

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ РАН»

На правах рукописи

Ефремова Екатерина Викторовна

**Исследование морфологии кометы
21P/ Giacobini-Zinner**

Специальность «01.03.01 Астрометрия и небесная механика»

Выпускная (диссертационная) работа

Научный руководитель:
член-корр. РАН
Шустов Борис Михайлович

Научный консультант:
канд. физ.-мат. наук
Верещагин Сергей
Викторович

Москва — 2020

Содержание

Благодарности.....	3
Введение.....	3
Глава 1. Сведения о комете 21P.....	7
1.1. Общие сведения	7
1.2. Основные характеристики орбиты и некоторые параметры кометы 21P8	
1.2.1. Блеск и положение в пространстве	9
1.2.2. Физические параметры.....	10
1.2.3. Химический состав	11
1.3. Метеорные потоки, потеря вещества.....	12
1.4. Наблюдения 1985 г. на обсерваториях мира.....	13
Глава 2. Наблюдения в Звенигородской обсерватории.....	15
2.1. Характеристики телескопа Цейсс-400	15
2.2. Сканирование и форматирование изображений.....	16
2.3. Составление каталога и размещение архива.....	19
2.4. Оценка астрометрической точности	21
Глава 3. Обработка данных наблюдений.....	24
3.1. Отбор изображений для изучения.....	24
3.2. Определение размеров кометы, профили интенсивностей, морфология в различных положениях на орбите.....	27
3.3. О направлении кометного хвоста.....	38
Глава 4. Космические угрозы, астероидно-кометная опасность.....	42
4.1. Кометы как источники космических угроз	42
4.2. Об уровне астероидно-кометной опасности	43
Заключение	47
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	50

Благодарности

Оценки параметров орбит выполнены по данным генератора эфемерид NASA HORIZONS (<https://ssd.jpl.nasa.gov>). В этом исследовании использовалась база данных SIMBAD, работающая в Страсбурге, Франция (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>), Wenger и др., 2000. Автор благодарит С.А. Нароенкова, В.В. Емельяненко за полезные советы, А.П. Карташову за помощь в размещении данных на сервере ИНАСАН, А. М. Соболева и И.А. Маслова за полезные советы и М.Д. Сизову за помощь в работе. Автор благодарна А.Б. Меньшикову за постоянную заботу и большие затраты времени на обработку изображений.

Введение

Актуальность темы. Комета 21P/Джакобини-Циннера (21P/Giacobini-Zinner) представляет особый интерес по ряду причин. Ее многократные появления в околоземном пространстве позволяют проследить изменения морфологии (деталей внешнего вида комы и хвоста) и физико-химических свойств на масштабе многих десятилетий. Также наблюдения кометы помогают сопоставить ее появления с наблюдениями метеорного потока Драконид, отождествляемого с кометой 21P и наблюдающегося в начале октября, и максимумов в его активности. Последнее может дать информацию о процессе разрушения кометы.

В работе Евдокимов 1972 по опубликованным наблюдениям появлений кометы, наблюдавшейся к тому времени на протяжении более полувека, было показано, что происходит замедление пространственного движения кометы 21P с соответствующими изменениями параметров орбиты. Связанные с этим эффекты представляют особый интерес, который определяет потребность изучения, в том числе морфологии кометы. Возможно, вблизи перигелия происходит выброс вещества из ядра. Реактивные силы, действующие при этом на ядро, оказывают влияние на орбиту кометы.

Хорошо известно, что большинство комет распадаются, т.к. при приближении к Солнцу летучие компоненты комет испаряются. Известны примеры распада комет, например, недавно появлявшаяся комета ATLAS. В результате распада комет образуются метеороидные потоки, причем некоторые их фрагментов могут быть достаточно крупными. Вспомним кометную гипотезу Тунгусского события. В составе метеорного потока Драконид встречались крупные фрагменты, вызвавшие болидные события в атмосфере Земли. Несмотря на то, что 21P не относится к потенциально опасным объектам, малое перигелийное расстояние ее орбиты ($q = 1,038$ а. е) и наличие крупных фрагментов в метеорном потоке Дракониды делает ее интересным объектом для исследований проблемы астероидно-кометной опасности.

Комета 21P многократно появлялась около Земли и появится в 2024 г. Возможность проведения наблюдений в будущем, наличие архива наблюдений 21P в Звенигородской обсерватории и наблюдения 2018 г. проведенные ИКИ РАН на телескопе Цейсс-1000 ЦКП ИНАСАН в Симеизе послужили стимулами для обращения к теме представленной работы.

Цель и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Включает описание данных и способы их получения, а также примененных методов исследования.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Участие в создании электронного архива, включающего изображения кометы 21P, полученные на астрографе Цейс-400 Звенигородской обсерватории.
2. Участие в работе по первичному анализу наблюдаемых изменений формы кометы на интервале времени конец июля – начало сентября 1985 г.
3. Первичный анализ кометной активности связанной с направлением хвоста кометы (в проекции на плоскость небесной сферы).
4. Программа для расчета статистики сближений астероидов с Землей на расстояния не более 1 млн. км.

Научная новизна:

1. С использованием уникальных данных наблюдений, полученных на астрографе Цейс-400 Звенигородской обсерватории получены оценки различных характеристик кометы 21P, включая детали пространственной и кинематической структуры.

2. Нашим коллективом разработана методика обработки архивных данных Звенигородской обсерватории, создан собственный архив изображений.

Научная и практическая значимость. Полученные в диссертации результаты важны для понимания эволюции короткопериодических комет и их связи с метеорными потоками, а также их значения в проблеме астероидно-кометной опасности.

Личный вклад автора. Автор принимала активное участие в постановке задачи, подборе и обработке наблюдательных данных, а также в обсуждении полученных материалов, их подготовке к публикации. Все результаты, выносимые на защиту, получены автором в результате совместных исследований с соавторами в статьях.

Достоверность представленных результатов. Достоверность представленных в диссертационной работе результатов обеспечивается применением проверенных методов и обоснованным выбором объектов исследования, данных наблюдений и методов обработки, прошедших апробацию. Сравнением с опубликованными результатами других авторов.

Апробация работы:

Результаты, представленные в диссертации, были представлены в качестве устных и стендовых докладов:

1. Всероссийская астрономическая конференция 2017 года (ВАК-2017), Ялта, 17-22 сентября 2017, устный доклад «О траекториях перелета к ресурсно-перспективным околоземным астероидам»

2. 46-я студенческой научная конференция «Физика Космоса», Коуровка, 30 января - 03 февраля 2017 г, устный доклад «О статистике астероидов, сближающихся с Землей»

3. XIV Конференции молодых ученых ИКИ РАН, 12-14 апреля 2017 г., Москва, устный доклад «О статистике декаметровых астероидов, сближающихся с Землей»

4. 47-я студенческая научная конференция «Физика Космоса», Коуровка, 29 января - 02 февраля 2018 г, устный доклад «О траекториях перелета к ресурсно-перспективным околоземным астероидам»

5. Расширенный научный семинар «Управление движением естественных тел», Таруса, 21 – 23 марта 2018, устный доклад «О траекториях перелета к астероидам, сближающимся с Землей»

6. Международная конференция «81-st Annual Meeting of The Meteoritical Society 2018», Москва, 22-27 июля 2018 г, устный доклад «ON THE STATISTICS OF NEAS»

7. 49-я студенческая научная конференция «Физика космоса», Коуровка, 27-31 января 2020 г., устный доклад «Обработка наблюдений кометы 21P Джакобини–Циннера, полученных на Звенигородской обсерватории ИНАСАН»

Публикации по теме диссертации, в том числе статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Shustov, V. M.; Naroenkov, S. A.; Efremova, E. V. On population of hazardous celestial bodies in the near-Earth space Solar System Research, Volume 51, Issue 1, pp.38-43 (2017)

2. Сизова М.Д., Ефремова Е.В., Верещагин С.В. Фотографические наблюдения кометы Джакобини-Циннера в Звенигородской обсерватории Научные Труды ИНАСАН, Том 4, стр. 337-342 (2019)

3. С. В. Верещагин, А.Б. Меньщиков, М.Д. Сизова, Б.М. Шустов, А.М. Соболев, Е. В. Ефремова, В.П. Осипенко Применение getsf к анализу изображений кометы 21P/Giacobini-Zinner, готовится к печати (WoS)

Глава 1. Сведения о комете 21P

1.1. Общие сведения

Хорошо известная короткопериодическая комета 21P / Giacobini-Zinner (символ «P» указывает на ее принадлежность к типу короткопериодических комет, орбитальный период меньше 200 лет) была открыта 20 декабря 1900 г. М. Джакобини в Ницце (Франция), и была "заново открыта" после прохождения двух периодов в 1913 году Э. Циннером в Бамберге (Германия). Альтернативные обозначения кометы Джакобини-Циннера: P/1900 Y1; 1900 III; 1900c; P/1913 U1; 1913 V; 1913e; 1926 VI; 1926e; 1933 III; 1933c; 1940 I; 1939I; 1946 V; 1946c; 1959 VIII; 1959b; 1966 I; 1965g; 1972 VI; 1972d; 1979 III; 1978h; 1985 XIII; 1984e; 1992 IX; 1991m.

Эта комета была целью для космического аппарата «International Cometary Explorer» («Эксплорер-59»), который прошел через газовый хвост кометы Джакобини — Циннера 11 сентября 1985 года. В классификации Fink (2009) 21P/G-Z благодаря особенностям своего химического состава (согласно A'Hearn et al. 1995 в 21P наблюдается пониженное содержание C₂ и C₃ относительно CN и OH) дала основание для появления нового прототипа «G-Z» включающего ~ 6% комет. Возвращаясь каждые 6.623 лет, 21P приносит новые возможности для поиска деталей и процессов, происходящих в комете на пути ее движения.

Наблюдения 21P в 1985 г. проводились в Звенигородской обсерватории Института астрономии РАН (ИНАСАН) на астрографе Цейс-400. У нас в архиве она обозначена как comet 1984e. Буква ставится по порядку открытия кометы от начала года. В 2018 г. также она наблюдалась ИКИ РАН на телескопе Цейсс-1000 ЦКП ИНАСАН в Симеизе.

Мы вновь обратились к этим материалам, т.к. считаем, что применение новых методов к старым данным помогает выявить ранее не замеченные детали. Было решено применить новую методику обработки *getsf*

(Men'shchikov 2021, in prep.) к обработке изображений комет, накопленных в оцифрованном виде в ИНАСАН.

В ИНАСАН сохранению и оцифровке накопленных фотоизображений комет уделяется большое внимание (Dluzhnevskaya et al 2012, Sizova et al 2019). Уже закончена оцифровка изображений некоторых комет, данные архивированы и доступны научному сообществу. Интернет-адрес архива URL = http://www.inasan.ru/divisions/zvenigorod/scan/comet_giacobini_zinner/.

Отметим, что это вполне в духе тенденций развития общемировой технологии «виртуальной обсерватории» (Dluzhnevskaya and Malkov 2018) в работе с астрономическими данными. Практически все виртуальные обсерватории обращаются к архивам фотопластинок, хранящихся на различных обсерваториях.

Еще раз отметим причину выбора в качестве объекта исследования именно 21P/Giacobini-Zinner. Особый интерес эта комета представляет поскольку, несмотря на многократные прохождения около Солнца, она продолжает быть активной. С другой стороны, в нашем архиве эта комета представлена в достаточном объеме, позволяющем выбрать подходящее изображение.

1.2. Основные характеристики орбиты и некоторые параметры кометы 21P

Основные характеристики кометы 21P можно найти на сайте URL=<https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=21P;cad=1>. Комета принадлежит семейству комет Юпитера. При каждом обороте комета теряет от 1 до 3.5% своей массы. Не исключено, что при сближении с Землей в 1702-м году кометы 21P и Вольфа I произошли из одной разделившейся кометы (Евдокимов 1972).

Добавим, что последний раз комета проходила перигелий 12 сентября 2018 года. Минимальное сближение с Землей было 18 сентября и составило около 58 миллионов километров.

1.2.1. Блеск и положение в пространстве

Параметры орбиты кометы следующие (URL = <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=21P> Orbital Elements at Epoch 2458062.5 (2017-Nov-05.0) эксцентриситет орбиты равен 0.710, большая полуось 3.500 а. е., перигелийное расстояние 1,01 а. е., афелийное 5,987 а. е. (комета семейства Юпитера), период обращения 6,55 г, наклонение орбиты 31,8°. В 1985 г было ее одиннадцатое наблюдаемое появление около Земли. В рассматриваемое появление комета ближе всего подходила к Земле 3 - 5 сентября (Таблица 1), ее расстояние от Земли в это время составляло приблизительно 73,9 млн. км. Этот момент заключен в пределы нашего интервала наблюдений (с 14 августа по 18 октября). Важная дата прохождения перигелия – 5 сентября.

Таблица 1 Расстояние 21P от Земли и Солнца

Расстояние	14 августа	3 сентября	5 сентября	1 октября	18 октября
Земля	0,53 АЕ	0,47 АЕ	0,47 АЕ	0,54 АЕ	0,64 АЕ
Солнце	1,07 АЕ	1,03 АЕ	1,03 АЕ	1,19 АЕ	1,19 АЕ

На Рис.1 показан график изменения блеска T_{mag} кометы. T_{mag} здесь – интегральная звездная величина кометы (кометного хвоста и комы). Эта величина дается с точностью до постоянной и хорошо показывает лишь ход блеска со временем. Для реальной оценки можно использовать звездную величину в перигелии равную 7.1^m. На Рис.1 видим, что блеск кометы довольно сильно изменялся, достигнув максимума яркости в момент прохождения перигелия. Как видно из Таблицы 1, момент прохождения перигелия в это появление приблизительно совпадает с момент наибольшего сближения с Землей.

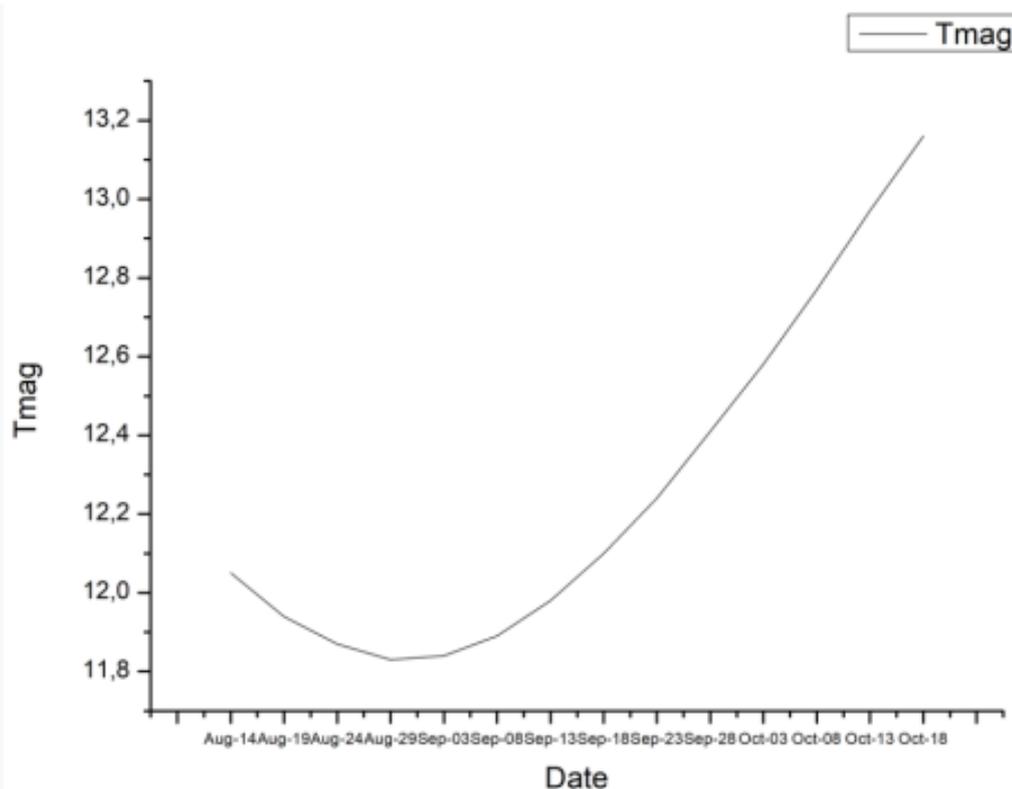


Рис.1. Блеск кометы в период с 14.08 по 18.10.1985 г. Комета в это появление была ближе всего к Земле 03.09.1985 г (построен по данным сайта JPL Small-Body Database Browser URL = <https://ssd.jpl.nasa.gov/>).

1.2.2. Физические параметры

Диаметр ядра кометы составляет около 2 км (Blaauw et al. 2014, также URL= <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=21P;cad=1>). На расстоянии приблизительно 1 а.е. от Солнца кометная кома имеет диаметр примерно 60 000 км. Плазменный хвост может достигать длины 500 000 км или больше.

Данные о комете Джакобини-Циннера получали не только наземными средствами. Космический аппарат «International Cometary Explorer» («Эксплорер-59») прошёл через ее газовый хвост 11 сентября 1985 года (von Roseninge et al. 1986). Случайно это совпадает по датам с периодом наблюдений кометы на Астрографе Звенигородской обсерватории ИНАСАН). Этим КА было получено множество параметров, включая размеры, химический состав и расположение в пространстве плазменного хвоста. Комета Giacobini-Zinner, приблизившись к перигелию 3 - 5 сентября 1985 г. (Таблица 1), стала более активной, чем ожидалось, и стало очевидно,

что орбита кометы имеет сдвиг (Rosenvinge et al. 1986), это потребовало соответствующих коррекций КА. Первоначальный план ICE состоял в том, чтобы пересечь ионный (плазменный) хвост кометы на расстоянии 10 000 км от ядра, новая, несколько изменившаяся орбита кометы уменьшила это расстояние до 7800 км.

При встрече с ICE скорость кометы составила 38,3 км/с, скорость солнечного ветра варьировалась между 400 и 500 км/с, приводя к абберационному углу в плоскости орбиты кометы между $5,5^\circ$ и $4,4^\circ$ соответственно (кометный хвост отставал по радиальной линии от Солнца к ядру кометы на эту величину) (Rosenvinge et al. (1986)).

1.2.3. Химический состав

К концу августа 1985 г. наблюдения КА ICE показали, что комета теряет более 10^{29} молекул воды в секунду. В эксперименте по ионному составу получены прямые измерения состава кометы. Обнаружены ионы водной группы (HO^+ , H_2O^+ , H_3O^+), они являются доминирующими компонентами. Обнаружено присутствие молекул CO^+ и HCO^+ . Эти измерения подтверждают, что основная летучая составляющая соответствует модели «ледяного конгломерата» Уиппла (Whipple 1950) с ядром, состоящим из водяного льда (Rosenvinge et al. 1986).

Во время появления в 1985 году также было обнаружено, что комета 21P / Giacobini-Zinner имеет очень необычный состав, причем C_2 и C_3 меньше примерно в шесть раз по сравнению с OH или CN (Schleicher et al. 1987). Это делает 21P прототипом класса комет с обедненной углеродной цепью (A'Hearn et al. 1995).

В данный момент активно ведутся поиски редких молекул, позволяющих пролить свет на образование 21P и последующие процессы на этой интересной комете. В работе (Roth, Nathan; et al. 2018) упоминаются запланированные наблюдения, которые будут включать в себя анализ набора родительских соединений с акцентом на гиперлетучие CO и CH_4 .

Относительное содержание этих соединений может зависеть как от начальных условий появления, так и от постформационной эволюции. Интересно, что результаты измерений поляризации рассеянного света на пылинках в коме кометы допускают наличие органической материи (Kiselev et al. 1998).

Важные данные можно получить из исследований пылевого хвоста. Его поиски проводились в том числе во время появления кометы в 1985 году (отметим, что именно в период наших наблюдений).

Возможно, что наличие пыли обусловлено ледяным составом ядра кометы с вкраплениями пыли. От ядра могут отрываться крупные и не достигающие земной поверхности ледяные фрагменты. Предположительно, подобный процесс произошел в 2012 г., когда в метеорном потоке Драконида был обнаружен массивный фрагмент, вес которого мог составлять 13 кг (Madiedo et al, 2012).

1.3. Метеорные потоки, потеря вещества

Как уже отмечалось, комета и метеорный поток Драконида связаны друг с другом. Ввиду своей короткопериодичности, комета 21P регулярно претерпевает сильный разогрев, в результате чего процесс ее распада значительно пополняет население кометных частиц на ее орбите. Среди этих частиц могут встречаться фрагменты значительных размеров, которые при попадании в атмосферу Земли вызывают болидные события. На примере данных, полученных КА Розетта при исследовании кометы Чурюмова-Герасименко, можно сделать вывод о неоднородности внутреннего строения комет. При распаде кометного ядра в результате нагрева от ядра могут отделяться фрагменты различных размеров. Наибольшие из них могут служить источником кометной опасности.

В ИНАСАН исследования 21P проводились как в 1985, так и в 2018 гг. По наблюдениям 2018 г. проведенным ИКИ РАН на телескопе Цейсс-1000 ЦКП ИНАСАН в Симеизе, отмечается уменьшение поляризации на

расстояниях, превышающих 10 тыс. км. Этот эффект может быть связан с распадом ядра и превращением крупных смерзшихся частиц в мелкую пыль (Маслов 2020). Уменьшение поляризации может быть связано и с разной скоростью отлета органических и неорганических частиц (Е. Зубко (частное сообщение)). Однако по ИК-наблюдениям кометы C/2004 Q2 (Мачхольца) однозначно удалось определить, что пыль отделяется ото льда (и нагревается) примерно на таких же расстояниях, как и 21P, а для этого фрагменты должны быть достаточно большими (И. Маслов (частное сообщение)).

В 1946 и 1959 годах у кометы наблюдались вспышки на 0,5–1,0 зв. вел. Отмечено, что вблизи перигелия происходил выброс вещества из ядра. Скорость выброса частиц составляла 10-20 м/сек.

Отмечается наличие огромного числа метеоров в 1933-м и 1946-м годах: до 10 тыс. метеоров в час (Jenniskens 2006), тогда как в 2011-м г., наблюдался, наоборот, локальный минимум частоты метеоров (Vaubailon et al. 2011). В работе Trigo-Rodríguez, et al. 2013 показано, что в октябре 2011 г. Дракониды продемонстрировали также несколько пиков активности, зенитное часовое число оказалось равным 400 метеоров в час. Это позволило сделать оценку потери массы кометой (выпавшей на земную поверхность) равной 950 ± 150 кг.

1.4. Наблюдения 1985 г. на обсерваториях мира

Наблюдения этой крайне примечательной кометы ведутся практически на всех обсерваториях мира. Отметим некоторые примечательные для нашего исследования работы.

1) Работа по фотометрии J. Pittichov'a et al. (2008).

В работе сообщается о наземных оптических и космических инфракрасных наблюдениях кометы 21P / Джакобини-Зиннера. Полученные при наблюдениях данные показывают, что комета проявляет активность но без очень интенсивных выбросов вещества. Измерения пылеобразования в

сочетании с отсутствием видимого расширенного выброса комы предполагают, что активность кометы прекратилась на расстоянии $r \sim 3.8$ а.е. от Солнца после прохождения перигелия. Значительных изменений кривой блеска 21P не наблюдалось. На 24-микронном изображении, полученном на космической обсерватории «Спитцер» Pittichová et al. 2008 видны сильная пылевая кома и хвост, но нет свидетельств значительного пылевого следа, хотя эта комета является родительским телом метеорного потока Драконида.

2) Работа Kiselev et al 1998.

Обсуждается необычное поведение поляризации рассеянного света на пылевых частицах кометы 21P / Джакобини-Циннера. В частности, одна из возможных интерпретаций связана с высоким содержанием органического вещества в его пыли. Метеоры Драконида, связанные с этой кометой, подтверждают наличие органического вещества в крупных пылинках кометы 21P / Джакобини-Циннер, обедненных частицами углерода в газовой фазе.

Глава 2. Наблюдения в Звенигородской обсерватории

2.1. Характеристики телескопа Цейсс-400

В 1985 г наблюдения проводились на телескопе Цейсс-400 Звенигородской обсерватории. Астрограф Цейсс-400/2000 (Рис. 2) имеет объектив диаметром 40 см, фокусное расстояние 203 см и масштаб = 103"/мм. Фотографирование производилось на фотографических пластинках размером от 9х12 см до 30х30 см ($8^{\circ}.5 \times 8^{\circ}.5$). Использовались фотопластинки и меньших размеров (15×15 см и 9×12 см) с соответственно меньшим охватом неба. Для определения астрометрических координат делались экспозиции длительностью 2–6 мин. Для фотометрии и изучения физических свойств – до 1 ч.



Рис. 2. Астрограф Цейс-400 Звенигородской обсерватории. Диаметр объектива = 40 см. Фокусное расстояние = 203 см.

Все снимки делались в режиме гидирования кометы, поэтому изображения звёзд не являются точечными. Длины звёздных треков

варьируются в зависимости от длительности экспозиции и угловой скорости движения кометы по небесной сфере. К сожалению, пластинки с целью построения необходимого в точной фотометрии плоского поля не снимались. Это препятствует качественному анализу изображений.

Использовались астрономические фотопластинки с эмульсиями ZU21 (ORWO, производство ГДР) чувствительностью 400 ед. ISO и HT-1AC, сделанные по заказу Астрономического общества (ТОО “ДАР”, Переяславль-Залесский), с чувствительностью менее 100 ед. ISO. Зерна галогенидов серебра в фотоэмульсии до экспозиции имеют размер в пределах 0.03 – 2 мкм (Журба 1987). Конечные размеры зерен составляют уже 15 – 20 мкм (Ризванов 1993) и из них построены мельчайшие детали изображений на фотопластинках.

2.2. Сканирование и форматирование изображений

Сканирование производилось на профессиональном сканере EPSON Expression 1640 XL с разрешением 1200 dpi (Рис. 3). Размер пикселя 21.2 мкм приблизительно равен размеру зерен проявленной фотопластинки. Данной моделью сканера оснащены с целью стандартизации и однородности получаемых изображений многие обсерватории. Например, эта модель широко применялась для оцифровки фотографических наблюдений в обсерваториях Италии и Ватикана (Barbieri et al 2003, Nesci et al. 2003). Аналогичные сканеры использовались в обсерватории Катании и на Бюраканской обсерватории. Это дало возможность использовать опубликованные результаты исследования качества сканов. Согласно исследованиям, проведенным различными авторами (Vocsa, Tsvetkov 2008), ошибки в измерениях координат по этим сканам не превосходят 1.0".



Рис. 3. Сканер Epson Expression 1640XL. Оптическое разрешение 1600 dpi. Максимальное 6400 dpi. 1 пиксель = 16 микрон. Интерполированное разрешение 12880×12880. Оптическая плотность 3.6 D.

Поскольку мы осуществляем переход от фотографического изображения к изображению в электронной форме, возникает вопрос об искажениях, вносимых в процессе сканирования. Также правомерен вопрос о том, можно ли отделить искажения в положениях звезд, вносимых сканером от дисторсии на пластинке? Искажения, вносимые сканером, можно учесть путем специального исследования сканера. Для этого сканируют специальную калибровочную сетку. Это дорогостоящий инструмент, применяемый в метрологических лабораториях. Ввиду отсутствия такой возможности мы собственное исследование сканера не проводили, опираясь на оценки точности сканеров такого типа на других обсерваториях, Сизова и др. 2020.

На Рис. 4 для примера показана пластинка 1228 (параметры см. в Таблице 2). В колонках Таблицы 2 содержатся (1) - номер пластинки, (2) - наблюдатель, (3) – длительность экспозиции, мин., (4) - начало экспозиции по Всемирному времени UT, (5) – дата, (6 и 7) - экваториальные координаты оптического центра пластинки. Мы использовали это изображение для

оценки точности экваториальных координат, которые можно получить для звезд. Изображения звезд не точечные, они заметно растянуты гидированием телескопа за кометой.

Таблица 2. Параметры пластинки 1228.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1228	Rusin	30	21:54:00	26.08.1985	04 44 52	+44 05 37

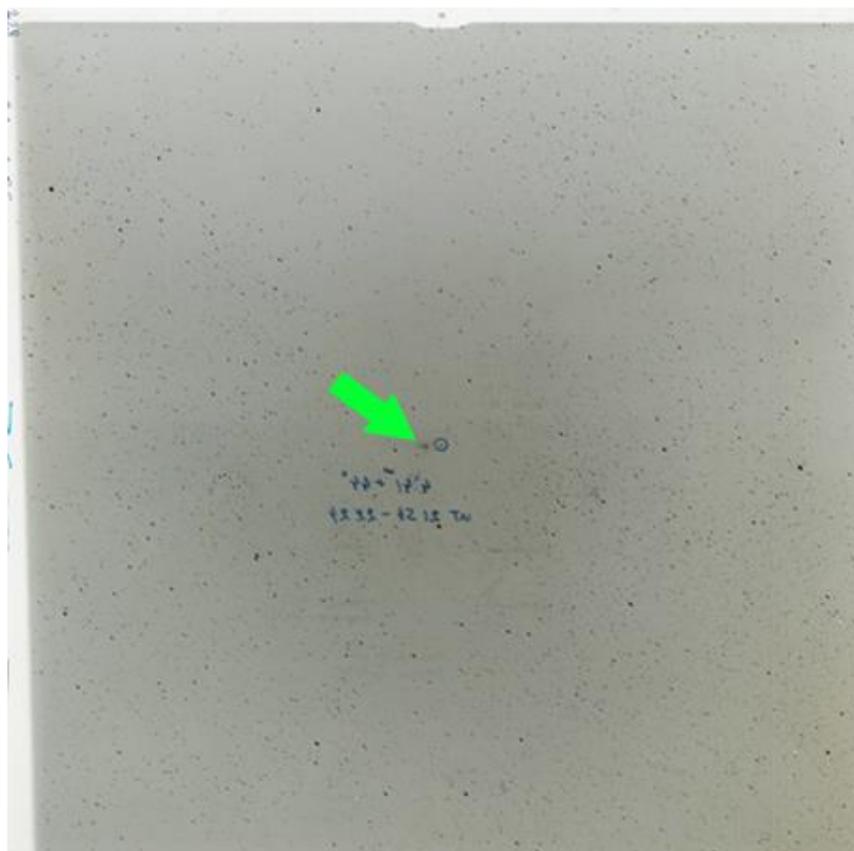


Рис. 4. Оригинальная копия изображения 1228. Туманное пятнышко в центре – изображение кометы Джакобини-Циннера (отмечено зеленой стрелкой). Точкой в кружке отмечен оптический центр пластинки, координаты центра подписаны.

Оценка геометрических искажений, связанных с влиянием оптики (дисторсией), произведена по следующей схеме. С помощью программы http://nova.astrometry.net/user_images/3186724#annotated мы выполнили перевод в fits wcs.

В результате получили новое изображение в формате fits. Далее использовалась программа Analyse – PinPoint Astrometry из Maxim DL Pro 5.

На основании данных звезд из каталога USNO-A2.0 была проведена астрометрическая редукция средствами Maxim DL Pro 5. Определена ошибка определения положения пикселей (5.9 arcsec; порядок полинома 4 – эта величина задает степень полинома, которым аппроксимируются зависимости между прямоугольными координатами звезд на пластинке).

2.3. Составление каталога и размещение архива

За период с 14.08.1985 по 18.10.1985 были получены пластинки с изображением кометы 21P Джакобини-Циннера с разным временем экспозиции. Работа велась в течение 26 ночей.

Отобран архив фотопластинок, который включает 41 изображение, пригодное для астрометрии, фотометрии и астрофизических исследований. Отобраны однородные по типу фотоэмульсии и времени экспозиции негативы, которые ранее были отсканированы и позволяют выполнить стандартную фотометрическую обработку.

В Таблице 3 приведен каталог полученных пластинок. В 2018-2019 гг пластинки были просканированы, а полученные электронные изображения (сканы) каталогизированы. Архив размещен на сайте ИНАСАН (URL=http://www.inasan.ru/divisions/zvenigorod/scan/comet_giacobini_zinner/). Адрес сайта для просмотра архива сканов фотопластинок Звенигородского астрографа в БД (WFPDB) в Центре данных (София, Болгария).

В Таблице 3 приведены параметры отобранных для сканирования фотопластинок. В колонках Таблицы 2 содержатся (1) - номер пластинки, (2) - наблюдатель (О – Осипенко, R – Русин, Y Юревич), (3) – длительность экспозиции (через запятую перечислены длительности экспозиций), (4) – число экспозиций, (5) - начало экспозиции по Всемирному времени UT, (6) – дата, (7 и 8) - экваториальные координаты оптического центра пластинки.

Таблица 3. Каталог сканов пластинок Звенигородского астрографа с изображением кометы.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1159	O	21,5	2	23:45:00	14.08.1985	03 16 16	+55 41 08
1160	R	3		20:26:30	17.07.1985	23 29 18	+57 20 31
1161	R	3		20:36:00	17.07.1985	23 29 18	+57 20 31
1162	R	4		20:39:00	17.07.1985	23 29 18	+57 20 31
1164	Y	6		20:54:00	19.07.1985	23 42 24	+57 52 38
1165	Y	6		22:29:00	19.07.1985	23 42 24	+57 52 38
1166	R	3		20:25:00	21.07.1985	23 55 06	+58 21 41
1167	R	30		20:39:00	21.07.1985	23 55 06	+58 21 41
1169	O	1		22:11:00	30.07.1985	01 06 05	+60 16 04
1170	O	2,3	2	22:23:00	30.07.1985	01 06 05	+60 16 04
1171	O	10		22:34:00	30.07.1985	01 06 05	+60 16 04
1173	O	4	2	20:57:00	02.08.1985	01 32 17	+60 15 27
1174	O	20		21:14:00	02.08.1985	01 32 17	+60 15 27
1175	O	20	2	22:08:00	03.08.1985	01 40 21	+60 15 13
1182	O	1,8	2	22:35:00	04.08.1985	01 49 24	+59 44 56
1183	R	2		20:40:00	08.08.1985	02 23 42	+58 49 40
1184	R	2		20:52:00	08.08.1985	02 23 42	+58 49 40
1185	R	30		21:10:00	08.08.1985	02 23 42	+58 49 40
1190	O	3,5	2	20:45:58	09.08.1985	02 34 39	+58 13 12
1193	O	3,5	2	21:13:00	10.08.1985	02 43 42	+58 12 47
1196	R	1		21:42:00	11.08.1985	02 50 30	+57 30 28
1197	R	30		21:54:00	11.08.1985	02 50 30	+57 30 28
1201	O	3,5	2	20:07:00	12.08.1985	03 03 46	+57 11 48
1205	R	1		23:06:00	13.08.1985	03 07 51	+56 23 35
1206	R	30		23:14:00	13.08.1985	03 07 51	+56 23 35
1210	R	1		22:23:00	15.08.1985	03 26 46	+54 53 33
1211	R	30		22:33:00	15.08.1985	03 26 46	+54 53 33
1215	R	1		22:23:00	18.08.1985	03 50 45	+52 09 09
1216	R	1		21:00:00	19.08.1985	03 56 27	+51 45 48
1217	R	30		21:27:00	19.08.1985	03 56 27	+51 45 48
1227	R	2		21:40:00	26.08.1985	04 44 52	+44 05 37
1228	R	30		21:54:00	26.08.1985	04 44 52	+44 05 37
1229	O	2,6	2	23:36:00	28.08.1985	04 56 31	+42 04 48
1230	O	4,3	3	21:51:03	01.09.1985	05 17 58	+36 33 17
1234	O	8,2	4	21:44:02	11.09.1985	06 01 02	+23 00 08
1235	O	10,5	4	1:24:00	14.09.1985	06 07 58	+19 59 38
1236	O	3,5	2	1:41:00	14.09.1985	06 07 58	+19 59 38
1237	O	8,5	6	0:48:00	15.09.1985	06 10 55	+18 17 25
1238	O	35	2	0:27:00	16.09.1985	06 17 57	+19 34 54
1240	O	2		23:39:23	19.09.1985	06 26 47	+11 28 15
1246	O	7		2:46:00	18.10.1985	07 19 13	-17 29 30

2.4. Оценка астрометрической точности

По сканам со временем экспозиции, не превышающим 2-3 минут (лишь в одном случае 6 минут, изображения звезд не растянуты гидированием), определены положения кометы в экваториальной системе координат. Ограничение в экспозиции обуславливается изображениями звезд, близкими к точечным, что дает возможность использовать астрометрический инструментарий пакета Maxim. В результате анализа получены данные о положении кометы на несколько дат в период наблюдений. Полученные значения приведены в Таблице 4. Для сравнения приведены значения положения кометы, взятые из двух других источников: с сайта Horizon (<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons>) и IAU Minor Planet Center

(https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=21p).

Также проведен анализ уже сканированных изображений фотопластинок посредством программного пакета Maxim DL Pro 5.

Результаты приведены в Таблице 4, где приводятся координаты, а также их невязки, определенные по сканам с указанными номерами (N). В колонках Таблицы 4 приведены: Date – дата получения фотопластинки, N – номер фотопластинки в нашем архиве, Exp – длительность экспозиции, экваториальные координаты альфа и дельта, определенные по сканам с помощью программного комплекса Maxim DL 5 Pro - Ra_Max, Dec_Max, Ra_Hor, Dec_Hor – JPL, Ra_MP, Dec_MP – полученные на сайтах JPL и MPC соответственно.

Таблица 4. Сравнение и невязки экваториальных координат кометы, полученных нами (наблюдаемые O) и вычисленных (C) в МПЦ и JPL.

Date	N	Exp, min	Ra_Max	Dec_Max	Ra_Hor	Dec_Hor	Ra_MP	Dec_MP
08.08.1985	1184	2	02 22 44.95	58 34 03.0	02 10 35.32	+60 07 54.4	02 19 42.6	+58 41 16
30.07.1985	1170	2,3	01 03 33.29	60 01 10.7	00 49 44.47	+61 03 03.5	01 00 28.1	+60 00 19
17.07.1985	1160	3	23 28 30.87	57 08 15.5	23 16 36.82	+57 35 03.4	23 26 28.8	+57 00 43
19.07.1985	1165	6	23 41 27.23	57 52 09.5	23 28 59.22	58 23 10.2	23 39 03.8	+57 44 49

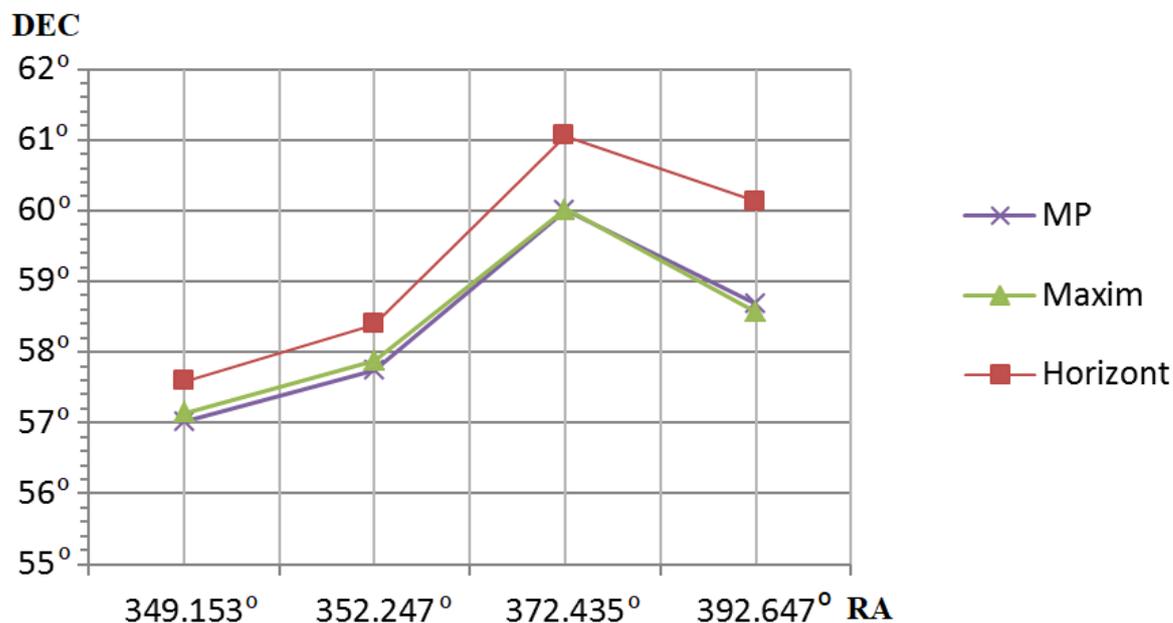


Рис. 5. Сравнение значений экваториальных координат кометы 21P, полученных из трех источников: Maxim DL, Minor Planet Center, JPL (Таблица 4).

На Рис. 5 приведены полученные значения координат из Таблицы 4. Таким образом, мы полагаем, что астрометрическая точность оцифрованных нами изображений не хуже, по крайней мере, $1''.6$. Такая точность нас вполне устраивает, т.к. мы обсуждаем, в основном, структурные детали изображения кометы и некоторые физические параметры.

Основные результаты Главы 2 опубликованы автором в работе:

Сизова М.Д., Ефремова Е.В., Верещагин С.В. Фотографические наблюдения кометы Джакобини-Циннера в Звенигородской обсерватории, Научные Труды ИНАСАН, Том 4, стр. 337-342 (2019).

Результаты этой главы, выносимые на защиту:

Участие в создании электронного архива, включающего изображения кометы 21P, полученные на астрографе Цейс-400 Звенигородской обсерватории.

Глава 3. Обработка изображений кометы

3.1. Отбор изображений для изучения

Для анализа изображений кометы использовалась выборка из 7 пластинок со временем экспозиции 30 минут (1167, 1185, 1197, 1206, 1211, 1217, 1228). В Таблице 5 приведены увеличенные фрагменты некоторых из перечисленных изображений кометы.

Таблица 5. Изображения (фрагменты сканов) кометы 21P/Джакобини-Циннера на фотопластинках с 30 минутной экспозицией.

	
Пластинка 1167, 21.07.1985	Пластинка 1185, 08.08.1985
	
Пластинка 1197, 11.08.1985	Пластинка 1206, 13.08.1985

Первичный осмотр изображений в Таблице 5 показывает, что кома кометы изменяется со временем. Качество изображений на отобранных кадрах вполне достаточное для применения программ обработки изображений. Поскольку орбита кометы достаточно хорошо определена, в дальнейшем можно дать приблизительную оценку размеров комы и других

деталей изображения кометы. Обработка ряда изображений позволяет проследить их изменение со временем, а также сравнить с их характеристиками, полученными для данных расстояний в другие появления кометы. В таблице 6 представлены данные о расстояниях кометы 21P от Земли и от Солнца для двух сканов 1166 и 1228, которые мы выбрали для детального изучения. Эти изображения были получены в разные даты в период наблюдений, до прохождения кометой перигелия 5 сентября 1985 г.

Таблица 6. Расстояния 21P от Земли ($D_{\text{Земли}}$) и от Солнца ($D_{\text{Солнце}}$).

Пластинка	Дата	Время	$D_{\text{Солнце}}$, км	$D_{\text{Земля}}$, км
1166	21.07.1985	20:25:00	1.788×10^8	1.032×10^8
1228	26.08.1985	21:54:00	1.546×10^8	7.548×10^7

На Рис. 6 показана зависимость расстояния от Земли на разные даты, по данным Horizons.

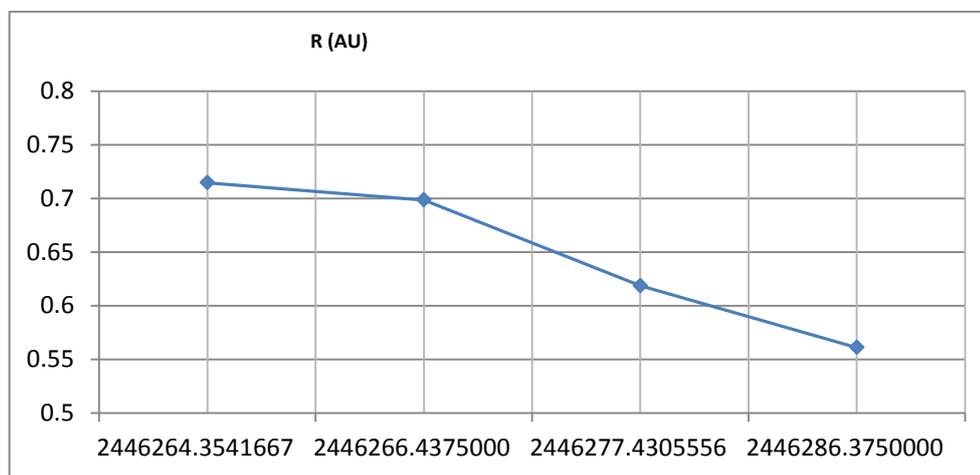


Рис. 6. Расстояние (по оси абсцисс) кометы 21P от Земли (в АЕ) в заданные юлианские даты (ось ординат). Пересчет на григорианскую дату последовательно 17.07.1985 20.07.1985 31.07.1985 09.08.1985.

Проведем первичную (на глаз) оценку размеров кометы на пластинке **1228**, т.е. на дату 26.08.1985 (Рис.7). Изображение вытянуто. Мы считаем,

что это происходит вследствие суперпозиции изображений сферической комы и вытянутого хвоста. Увеличенное изображение кометы на Рис.7 позволяет вычислить ее пространственные размеры. Горизонтальный и вертикальный размеры комы составляют приблизительно 35 x 25 пикс. Размер пикселя исходя из разрешения сканера (1200 dpi) составляет 0.0212 мм. Таким образом, линейный размер комы равен 0.74 x 0.53 мм, что при учете масштаба телескопа 103 “/мм, составило 76.2” x 54.6”. Расстояние до Земли на эту дату равно 75 480 тыс. км (приблизительно 0.5 а.е., Таблица 6).

Пространственные размеры в таком случае равны 27.4 x 19.5 тыс. км.

По данным КА «International Cometary Explorer» (ICE), который прошел через ее плазменно-пылевой хвост 11 сентября 1985 г. (Rosenvinge et al. 1986), диаметр комы на расстоянии около 1 а.е. от Солнца составляет приблизительно 60000 км. Как видим, наша оценка, сделанная по изображению кометы в оптическом диапазоне до перигелия составила приблизительно в два-три раза меньшую величину.

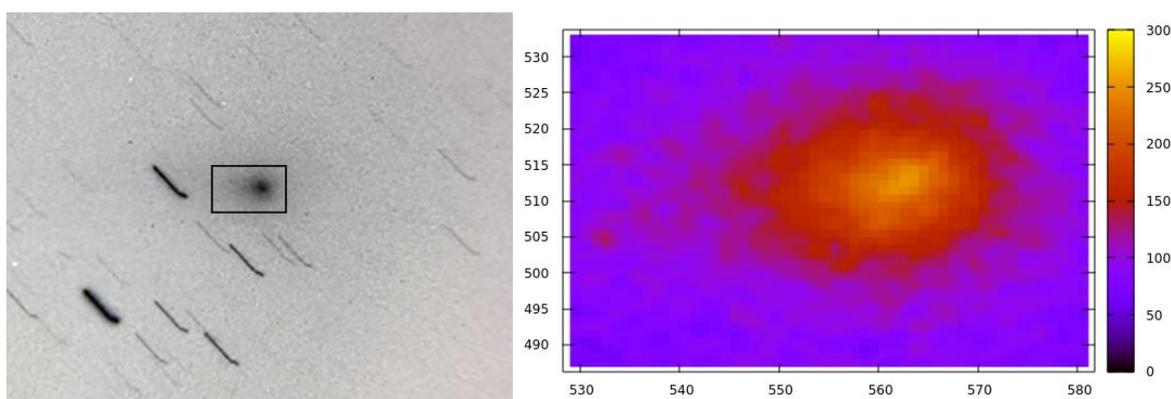


Рис.7. Фрагмент скана 1228 (слева), размером по горизонтали приблизительно 0.5° . Справа – распределение плотности почернения для изображения кометы, выделенный фрагмент на изображении слева показан рамкой.

3.2. Определение размеров кометы, профили интенсивностей, морфология в различных положениях на орбите

Получив сканы фотоизображений, мы получили возможность использовать практически весь арсенал современных программ обработки изображений. Мы выбрали эффективный, имеющийся в нашем распоряжении метод.

Для анализа данных на современном уровне нами использован новый метод разделения структурных компонент *getsf* (Men'shchikov 2021, in prep.), являющийся развитием методов *getsources* (Men'shchikov et al. 2012), *getfilaments* (Men'shchikov 2013) и *getimages* (Men'shchikov 2017), который позволяет проанализировать и разделить смешанные компоненты: источники, волокнистые структуры и фон (и/или шум). Программа *getsf* предназначена для отделения сложного фона от вытянутых структур и от компактных источников. (В качестве примера для понимания метода см. рисунки 6 и 7 в статье Men'shchikov 2017). Метод *getsf* дает множество изображений, выделяя, например, источники, фон, структуры. При этом изображения могут быть визуализированы цветом и наряду с ними записываются файлы изображений в формате fits.

Мы выбрали совершенно разные по экспозиции изображения и применили к ним *getsf* для определения размеров комы на половине интенсивности. Нами построены распределения плотности для выбранных изображений, которые мы аппроксимировали 2D распределением Гаусса. Эта простейшая модель, показала хорошее согласие с наблюдаемым распределением интенсивности и была использована нами для моделирования изображения комы.

Исходные изображения приведены на Рис.8 и на Рис.11. Для подготовки начального изображения для обработки *getsf* использован программный комплекс URL = nova.astrometry.net. Естественно, что фотометрическая обработка проводилась только для центральной части скана, где расположена комета. Размер кометы составляет приблизительно не

более 2' и нет необходимости подвергать обработке весь скан фотопластинки. При отождествлении файлы получены в формате fits WCS.

На Рис.8 приведено исходное изображение 1166, которое после некоторой подготовки было обработано методом *getsf*. Взята, как уже сказано, центральная часть скана размером приблизительно 1.5 градуса. На Рис.8 видим, что изображение кометы имеет нерегулярную форму. Видна засветка по направлению к соседним звездам. Изображения звезд небольшой яркости имеют симметричную форму.

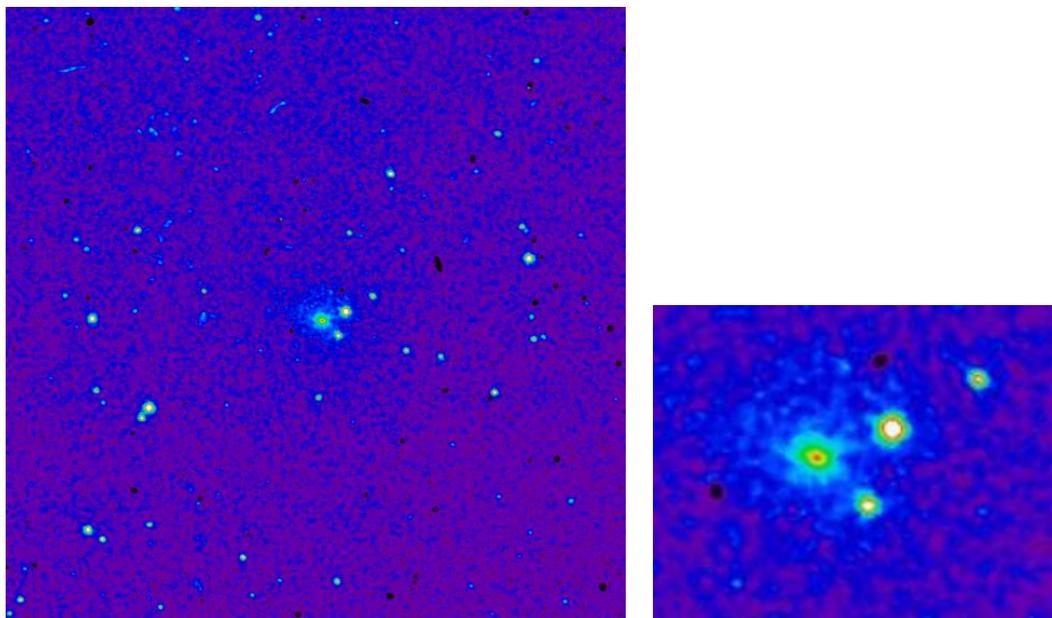


Рис. 8. Исходное изображение 1166 (время экспозиции 3 минуты). Для масштаба – размер кометы составляет приблизительно 1 arcmin.

Ниже последовательно показаны различные детали и составляющие изображения, полученные в результате обработки скана пластинки 1166 (экспозиция 3 минуты).

Приводим параметры отождествления программой NovaAstrometry. Итак, мы использовали исходное изображение: `new-image_1166.fits` с параметрами:

Center (RA, hms):23h 55m 18.579s (Dec, dms): +58° 16' 39.169"
Size:1.97 x 1.8 deg
Radius:1.333 deg

Pixel scale: 1.63 arcsec/pixel
Orientation: Up is 180 degrees E of N
Submitted Kon 2020-02-13T11:19:15Z as "plate1166001.tif" (Submission 3238696).

Далее последовательно показаны результаты обработки.

На Рис.9. для пластинки 1166 показан компонент компактных источников с на половине интенсивности.

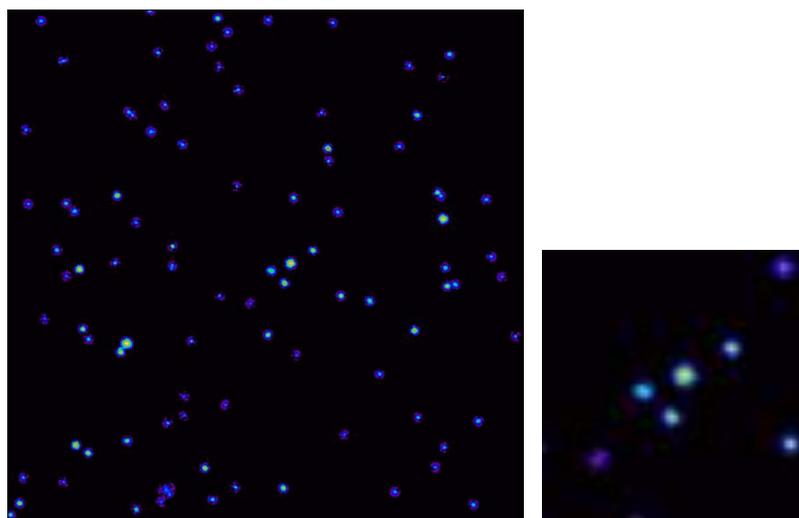


Рис. 9. Компактные источники, отделенные от всего остального. Справа приведено изображение центральной части, отличается масштабом, чтобы показать структуру изображения. Выделены все круглые структуры, с сигналом выше, чем 1 сигма.

На рис. 10 наоборот, удалены все точечные объекты и выделены протяженные, включая изображение кометы.

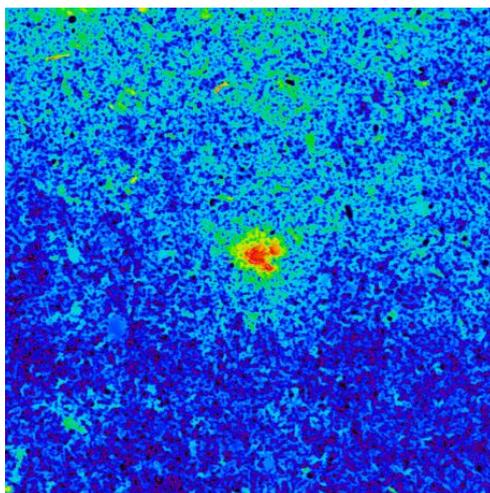


Рис. 10. Компонента "протяженных структур". Размер кадра тот же, что на Рис.9, левая панель. Выделены все вытянутые структуры, с сигналом выше, чем 1 сигма.

Как видно из рис. 10, в изображении поля нет ярких сложных протяженных структур. Видны только шум, несколько наиболее ярких звезд (изображение которых занимает достаточно большое количество пикселей, чтобы они классифицировались в getsf как протяженные) и собственно комета.

Прделаем вышеизложенное последовательно для скана **1228** (получена 26.08.1985 экспозиция 30 мин.). Перигелий в это появление комета прошла 5.09.1985 г., т.е. до перигелия осталось десять суток, а хвост не наблюдается. Результаты прогона new-image_1228006.fits через getsf:

На Рис.11 представлено исходное изображение с выделенными цветом уровнями интенсивности засветки.

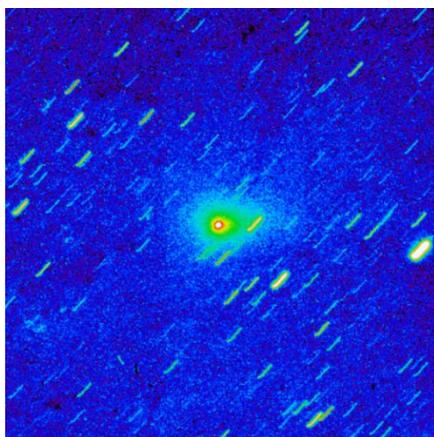


Рис. 11. Исходное изображение пластинки 1228 (30 мин.).

На Рис.12 показан скан (фрейм) 1228 (центральная часть с изображением кометы и окружающих звезд), которая была получена с гораздо большей экспозицией (30 мин относительно 3 мин для 1166), поэтому деталей (звезд) на фотографии мы видим намного больше. Для изучения яркости комы мешает пересвет в центральной части. Хорошо заметны треки звезд, получающиеся при постоянном слежении телескопа за кометой. Это дает возможность определить направление движения кометы среди звезд.

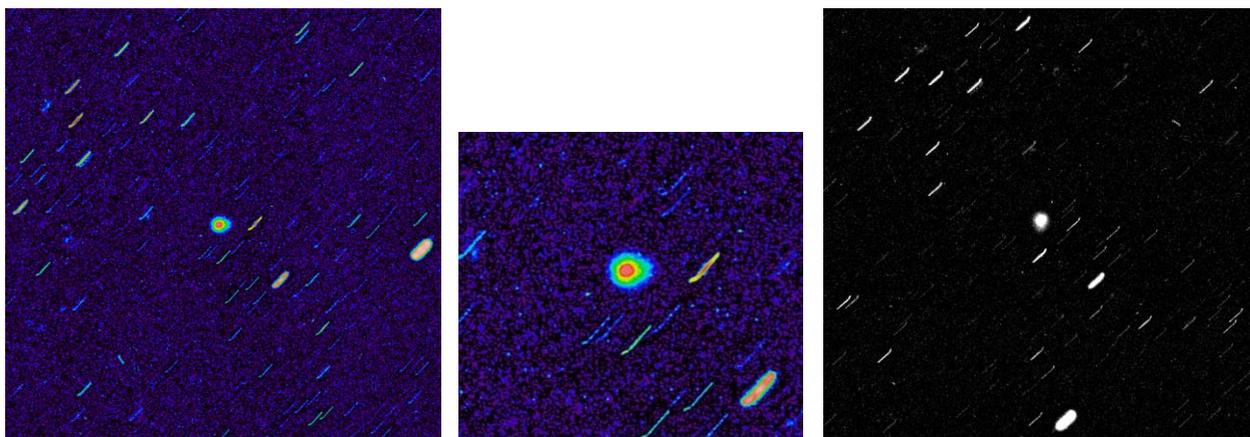


Рис.12. Компонент компактных источников.

Для полноты приведем и полученное нами выделенное изображение фона (рис.13).

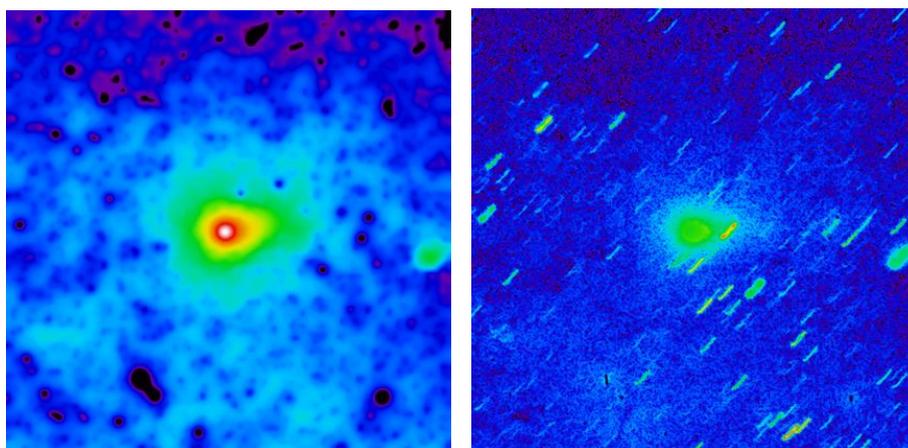


Рис. 13. Протяженные структуры на скане 1228. Справа - компонента "вытянутых структур" (больших пространственных масштабов, чем источники).

Размеры кометы. Выше мы сделали оценку размеров, рассмотрев фотоизображение на скане 1128. Использовали оригинал, без применения методов очистки от шума. Перейдем к следующему шагу, обработке изображений методом *getsf*. Мы взяли для исследования два скана. Они получены по пластинкам с разным временем экспозиции. Как это часто бывает, в случае увеличения экспозиции центральная часть комы оказывается пересвеченной и не позволяет оценить, например, размеры. Для того чтобы оценить размеры комы на **пересвеченной** пластинке **1228** (напомним, что экспозиция была 30 мин), необходимо восстановить ее профиль. В качестве модели распределения интенсивности мы в первом приближении взяли наиболее простую модель распределения по Гауссу.

Как найти параметры модели ? В начале, - для того, чтобы проверить, насколько хорошо такая модель будет описывать интенсивность комы на пластинке, воспользуемся менее пересвеченным изображением на пластинке 1166 (экспозиция 3 мин). Затем, происходит подбор параметров гауссианы наилучшим образом вписывающейся в профили распределения интенсивности для 1166 – это будет полный профиль, а для 1228 мы имеем лишь нижнюю часть профиля для подбора модели Гаусса, где мы имеем не пересвеченную часть изображения.

Итак, перечислим по шагам процесс определения размеров кометы на пересвеченном изображении (1228, $\text{exp}=30$ мин.):

1) На сканах выделены фрагменты, содержащие комету с небольшим полем вокруг. В прямоугольной системе координат определены центры комы - пластинка 1166 – фрагмент с центром в $x, y = (486, 465)$ и размером 23×23 пикселя, пластинка 1228(?) – фрагмент с центром в $x, y = (689, 698)$ и размером 100×100 пикселей).

2)Для изображения 1166 формируется полное модельное распределение Гаусса с помощью метода `Astropy.models.Gaussian2D` (URL + https://docs.astropy.org/en/stable/api/astropy.modeling.functional_models.Gaussian2D.html).

Необходимые параметры модели взяты на основе значений, полученных из анализа изображения – максимальная интенсивность пикселей, их положение x , y на изображении, стандартное отклонение по осям x , y . Исходное изображение вписывается в модель с помощью метода наименьших квадратов (МНК), используя функцию `Astropy.modeling.fitting.LevMarLSQFitter` (<https://docs.astropy.org/en/stable/api/astropy.modeling.fitting.LevMarLSQFitter.html#astropy.modeling.fitting.LevMarLSQFitter>).

Результат будет содержать новое стандартное отклонение и новый (модельный) максимум интенсивности.

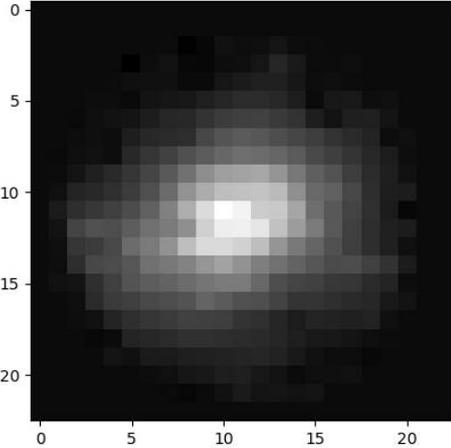
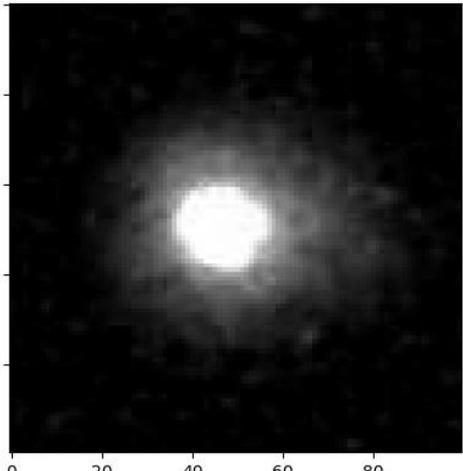
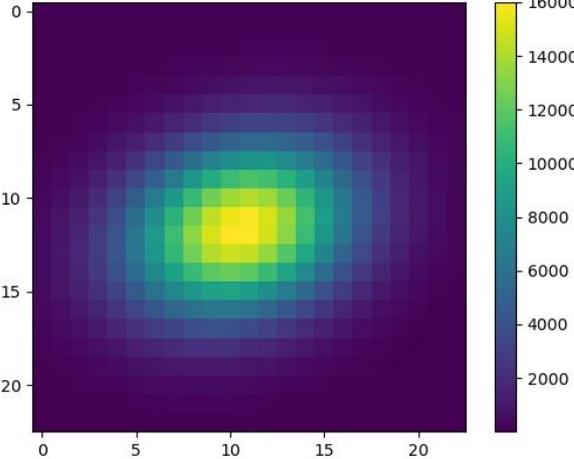
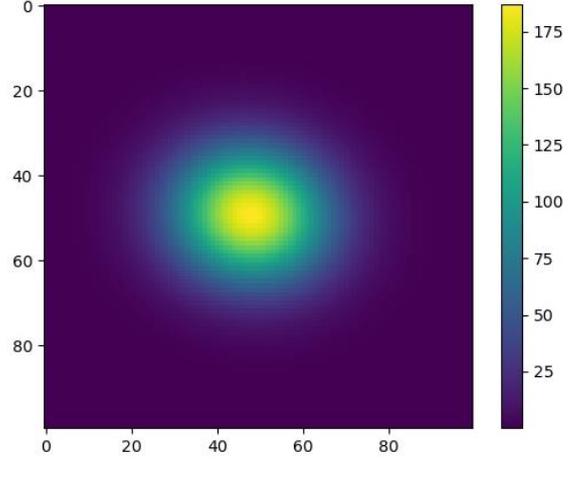
3)Полученная модель вписана в наблюдаемое распределение плотности изображения кометы (в 3D).

Перейдем к анализу результатов, обратимся к Таблице 7.

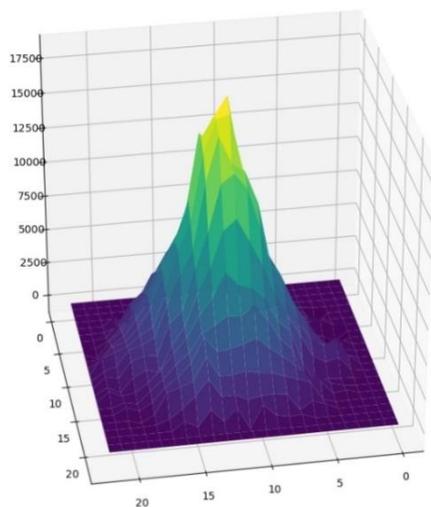
На Шаге 1 (Таблица 7) мы выделили изображения (фреймы) кометы, как для 1228 с экспозицией 30 мин. и вследствие этого пересвеченному и 1166 с плавным изменением плотности к центру комы.

На Шаге 2 определены координаты центров и дисперсии по осям σ_x , σ_y . Они необходимы для построения моделей распределения интенсивности на Шаге 3.

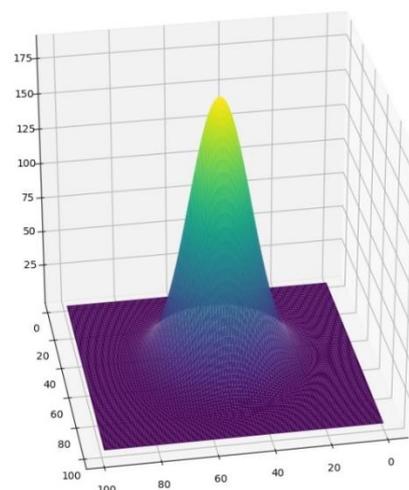
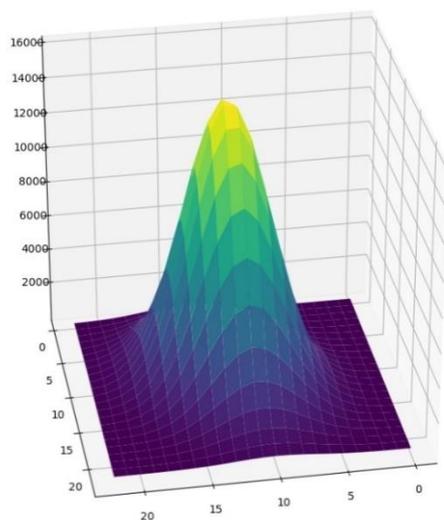
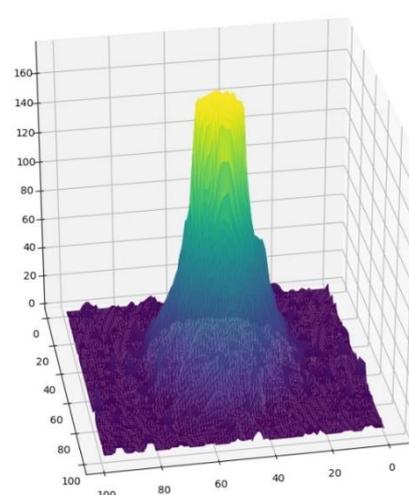
Таблица 7. Формирование распределения Гаусса для пластинок 1228 и 1166.

Пластинка 1228 (30 мин.)	Пластинка 1166 (3 мин.)
Шаг 1. Выделение кометы на пластинке	
	
Шаг 2. Формирование распределения Гаусса	
<p>Амплитуда = 16225.1 $x, y = (10.56, 11.66)$ $\sigma_x, \sigma_y = (4.155, 3.05)$</p>	<p>Амплитуда = 187.33 $x, y = (47.8, 49.28)$ $\sigma_x, \sigma_y = (12.82, 11.1)$</p>
	
Шаг 3. 3D изображение комы (Шаг 1) и полученной модели (Шаг 2)	

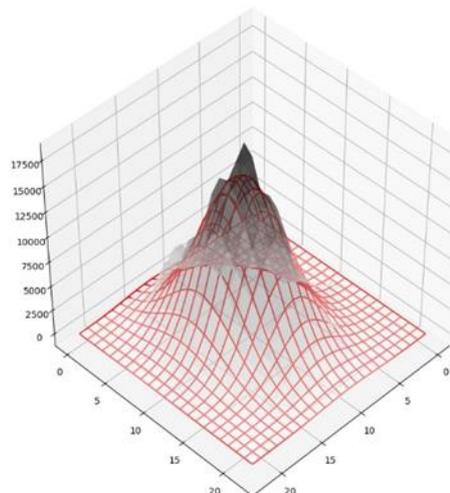
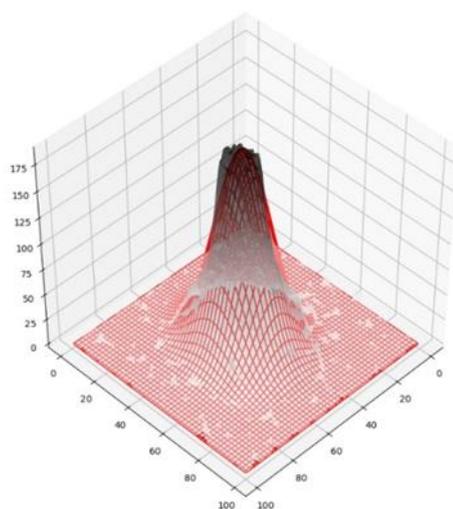
Пластинка 1228 (30 мин.)

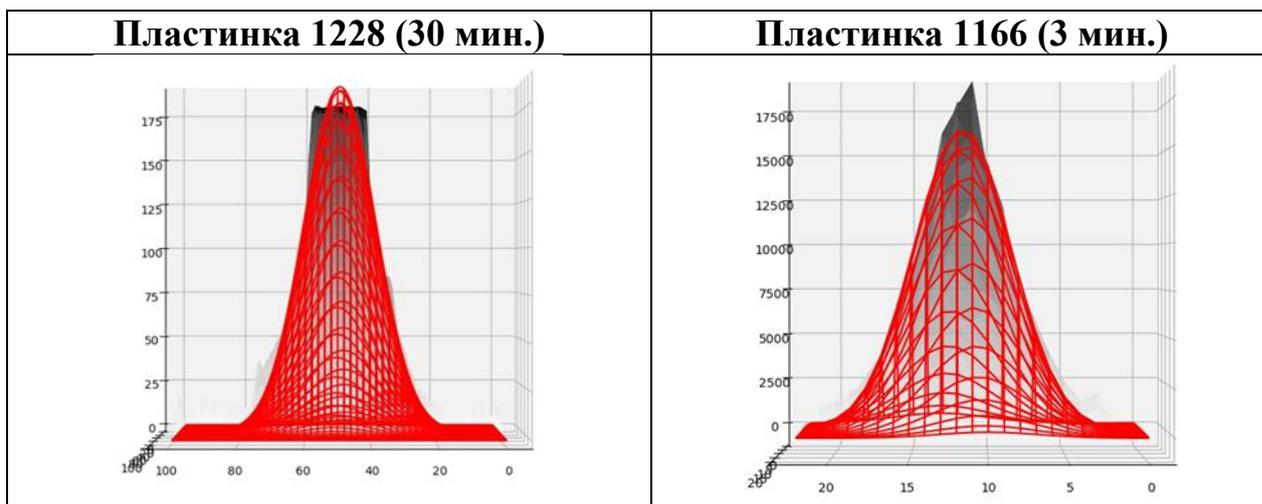


Пластинка 1166 (3 мин.)



Шаг 4. Наложение 3D изображений и 2D профиль





На Шаге 4 сделано совмещение подобранных гауссовых моделей с наблюдаемыми профилями интенсивностей. Финальные результаты совмещения приведены на Рис. 14 и Рис.15.

Видно, что распределение Гаусса хорошо ложится на профиль пересвеченной комы (пластинка 1166, 3 мин.). При этом лишь сглаживается острый пик. Такое соответствие модели наблюдаемому профилю мы считаем подтверждением справедливости выбранной простой модели. Последнюю мы применили к пересвеченному изображению 1228 (30 мин.). Результат этого совмещения приведен на Рис.15.

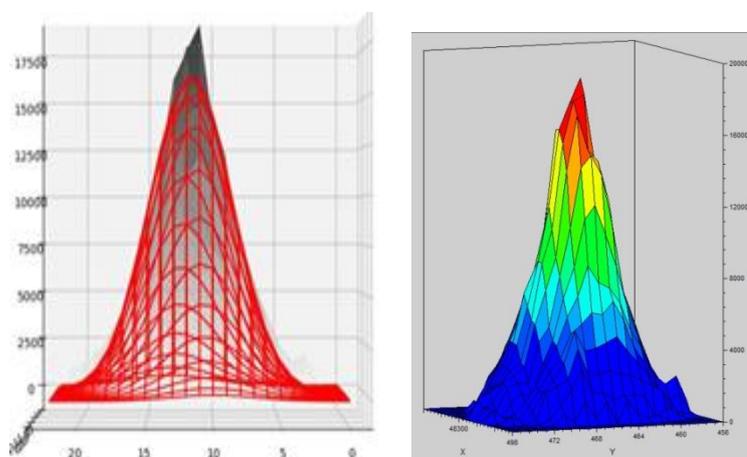


Рис. 14. Пластинка 1166 время экспозиции 3 минуты. Масштаб 1.627 arcsec/pix. Диаметр комы на половине яркости составляет 9 пикселей.

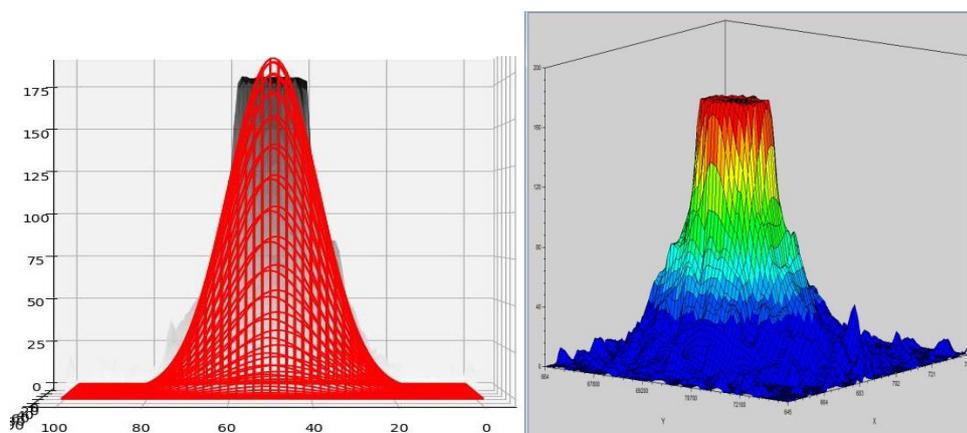


Рис.15. Компонент компактных источников. Пластинка 1228 время экспозиции 30 мин. Диаметр комы 29 пикселей. Диаметр комы 29 пикселей.

На Рис.15 видим, что модель совмещенная лишь по крыльям, представляет распределение в целом, аппроксимирую верхнюю пересвеченную часть профиля гауссианой.

Вывод. Проведенная работа позволила аппроксимировать два изображения кометы моделью комы в виде распределения Гаусса. Естественно, что теперь можно говорить о размере комы на половине от максимума интенсивности. Для 1228 диаметр комы составил 29 пикселей (размер комы 47 arcsec), тогда как для 1166 он составил всего лишь 9 пикселей (15 arcsec). Программа getsf дала нам также величину масштаба равную 1.627 arcsec/pix (практически совпадающее со значением выше полученным с помощью NewAstrometry).

Напомним, что выше по необработанному скану 1228 мы нашли размеры кометы 76.2 x 54.6 arcsec. Меньший размер здесь представляет диаметр комы, который

нужно сравнивать с полученным диаметром здесь (без учета несимметричной части). Разница составила более 7 arcsec. Таким образом, getsf послужил на наш взгляд получить более надежный результат за счет вычитания шумовой засветки.

3.3. О направлении кометного хвоста

Рассмотрим проекцию истинного направления кометного хвоста на небесную сферу. Направление кометного хвоста рассчитывалось по формуле:

$$\tan \delta = \frac{\sin(\alpha - \alpha_{\odot})\operatorname{tg}\delta_0 - \sin(\alpha_0 - \alpha)\operatorname{tg}\delta_{\odot}}{\sin(\alpha_0 - \alpha)}$$

где

α_{\odot} , δ_{\odot} - координаты Солнца на заданную дату,

α_0 , δ_0 – координаты кометы на заданную дату,

α , δ – координаты для построения позиционного угла.

Для даты 26.08.1985 получено значение тангенса позиционного угла

$\tan \delta = -6,7125$.

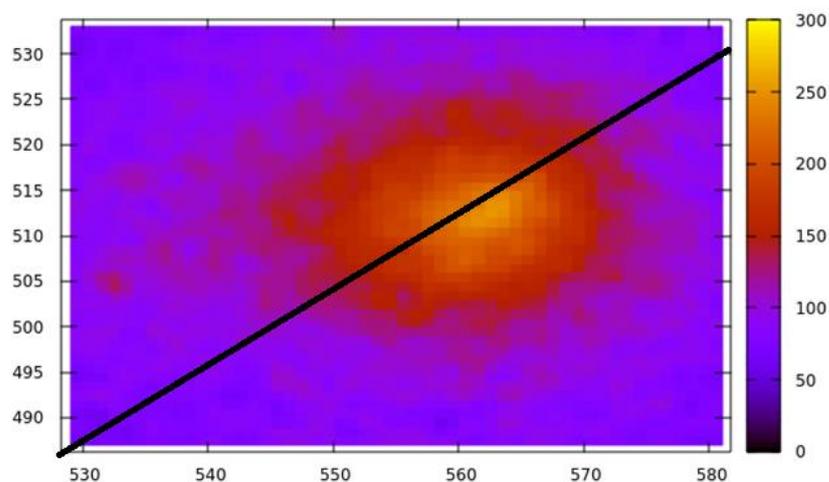


Рис.16. Приблизительное направление хвоста кометы 21P в проекции на сферу

Форма и направление кометного хвоста может многое сказать о составе. В случае многократно побывавшей в перигелии 21P можно ожидать полного отсутствия испаряющегося газа. Но это не так, комета скорее всего продолжает обладать ледяным ядром, что мы предположительно видим по направлению и форме ее хвоста. Ниже представлена предложенная нами простая схема точного определения величины отклонения хвоста кометы от солнечного ветра, то есть направления комета-Солнце, в проекции на сферу. На Рис.17 показан сферический треугольник “положение кометы – Северный полюс Мира – Солнце”. Задача найти угол отклонения хвоста кометы от направления солнечного ветра.

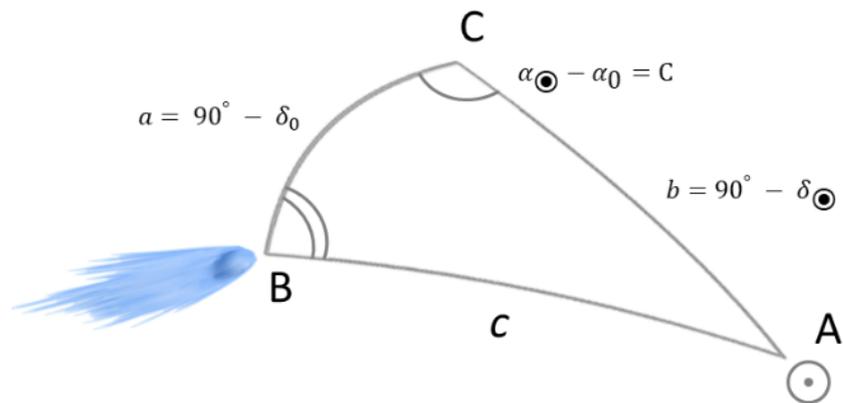


Рис. 17. Сферический треугольник, позволяющий определить направление “ядро кометы – Солнце”. Здесь вид “извне” небесной сферы для удобства сравнения с фотоизображением на пластинке. Координата α возрастает слева – направо (отметим, что на негативе наоборот, Рис.2).

На Рис.17 малыми буквами обозначены дуги, прописными соответствующие им углы. Значения нам известны a , b , C . Для того, чтобы понять направление хвоста кометы относительно направление на Полюс Мира нужно найти угол при ядре кометы B .

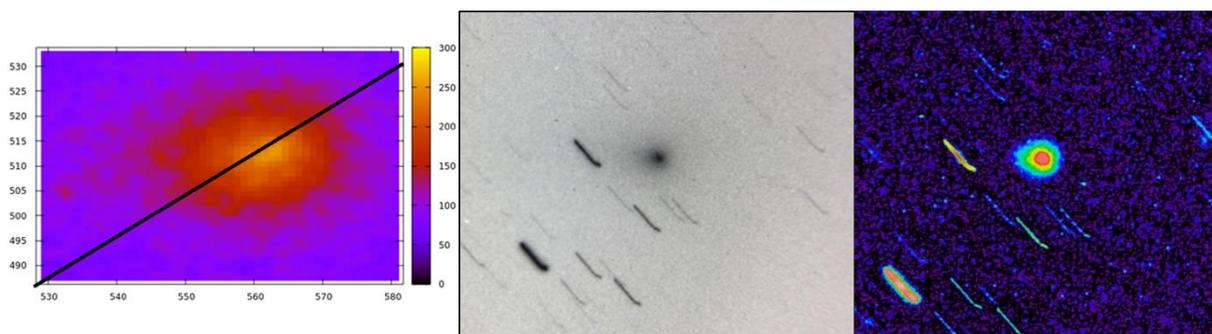


Рис. 18. Комета 21P на центральной части (слева) фотопластины 1228 (время экспозиции 30 минут, изображения звезд растянуты, 26.08.1985, Таблица 1, напомним, что перигелий комета прошла вскоре 5 сентября 1985 г.). В центре фрагмент исходного изображения, эмульсией вниз, Север вверху. Крайний справа - файл comet21p.100.obs.bgs.s30as.png. (письмо АБМ 12 мая в 18:25 Re: 21P photoimage), увеличенный фрагмент.

Сопоставляя направление движения кометы на Рис.18 (правая панель, где треки звезд фактически прочерчивают фрагмент наблюдаемой траектории кометы) с направлениями на Рис.18 (левая панель) солнечного ветра и хвоста кометы обнаруживаем следующее. Комета движется практически перпендикулярно направлению на Солнце (так и должно быть, ведь мы наблюдаем момент вблизи перигелия). Хвост же у кометы слегка отстает в противоположную сторону от орбитального движения (комета движется “сверху – вниз” на негативе (Рис. 18, правая панель). На Рис.18 (левая панель) мы видим хвост III-го типа, видимое отклонение составляет приблизительно 60° (исходя из полученного значения позиционного угла равного $\rho=94^\circ$). Отметим, что хвосты II и III типов - пылевые; непрерывно выделяющиеся из ядра пылинки образуют хвосты II типа, хвосты III типа появляются в тех случаях, когда из ядра одновременно выделяется целое облако пылинок. III типа - короткие, почти прямые, с самого начала отклонённые в сторону, противоположную орбитальному движению.

Положения, выносимые на защиту:

1. Определение параметров кометы 21P на даты наблюдений появления кометы в 1985 г.

2. Первичный анализ кометной активности связанной с направлением хвоста кометы (в проекции на плоскость небесной сферы).

Основные результаты готовятся к публикации:

С. В. Верещагин, А.Б. Меньщиков, М.Д. Сизова, Б.М. Шустов, А.М. Соболев, Е. В. Ефремова, В.П. Осипенко. Применение getsf к анализу изображений кометы 21P/Giacobini-Zinner, готовится к печати (WoS)

Глава 4. Космические угрозы, астероидно-кометная опасность

4.1. Кометы как источники космических угроз

Как уже отмечалось в разделе 1.3, комета Джакобини-Циннера является короткопериодической кометой, которая многократно сближалась с Солнцем за время своего существования. Каждый раз сближаясь с Солнцем, кометы испаряются, теряют часть вещества, и это делает кометы подверженными разрушению. Подобные разрушения неоднократно наблюдались, к примеру, при наблюдениях за кометой ATLAS (Рис. 19) и кометой SWAN (Рис. 20) в 2020 году.

Разрушившиеся кометы полрождают метеорные потоки. Метеорный поток Драконида – частицы кометы Джакобини-Циннера. Земля входит в облако осколков каждый октябрь. Пик потока – 10 октября. Есть наблюдения крупного болидного события, показывающие, что комета может оставлять на орбите значительные по размерам осколки, которые могут нести непосредственную угрозу Земле



Рис.19. Комета ATLAS, разрушение ядра. Фото Hubble

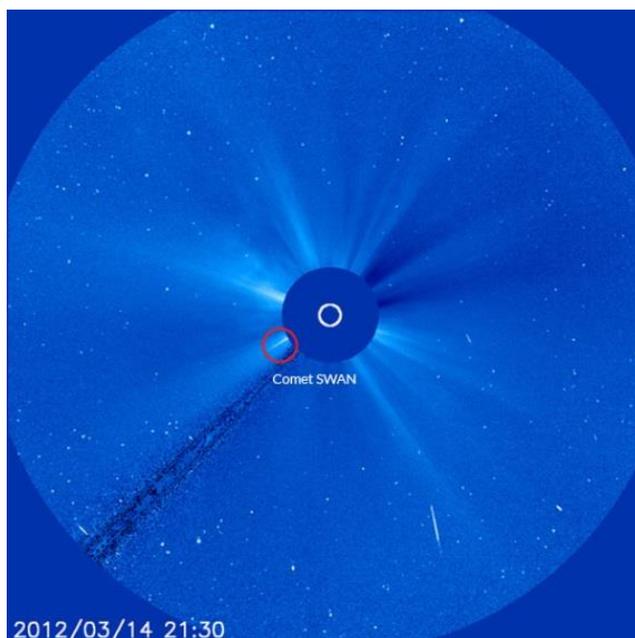


Рис.20. Комета SWAN, фото SOHO

4.2. Об уровне астероидно-кометной опасности

В проблеме астероидно-кометной опасности (АКО) главными носителями опасности являются астероиды, сближающиеся с Землей, размером более нескольких десятков метров. Согласно статистике наблюдений, комет среди потенциально опасных объектов менее одного процента (данные NASA). Тем не менее, эту составляющую нужно исследовать и учитывать. Столкновение кометы может быть более опасным, чем с астероидом того же размера, т.к. скорости сближения комет с Землей в среднем существенно выше. Более того распад кометы на крупные фрагменты может привести к тому, что появится сразу несколько «крупных снарядов» и произойдет серийное столкновение (примеры – столкновение кометы Шумейкеров-Леви 9 с Юпитером в 1994г, а также многочисленные цепочки кратеров на Луне – следы серийных столкновений).

Для оценки АКО нужно учитывать частоту сближений (столкновений, как частный случай). Статистика сближений астероидов в этом смысле более богата. Изучая эту статистику, можно делать предположения также и о частоте сближений с опасными кометами.

В работе Шустов и др. 2017 проведен анализ статистики сближений декаметровых с Землей.

Статистика астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ) на расстояние R (т.е. попадающих в сферу радиусом R) выполнена при помощи программы, написанной на языке C++. Программа вычисляет положения в пространстве астероидов и Земли на интервале 10 лет со скважностью 1 сутки (начиная с 01 января 2016 г). Положение астероида определяется по кеплеровым элементам орбиты астероида (полученным при помощи пакета NEOPOP URL = <http://neo.ssa.esa.int/neo-population>). Рассматривается невозмущенное движение. Положение Земли берется из файла DE405, взятого с сайта JPL (URL = http://ssd.jpl.nasa.gov/?planet_eph_export). Затем вычисляются расстояния между Землей и астероидом. Если расстояние меньше или равно заданного R , то данное событие учитывается в статистике.

Для моделирования популяции и получения элементов орбит модельных астероидов использована программа Near-Earth Object Population Observation Program (NEOPOP). В основе пакета NEOPOP лежит модель популяции околоземных астероидов Боттке-Морбиделли-Гравника (v4, 2015-02-25) (G. Hahn et al, 2014).

На рисунке 21 показана зависимость среднего за год (в течение расчетного периода) количества околоземных астероидов, пересекающих околоземную сферу радиусом R от размера астероида. Приведены результаты для двух значений R : 1 млн км – характерный размер зоны обзора КА СОДА, и 0.4 млн. км. – примерный радиус орбиты Луны. В модели Боттке-Морбиделли-Гравника задаются не размеры, а абсолютная астероидная звездная величина H . Размер астероида для данной H определялся по формуле

$$\log D = 3,122 - 0,5 \log \rho - 0,2H,$$

где D – диаметр астероида, выраженный в км, ρ – геометрическое альbedo астероида, H – абсолютная звездная величина астероида в лучах V

(визуальная полоса спектра фотометрической системы UBV). Расчет производился для значения альбедо 0.15.

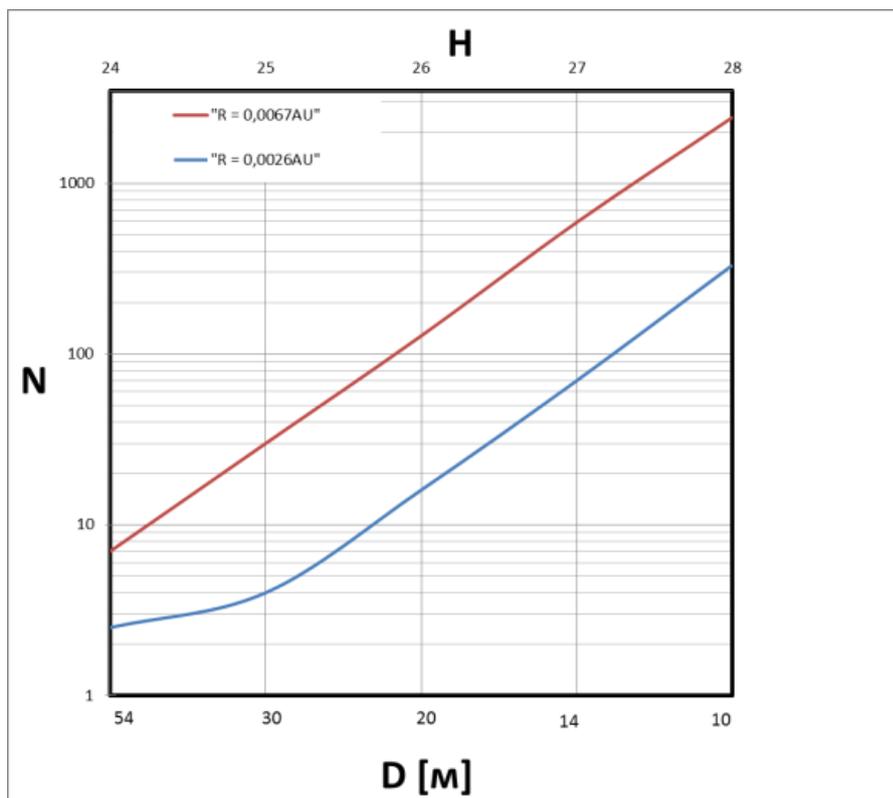


Рис. 21. На рисунке красным цветом показана зависимость количества астероидов, пересекающих сферу радиусом 1 млн км., от размера (и от H). Синим – то же для $R = 0.4$ млн км.

Выбор радиуса сферы в 0.4 млн км (примерное расстояние от Земли до Луны) обусловлен тем, что часто в СМИ появляются «пугающие» сообщения об астероидах, проходящих между Луной и Землей. Стоит отметить, что ажиотаж вокруг отдельных тел, пересекающих эту область, не оправдан, ведь за год на расстоянии до 0.4 млн км от Земли пролетает около четырех сотен астероидов размером от 10 м.

Основные результаты:

1) Количество АСЗ размером более 10 м, входящих за год в околоземное пространство радиусом 1 млн км, составляет около 3200 штук в год. Получены зависимости частоты входа в указанную зону от размера АСЗ.

2) Получены зависимости частоты входа в указанную зону от размера АСЗ.

Обсудим эти результаты.

Понятие дневного неба подробно рассмотрено в работе (Шустов и др., 2017). Это область вокруг Солнца радиусом не менее 45° . В бытовом понимании для дневного неба этот угол составляет 90° . Следует отметить, что для оценки эффективности наблюдательной способности КА СОДА рассматривалась область сферы радиусом 1 млн км и углом раствора 120° . Согласно приведенным выше статистическим оценкам, количество астероидов размером более 10 м, проходящих с дневного неба и пересекающих данный участок указанной сферы равно 932.

Для комет нужно приведенные статистические данные умножить на фактор (возможно и не намного) меньший единицы. Более точное значение фактора еще пока не оценивалось.

Положение на защиту по результатам этой главы:

Программа для расчета статистики сближений астероидов с Землей на расстояния не более 1 млн. км.

Основные результаты опубликованы в статье:

Шустов Б.М., Нароенков С.А., Ефремова Е.В. О населенности околоземного пространства опасными небесными телами // Астрон. Вестник. – 2017. - Т. 51. № 1. Стр. 44-50.

Заключение

В процессе работы получены следующие результаты и намечены дальнейшие перспективы:

Создан архив сканов фотопластинок с изображениями кометы 21P/Giacobini-Zinner, который размещен в открытом доступе на сайте ИНАСАН. Пластинки были получены на широкоугольном астрографе “Цейс – 400”. Снимки были получены в широком интервале экспозиций от менее 1 мин (более пригодны для астрометрии) и до часа (более пригодны для выявления морфологических деталей вне комы, например - хвоста). Особую ценность представляет многодневный ряд наблюдений, позволяющий проследить изменения деталей и размеров кометы.

Кроме собственных материалов, в будущем предполагается использовать архив ПЗС наблюдений кометы 21P 2018 г, проведенные ИКИ РАН на телескопе Цейсс-1000 ЦКП ИНАСАН в Симеизе. На Рис.22 пример изображения из этого архива.



Рис.22. Из работы по изучению поляризации кометы 21P/Джакобини-Циннера в 2018 году, Маслов et al, 2018.

Детально проанализированы два изображения кометы 21P/Giacobini-Zinner. Оба изображения получены фотографическим путем с разными экспозициями: 3 мин для 1166 и 30 мин для 1128. Снимок 1128 (комета наблюдалась вблизи перигелия) позволил оценить позиционный угол хвоста

кометы равный 94° на Рис.18. При таком угле хвост кометы направлен с небольшим отклонением (6°) от направления солнечного ветра в сторону отставания от движения по орбите. Это свидетельствует о (ранее дискутируемом) наличии значительной пылевой составляющей теряемого кометой вещества.

Показано, как применение современных технологий обработки изображений (например, *getsf*) дает возможность изучать слабые но важные детали, которые было трудно или невозможно исследовать старыми методами. По нашим сканам возможно выполнение астрометрических и фотометрических исследований. Возможно использовать полученный материал для исследования физики процессов потери вещества. Так что исследования на основе использование архивных данных фотонаблюдений кометы 21P/Giacobini-Zinner 1985 г. получили новую жизнь. Применение современных методик позволяет разделить изображение и выделить полезные детали. В данной работе мы показали, что *getsf* хорошо справляется с мелкомасштабным изображением 21P, отделяя ее от соседних звезд, дает детальный профиль интенсивности комы позволяющий оценить размеры кометы. Важно отметить, что получено изображение хвоста кометы, включая слабые детали. Итак, несмотря на то, что мы имеем дело с довольно старыми архивными фотонаблюдениями, применение уникальной современной методики обработки *getsf* позволяет взглянуть по-новому на полученный фотоматериал.

В будущем мы собираемся продолжить работу и по архивному и по новому материалу. Серия наблюдений появления кометы в 1985 г. позволяет провести сравнение изменений размеров кометы со временем на нашем интервале наблюдений. Как показано Schleicher et al. 1987, Активность 21P в этом случае носила асимметричный характер, будучи в два раза выше до перигелия, чем после его прохождения. Это интересное явление нуждается в объяснении, что подтверждает особенную ценность наблюдений этого появления. Вращение кометы и возможная сублимация фрагментов ядра

представляют особый интерес в связи с особенностями ее химического состава, скорее всего 21P молодая комета группы Юпитера вещество которой носит первозданный характер без эволюционных изменений химического состава (Moulane et al. 2020).

Новый материал надеемся получить во время следующего приближения кометы, которое ожидается в 2025 году.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A'Hearn M. F., Millis R.F., Schleicher D. G., Osip D. G., Birch P. V. The Ensemble Properties of Comets: Results from Narrowband Photometry of 85 Comets, 1976-1992 // *Icarus*. – 1995. – V. 118, Issue 2, - P. 223-270.
2. Barbieri C., Blanco C., Bucciarelli B., et al. Digitization and scientific exploitation of the Italian and Vatican Astronomical Plate Archives // *Experimental Astron.*—2003.—15, N 1.—P. 29—43.
3. Blaauw R. C., Suggs R. M., and Cooke W.J. Dust production of comet 21P/Giacobini-Zinner using broadband photometry // *Meteoritics and Planetary Science*. – 2014. - V.49, pp.45-51.
4. Bocsa G., Tsvetkov M. Measuring and scanning methods in astrometric processing of the photographic plates Exploring the Solar system and the Universe // *AIP Conference Proceedings*. – 2008. – V. 1043, pp. 212-213.
5. Chornaya E., Zubko E., Luk'yanyk I. et al. Imaging polarimetry and photometry of comet 21P/Giacobini-Zinner // *Icarus* – 2020. – V. 337. id. 113471.
6. Dluzhnevskaya O. B., Vereshchagin S. V., Chupina, N. V., Osipenko, V. P. The INASAN Zvenigorod Observatory Plate Collection // *Publications of the Astronomical Society "Rudjer Boskovic"*. -2012. - V. 11, pp. 359-362.
7. Dluzhnevskaya O. B., Malkov O. Yu. Russian Virtual Observatory // *Stars and Satellites, Proceedings of the Memorial Conference Devoted to A.G. Masevich 100th Anniversary, held in Moscow, Russia, in Oct 15-16, 2018, INASAN Science Proceedings*. Edited by B. M. Shustov and D. S. Wiebe. Moscow: Yanus-K. – 2018. - p. 391-396.
8. Evdokimov Yu. V. Investigation of the motion of the comet Jacobini-Zinner and the origin of meteor showers // *Kazan, the Dissertation for the degree of doctor of phiz-mat. Sciences*. – 1976.
9. Fink U. A taxonomic survey of comet composition 1985--2004 using CCD spectroscopy // *Icarus* – 2009. – V. 201. PP. 331–334.
10. HORIZONS Web-Interface, Solar System Dynamics. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology // URL = <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>

11. Jenniskens P. M. M. Meteor showers and their parent comets // Cambridge, UK: Cambridge University Press – 2006. 790 p.
12. Jenniskens P. Draconid meteors 2011 // Central Bureau for Astronomical Telegrams – 2011. Electronic Telegram No. 2862 URL = <http://www.cbat.eps.harvard.edu/iau/cbet/002800/CBET002862.txt>.
13. Kiselev N.N., Jockers K., Rosenbush V.K. Organic Matter in Dust of Comet 21P/Giacobini-Zinner and the Draconid Meteoroids // Earth Moon, and Planets - 1998. – V. 82. P. 141.
14. Madiedo J. M., Trigo-Rodríguez J.M., Konovalova N. , CastroTirado A.J. A 13 kg meteoroid from comet 21P/Giacobini-Zinner recorded as a bolide during the 2011 Draconid outburst // 43rd Lunar and Planetary Science Conference - 2012.
15. Maslov I. A., Nikolenko I. V., Ugolnikov O. S. Polarization of comet 21P/Giacobini-Zinner in 2018 // Astronom. Tsirk. – 2019. - V.1645, p. 1-3.
16. Men'shchikov A., André Ph., Didelon P., Motte F., Hennemann M., Schneider N. A multi-scale, multi-wavelength source extraction method: getsources // Astron. and Astrophys. – 2012. – V. 542, A81.
17. Men'shchikov, A. A multi-scale filament extraction method: getfilaments // 2013, Astron. and Astrophys. – 2013. – V. 560, A63.
18. Men'shchikov, A. Background derivation and image flattening: getimages // Astron. and Astrophys. – 2017. – V.607, A64.
19. Men'shchikov, A. 2021, in preparation.
20. Moulane Y., Jehin E., Rousselot P., Manfroid J., Shinnaka Y., Pozuelos F. J., Hutsemékers D., Opitom C., Yang B., Benkhaldoun Z. Photometry and high-resolution spectroscopy of comet 21P/Giacobini-Zinner during its 2018 apparition // Astron. and Astrophys. – 2020. – V. 640, A54.
21. Nesci R., Barbieri C., Bucciarelli B. at al. Digitization and electronic distribution of the astronomical plate archives of Italian Astronomical observatories // Memorie della Società Astronomica Italiana Supplement. – 2003. - v.3, p.364.

22. Pittichov´a J., Kelley M. S., Woodward C. E., Meech K. J. Imaging of Comet 21P/Giacobini-Zinner // *Bioastronomy 2007: Molecules, Microbes and Extraterrestrial Life ASP Conference Series* – 2009. - V. 420. p.103.

23. Pittichová J., Woodward C. E., Kelley M. S., Reach W. T. Ground-Based Optical and Spitzer Infrared Imaging Observations of Comet 21P/GIACOBINI-ZINNER // *Astron. J.* – 2008. - V. 136, Iss. 3, pp. 1127-1136.

24. Rhiannon C. BLAAUW, Robert M. SUGGS, and William J. COOKE Dust production of comet 21P/Giacobini-Zinner using broadband photometry *Meteoritics & Planetary Science* 49, Nr 1, 45–51 (2014) doi: 10.1111/maps.12115

25. Rizvanov N.G., *Fotograficheskaya astrometriya (Photographic Astrometry)* // Kazan: Kazan. Gos. Univ. - 1993.

26. Roth N., Gibb E., Dello Russo N. et al. Probing the Evolutionary History of Comets: An Investigation of the Hypervolatiles CO and CH₄ and Parent Volatile Abundances in the Jupiter-family Comet 21P/Giacobini-Zinner // *American Astronomical Society, DPS meeting #50 -2018.* id.210.11.

27. Schleicher D., Knight M. Narrowband Observations of Comet 21P/Giacobini-Zinner During Its Excellent 2018 Apparition // *American Astronomical Society -2018.* DPS meeting #50, id.210.12.

28. Trigo-Rodríguez J. M., Madiedo J. M., Williams I. P. et al. The 2011 October Draconids outburst - I. Orbital elements, meteoroid fluxes and 21P/Giacobini-Zinner delivered mass to Earth // *Monthly Notic. Royal Astron. Soc.* – 2013. – V. 433, Iss. 1, p.560-570.

29. Vereshchagin S. V., Chupina N. V. Digital archive of the astrograph plates stored at the INASAN Zvenigorod observatory // *Baltic Astronomy* – 2012. - V.21, P. 366-370.

30. von Roseninge T. T., Brandt J. C., Farquhar R. W. The International Cometary Explorer Mission to Comet Giacobini-Zinner // *Science* – 1986. - V. 232, Issue 4748, pp. 353-356.

31. WIDE-FIELD PLATE DATABASE URL = <http://draco.skyarchive.org/search/search.cgi>

32. Whipple F. L. On tests of the icy conglomerate model for comets // *Astron. J.* – 1950. – V. 55. P. 83.
33. Zhurba Yu.I., *Kratkii spravochnik po fotomaterialam (Brief Handbook on Photographic Materials)* // Moscow – 1987. Iskusstvo.
34. *Астрономический Ежегодник 1984* // Институт Прикладной Астрономии - 1983.
35. Барабанов С.И., Постникова Е.С., Верещагин С.В. Архив изображений ярких комет, полученных на Звенигородской обсерватории ИНАСАН // *Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове* – 2018. № 225, (Труды Всероссийской астрометрической конференции «ПУЛКОВО – 2018» Санкт-Петербург) с. 131. URL = http://www.gaoran.ru/russian/publ-s/izv_225/izv_225.pdf
36. Верещагин С.В., Постникова Е.С., Осипенко В.П. Фотографические наблюдения кометы Хейла-Боппа на Звенигородской обсерватории // *Астрономический Вестник.* – 2017. - Т. 51. No. 2. Стр. 174–181.
37. Звенигородская обсерватория Института астрономии РАН http://www.inasan.ru/divisions/zvenigorod/about_zo/
38. Звенигородская обсерватория Института астрономии РАН, инструменты <http://www.inasan.ru/divisions/zvenigorod/instr/>
39. Ксанфомалити Л. В.. Некоторые свойства кометы Хейла–Боппа (по наблюдениям 1995–98 гг.) // *Астрономический вестник* – 2020. - Т. 54. № 2. стр. 135-150.
40. Куликов К.А. Курс сферической астрономии // М.: «Наука», 1969. — 216 с.
41. Маслов И. А. Распределение поляризации в коме кометы 21P/Джакобини-Циннера // *Астроном. Цирк.* - 2020, готовится к печати.
42. Сизова М.Д., Ефремова Е.В., Верещагин С.В. Фотографические наблюдения кометы Джакобини-Циннера в Звенигородской обсерватории // *Научные труды Института астрономии РАН.* – 2019. Т. 4. Стр. 337-342.

44. Сизова М.Д., Чупина Н.В., Верещагин С.В. Архив изображений комет на сайте ИНАСАН // Научные труды Института астрономии РАН. – 2019. - Т. 4. Стр. 398-404.

45. Шустов Б.М., Нароенков С.А., Ефремова Е.В. О населенности околоземного пространства опасными небесными телами // Астрон. Вестник. – 2017. - Т. 51. № 1. Стр. 44-50.