

УДК 523.64-75:520.82/85

## МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ, АКТИВНЫЕ НА БОЛЬШИХ ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКИХ РАССТОЯНИЯХ: ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ 6-М ТЕЛЕСКОПА САО РАН

© 2020 А. В. Иванова<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Астрономический институт Словацкой академии наук, Татранска Ломница, SK-05960 Словацкая Республика

<sup>2</sup>Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев, 03143 Украина

<sup>3</sup>Астрономическая обсерватория, Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, Киев, 04053 Украина

Поступила в редакцию 25 сентября 2019 года; после доработки 20 ноября 2019 года;  
принята к публикации 20 ноября 2019 года

Детальное изучение активных на больших гелиоцентрических расстояниях (больше 4 а.е.) комет, которые впервые входят в Солнечную систему и состоят из вещества в первичном, не переработанном состоянии, помогает лучше понять историю и эволюцию Солнечной системы. В частности, современные модели формирования планет-гигантов требуют включения аккреции летучих элементов (неон, аргон, криптон, ксенон и др.), которые изначально не могли присутствовать на гелиоцентрических расстояниях, где формировались планеты-гиганты. Тем не менее летучие компоненты могли бы эффективно поставляться телами пояса Койпера и облака Оорта, которые формировались при температурах ниже 30 К. В работе приведен обзор результатов многолетнего комплексного исследования малых тел Солнечной системы, проявляющих кометоподобную активность на больших гелиоцентрических расстояниях. Данные получены по наблюдениям на 6-м телескопе САО РАН с помощью многорежимных редукторов светосилы SCORPIO и SCORPIO-2.

Ключевые слова: кометы: общее — методики: фотометрическая — методики: спектроскопическая — методики: поляриметрическая

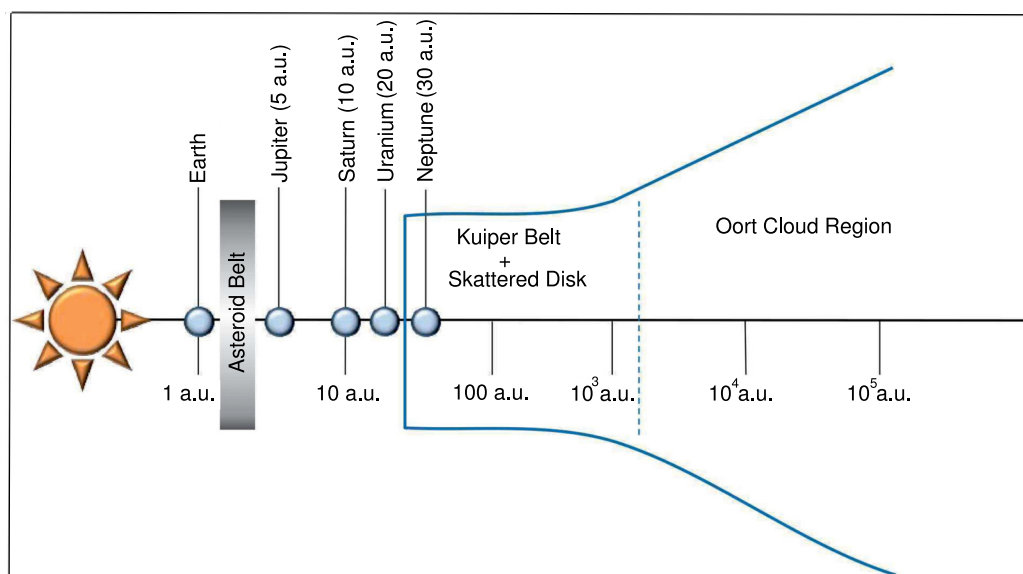
### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные исследования малых тел Солнечной системы (далее МТСС) включают в себя различные аспекты, связанные с их формированием в протопланетном диске, динамической и химической эволюцией, проявлением активности в зависимости от расстояния до Солнца, с изучением их физических и динамических характеристик, включая вопросы взаимосвязи между ними. За последнее время в области физики малых тел Солнечной системы получены новые данные, которые изменили представление о формировании и эволюции Солнечной системы и взаимосвязи между различными популяциями малых тел. Так, основываясь на последних исследованиях Dones et al. (2015), следует предположить существование трех резервуаров комет в Солнечной системе: транснептуновая область, облако Оорта и главный пояс астероидов (рис. 1).

Динамические исследования тел Солнечной системы указывают на то, что облако Оорта является основным источником почти изотропных комет, включая долгопериодические кометы (ДПК) и кометы типа Галлея (КТГ). В свою очередь эклиптические кометы (ЭК) и кометы типа Энке (КТЭ) формировались в основном поясе Койпера, а рассеянный диск является источником комет семейства Юпитера (КСЮ) и кентавров (Levison et al. 2010, Weissman 1990; 1997). Однако эти и другие исследования динамики тел в Солнечной системе (Dones et al. 2015; 2004, Levison et al. 2008, Nesvornyy et al. 2017) так и не ответили на вопрос: коротко- и долгопериодические кометы формировались в разных местах Солнечной системы или в слегка перекрывающихся областях первичного планетарного диска, прежде чем они были выброшены во внешнюю область Солнечной системы?

Активное исследование МТСС в последние годы привело к накоплению большого количества данных о короткопериодических и долгопериодических кометах на небольших (меньше 2 а.е.) рас-

\*E-mail: oivanova@ta3.sk



**Рис. 1.** Схематическое изображение, показывающее пояс Койпера, рассеянный диск и облако Оорта в масштабе с нашей планетной системой.

стояниях от Солнца. А вот наблюдения комет с перигелием больше 4 а.е. проводились редко, что образовало значительный недостаток информации именно о кометах, которые проявляют активность на больших расстояниях от Солнца. Сложившаяся ситуация привела к тому, что открытым остается вопрос и по таксономии комет. До сих пор не удалось выделить группы комет, опираясь на их физические и химические характеристики, если не считать группу комет с дефицитом углеродных соединений, однако большинство из них относится к короткопериодическим кометам, и эта особенность может быть связана с местом их формирования в Солнечной системе, а не с их эволюцией (Cochran et al. 2015, Mandt et al. 2015).

Благодаря космическим миссиям к нескольким кометам<sup>1</sup> получены новые уникальные данные о физических и химических характеристиках кометных ядер и кометной пыли. Установлено, что:

- поверхности исследованных комет значительно различаются между собой как по структуре, так и по составу;
- основная доля поверхностей покрыта темной пылевой коркой, а льды присутствуют в виде локальных пятен;
- вынос вещества в джетах не прекращается и на ночной стороне ядра комет;
- активность комет может регулироваться не только сублимацией водяного льда, но и субли-

мацией более летучих компонентов ядра, таких как CO и CO<sub>2</sub>;

- кометная пыль может содержать как частицы протосолнечной туманности, так и межзвездные частицы.

Однако космические миссии не могут быть очень частыми, а исследуемые объекты ограничиваются эллиптическими кометами (кроме единственной кометы 1P/Halley, которая относится к группе почти изотропных комет). Только в 2019 г. впервые ESA поддержала новую миссию «Comet Interceptor» к долгопериодической комете в рамках программы «Cosmic Vision»<sup>2</sup>. Поэтому наземные наблюдения и мониторинг активных на больших гелиоцентрических расстояниях комет были и остаются очень актуальными и важными задачами физики комет.

С 2006 г. на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН) нашей группой начата комплексная программа исследования активности комет на больших гелиоцентрических расстояниях. Благодаря уникальным авторским приборам SCORPIO (Afanasiev and Moiseev 2005) и SCORPIO-2 (Afanasiev and Amirkhanyan 2012, Afanasiev and Moiseev 2011) появилась возможность проводить детальные исследования МТСС различными методами, а именно: получать спектральные, фотометрические, поляриметрические

<sup>1</sup><https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/planets/cometpage.html>

<sup>2</sup>[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/ESA\\_s\\_new\\_mission\\_to\\_intercept\\_a\\_comet](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/ESA_s_new_mission_to_intercept_a_comet)

и интерферометрические данные для выбранного объекта в одну ночь и на одном телескопе.

Основными задачами программы были:

- определение физических характеристик выбранных объектов МТСС различных динамических групп;
- исследование проявлений и развития нестационарных процессов в объектах с выявленной активностью;
- поиск молекулярных эмиссий в спектрах отдаленных комет, ответственных за их активность и вынос вещества с поверхности;
- исследование развития активности с изменением гелиоцентрического расстояния для новых комет;
- изучение пылевой компоненты атмосфер комет, впервые входящих во внутренние области Солнечной системы.

Такой подход и использование крупного телескопа позволили расширить наши знания в области физики комет. Данные, полученные на протяжении десяти лет, открыли новые возможности для интерпретации активности отдаленных и далеких активных комет (Ivanova et al. 2019b; 2015a, Korsun et al. 2006; 2008; 2016; 2010; 2014, Kulyk et al. 2018, Rousselot et al. 2014), ионизации на больших расстояниях от Солнца (Ivanova et al. 2019a), состава частиц, формирующих атмосферу комет (Dlugach et al. 2018, Ivanova et al. 2019b; 2015d), их форму и ввести ограничения для модельных параметров (Dlugach et al. 2018, Ivanova et al. 2019b). Дальнейший анализ накопленных данных со временем позволит установить возможные динамические связи между различными популяциями МТСС путем моделирования их орбитальной эволюции, связь между физическими и динамическими характеристиками МТСС различных популяций для выявления особенностей, связанных с различными областями их образования или эволюции.

В данной статье мы представляем ряд уникальных результатов исследовательской программы, которые позволили нам найти объяснения для некоторых нерешенных проблем физики комет и поставить новые задачи для дальнейших исследований.

## 2. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДАЛЕКИХ КОМЕТ

Спектральные исследования дают информацию о нейтральном ионизированном газе, а также пыли, которые присутствуют в кометных атмосферах. Анализ излучения от каждой из этих компонент является основным источником информации о физических процессах в атмосферах комет. Полученные

физические параметры газового и пылевого компонентов позволяют построить количественную теорию излучения кометных атмосфер. Спектрофотометрические исследования комет очень информативны, однако, в отличие от фотометрии, высококачественные спектры комет (особенно отдаленных) можно получить только на крупных телескопах. С 2006 г. на 6-м телескопе САО РАН началась комплексная программа исследования активности далеких комет, включающая поиск эмиссий газов, ответственных за формирование ком и хвостов этих комет. За десять лет были получены длинноволновые спектры более 30 далеких комет. Это позволило систематизировать и расширить наши знания о долгопериодических кометах, поскольку ранее только для нескольких из них были получены подобные данные. Анализ показал, что для большинства исследуемых комет в спектрах зарегистрирован только континуум (Ivanova et al. 2019b; 2015a, Korsun et al. 2010, Rousselot et al. 2014), обусловленный рассеянием солнечного излучения на кометной пыли (рис. 2).

Для спектров далеких комет были получены зависимости эффективности рассеяния пыли от длины волны. Это позволило в большинстве случаев зарегистрировать эффект покраснения (рост эффективности рассеяния с длиной волны) (Ivanova et al. 2019b; 2015a; 2016b, Korsun et al. 2006; 2008; 2010; 2014). Но для части комет эффективность рассеяния пылинками солнечного излучения в голубой области спектра была больше, чем в красной области (Korsun et al. 2010).

Только для трех комет: 29P/Schwassmann–Wachmann 1 (далее 29P), C/2002 VQ94 (LINEAR) (далее 2002 VQ94), и C/2011 J1 (Catalina) (далее 2011 J1) были обнаружены существенные эмиссионные составляющие (Ivanova et al. 2015c, Korsun et al. 2006; 2008). Здесь отождествлены эмиссии нейтральных молекул CN (29P, 2002 VQ94, 2011 J1) (Ivanova et al. 2015c, Korsun et al. 2006; 2008) и C<sub>3</sub> (2002 VQ94) (Korsun et al. 2006; 2008), а также достаточно мощные эмиссионные полосы ионов CO<sup>+</sup> и N<sub>2</sub><sup>+</sup> в спектрах комет 2002 VQ94 и 29P (Korsun et al. 2006; 2008; 2014). В дальнейшем наличие ионов CO<sup>+</sup> и N<sub>2</sub><sup>+</sup> в спектрах 29P было подтверждено наблюдениями на телескопе SOAR (Ivanova et al. 2016b; 2018b). До наших наблюдений эмиссии ионов CO<sup>+</sup> были зафиксированы лишь в спектрах кометы 29P на расстоянии порядка 6 а.е. от Солнца в 80-х годах прошлого столетия. Обнаружение N<sub>2</sub> в кометах было спорным вопросом в течение многих лет, поскольку молекула N<sub>2</sub> в силу своих физических свойств не может быть обнаружена в видимом диапазоне спектра комет при наземных оптических наблюдениях.

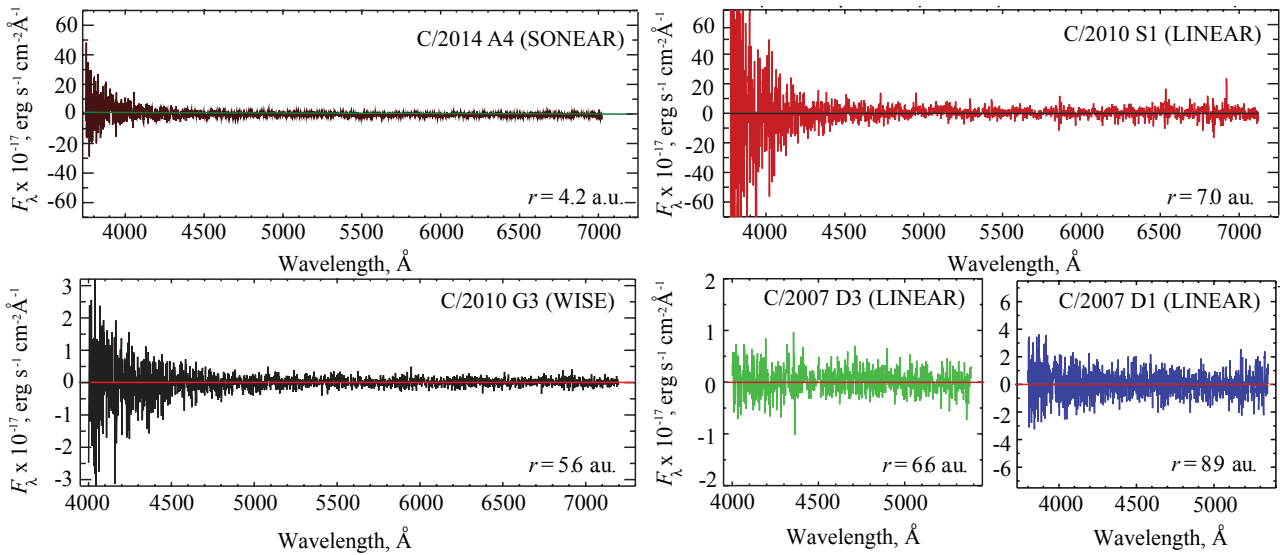


Рис. 2. Спектры пяти далеких комет (Ivanova et al. 2019b; 2015a; 2018a).

До публикации наших исследований далеких комет (Ivanova et al. 2016b; 2018b, Korsun et al. 2006; 2008; 2014) ион  $N_2^+$  наблюдался в спектрах некоторых комет, находящихся близко к Солнцу: C/1908 R1 (Morehouse) (de La Baume Pluvinel and Baldet 1911), C/1961 R1 (Humason) (Greenstein 1962), 1P/Halley (Lutz et al. 1993, Wyckoff and Theobald 1989), C/1987 P1 (Bradfield) (Lutz et al. 1993) и C/2016 R2 (PanSTARRS) (Cochran and McKay 2018). Первое обнаружение молекулы  $N_2$  было сделано для кометы 67P/Churyumov–Gerasimenko (далее 67P) с помощью масс-спектрометра ROSINA в рамках космической миссии Розетта (Rubin et al. 2015).

Спектральный мониторинг кометы 2002 VQ94 показал, что ионы  $CO^+$  и  $N_2^+$  в спектрах кометы наблюдаются и на гелиоцентрических расстояниях 7.33 и 8.36 а.е. (Korsun et al. 2014). Только на гелиоцентрическом расстоянии 9.86 а.е. мы перестали детектировать эмиссии этих ионов, что, возможно, связано как с отсутствием эмиссий, так и с чувствительностью прибора и, соответственно, со слабым сигналом от кометы на таких больших гелиоцентрических расстояниях.

Еще в 80-х годах было показано, что в условиях ранней солнечной туманности доминирующими равновесными видами углерода, кислорода и азота должны быть  $CO$ ,  $H_2O$  и  $N_2$  (Lewis and Prinn 1980). Поэтому исследование содержания азота в кометах важно для понимания условий их формирования в ранней солнечной туманности. Также считается, что наиболее распространенными видами льдов в протопланетной туманности (наряду с

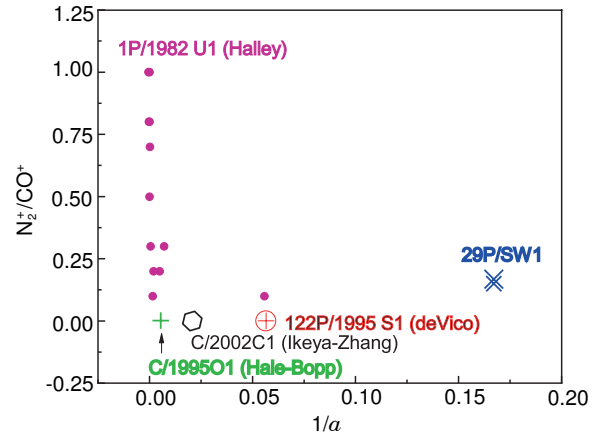


Рис. 3. Оценка отношения  $N_2^+(0,0)/CO^+(4,0)$  для разных динамических типов комет.  $a$  — большая полуось. Данные для комет взяты из работ: 29P/Schwassmann–Wachmann 1 — Ivanova et al. (2016b); 1P/Halley — Cochran et al. (2000); 122P/de Vico, C/2002C1 (Ikeya–Zhang), C/1995 O1 (Hale–Bopp) — из статей Cochran (2002), Cochran et al. (2000).

водяным льдом) были  $CO$ - и  $CO_2$ -льды (Meech and Svoren 2004). Отождествленные нами ионы  $CO^+$  и  $N_2^+$  в далеких кометах, в которых сохранилось неизменным первичное вещество протопланетной туманности, подтверждают этот вывод. Верхние пределы отношения  $N_2/CO$  для нескольких комет и причина дефицита  $N_2$  в кометах обсуждается в статье Cochran et al. (2000). Наши оценки отношения  $N_2^+/CO^+$  для выбранных далеких комет и результатов, приведенных в литературе, представлены на рис. 3.

Кроме отдельных спектральных наблюдений

выбранных далеких комет мы проводили исследование изменения параметров спектра комет в зависимости от расстояния до Солнца. Для нескольких комет (например, C/2006 W3 (Christensen) и C/2012 S1 (ISON)), которые наблюдались в широком диапазоне гелиоцентрических расстояний, было обнаружено, что развитый эмиссионный спектр в кометах формируется на расстояниях от Солнца, меньших 4 а.е. Например, в спектрах кометы C/2006 W3 (Christensen) эмиссии нейтральных молекул и ионов не были зарегистрированы, в то время как комета находилась в диапазоне гелиоцентрических расстояний от 8.49 до 6.25 а.е. Спектр кометы значительно изменился после 3.7 а.е. от Солнца. Тогда там были отождествлены эмиссии молекул CN, C<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>, CH, NH<sub>2</sub>, а также ионов CO<sup>+</sup> и CH<sup>+</sup> (Korsun et al. 2016). Аналогичный богатый эмиссионный спектр наблюдался и для уникальной кометы C/1995 O1 (Hale–Bopp) на небольших расстояниях от Солнца. Так же, как и для далеких комет 2002 VQ94 и 29P, в комете 2006 W3 было отождествлено множество эмиссий CO<sup>+</sup>, и это может говорить о том, что комета обогащена CO.

Базируясь на результатах спектральных исследований, можно говорить о том, что часть изученных нами далеких комет обогащена CO и N<sub>2</sub>, и это может быть напрямую связано с местом формирования этих комет в Солнечной системе. Кроме того, наши результаты подтверждают идею поставки летучего вещества при формировании планет-гигантов.

### 3. ФОТОМЕТРИЯ ДАЛЕКИХ КОМЕТ

Среди методов, используемых для определения физических характеристик комет, фотометрия является наиболее развитой и распространенной. Фотометрические наблюдения комет часто проводятся с помощью широкополосных фильтров, в нашем случае это системы Джонсона–Коузинса *UBVR<sub>C</sub>* и SDSS *ugriz*. К сожалению, основные кометные эмиссии CN, C<sub>2</sub> и C<sub>3</sub> не совпадают с максимумами пропускания стандартных широкополосных фильтров (рис. 4). Поэтому показатели цвета тех комет, в спектрах которых присутствуют сильные газовые эмиссии, полученные с этими фильтрами, неадекватно отражают свойства кометной пыли. Тем не менее такие наблюдения полезны как для изучения свойств пыли комет, активных на расстояниях больше 4 а.е. (Ivanova et al. 2019b; 2015a; d, Korsun et al. 2016; 2010), где в основном отсутствуют сильные эмиссии в спектрах (см. рис. 2), так и для исследования активных процессов в атмосферах комет, оценок объемной

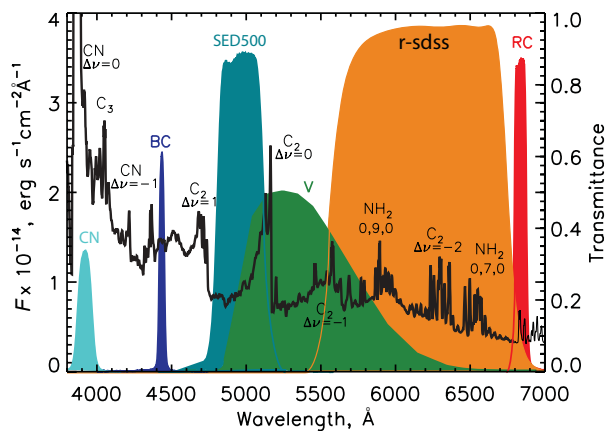


Рис. 4. Нормированные кривые пропускания фильтров *CN* ( $\lambda$  3982/36 Å), *BC* ( $\lambda$  4429/36 Å), *RC* ( $\lambda$  6835/83 Å), *SED500* ( $\lambda$  5019/246 Å), *r-sdss* ( $\lambda$  6200/1200 Å) и *V* ( $\lambda$  5580/880 Å), наложенные на спектр кометы 2P/Encke, полученный на 6-м телескопе САО РАН.

светимости и плотности вещества в кометной голове, для определения периода вращения ядра и других задач.

Для далеких комет, в спектрах которых были обнаружены газовые эмиссии (Korsun et al. 2006; 2008), широкополосная фотометрия дополнялась данными спектральных наблюдений, что позволило значительно улучшить интерпретацию широкополосных фотометрических наблюдений и повысить точность определяемых физических характеристик. Для фотометрических задач, связанных с исследованием газового компонента (наблюдения в фильтре *CN* отдельных молекулярных эмиссий некоторых далеких комет), ионной комы CO<sup>+</sup> и пылевой составляющей на участках кометного континуума использовались узкополосные фильтры, разработанные в рамках международной программы исследований кометы C/1995 O1 (Hale–Bopp) (Farnham et al. 2000). Эти фильтры предназначены для выделения отдельных молекулярных эмиссий и участков кометного континуума. При наблюдении на 6-м телескопе САО РАН для подобных задач также применялся набор фильтров с шириной полосы 250 Å (SED), изготовленный в Edmund Optics<sup>3</sup>.

Несмотря на короткие временные периоды видимости комет, в наших эпизодических, но качественно спланированных наблюдениях мы получили богатый материал о физических характеристиках этих уникальных объектов Солнечной системы, сочетая данные, полученные различными методами. Так, выполнение комплексной программы

<sup>3</sup><https://www.sao.ru/Doc-k8/Telescopes/bta/instrum/>

по исследованию активности МТСС на больших гелиоцентрических расстояниях с помощью 6-м телескопа САО РАН позволило определить по фотометрическим данным скорость выноса газа и пыли (а также их вариации с гелиоцентрическим расстоянием), сравнительный химический состав комет, оценить периоды вращения их ядер, размеры и многое другое.

Однако для решения некоторых задач кометной физики требуются длинные систематические ряды наблюдений, которые невозможно получить при наблюдениях на больших телескопах вследствие ограничения на выделяемое время наблюдений. В этом случае параллельно проводились мониторинговые наблюдения на разных малых и средних телескопах (Ivanova et al. 2014; 2016a).

За десять лет фотометрических наблюдений МТСС с высоким пространственным разрешением на 6-м телескопе САО РАН были исследованы более 45 комет различных динамических групп, а также отдельные активные астероиды и кентавры.

Особое внимание уделялось тем МТСС, которые активны на значительных гелиоцентрических расстояниях, большинство из которых имеет перигелийное расстояние свыше 4 а.е. Отдельно исследовался вопрос развития активности кометы при приближении ее к Солнцу с расстояний, превышающих 10 а.е. (Rousselot et al. 2014).

Особое внимание также уделялось задаче сравнения изменения свойств пыли динамически новых комет с перигелием меньше 0.5 а.е. Такое детальное исследование развития активности выполнялось для кометы C/2012 S1 (ISON), значение перигелия которой было 0.012 а.е. и она была активна на расстояниях больше 9 а.е. от Солнца (Ivanova et al. 2014; 2018a, Kharchuk et al. 2015, Křišandová et al. 2014, Samarasinha et al. 2015).

Однако комет, наблюдавшихся в широком диапазоне фазовых углов, достаточно мало, поэтому приходится наблюдать большое количество разных комет и строить выводы на комплексных исследованиях разных объектов.

Поскольку в спектрах большинства исследованных нами отдаленных комет не были найдены газовые эмиссии (Ivanova et al. 2019b; 2015a, Korsun et al. 2010), для исследования пылевой компоненты мы использовали широкополосную фотометрию.

Фотометрия в фильтрах позволяет определять цвет пыли, пылепроизводительность, исследовать активные структуры, измерять период вращения комет, оценивать диаметр кометного ядра. Применение определенных моделей дало нам возможность оценить диапазон размеров пылинок, их скорости, локализовать активные области. Ниже детально описываются результаты такого анализа.

### 3.1. Оценка пылепроизводительности в кометах

Определение числа пылинок на луче зрения по измерениям континуума в видимой области — довольно сложная задача, поскольку блеск кометы в континууме зависит как от фазового угла, так и от распределения частиц по размерам, их альбедо и других факторов, значения которых в большинстве случаев нам мало известны, особенно для долгопериодических и далеких комет. Также не представляется возможным разделить вклад в блеск кометы таких параметров как альбедо частиц и их концентрация. Тем не менее мы можем получить оценку пылепроизводительности в кометах по потоку рассеянного света от кометы в континууме. Достаточно давно в кометной физике стали использовать такое понятие как «фактор заполнения» (A'Hearn et al. 1984):

$$f = \frac{sN_d(\rho)}{\pi\rho^2}, \quad (1)$$

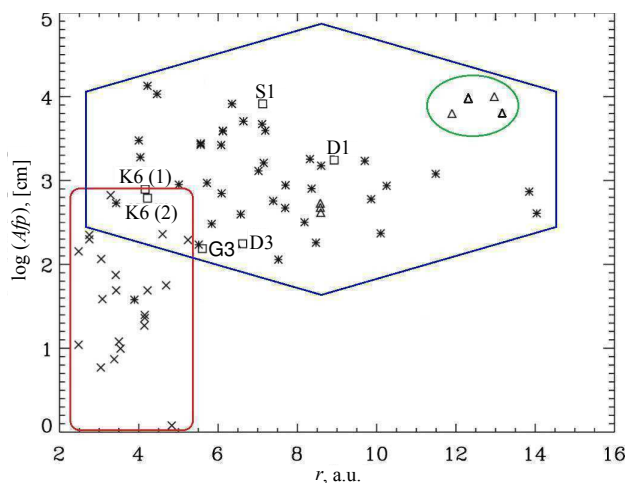
где  $s$  — площадь сечения одной пылинки, а  $N_d$  — число пылинок, находящихся в диафрагме радиуса  $\rho$ . Так как  $sN_d(\rho)$  — площадь всех пылинок, наблюдаемых в диафрагме, а  $\pi\rho^2$  — площадь диафрагмы, в этом случае отношение (1) выражает степень заполнения диафрагмы пылинками кометной комы в проекции на небесную сферу. Таким образом, была получена формула, которая часто используется в кометной физике в качестве определения относительной меры пылепроизводительности в разных кометах (A'Hearn et al. 1984):

$$Afr\rho = \frac{F_c(2r\Delta)^2}{Fs\rho}, \quad (2)$$

где  $Afr\rho$  — это произведение альбедо Бонда ( $A$ ), фактора заполнения ( $f$ ) и линейного радиуса апертуры ( $\rho$ ), а параметры  $r$  и  $\Delta$  — гелиоцентрическое и геоцентрическое расстояния до объекта.

Так как  $f \propto N_d(\rho)\rho^2$ , а  $N_d(\rho) \propto 1/\rho$ , параметр  $Afr\rho$  не зависит от размера диафрагмы. Формула (2) широко используется, несмотря на то что условие изотропного рассеяния света на пылинках в атмосферах комет явно не соблюдается. Однако такой подход позволяет сравнивать результаты, полученные в разные эпохи и на разных инструментах. Но, несмотря на удобство использования данного параметра, результаты получаются сильно зависимыми от использованных апертур и степени активности кометы, когда в значительной мере нарушается условие изотропного выноса вещества из ядра кометы.

Для всех комет, которые были нами исследованы на 6-м телескопе САО РАН, был рассчитан параметр  $Afr\rho$  (рис. 5). Оказалось, что для большинства отдаленных комет значение этого параметра

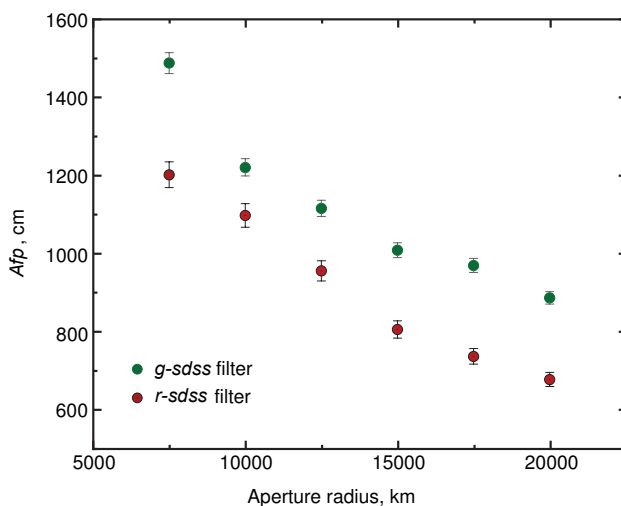


**Рис. 5.**  $\log(Af\rho)$  параметра, рассчитанный для наблюдаемых нами далеких комет (квадраты) как функция гелиоцентрического расстояния  $r$ . Для сравнения приведены значения параметра для долгопериодических комет, представленных в литературе (звездочки), активных кентавров (треугольники) и комет семейства Юпитера (крестики), которые были активны на больших гелиоцентрических расстояниях (Bauer et al. 2003, Ivanova et al. 2014, Korsun et al. 2010, Lara et al. 2009, Lowry and Fitzsimmons 2005, Mazzotta Epifani et al. 2010; 2006; 2007; 2008; 2009; 2014, Meech and Belton 1990, Meech et al. 2009, Rousselot et al. 2014, Shubina et al. 2014, Solonoi et al. 2012, Szabó et al. 2001; 2008; 2002).

существенно больше, чем для короткопериодических комет, включая кометы семейства Юпитера, наблюдающихся на больших гелиоцентрических расстояниях. К сожалению, выборка наблюдаемых комет все еще мала для окончательного заключения, но предварительный анализ показывает некую асимметрию в активности, а именно: постперигелийная активность новых комет значительно выше, чем их активность на аналогичных гелиоцентрических расстояниях, но до перигелия.

Например, интересный результат, согласованный с моделированием пылевой компоненты, был получен для далекой кометы C/2014 A4 (SONEAR) (далее 2014 A4). Вывод о фрагментации частиц в коме, сделанный на основании моделирования, подтверждается нашими фотометрическими данными (рис. 6). Уменьшение  $Af\rho$  с удалением от ядра наиболее естественно можно объяснить именно фрагментацией частиц, которая вызывает уменьшение размера сечения рассеяния частиц. Кроме того, получена заметная разница в профилях  $Af\rho$  для фильтров  $r-sdss$  и  $g-sdss$ . Она связана с изменением характеристик рассеяния света частицами и подтверждает преобладание в коме далекой кометы частиц субмикронного и микронного размеров.

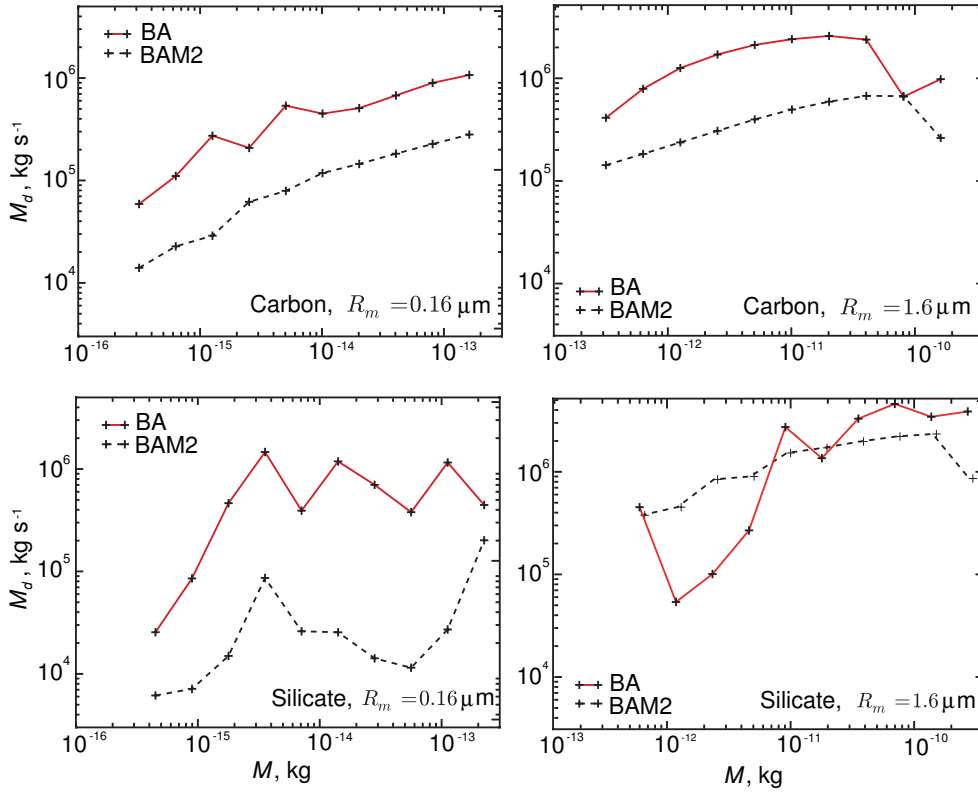
В физике комет часто приводится оценка массы пыли, вынесенной с поверхности ядра (Ivanova



**Рис. 6.** Параметр  $Af\rho$  в зависимости от радиуса апертуры, измеренный в комете C/2014 A4 (SONEAR) в фильтрах  $g-sdss$  и  $r-sdss$  (Ivanova et al. 2019b).

et al. 2015a, Rousselot et al. 2014). Все используемые для этого методики требуют знания альбедо частиц, начальной скорости их выброса и размера. К сожалению, эти характеристики плохо известны, особенно для новых комет. Частично дефицит этой информации восполнили космические миссии к короткопериодическим кометам, включая недавнюю миссию Rosetta к комете 67P. Однако большинство вопросов так и осталось открытыми, и мы можем только оценочно вводить тот или иной параметр. Как мы показали в своей работе Ivanova et al. (2018a), точная оценка величины пылепроизводительности из параметра  $Af\rho$  является неоднозначной задачей. Результат такой процедуры сильно зависит от динамических (например, эффективной плотности и поперечного сечения), а также оптических (например, коэффициента рассеяния и фазовой функции) характеристик пылевых частиц. Небольшие отклонения указанных параметров могут привести к кардинальным изменениям в оценке пылепроизводительности.

Мы продемонстрировали, что микроскопические свойства пыли (эффективный размер и пористость) связывают динамические и оптические свойства комет между собой. Также необходимо применять теорию рассеяния Ми при расчете оптических свойств пористых пылевых частиц (рис. 7). Не стоит забывать и о другой неопределенности в результатах расчета скорости пылепроизводительности вынесенной пыли — о ее химическом составе. Поэтому переход от параметра  $Af\rho$  к массовой величине пылепроизводительности нужно делать с осторожностью, принимая во внимания лабораторные и космические исследования для каждой конкретной кометы.



**Рис. 7.** Результат расчета пылепроизводительности в зависимости от массы пылевых агрегатов: верхний ряд — углеродные агрегаты, нижний ряд — силикатные агрегаты. Результаты показаны для трех размеров мономеров и двух типов агрегатов: BA и BAM2 (Ivanova et al. 2018a).

### 3.2. Цветовые характеристики пыли

Несмотря на неопределенность оптических свойств пылевых частиц (Ivanova et al. 2018a), можно рассчитать некоторые характеристики пыли. Например, часто используемый при фотометрических наблюдениях анализ цвета (оценка спектральной отражательной способности) показывает (особенно при апертурной фотометрии), что свет, рассеянный пылевыми частицами комы, в большинстве случаев краснее падающего солнечного излучения. Спектральная отражательная способность кометы  $S(\lambda)$  на длине волны  $\lambda$  определяется (Jewitt and Meech 1986):

$$S(\lambda) = \frac{F_c(\lambda)}{F_s(\lambda)\phi(\lambda)d\lambda}, \quad (3)$$

где  $\phi(\lambda)$  — кривая пропускания фильтра,  $F_s(\lambda)$  — спектральное распределение солнечного излучения. К сожалению, эффективность рассеяния пылинок  $Q_{sca}(\lambda)$  не может быть измерена непосредственно из наблюдений, однако принимается, что для оптически тонкой атмосферы  $S(\lambda) \propto Q_{sca}(\lambda)$ .

Для количественной характеристики рассеяния пыли на разных длинах волн используется

спектральный градиент отражательной способности (Jewitt and Meech 1986):

$$S'(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{(dS/d\lambda)}{\overline{S'}(\lambda_1, \lambda_2)}, \quad (4)$$

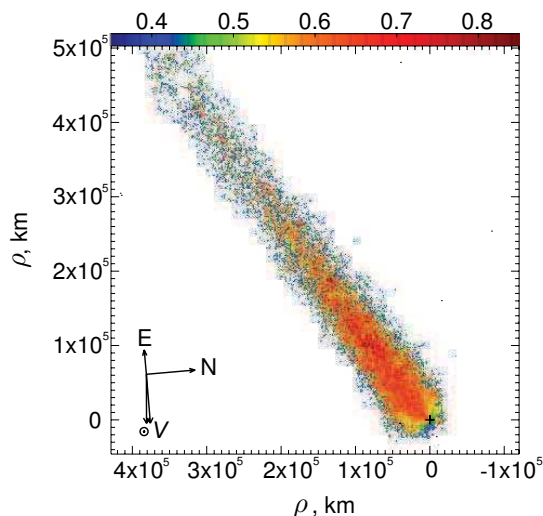
где  $dS/d\lambda$  — скорость изменения отражательной способности в интервале длин волн от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$ , а  $\overline{S'}(\lambda_1, \lambda_2)$  — средняя отражательная способность в этом интервале длин волн.

Так как континуум кометы часто наблюдается с применением разных фильтров, то спектральный градиент отражательной способности удобнее выражать в процентах на 1000 Å:

$$S'(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{2000}{\Delta\lambda} \frac{F_2 - F_1}{F_2 + F_1}, \quad (5)$$

где  $\Delta\lambda$  — разница эффективных длин волн красного и синего фильтров, выраженная в ангстремах, а  $F_1$  и  $F_2$  — потоки (в случае апертурной фотометрии) или интенсивности (в случае поверхностной фотометрии) излучения кометы в красной ( $\lambda_2$ ) и синей ( $\lambda_1$ ) областях спектра соответственно. Особенность градиента отражательной способности в том, что он напрямую зависит от микрофизических свойств частиц пыли и не зависит от их количества





**Рис. 8.** Цветовая карта ( $g-r$ ) кометы C/2014 A4 (SONEAR), построенная на основе изображений, полученных 5 ноября 2015 г. на 6-м телескопе CAO РАН (Ivanova et al. 2019b).

в поле зрения. Например, средние значения нормированных градиентов отражательной способности находятся в пределах от 3 до 25% (Ivanova et al. 2019b; 2015c, Kulyuk et al. 2018) для спектральных областей  $B-V$  и  $V-R$ . Если наши апертурные данные дополнить другими исследованиями цвета из литературы (Jewitt 2015, Mazzotta Epifani et al. 2006, Meech et al. 2009), то результаты анализа указывают на то, что динамически новые кометы ( $1/a < 10^{-4}$  а.е. $^{-1}$  (Oort and Schmidt 1951)), которые впервые входят во внутреннюю область Солнечной системы, имеют немного более красные комы в спектральной области  $B-V$ , чем те кометы, которые прошли перигелий. Однако этот вывод нужно проверить с использованием большой выборки новых комет, особенно учитывая то, что апертурная фотометрия усредняет величину цвета, сглаживая реальную картину его распределения по коме кометы (рис. 8), как мы можем, например, видеть в работах Ivanova et al. (2019b), Rosenbush et al. (2017).

Также остается открытым вопрос о динамических вариациях цвета в комах далеких комет, которые мы наблюдали для нескольких короткопериодических комет (Ivanova et al. 2017, Luk'yanuk et al. 2019). Основная особенность фотометрических наблюдений комет состоит в том, что для большинства комет они проводятся ограниченное количество раз, а иногда и единожды. При этом измерения обычно делаются с большими временными интервалами. Анализ наблюдательных данных делается в допущении об определенной стабильности светорассеивающих свойств кометной пыли. В то же время давно известно что кометы в

общем случае являются нестабильными объектами с разного рода вспышечной активностью, сопровождающейся выбросом большого количества вещества. Остается открытым вопрос: насколько характеристики светорассеяния, включая показатель цвета, нечувствительны к микрофизическим свойствам кометной пыли? Важно понять, может ли показатель цвета кометы претерпевать заметные временные вариации, коррелирующие, по крайней мере, с ее вспышечной активностью? Например, в ходе исследований Ivanova et al. (2017) мы обнаружили, что показатель цвета пыли в комете C/2013 UQ4 (Catalina) испытывал значительные краткосрочные вариации. Нами было предложено наиболее вероятное объяснение данного феномена: это временные колебания химического состава частиц пыли во внутренней коме.

Поиск быстрых изменений показателя цвета является новой и актуальной задачей физики комет. Такой поиск был предпринят ещё в середине 80-х годов в рамках международной программы исследований кометы 1P/Halley. Однако не были обнаружены заметные временные вариации не только цвета, но даже степени линейной поляризации — характеристики рассеянного света, наиболее чувствительной к микрофизическим свойствам частиц пыли (Dollfus and Suchail 1987). Этот результат был экстраполирован на другие кометы, и, таким образом, задача поиска быстрых вариаций в кометах на долгое время потеряла свою актуальность. Тем не менее различные авторы все же указывали на наличие подобных вариаций в связи со вспышечной активностью комет (см., например, (Hadamcik et al. 2007, Li et al. 2014, Weiler et al. 2003, Zubko et al. 2011)). В литературе имеются свидетельства быстрых изменений цвета пыли в комете C/1995 O1 (Hale-Bopp) (Weiler et al. 2003) и медленных изменений в комете C/2013 A1 (Siding Spring) (Li et al. 2014). Впрочем, в последнем случае нельзя с уверенностью утверждать, что изменения носили лишь долгопериодический характер. Комета наблюдалась с помощью космического телескопа им. Хаббла, и, как следствие, наблюдательное время было крайне ограничено, а именно: были выполнены три наблюдения в течение 4.5 месяцев. Новые данные о краткосрочных вариациях цвета были нами получены для кометы 41P/Tuttle-Giacobini-Kresak (Luk'yanuk et al. 2019). Моделирование её пылевой компоненты показало, что химический состав пыли во внутренней коме поменялся в течении ночи. Также удалось сделать вывод о составе внутренней комы кометы, конкретно: о наличии силикатов с высоким содержанием магния и органических соединений или силикатов Mg-Fe.

### 3.3. Ионная кома $\text{CO}^+$ в далеких кометах

Наши спектральные данные указали на наличие в двух далеких кометах 29P и 2002 VQ94 ионов  $\text{CO}^+$  и  $\text{N}_2^+$  (Ivanova et al. 2019b, Korsun et al. 2006; 2008; 2016). Это побудило исследовать более детально ионную кому этих комет и обсудить механизмы ионизации нейтрального газа на больших гелиоцентрических расстояниях. Для этой задачи была выбрана комета 29P. Она является одной из самых известных среди немногих наблюдаемых дальних комет на больших расстояниях (более 4 а.е.) от Солнца, в коме которых обнаружено присутствие ионов  $\text{CO}^+$  (Cochran et al. 1980, Cochran and Cochran 1991, Cook et al. 2005, Ivanova et al. 2016b; 2018b, Korsun et al. 2008, Larson 1980). Для 29P регулярно наблюдаются эпизодические вспышки (Ivanova et al. 2019a; 2016b, Picazzio et al. 2019, Trigo-Rodríguez et al. 2008). Ионы  $\text{CO}^+$  обнаружены как при вспышках, так и в неактивном состоянии кометы.

В течение последних десятилетий рассматривались различные физические механизмы источников как активности в далеких кометах (Galeev 1987, Gringauz et al. 1986, Ibadov 1993, Ip and Axford 1986, Krankowsky et al. 1986, Wurm and Rahe 1969), так и ионизации, включая фотоионизацию солнечным излучением, ударную ионизацию, перезарядку с протонами солнечного ветра, а также электрический разряд во внутренней коме (Cravens 1987, Edberg et al. 2016, Huebner and Giguere 1980, Mendis and Brin 1977). В настоящее время не существует общепринятого мнения по поводу того, какой из перечисленных механизмов более распространен. Однако наблюдения показали, что значительная часть ионов комет образуется в самой внутренней коме (в *зоне столкновения*). Из-за низкой активности таких комет за пределами гелиоцентрических расстояний больше 4 а.е. поток солнечного ветра может непосредственно воздействовать на поверхности их ядер, вызывая ионное распыление поверхностного материала (Coates 1997). Поскольку выброс материала кометы с поверхности путем распыления практически пропорционален концентрации компонентов, этот факт может быть использован для определения состава ядра. Когда комета приближается к Солнцу, ее кома становится достаточно плотной, так что солнечный ветер поглощается над поверхностью, и распыляющие ионы исчезают (Nilsson et al. 2015, Wurz et al. 2016).

Эффекты ионизации с поверхности путем распыления известны из прямых наблюдений кометы 67P/Churyumov–Gerasimenko по результатам миссии Rosetta (Wurz et al. 2016) и из наблюдений в окрестностях объектов без какой-либо атмосферы. Например, ионы Луны распылялись

непосредственно с поверхности, и они регулярно наблюдаются в солнечном ветре в виде поглощающих ионов (Halekas et al. 2012, Harada et al. 2015, Hilchenbach et al. 1993). Для исследования механизма ионизации на больших гелиоцентрических расстояниях нами были построены и проанализированы карты распределения ионов  $\text{CO}^+$  в коме кометы 29P по наблюдениям на БТА с 2007 по 2011 гг. (см. работу Ivanova et al. (2019b) и ссылки в ней). Как показано на рис. 9, используемый нами фильтр  $\text{CO}^+$  ( $\lambda 4277/39 \text{ \AA}$ ) пропускает излучение ионов  $\text{CO}^+$  и континуума, тогда как фильтр  $SED537$  ( $\lambda 5309/169 \text{ \AA}$ ) пропускает только пылевой континуум, без ионов  $\text{CO}^+$ .

Для получения изображения чистой ионной комы кометы мы вычли суммарное изображение континуума, которое было получено в фильтре  $SED537$ , из суммарного изображения  $\text{CO}^+$ , учитывая кривую пропускания каждого фильтра и различные уровни континуума. Мы использовали значения покраснения, полученные при спектральных наблюдениях кометы 29P (Ivanova et al. 2016b; 2018b, Korsun et al. 2008). На верхней панели рис. 10 показаны карты распределения  $\text{CO}^+$  после вычитания континуума, на нижней — изображения пылевой комы кометы 29P. Ионная  $\text{CO}^+$ -кома наблюдается во все даты. В большинстве случаев кома компактна, асимметрична относительно оптоцентра и вытянута по направлению к Солнцу. В противоположность ионной коме пылевая была более вытянутой и достаточно симметричной. Кометная кома трансформировалась к концу 2009 г.: активность 29P снизилась, а пылевая кома стала более компактной. Кома  $\text{CO}^+$  не менялась в течение этого периода в достаточной степени, но лишь была слабо вытянута по направлению к Солнцу.

На основе анализа наших наблюдательных данных был предложен физический механизм (Ivanova et al. 2019a), объясняющий ионизацию  $\text{CO}$  в коме кометы 29P. Поскольку предполагается, что эффекты ионизации с поверхности путем распыления заряженными частицами солнечного ветра важны (или даже доминируют) на гелиоцентрическом расстоянии около 6 а.е., мы проанализировали параметры солнечного ветра в окрестности кометы и сравнили поток частиц солнечного ветра с наблюдаемой плотностью комы  $\text{CO}^+$ , принимая во внимание тот факт, что выброс материала с поверхности при распылении практически пропорционален потоку. Прямые измерения параметров солнечного ветра в окрестности кометного ядра недоступны, и нами была использована численная трехмерная магнитогидродинамическая (МГД) модель параметров солнечного ветра в гелиосфере,

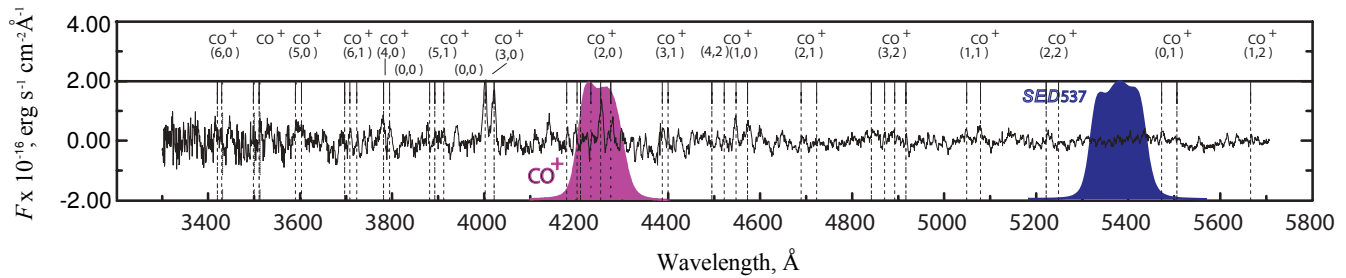


Рис. 9. Нормализованные кривые пропускания фильтров  $\text{CO}^+$  ( $\lambda 4277/39 \text{ \AA}$ ) и  $\text{SED537}$  ( $\lambda 5309/169 \text{ \AA}$ ), наложенные на наблюдаемый спектр кометы 29P (Ivanova et al. 2018b).

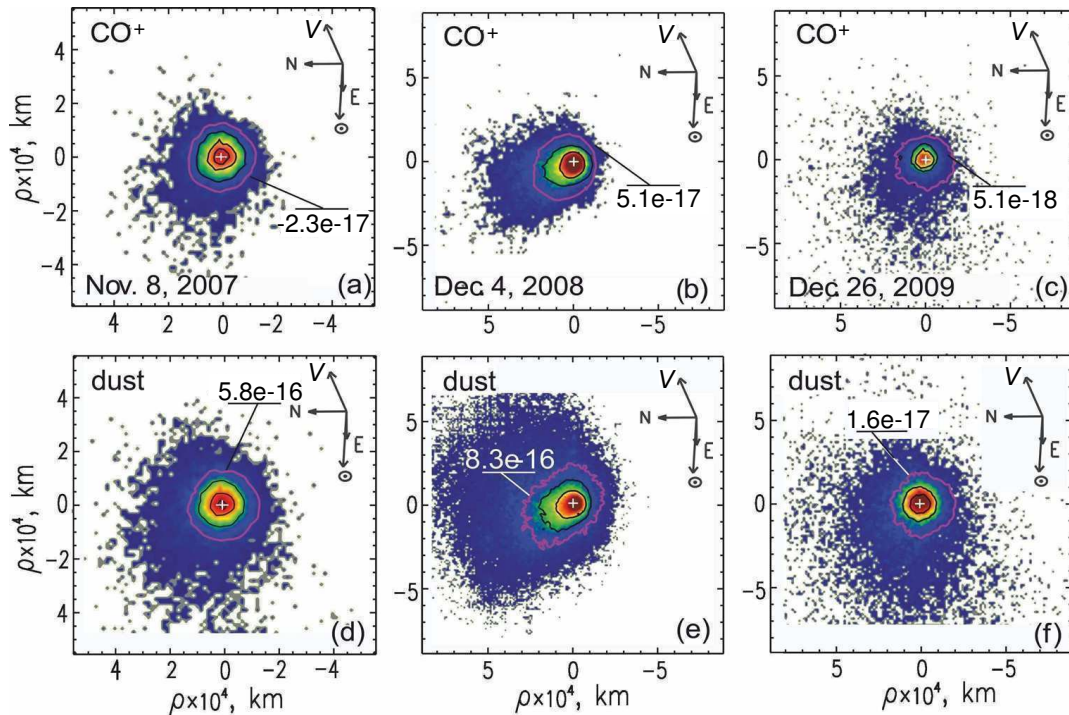


Рис. 10. Изолированные  $\text{CO}^+$  ((a), (b), (c)) и пылевая ((d), (e), (f)) комы кометы 29P, полученные по наблюдениям 2007 г. на 6-м телескопе САО РАН. Все изображения масштабированы в  $\text{эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$  (Ivanova et al. 2018b).

предоставленная NASA. Данная модель основана на численном решении уравнений для плотности плазмы, импульса и плотности энергии, а также магнитного поля в МГД-приближении (Odstrcil 2003, Odstrcil et al. 2004). Для наших целей важно было, чтобы модель покрывала  $\pm 60^\circ$  по широте, потому что комета находилась вне плоскости эклиптики. Сравнение модели с прямыми измерениями на расстоянии 1 а.е. с помощью космических аппаратов STEREO-A, -B и Wind продемонстрировало относительно хорошее согласие с усредненными параметрами солнечного ветра для области увеличения плотности (обнаруженного всеми тремя космическими аппаратами), через которую проходила Земля 23–25 октября 2007 г., что обеспечивает локальную проверку результатов модели.

Эта область увеличения плотности затем распространялась со средней скоростью солнечного ветра (порядка  $380\text{--}430 \text{ км с}^{-1}$ ).

Почти линейная зависимость (см. рис. 11) указывает на то, что ионизация распылением, которая, как предполагается, пропорциональна потоку частиц, является наиболее эффективным механизмом ионизации комет на больших гелиоцентрических расстояниях (порядка 6 а.е. для 29P).

### 3.4. Морфология активных структур в выбранных далеких кометах

У большинства малых тел Солнечной системы, проявляющих кометную активность, можно увидеть различные структуры в комах: струи, веера,

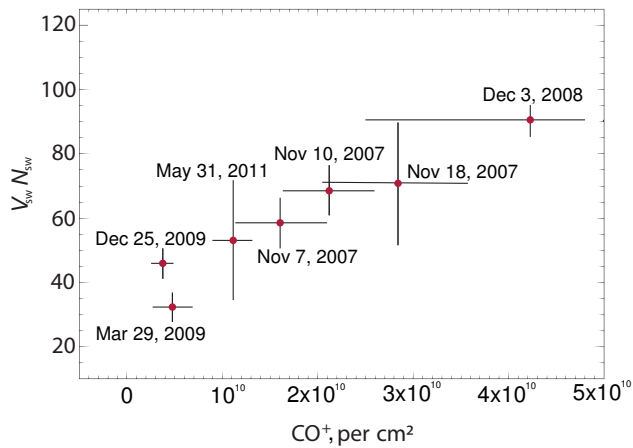


Рис. 11. Влияние потока протонов солнечного ветра на поток ионов  $CO^+$  в окрестности кометы 29P (Ivanova et al. 2019a).

оболочки и т.д. Эти, по сути, пространственные вариации плотности комы являются результатами процессов, связанных с ядром или взаимодействием кометы и солнечного ветра. Активные структуры могут быть использованы для изучения свойств невидимого оптическими методами ядра. Кроме того, морфология несет информацию об изменениях, которые произошли во время формирования активных структур. Например, периодические вариации и особенности комы могут быть использованы для оценки периода вращения кометного ядра.

Важность морфологических исследований в кометной физике заключается в обнаружении пространственных структур, которые видны почти для большинства комет, независимо от их динамического класса, и почти на всех длинах волн. Структуры могут быть образованы пылью, ионами, нейтральным газом. В зависимости от используемых фотометрических фильтров мы можем выделять в коме кометы структуры, образованные одним из перечисленных компонентов кометной атмосферы. Структуры часто видны как в околоядерной области, так и вплоть до расстояний больше десятков тысяч километров от ядра.

Структуры могут быть как долговременными и устойчивыми образованиями, которые наблюдаются до месяца и больше, так и кратковременными, с периодом жизни до нескольких минут. Отдельные активные проявления в комах комет могут быть как периодическими, так и иметь спонтанный характер. Это же относится и к их формам, которые разнообразны и варьируют от симметричных до полностью хаотичных. В исследованиях далеких комет мы анализировали морфологию активных структур, используя фотометрические данные. Поскольку большинство далеких комет не демонстрирует наличие сильных газовых эмиссий или ионов в

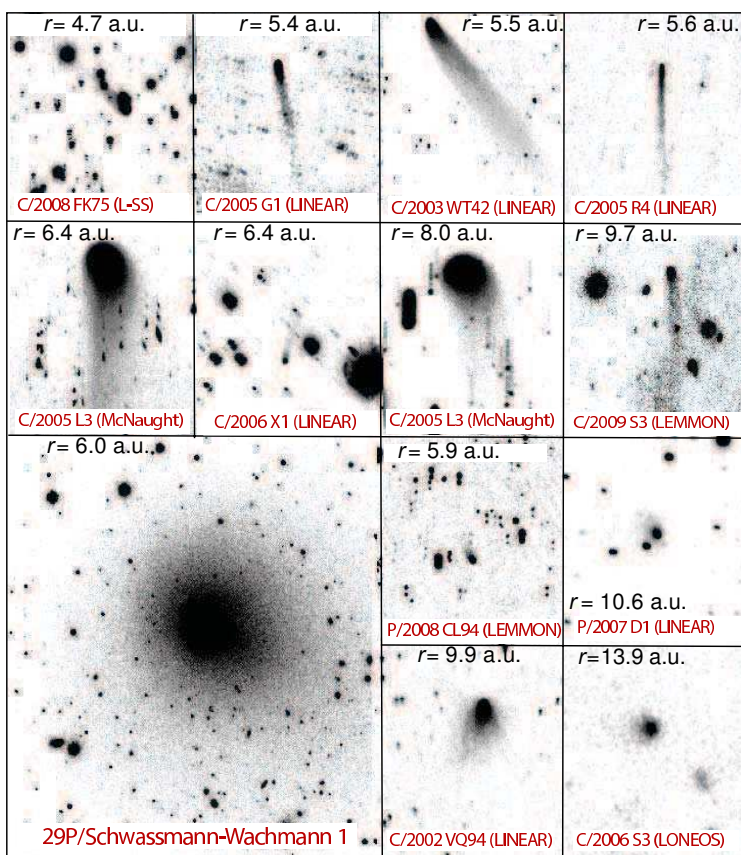
спектрах (см. раздел о спектральных исследованиях), для изучения морфологии использовались широкополосные фильтры. В большинстве изученных нами далеких комет кома и активные структуры сформированы пылевыми частицами, вынесенными из ядра. Только для наблюдения двух комет — 200 VQ94 и 29P — мы использовали узкополосные фильтры для выделения и исследования пылевой и  $CO^+$ -комы отдельно (Ivanova et al. 2009, Korsun et al. 2008). Большинство далеких комет проявляет активность с присутствием активных структур и протяженных хвостов. Внешне они не похожи на хвосты комет (рис. 12), формирующиеся на близких гелиоцентрических расстояниях. Как правило, они не имеют внутренней структуры, почти не меняют ширину вдоль хвоста, зачастую сильно изогнуты.

Для выделения низкоконтрастных структур в кометной коме мы применяли несколько методов анализа изображения: деление на среднее по азимуту, азимутальную перенормировку (Samarasinha and Larson 2014), а также метод вращательного градиента (Larson and Sekanina 1984). Два первых метода позволяют компенсировать яркий фон кометной комы и выделить низкоконтрастные структуры. Деление на азимутальное среднее очень хорошо работает для выявления ярких широких струй. Все изображения предварительно проверялись на содержание артефактов. Обработка изображений цифровыми фильтрами в основном выполнялась с использованием двух разных программ: взятых с сайта Planetary Space Science<sup>4</sup> и наших собственных кодов IDL для всех этих фильтров. Как мы указали выше, карты интенсивности строились путем объединения всех фотометрических изображений, полученных с помощью одного и того же фильтра.

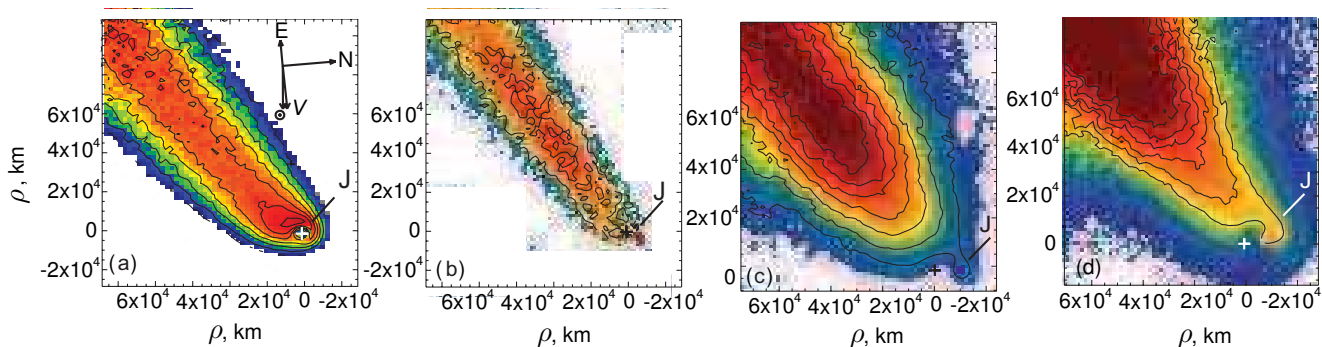
Поскольку различные методы фильтрации воздействуют на изображение по-разному и также могут приводить к появлению ложных структур после фильтрации изображений, мы применяли каждый из цифровых фильтров к отдельному кадру, а после — к суммарному изображению, чтобы оценить, были ли выявленные структуры реальными или нет. Этот метод позволил нам избежать появления ложных структур при обработке изображений цифровыми фильтрами (рис. 13). Дополнительно мы также изучали изменение структуры струи вследствие смещения оптоцентра кометы.

Подобная техника выделения малокаонтрастных структур применялась с успехом для различных далеких комет (Ivanova et al. 2009; 2019b; 2017, Korsun et al. 2008; 2010, Rosenbush et al. 2017).

<sup>4</sup><http://www.psi.edu/research/cometimen>



**Рис. 12.** Прямые изображения выбранных далеких комет с различными морфологическими проявлениями, полученные на 6-м телескопе САО РАН в период с 2006 по 2011 гг.



**Рис. 13.** Изображения кометы C/2014 A4 (SONEAR) в фильтре  $r - sdss$ , полученные на 6-м телескопе БТА САО РАН (Ivanova et al. 2019b), обработанные цифровыми фильтрами: (a) — изображение относительной интенсивности, обработанное с использованием деления на профиль  $1/\rho$  (Samarasinha and Larson 2014); (b) — изображение, обработанное методом вращательного градиента (Larson and Sekanina 1984); (c) и (d) — изображения относительной интенсивности, к которым были применены методы деления по азимутальному среднему и ренормализации (Samarasinha and Larson 2014).  $\rho$  — расстояние от кометного оптоцентра,  $J$  — веерообразная структура в околоядерной области. Стрелки указывают направление на Солнце, на север (N), на восток (E) и вектор скорости кометы, спроецированный на небесную плоскость ( $V$ ).

### 3.5. Оценка периода вращения для далеких комет с джетовой активностью

Оценка периода вращения комет является важной задачей для понимания и описания физических процессов, которые отвечают за активность кометного ядра. Это остается на сегодняшний день акту-

альным и для далеких комет. В литературе можно видеть оценки периода вращения с использованием различных методик (Samarasinha et al. 2004). Большая часть описанных оценок периода вращения основана на анализе кривых блеска комет, полученных в широких фильтрах. Также наряду с

определением периода вращения по кривым блеска комет активно используется метод, основанный на исследовании динамики активных структур в кометах. Различные вариации этого метода использовались ранее для изучения комет 29P (Stansberry et al. 2004), C/1995 O1 (Hale–Bopp) (Lisse et al. 2007, Samarasinha et al. 2004), P/1992t (Swift–Tuttle) (Yoshida et al. 1993) и других. Мы применили этот метод для исследования периода вращения кометного ядра кометы 29P, которая известна своей вспышечной активностью с образованием множества структур в коме. Для нахождения периода мы предложили модифицированный метод, который, в отличие от других техник, слабо зависит от внешних параметров (скорости газа, ошибки значения блеска кометы и др.), поскольку он основан на оценке величины смещения малококонтрастных структур на изображениях. Для нашего метода единственным допущением является предположение, что мы регистрируем угловое смещение одних и тех же структур в течение периода наблюдения.

Для верификации наших результатов мы сравнивали их с подобными результатами, полученными по наблюдениям в разное время на 6-м телескопе САО РАН и 2-м телескопе обсерватории на пике Терскол Международного центра астрономических и медико-экологических исследований. Для выделения малококонтрастных структур (джетов) на изображениях пылевой комы кометы 29P мы использовали описанную в работе Ivanova et al. (2009) методику применения цифровых фильтров для обработки изображений. На рис. 14 можно видеть, что после применения цифровых фильтров к изображениям кометы 29P, полученным в декабре 2008 г., выделяются два джета, которые были видны на протяжении всего периода наблюдений.

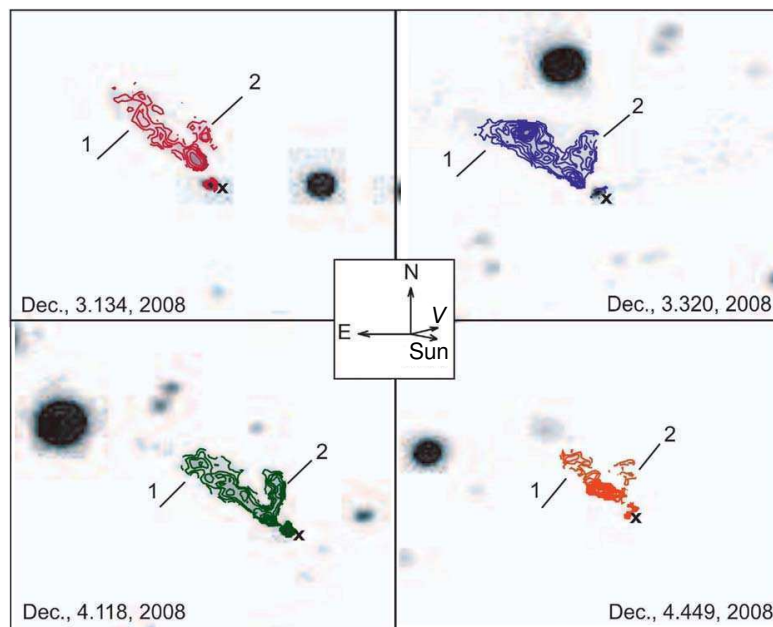
Для анализа угловых смещений выделенных структур в коме кометы использовался метод кросс-корреляции. Изображения из прямоугольной системы координат были преобразованы в полярную систему координат с центром, соответствующим фотометрическому центру кометы. В качестве полярного расстояния выбрано радиальное расстояние от ядра, а в качестве полярного угла — азимутальный угол, отсчитываемый от направления на север против часовой стрелки. Кроме того, все изображения предварительно, до преобразования системы координат, были одинаково ориентированы в направлении на север и на восток. Чтобы избежать возможных ошибочных результатов определения периода вращения кометы, низкочастотный тренд в изображениях кометы в полярной системе координат, к которым не применялись цифровые фильтры, был удален. В итоге на изображениях, полученных в 2008 г., нами было выделено два джета, а на изображениях в 2009 г. — три пылевые структуры. Для проверки

правильности оцененного нами периода вращения необходимо было убедиться, что выделенные нами структуры в кометной коме одни и те же на протяжении всего периода наблюдений в каждом из сетов. В нашем случае мы имеем два сета: в декабре 2008 г. и феврале 2009 г. Для проверки этого предположения был использован метод синхронного детектирования.

Оценка периода для первого сета наблюдений (3–5 декабря 2008 г.) составила  $12.1 \pm 1.2$  дня, а для второго периода (14–19 февраля 2009 г.)  $11.7 \pm 1.5$  дня. Данные оценки не противоречат друг другу, а небольшой разброс результатов может объясняться погрешностями измерений. Близкие по значению результаты для разных периодов наблюдений говорят о том, что использованный метод довольно точен и может применяться для наблюдения других далеких комет с активными структурами в пылевой коме.

#### 4. ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВЫБРАННЫХ ДАЛЕКИХ КОМЕТ

Большая часть знаний о физических свойствах кометной пыли была получена на основе наблюдений комет в момент приближения к Солнцу (менее 2 а.е.). Также до наших исследований считалось, что природа частиц пыли кометной комы не зависит от гелиоцентрического расстояния (Dollfus and Suchail 1987). Тем не менее новые исследования показывают различия между активностью и физическими свойствами комет вблизи Солнца и далеких комет (Dlugach et al. 2018, Ivanova et al. 2015a; 2011, Korsun et al. 2008; 2016, Mazzotta Epifani et al. 2009, Meech et al. 2009). Поэтому важно накопить наблюдательный материал и из анализа понять, почему в некоторых кометах пыль в основном представлена компактными частицами, в то время как в других кометах преобладают пористые агрегатные частицы. Для этого необходимо проанализировать взаимосвязь динамических характеристик комет с их физическими свойствами. Также одной из причин различия свойств коротко- и долгопериодических комет может быть эволюция комет. Короткопериодические кометы, в отличие от новых и долгопериодических комет, испытали многократное прохождение вблизи Солнца, что может значительно отразиться на их физических свойствах. С 2011 г. началась реализация новой задачи на 6-м телескопе САО РАН, целью которой было исследование свойств пыли в далеких кометах, которые активны в той области Солнечной системы, где сублимация водяного льда незначительна. Эта задача была актуальной и органично дополняла предыдущие результаты, полученные с использованием спектrophотометрических методов исследования далеких комет.



**Рис. 14.** Выделенные структуры 1 и 2 в пылевой коме кометы 29P после обработки суммарных изображений кометы, полученных в декабре 2008 г. на 6-м телескопе САО РАН методом вращательного градиента (Larson and Sekanina 1984). Крестом отмечено положение фотометрического центра кометы (Ivanova et al. 2009).

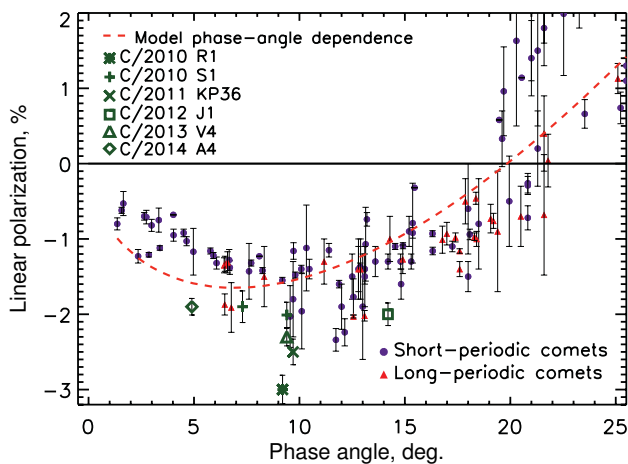
Необходимо отметить, что на тот момент практически не было данных по исследованию поляризации тех комет, которые активны за орбитой Юпитера. Поляриметрические исследования, проводившиеся в течении шести лет, позволили нам получить новые данные о размерах пылинок в выбранных далеких кометах, судить об их ориентации и составе. Поскольку некоторые из далеких комет характеризуются вспышечной активностью, например, комета 29P, то исследовалось изменение рассеивающих свойств пылинок в период вспышек. Исследование спектральной зависимости поляризации излучения отдаленных комет позволило судить о свойствах пыли, включая их фрагментацию. Первый подробный анализ распределения линейной поляризации при кометной коме для дальних комет с перигелием более 4 а.е. был опубликован в работах Ivanova et al. (2015c; d). Все результаты наших наблюдений, проведенных при фазовых углах  $\alpha < 15^\circ$ , показывают, что отрицательная ветвь поляризации значительно более выражена (рис. 15, данные взяты с сайт NASA PDS<sup>5</sup>), чем для комет на малых гелиоцентрических расстояниях. Например, поляризация комет C/2010 S1 (LINEAR) (в дальнейшем 2010 S1) и C/2010 R1 (LINEAR) (в

дальнейшем 2010 R1) значительно больше (степени поляризации в коме от  $-1.9\%$  до  $-8\%$ ), чем типичное значение поляризации ( $-1.5\%$ ), наблюдаемое для большинства комет на близких гелиоцентрических расстояниях. Результаты численного моделирования (Ivanova et al. 2015d) методом суперпозиции  $T$ -матрицы (Mackowski and Mishchenko 1996) показал, что для комет 2010 S1 и 2010 R1 хорошо работает модель кометной пыли в виде агрегатов с общим радиусом примерно 1.3 мкм, пористостью  $p = 0.54$  и показателем преломления  $1.65 + i0.05$ .

Другие результаты были получены для кометы переходного типа (где за вынос пыли конкурируют водяной и  $\text{CO}_2$ -лед) C/2012 J1 (Catalina) (в дальнейшем 2012 J1). Принимая во внимание карты распределения и анализ профилей степени линейной поляризации по коме кометы, хорошо видно, что кома кометы 2012 J1 не имеет морфологических особенностей (Ivanova et al. 2015d). То есть степень линейной поляризации почти не меняется, нет областей с отрицательной поляризацией, следовательно, можно предположить, что пылевая кома кометы состоит из пылевых частиц, которые имеют одинаковые оптические характеристики.

Среднее значение степени линейной поляризации в комете 2012 J1 определено на уровне  $-2\%$ . Моделирование наблюдательных данных, основанное на простом подходе, когда брался один тип

<sup>5</sup><https://pdssbn.astro.umd.edu/holdings/pds4-compil-comet:polarimetry-v1.0/SUPPORT/dataset.html>



**Рис. 15.** Суммарная фазовая кривая для короткопериодических и долгопериодических комет на малых гелиоцентрических расстояниях и далеких комет (символы выделены зеленым цветом) на больших гелиоцентрических расстояниях (Dlugach et al. 2018, Ivanova et al. 2015d).

частиц с одинаковым показателем преломления и одинаковым распределением частиц по размерам по всей коме, послужило демонстрацией того факта, что такой уровень поляризации может быть воспроизведен всеми материалами с мнимой частью показателя преломления менее 0.07. Также величина спектрального градиента по наблюдениям наложила дополнительные условия на состав частиц, а именно: нельзя описать наблюдаемую степень поляризации влиянием водяного льда, наличие которого можно ожидать в комете 2012 J1. Авторами (Ivanova et al. 2015c) было установлено, что одновременно значение степени линейной поляризации и спектрального градиента имеет вещество с показателем преломления  $1.6 + 0.03i$ , что соответствует обогащенным магнием силикатам с небольшим содержанием аморфного углерода.

Анализ поляриметрии шести далеких комет позволил обобщить данные и получить результаты теоретического моделирования характеристик рассеяния света, выполненных для частиц различной морфологии, и сравнить их с наблюдениями, а также на основании результатов этого сравнения обсудить возможный состав частиц в атмосферах дальних комет. В частности, нами были рассмотрены агрегатные частицы (как очень компактные, так и очень пористые), состоящие из большого количества субмикронных сферических мономеров (рис. 16).

В результате численного моделирования, основанного на методе  $T$ -матрицы (Mackowski and Mishchenko 1996), было получено разумное согласие со всеми наблюдательными поляриметрическими данными для следующих двух моделей частиц: смесь сплюснутых сфероидов вода–лед

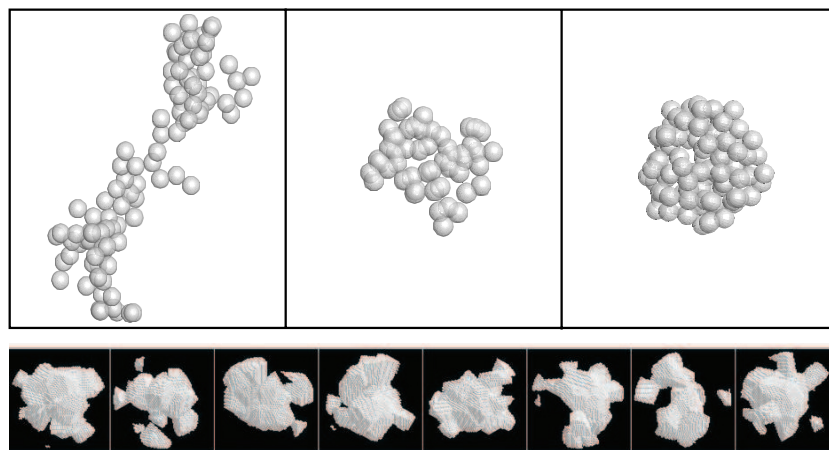
с пористыми агрегатами, состоящими из силикатных мономеров, или компактных агрегатов, состоящих из силикатных мономеров; и смесь тех же сплюснутых сфероидов вода–лед с пористым силикатом и органическими агрегатами. Следует отметить, что одним из основных различий между нашей моделью и теми, которые используются для комет, наблюдающихся вблизи Солнца, является включение в модель большого числа частиц, состоящих из водяного льда. Сравнение теоретических и наблюдательных данных показало, что присутствие частиц льда (в данном случае в форме сплюснутых сфероидов) приводит к углублению отрицательной ветви поляризации и тем самым улучшает согласие с данными наблюдений для далеких комет. Последние детальные исследования далекой кометы 2014 A4 (Ivanova et al. 2019b) подтверждают наши предыдущие результаты, демонстрирующие, что для далеких комет отрицательная ветвь поляризации при малых фазовых углах более глубокая по сравнению с наблюдаемыми для комет вблизи Солнца (рис. 17).

О единственном случае большой отрицательной поляризации ( $-6\%$  в гало комет 81P/Wild 2 и 22P/Kopff) было сообщено в работе Nadamcik and Lvasseur-Regourd (2003). Тем не менее эти кометы наблюдались при фазовых углах  $9^\circ 7'$  и  $18^\circ$ . А при таких фазовых углах поляризация может достигать значительного отрицательного значения даже для довольно регулярного состава пыли. Для кометы C/2012 S1 (ISON) найдено, что среднее (отрицательное) значение поляризации по коме составляло  $-1.6\%$  на гелиоцентрических расстояниях 3.81 а.е. (Hines et al. 2014). Такая отрицательная поляризация необычно низка по сравнению с тем, что наблюдается для других далеких комет, и, возможно, связана с уникальностью кометы C/2012 S1 (ISON), которая оказалась сангрейзером.

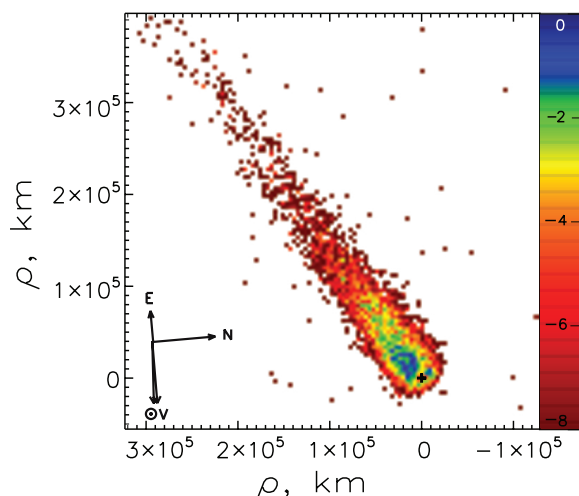
В наших наблюдениях кометы 2014 A4 карта распределения величины линейной поляризации показывает пространственные изменения степени поляризации по коме от около  $-3\%$  вблизи ядра до почти  $-8\%$  в хвосте (рис. 13). Анализ поляризации и цвета и их изменение по мере удаления от ядра показывают, что частицы пыли в дальних кометах малы (менее 1 мкм), что неудивительно, так как слишком мало газа, способного поднимать крупные частицы. Пыль содержит ледяные частицы и частицы, состоящие из (или покрытые) толином или другой подобной органикой. Ледяные частицы фрагментируются, когда они отдаляются от ядра.

Фотометрические исследования кометы подтверждают тот факт, что кому формируют субмикронные и микронные частицы, которые со временем фрагментируются. Таким образом, наши





**Рис. 16.** Пример частиц пыли, использовавшихся для моделирования ком далеких комет: верхняя панель — частицы в виде агрегатов (Ivanova et al. 2015d), нижняя панель — в виде агломерированных осколков (Ivanova et al. 2017).



**Рис. 17.** Распределение степени линейной поляризации по коме кометы C/2014 A4 (SONEAR). Поляриметрические изображения получены в R-фильтре на 6-м телескопе САО РАН (Ivanova et al. 2019b).

результаты свидетельствуют о том, что пыль в дальних кометах отличается от пыли обычных комет, которые наблюдаются на гелиоцентрических расстояниях меньше 2 а.е., как по размеру, так и по составу. Необходимо отметить, что поляриметрические данные для близких к Солнцу комет, как правило, хорошо описываются смесью довольно крупных частиц из темного материала и силикатов (Kiselev et al. 2015).

## 5. МЕХАНИЗМЫ АКТИВНОСТИ НА БОЛЬШИХ ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКИХ РАССТОЯНИЯХ

Хотя физическая активность комет вне зоны сублимации водяного льда (более 3 а.е.) была

зафиксирована довольно давно (Roemer 1962), на сегодняшний день механизмы ее возникновения и развития все еще недостаточно понятны и обоснованы. В литературе предлагаются различные механизмы активности комет на больших гелиоцентрических расстояниях:

- сублимация сверхлетучих льдов CO/CO<sub>2</sub> (Houripis and Mendis 1981, Hughes 1992);
- фазовый переход примитивных аморфных льдов, из которых преимущественно состоят ядра комет, в кристаллическую форму (de Sanctis et al. 2002, Gronkowski and Smela 1998, Prialnik and Bar-Nun 1992);
- полимеризация HCN (Rettig et al. 1992);
- метеороидное бомбардирование поверхности кометного ядра, которое приводит к активации других механизмов (Ivanova et al. 2015b, Shulman and Ivanova 2003);
- плавление подповерхностных льдов и образование растворов суперлетучих компонентов, что сопровождается значительным выделением энергии (Meech and Svoren 2004, Miles 2016);

Однако большинство предложенных механизмов не может объяснить наблюдаемую длительную активность комет на больших гелиоцентрических расстояниях (Ivanova et al. 2011) и требует дальнейшего исследования и накопления нового материала. Неопределенность остается и для химического состава атмосфер далеких комет, их газо- и пылепроизводительности, структуры и строения ядер, что имеет прямое отношение к космогнии самих комет. По нашему мнению, выявление различий в физических свойствах комет разных динамических типов позволит решить задачу как однородности состава самих ядер, так и однородности вещества в области образования комет в

протосолнечной туманности. Не менее важно на большом количестве накопленных данных сопоставить наблюдаемые общие физические свойства и индивидуальные особенности комет с их динамическими характеристиками, которые указывают на потенциальные места их образования.

## 6. ОТКРЫТЫЕ ВОПРОСЫ В ФИЗИКЕ ДАЛЕКИХ КОМЕТ

Уникальность комплексных наблюдений, выполненных на 6-м телескопе САО РАН с приборами SCORPIO и SCORPIO-2, заключается в получении большого объема данных различными методами, что позволяет не только более детально исследовать свойства пыли и газа в выбранных объектах, но и ввести ограничения на модельные параметры, используемые для интерпретации наблюдательных данных. Такой подход позволил не только собрать уникальные данные для нового типа комет, но и улучшить наше понимание эволюции пыли в коме, дополняя анализ поляризации и цвета изучением вариаций других фотометрических характеристик пыли, в частности, радиальными профилями и изменениями пылепроизводительности с расстоянием от ядра. Спектральные исследования позволили говорить о содержании сверхлетучих компонентов в далеких кометах, которые могут быть ответственны за формирование их протяженных ком и хвостов.

Несомненно, что полученные модели частиц в атмосферах небольшого числа далеких комет являются предварительными, хотя и позволили внести ограничения на состав и размеры частиц. Также важно помнить, что каждая комета уникальна, и, к сожалению, редко удается проследить эволюцию долгопериодических комет или получить длительный наблюдательный ряд, включающий период до и после прохождения перигелия. Зачастую мы получаем эпизодические наблюдения, относящиеся не более чем к нескольким фазовым углам на комету. Поэтому для лучшего понимания природы и морфологии частиц в атмосферах дальних комет в будущем требуются обширные дополнительные фотополариметрические и спектральные наблюдения комет, проводимые при различных фазовых углах и использовании нескольких фильтров.

Остается открытым вопрос наличия круговой поляризации у далеких комет. Она была обнаружена и исследована на 6-м телескопе у кометы C/2009 P1 (Garradd) (Ivanova et al. 2009). Ее эволюция с расстоянием от Солнца была исследована на близких гелиоцентрических расстояниях от 1.6 до 2.2 а.е. Нужны новые наблюдения далеких комет со значительной активностью на расстояниях больше 4 а.е., позволяющих зафиксировать слабый сигнал круговой поляризации. Исследование этого

вопроса может помочь понять, насколько более характерно наличие круговой поляризации для новых комет, чем для старых короткопериодических комет, и насколько она зависит от эволюционных процессов.

Плохо изучен и вопрос наличия силикатных пиков в далеких кометах. Спектры некоторых комет в инфракрасной области (ИК) показывают силикатные эмиссионные полосы над непрерывным спектром, предполагая сложную минералогию кометных силикатов (Schulz et al. 1993). Самые сильные силикатные эмиссии наблюдались в комете C/1995 O1 (Hale-Bopp), хотя по форме они были очень близки к тем, которые наблюдались в комете Галлея и других кометах (Schleicher et al. 1998). Интенсивность силикатных пиков зависит от размеров частиц и их температуры. Не все кометы показывают сильные десятимикронные эмиссионные пики. Практически ни у одной короткопериодической кометы (за исключением разрушенной короткопериодической кометы 73P) не найдены сильные эмиссионные пики, а у некоторых из них эмиссии в ИК области спектра вообще не найдены.

Остается нерешенным вопрос о месте рождения кометы 29P, которая, по оптическим и радиоданным, обогащена СО, и, соответственно, должна была формироваться во внешних холодных областях протопланетного диска (Paganini et al. 2012). Тем не менее последние данные с телескопа Spitzer показывают наличие кристаллических силикатов в коме кометы (Kelley et al. 2009, Stansberry et al. 2004), которые испытывали сильную термическую обработку в регионах рядом с молодым Солнцем. Эти противоречивые данные наблюдений могут указывать на возможную миграцию кометы в более горячую область во время ее динамической эволюции. Наши исследования динамической эволюции орбиты кометы 29P (Neslušan et al. 2017) показали, что низкий наклон орбиты кометы в большей степени свидетельствует ее происхождению в транснептуновой области. Поскольку комета, скорее всего, мигрировала через большой интервал гелиоцентрического расстояния, от положения глубоко внутри орбиты Меркурия до транснептунового региона, ее поверхность больше не может рассматриваться как первичная, и она, вероятно, была уже изменена взаимодействием с интенсивной солнечной радиацией и с межпланетным веществом.

Лабораторные исследования указывают на то, что развитие активности имеет характерные особенности в зависимости от того, какой физический механизм ее вызвал (Notesco et al. 2003). Наши теоретические исследования (Ivanova et al. 2011) показали, что приведенные в литературе механизмы (см. раздел IV.A) хорошо объясняют временную вспыхивающую активность комет на больших гелиоцентрических расстояниях, но не способны

объяснить наблюдаемую нами длительную активность отдаленных комет, когда выносятся большой объем вещества с поверхности (Ivanova et al. 2011). Не менее важным остается вопрос взаимосвязи объектов, проявляющих кометную активность, но различных по динамическим свойствам в широком диапазоне гелиоцентрических расстояний. Например, на сегодняшний день практически отсутствуют поляриметрические исследования кентавров и активных астероидов.

Полученные результаты исследований далеких комет показывают, что, несмотря на общую схожесть в свойствах комет из разных динамических групп, существуют различные отклонения в их индивидуальных свойствах, которые в основном обусловлены различиями, связанными с местами их формирования и последующей эволюцией, включая миграцию в Солнечной системе под влиянием планет-гигантов.

Комплексные наблюдения далеких комет на 6-м телескопе САО РАН значительно расширили наши знания в области исследования физики далеких комет, что особенно важно в преддверии новой миссии ESA «Comet Interceptor» (впервые к долгопериодической комете). Однако, несмотря на более чем десятилетний период исследования далеких комет на 6-м телескопе САО РАН, накопленный материал все же недостаточен для полномасштабного анализа и экстраполяции на случаи других далеких комет. Требуется и дальше проводить именно комплексные исследования различными методами, включающими фотометрию, поляриметрию и спектроскопию. Это поможет в дальнейшем систематизировать данные и выделить таксономические классы МТСС, которые проявляют кометную активность, и понять влияние места формирования в Солнечной системе на состав и свойства отдельных комет или групп.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Большинство работ было выполнено в рамках комплексных наблюдательных программ по исследованию активности далеких комет в соавторстве с коллегами в САО РАН (Афанасьевым В. Л., Моисеевым А. В.) и ГАО НАНУ (Корсуном П. П., Розенбуш В. К., Киселевым Н. Н., Кулик И. В.). Автор выражает благодарность Алексею Моисееву и Игорю Лукьянику за критические замечания и дискуссию, которые значительно улучшили статью. Автор выражает благодарность за выполнение наблюдений на 6-м телескопе САО РАН Афанасьеву В. Л., Моисееву А. В., Опарину Д. В., Уклену Р. И.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение № 05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016). Исследования дополнительно финансировались грантом Словацкой академии наук VEGA 2/0023/18.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. L. Afanasiev and V. R. Amirkhanyan, *Astrophysical Bulletin* **67** (4), 438 (2012).
2. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31** (3), 194 (2005).
3. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astronomy* **20**, 363 (2011).
4. M. F. A'Hearn, E. Dwek, and A. T. Tokunaga, *Astrophys. J.* **282**, 803 (1984).
5. J. M. Bauer, Y. R. Fernández, and K. J. Meech, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **115**, 981 (2003).
6. A. J. Coates, *Advances in Space Research* **20**, 255 (1997).
7. A. Cochran, E. S. Barker, and W. Cochran, *Astron. J.* **85**, 474 (1980).
8. A. L. Cochran, *Astrophys. J.* **576**, L165 (2002).
9. A. L. Cochran and W. D. Cochran, *Icarus* **90**, 172 (1991).
10. A. L. Cochran, W. D. Cochran, and E. S. Barker, *Icarus* **146**, 583 (2000).
11. A. L. Cochran, A.-C. Levasseur-Regourd, M. Cordiner, et al., *Space Science Reviews* **197** (1-4), 9 (2015).
12. A. L. Cochran and A. J. McKay, *Astrophys. J.* **856** (1), L20 (2018).
13. J. C. Cook, S. J. Desch, and S. Wyckoff, *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts* **37**, 16.05 (2005).
14. T. E. Cravens, *Geophysical Research Letters* **14**, 983 (1987).
15. A. de La Baume Pluvinel and F. Baldet, *Astrophys. J.* **34**, 89 (1911).
16. M. C. de Sanctis, M. T. Capria, and A. Coradini, in B. Warmbein (ed.), *Asteroids, Comets, and Meteors: ACM 2002*, vol. 500, pp. 39–42 (ESA Publications Division, Noordwijk, 2002).
17. J. M. Dlugach, O. V. Ivanova, M. I. Mishchenko, and V. L. Afanasiev, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **205**, 80 (2018).
18. A. Dollfus and J.-L. Suchail, *Astron. and Astrophys.* **187**, 669 (1987).
19. L. Dones, R. Brasser, N. Kaib, and H. Rickman, *Space Science Reviews* **197** (1-4), 191 (2015).

20. L. Dones, P. R. Weissman, H. F. Levison, and M. J. Duncan, *ASP Conf. Ser.* **323**, 371 (2004).
21. N. J. T. Edberg, M. Alho, M. André, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **462**, S45 (2016).
22. T. L. Farnham, D. G. Schleicher, and M. F. A'Hearn, *Icarus* **147** (1), 180 (2000).
23. A. A. Galeev, *Astron. and Astrophys.* **187**, 12 (1987).
24. J. L. Greenstein, *Astrophys. J.* **136**, 688 (1962).
25. K. I. Gringauz, T. I. Gombosi, A. P. Remizov, et al., *Sov. Astron. Letters* **12**, 279 (1986).
26. P. Gronkowski and J. Smela, *Astron. and Astrophys.* **338**, 761 (1998).
27. E. Hadamcik and A. C. Levasseur-Regourd, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **79**, 661 (2003).
28. E. Hadamcik, A. C. Levasseur-Regourd, V. Leroi, and D. Bardin, *Icarus* **191**, 459 (2007).
29. J. S. Halekas, A. R. Poppe, G. T. Delory, et al., *Journal of Geophysical Research (Planets)* **117**, E06006 (2012).
30. Y. Harada, J. S. Halekas, A. R. Poppe, et al., *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* **120**, 4907 (2015).
31. M. Hilchenbach, D. Hovestadt, B. Klecker, and E. Möbius, *Advances in Space Research* **13**, 321 (1993).
32. D. C. Hines, G. Videen, E. Zubko, et al., *Astrophys. J.* **780**, L32 (2014).
33. H. L. F. Houpis and D. A. Mendis, *Moon and Planets* **25**, 397 (1981).
34. W. F. Huebner and P. T. Giguere, *Astrophys. J.* **238**, 753 (1980).
35. D. W. Hughes, *Astronomy Now* **6**, 41 (1992).
36. S. Ibadov, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **4**, 17 (1993).
37. W.-H. Ip and W. I. Axford, *Planetary and Space Science* **34**, 1061 (1986).
38. A. V. Ivanova, P. P. Korsun, and V. L. Afanasiev, *Solar System Research* **43**, 453 (2009).
39. O. Ivanova, O. Agapitov, D. Odstreil, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **486** (4), 5614 (2019a).
40. O. Ivanova, S. Borysenko, and A. Golovin, *Icarus* **227**, 202 (2014).
41. O. Ivanova, S. Borysenko, E. Zubko, et al., *Planetary and Space Science* **122**, 26 (2016a).
42. O. Ivanova, I. Luk'yanyk, L. Kolokolova, et al., *Astron. and Astrophys.* **626**, A26 (2019b).
43. O. Ivanova, L. Neslušán, Z. S. Křišandová, et al., *Icarus* **258**, 28 (2015a).
44. O. Ivanova, L. Neslušán, Z. S. Křišandová, et al., *Icarus* **258**, 28 (2015b).
45. O. Ivanova, V. Reshetnyk, Y. Skorov, et al., *Icarus* **313**, 1 (2018a).
46. O. Ivanova, O. Shubina, A. Moiseev, and V. Afanasiev, *Astrophysical Bulletin* **70** (3), 349 (2015c).
47. O. Ivanova, E. Zubko, G. Videen, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **469**, 2695 (2017).
48. O. V. Ivanova, J. M. Dlugach, V. L. Afanasiev, et al., *Planetary and Space Science* **118**, 199 (2015d).
49. O. V. Ivanova, I. V. Luk'yanyk, N. N. Kiselev, et al., *Planetary and Space Science* **121**, 10 (2016b).
50. O. V. Ivanova, E. Picazzio, I. V. Luk'yanyk, et al., *Planetary and Space Science* **157**, 34 (2018b).
51. O. V. Ivanova, Y. V. Skorov, P. P. Korsun, et al., *Icarus* **211** (1), 559 (2011).
52. D. Jewitt, *Astron. J.* **150**, 201 (2015).
53. D. Jewitt and K. J. Meech, *Astrophys. J.* **310**, 937 (1986).
54. M. S. Kelley, D. H. Wooden, C. Tubiana, et al., *Astron. J.* **137**, 4633 (2009).
55. S. V. Kharchuk, O. V. Ivanova, P. P. Korsun, et al., *Solar System Research* **49** (5), 318 (2015).
56. N. Kiselev, V. Rosenbush, A.-C. Levasseur-Regourd, and L. Kolokolova, *Comets* (Cambridge University Press, Cambridge, 2015).
57. P. P. Korsun, O. V. Ivanova, and V. L. Afanasiev, *Astron. and Astrophys.* **459** (3), 977 (2006).
58. P. P. Korsun, O. V. Ivanova, and V. L. Afanasiev, *Icarus* **198** (2), 465 (2008).
59. P. P. Korsun, O. V. Ivanova, V. L. Afanasiev, and I. V. Kulyk, *Icarus* **266**, 88 (2016).
60. P. P. Korsun, I. V. Kulyk, O. V. Ivanova, et al., *Icarus* **210**, 916 (2010).
61. P. P. Korsun, P. Rousselot, I. V. Kulyk, et al., *Icarus* **232**, 88 (2014).
62. D. Krankowsky, P. Lammerzahl, I. Herrwerth, et al., *Nature* **321**, 326 (1986).
63. Z. Křišandová, O. Ivanova, J. Svoreň, et al., *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso* **43** (3), 455 (2014).
64. I. Kulyk, P. Rousselot, P. P. Korsun, et al., *Astron. and Astrophys.* **611**, A32 (2018).
65. L. M. Lara, J. Licandro, and G.-P. Tozzi, *Astron. and Astrophys.* **497**, 843 (2009).
66. S. M. Larson, *Astrophys. J.* **238**, L47 (1980).
67. S. M. Larson and Z. Sekanina, *Astron. J.* **89**, 571 (1984).
68. H. F. Levison, W. Bottke, M. Gounelle, et al., *AAS/Division of Dynamical Astronomy Meeting 12.05* (2008).
69. H. F. Levison, M. J. Duncan, R. Brasser, and D. E. Kaufmann, *Science* **329** (5988), 187 (2010).
70. J. S. Lewis and R. G. Prinn, *Astrophys. J.* **238**, 357 (1980).
71. J.-Y. Li, N. H. Samarasinha, M. S. P. Kelley, et al., *Astrophys. J.* **797**, L8 (2014).
72. C. M. Lisse, K. E. Kraemer, J. A. Nuth, et al., *Icarus* **191**, 223 (2007).
73. S. C. Lowry and A. Fitzsimmons, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **358** (2), 641 (2005).
74. I. Luk'yanyk, E. Zubko, M. Husárik, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **485**, 4013 (2019).
75. B. L. Lutz, M. Womack, and R. M. Wagner, *Astrophys. J.* **407**, 402 (1993).
76. D. W. Mackowski and M. I. Mishchenko, *Journal of the Optical Society of America A* **13**, 2266 (1996).
77. K. E. Mandt, O. Mousis, B. Marty, et al., *Space Science Reviews* **197** (1-4), 297 (2015).
78. E. Mazzotta Epifani, M. Dall'Ora, L. di Fabrizio, et al., *Astron. and Astrophys.* **524**, C1 (2010).
79. E. Mazzotta Epifani, P. Palumbo, M. T. Capria, et al., *Astron. and Astrophys.* **460** (3), 935 (2006).

80. E. Mazzotta Epifani, P. Palumbo, M. T. Capria, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **381** (2), 713 (2007).
81. E. Mazzotta Epifani, P. Palumbo, M. T. Capria, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **390**, 265 (2008).
82. E. Mazzotta Epifani, P. Palumbo, M. T. Capria, et al., *Astron. and Astrophys.* **502**, 355 (2009).
83. E. Mazzotta Epifani, D. Perna, L. Di Fabrizio, et al., *Astron. and Astrophys.* **561**, A6 (2014).
84. K. J. Meech and M. J. S. Belton, *Astron. J.* **100**, 1323 (1990).
85. K. J. Meech, J. Pittichová, A. Bar-Nun, et al., *Icarus* **201**, 719 (2009).
86. K. J. Meech and J. Svoren, *Comets II*, pp. 317–335 (The University of Arizona Press, Tucson, 2004).
87. D. A. Mendis and G. D. Brin, *Moon* **17** (4), 359 (1977).
88. R. Miles, *Icarus* **272**, 387 (2016).
89. L. Neslušan, D. Tomko, and O. Ivanova, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso* **47**, 7 (2017).
90. D. Nesvorný, D. Vokrouhlický, H. C. L. Dones, et al., *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts* 401.01 (2017).
91. H. Nilsson, G. Stenberg Wieser, E. Behar, et al., *Astron. and Astrophys.* **583**, A20 (2015).
92. G. Natesco, A. Bar-Nun, and T. Owen, *Icarus* **162**, 183 (2003).
93. D. Odstrcil, *Advances in Space Research* **32**, 497 (2003).
94. D. Odstrcil, P. Riley, and X. P. Zhao, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* **109**, A02116 (2004).
95. J. H. Oort and M. Schmidt, *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands* **11**, 259 (1951).
96. L. Paganini, M. J. Mumma, G. L. Villanueva, et al., *Astrophys. J.* **748**, L13 (2012).
97. E. Picazzio, I. V. Luk'yanyk, O. V. Ivanova, et al., *Icarus* **319**, 58 (2019).
98. D. Prrialnik and A. Bar-Nun, *Astron. and Astrophys.* **258**, L9 (1992).
99. T. W. Rettig, S. C. Tegler, D. J. Pasto, and M. J. Mumma, *Astrophys. J.* **398**, 293 (1992).
100. E. Roemer, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **74** (436), 82 (1962).
101. V. K. Rosenbush, O. V. Ivanova, N. N. Kiselev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **469**, S475 (2017).
102. P. Rousselot, P. P. Korsun, I. V. Kulyk, et al., *Astron. and Astrophys.* **571**, A73 (2014).
103. M. Rubin, K. Altwegg, H. Balsiger, et al., *Science* **348**, 232 (2015).
104. N. H. Samarasinha and S. M. Larson, *Icarus* **239**, 168 (2014).
105. N. H. Samarasinha, B. E. A. Mueller, M. J. S. Belton, and L. Jorda, *Comets II*, pp. 281–299 (The University of Arizona Press, Tucson, 2004).
106. N. H. Samarasinha, B. E. A. Mueller, M. M. Knight, et al., *Planetary and Space Science* **118**, 127 (2015).
107. D. G. Schleicher, R. L. Millis, and P. V. Birch, *Icarus* **132**, 397 (1998).
108. R. Schulz, M. F. A'Hearn, P. V. Birch, et al., *Icarus* **104**, 206 (1993).
109. O. Shubina, I. Kulyk, P. Korsun, and Y. Romanjuk, *Advances in Astronomy and Space Physics* **4**, 38 (2014).
110. L. M. Shulman and A. V. Ivanova, *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel* **19**, 367 (2003).
111. M. Solontoi, Ž. Ivezić, M. Jurić, et al., *Icarus* **218**, 571 (2012).
112. J. A. Stansberry, J. Van Cleve, W. T. Reach, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **154**, 463 (2004).
113. G. M. Szabó, B. Csák, K. Sárneczky, and L. L. Kiss, *Astron. and Astrophys.* **374**, 712 (2001).
114. G. M. Szabó, L. L. Kiss, and K. Sárneczky, *Astrophys. J.* **677**, L121 (2008).
115. G. M. Szabó, L. L. Kiss, K. Sárneczky, and K. Sziládi, *Astron. and Astrophys.* **384**, 702 (2002).
116. J. M. Trigo-Rodríguez, E. García-Melendo, B. J. R. Davidsson, et al., *Astron. and Astrophys.* **485**, 599 (2008).
117. M. Weiler, H. Rauer, J. Knollenberg, et al., *Astron. and Astrophys.* **403**, 313 (2003).
118. P. R. Weissman, *Nature* **344** (6269), 825 (1990).
119. P. R. Weissman, *Annals of the New York Academy of Sciences* **822**, 67 (1997).
120. K. Wurm and J. Rahe, *Icarus* **11**, 408 (1969).
121. P. Wurz, M. Rubin, K. Altwegg, et al., in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, vol. 18, pp. EPSC2016–2136 (2016).
122. S. Wyckoff and J. Theobald, *Advances in Space Research* **9**, 157 (1989).
123. S. Yoshida, T. Aoki, T. Soyano, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **45**, L33 (1993).
124. E. Zubko, R. Furusho, K. Kawabata, et al., *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **112**, 1848 (2011).

## Small Bodies of the Solar System Active at Large Heliocentric Distances: Studies with the 6-Meter Telescope of SAO RAS

A. V. Ivanova

A detailed study of comets active at large heliocentric distances (greater than 4 au) which enter the Solar System for the first time and are composed of matter in its elementary, unprocessed state, would help in our understanding of the history and evolution of the Solar System. In particular, contemporary giant planet formation models require the presence of accretion of volatile elements such as neon, argon, krypton, xenon and others, which initially could not survive at the distances where giant planets were formed. Nevertheless, the volatile components could be effectively delivered by the Kuiper-belt and Oort-cloud bodies, which were formed at temperatures below 30 K. This review is dedicated to the results of a multi-year comprehensive study of small bodies of the Solar System showing a comet-like activity at large heliocentric distances. The data were obtained from observations with the 6-meter telescope of SAO RAS equipped with multi-mode focal reducers SCORPIO and SCORPIO-2.

Keywords: *comets: general—techniques: photometric—techniques: spectroscopic—techniques: polarimetric*