

УДК 523.64

ЭВОЛЮЦИОННЫЙ СТАТУС ОКОЛОЗЕМНОЙ КОМЕТЫ 7P/PONS-WINNECKE

© 2024 г. А. О. Новичонок^{a,*}, А. А. Шмальц^b, С. В. Назаров^c, А. С. Позаненко^d,
Е. В. Новичонок^e, М. А. Терешина^b, В. А. Воропаев^b

^aФГБОУ «Петрозаводский государственный университет», Петрозаводск, Россия

^bИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

^cКрымская астрофизическая обсерватория РАН, пос. Научный, Россия

^dИКИ РАН, Москва, Россия

^eКарельский научный центр РАН, Петрозаводск, Россия

*e-mail: artnovich@inbox.ru

Поступила в редакцию 09.08.2023 г.

После доработки 12.12.2023 г.

Принята к публикации 28.01.2024 г.

7P/Pons–Winnecke — околоземная короткопериодическая комета с умеренным уровнем активности. В этой работе мы представляем анализ наблюдений, выполненных в благоприятном появлении 2021 г., свидетельствующих о ее статусе как переходной стареющей кометы. Сублимация начинается близко к Солнцу: на расстоянии $R_{ON} = 1.76 \pm 0.1$ а. е., продолжается ~13 месяцев и, вероятно, обусловлена остаточными запасами водяного льда. Пылепроизводительность кометы даже в перигелии невысока (<150 кг/с), и 1.4% активной площади ядра достаточно, чтобы обеспечить данную потерю массы. Фотометрический возраст кометы $P_{AGE} = 54.4$ кометного года, что в совокупности с амплитудой кривой блеска $A_{SEC}(1;1) = 5.5^m$ соответствует статусу переходной средневозрастной кометы.

Ключевые слова: малые тела Солнечной системы, эволюция комет, околоземный объект, ядро кометы, пылепроизводительность, фотометрия

DOI: 10.31857/S0320930X24040094, EDN: LTXDYN

ВВЕДЕНИЕ

Комета 7P/Pons–Winnecke (далее 7P/P–W) в 2021 г. вернулась с благоприятными условиями видимости: 12 июня, через 16 сут. после перигелия (27 мая), она сблизилась с Землей на 0.44 а. е., что позволило детально исследовать уровень активности кометы.

7P/P–W — крупная и относительно яркая короткопериодическая комета семейства Юпитера, обнаруженная в 1819 г. За последние 200 лет расстояние перигелия кометы q несколько раз менялось из-за сближения с Юпитером, принимая значения в интервале от 0.77 а. е. в первой половине XIX века до 1.26 а. е. (эпоха перигелия 1989 г.); сейчас $q = 1.23$ а. е. В последующие десятилетия эта величина вновь будет уменьшаться и достигнет $q = 0.84$ в конце XXI века (Kinoshita, 2016).

Таким образом, комета по определению ($q < 1.3$ а. е.) относится к группе объектов, сближающихся с Землей, и в дальнейшем, после полного прекращения сублимации из-за истощения околоповерхностных летучих веществ, может пополнить популяцию околоземных астероидов (Fernández и др., 2002).

7P/P–W обладает относительно крупным (диаметр $D_N = 5.2$ км (Lamy и др., 2004)) ядром, активность которого, как можно судить на основе наблюдений в прошлых появлениях, невелика. Следовательно, благоприятное появление 2021 г. дает нам возможность исследовать переходный объект, эволюционнодвигающийся к стадии спящей кометы (англ. “dormant comet”).

В этой работе мы представляем анализ наблюдений 7P/P–W в появлении 2021 г. (преимущественно авторских), свидетельствующих

о переходном статусе кометы, т.е. об относительно низкой активности ее ядра.

В разделе “Кривая блеска” проанализирована доперигелийная кривая блеска и определен момент “включения” кометы, т.е. видимого начала активности ее ядра. В разделе “Фотометрия” мы раскрываем наш подход к фотометрии, а в разделе “Темпы производства пыли” представлен анализ темпов пылепродуктивности. В разделе “Модель сублимации и процент активной площади ядра” на базе простой модели, математически характеризующей сублимацию водяного льда, рассчитывается активная площадь ядра кометы.

КРИВАЯ БЛЕСКА

Блеск и физические характеристики в благоприятном появлении 2021 г. Обзор наблюдений

Комета была переоткрыта за 16 месяцев до перигелия, близ противостояния в январе 2020 г. ($r_H = 4.26$ а. е.), когда была звездообразным объектом с блеском $\sim 21.5V$ и отслеживалась обзорами PanSTARRS (MPC-код F51), Mt. Lemmon (G96) и парой других обсерваторий (I81, L27) на протяжении полутора месяцев.

7P/P-W вновь стала наблюдаться после почти годового перерыва, непрерывный ряд наблюдений продолжался вплоть до перигелия и некоторое время после него. В ноябре 2020 г. она появилась на утреннем небе, имела блеск $\sim 20.5V$ и наращивала блеск в последующие недели. Объект оставался внешне звездообразным вплоть до февраля 2021 г., когда на снимках кометы сначала появилась очень компактная пылевая, а затем и тусклая, но обширная внешняя газовая кома (см. раздел “Наблюдения”).

Перед перигелием комета была видна на утреннем небе северного полушария, а потом ушла в южную полусферу неба.

Период визуальной видимости (ярче 14^m ; здесь и далее обозначение блеска через X^m обозначает блеск, определенный по результатам визуальных наблюдений с использованием звезд сравнения в полосах V и V_T (последнее — из каталога Tucho-2).) продолжался с апреля до начала сентября, при этом блеск перед перигелием рос стремительно (градиент $n = 9.7$ с начала марта и до перигелия, см. формулу (3)), что нередко характерно для старых комет. Наблюдалась также другая типичная черта этих

объектов — смещение максимального блеска в постперигелийную сторону. Пиковый блеск (немногим более тусклый, 11^m) держался с начала июня до начала июля (после перигелия и вблизи даты сближения с Землей).

Фиксируемый визуальными наблюдателями размер комы не превышал $2'$ в апреле—мае (до 45 тыс. км), но увеличился до $3'$ (60 тыс. км) в июне и $4'$ (до 100 тыс. км) в июле — начале августа, вновь уменьшившись до $1'-1'.5$ (до 50 тыс. км) к началу сентября. Степень конденсации комы к центру (DC) достигла максимума (5) в июле — начале августа, в апреле и середине сентября наблюдатели сообщали о $DC = 3$ (анализ в этом абзаце на основе наблюдений из базы данных COBS, <http://cobs.si>).

Вспышки. Для 7P/P-W характерны вспышки яркости: например, в мае 2008 г. ($r_H = 1.9$ а. е., стадия неактивного ядра незадолго до момента начала активности, см. раздел “Абсолютный блеск ядра и начало активности”) блеск псевдоядра на короткое время вырос на 3^m .

Возвращение 2021 г. также отметились вспышками: два небольших (на несколько десятых зв. вел.) всплеска яркости зафиксировали регулярные наблюдения обзора ZTF: первый из них случился около 3.45 февраля 2022 г., так же (как и в 2008 г.) вблизи момента начала активности ($r_H = 1.80$ а. е.), а второй — почти двумя месяцами позже (Kelley, Lister, 2021).

Вспышки комет — типичная черта их поведения, они встречаются и на стадиях видимого отсутствия активности, как, например, у комет 1P/Halley и 2P/Encke. В случае кометы 1P/Halley вспышка произошла 12 февраля 1991 г. на гелиоцентрическом расстоянии $r_H \sim 14$ а. е. и, вероятно, возникла из-за кристаллизации аморфного льда (Prialnik, Bar-Nun, 1992), в то время как у 2P/Encke регулярно наблюдается активность близ афелия, которая выражается в аномальном повышении яркости кометы без видимых изменений ее внешнего (звездообразного) вида (Fernández и др., 2005).

Мы предполагаем, что в упомянутых случаях предперигелийной вспышечной активности 7P/P-W нарастающее по мере приближения кометы к Солнцу тепло вскрывает близкие к поверхности ядра кометы резервуары доступного льда; подобный сценарий наблюдался на ранней стадии активности 67P/Churyumov—Gerasimenko (Alí-Lagoa и др., 2015).

Еще одна вспышка 7P/P-W наблюдалась после перигелия, ~ 21 ноября 2022 г., когда внешне неактивное и уже далекое от Солнца ($r_H = 4.4$

а. е.) ядро кометы увеличило блеск более чем на 1.9^m , достигнув $r' = 19.7$ (Kelley и др., 2022).

Благоприятные появления в будущем. Следующие благоприятные возможности для исследований крупного и слабоактивного ядра 7P/P–W представятся в появлениях 2045, 2062, 2073 и 2084 гг.: во всех этих случаях комета подойдет к Земле на 0.3 а. е. или ближе, а в появлении 2062 г. сближение на 0.17 а. е. произойдет за неделю до перигелия. Так же к этим годам комета вновь уменьшит расстояние перигелия (см. раздел “Введение”), что может привести к увеличению ее активности из-за дополнительного солнечного тепла.

Наблюдения

Для определения момента начала активности 7P/P–W мы использовали данные собственных наблюдений (см. раздел “Фотометрия”), а также результаты фотометрии, опубликованные в базе Центра малых планет (MPC). Мы выбрали из архивов MPC наблюдения обзоров Catalina (код MPC – 703), Mt. Lemmon (G96), PANSTARRS (F51, F52), ATLAS (T05, T08), которые получили значительное количество внутренне согласованных рядов измерений.

Для анализа кривой блеска (см. раздел “Абсолютный блеск ядра и начало...”) также использовались любительские данные из базы кометных наблюдений COBS (в том числе результаты визуальных наблюдений, которые стали особенно актуальны на активной фазе вблизи перигелия).

Наблюдения в крупных профессиональных обзорах. Анализируя доступные в базе Центра малых планет наблюдения из вышеперечисленных обзоров (раздел “Наблюдения”) для астероида (1000) Piazzia, мы рассчитали поправочные коэффициенты, чтобы свести весь комплекс оценок блеска к полосе V . Поправка $V-G = 0.2$ рассчитывалась на базе авторских снимков, полученных без фильтра, на которых одни и те же звезды поочередно измерялись с привязкой к полосе V (использовался каталог APASS из AAVSO (The AAVSO...)) и к полосе G (каталог Gaia DR2). Обзоры 703 и G96 напрямую используют звезды сравнения в полосе G Gaia по снимкам без фильтров, в то время как наблюдения всех остальных обзоров были сопоставлены с данными из 703 и G96.

Сравнивая рассчитанные нами поправочные коэффициенты с коэффициентами Центра малых планет (Band Conversion...), мы обнаружили

существенные расхождения, поэтому для анализа использованы только определенные нами коэффициенты (табл. 1).

Таблица 1. Поправочные коэффициенты для фотометрических данных, полученных в профессиональных обзорах астероидов

Обзор, MPC-код (фильтр, F)	$V-F^1$
Mt. Lemmon, 703, G96 (G)	0.20
ATLAS, T05, T08 (c)	0.08
ATLAS, T05, T08 (o)	0.15
PanSTARRS, F51, F52 (w)	0.24

Примечание:

1 – поправочный коэффициент для пересчета полученного в обзоре блеска к полосе V .

Авторские наблюдения. Собственные наблюдения проводились с использованием следующих телескопов:

- 1.0-м f/12.8 телескоп системы Ричи–Кретьена Цейсс-1000 Симеизской обсерватории ИНАСАН (1.0-м RC);
- 0.36-м f/8 телескоп системы Ричи–Кретьена обсерватории ISON-Kitab (0.36-м RC);
- 0.35-м f/5 телескоп системы Ньютона “Синтез” Крымской астрофизической обсерватории (0.35-м N).

Чтобы получить как можно больший сигнал (в первые недели наблюдений речь шла о фиксации объекта в принципе) на стадии неактивного ядра (видимый блеск 18–20.5 V), мы проводили наблюдения без использования фотометрических фильтров. Блеск измерялся по большому количеству сравнимых с кометой по блеску звезд поля с привязкой к полосе G Gaia, которая относительно близка по профилю к чувствительности использованных ПЗС-камер без фильтра.

Мы впервые наблюдали комету 29 ноября 2020 г. (см. табл. 2), когда она уже подошла довольно близко ($r_H = 2.31$ а. е.) к Солнцу. 7P/P–W выглядела тусклым звездообразным объектом с блеском $\sim 20.5G$. Видимый блеск объекта соответствовал величине, ожидаемой от неактивного ядра. Следовательно, в начале и в конце 2020 г. комета действительно была неактивна (см. рис. 2), и продолжала быть неактивной во время большей части наших наблюдений (см. на рис. 1 примеры изображений от разных дат).

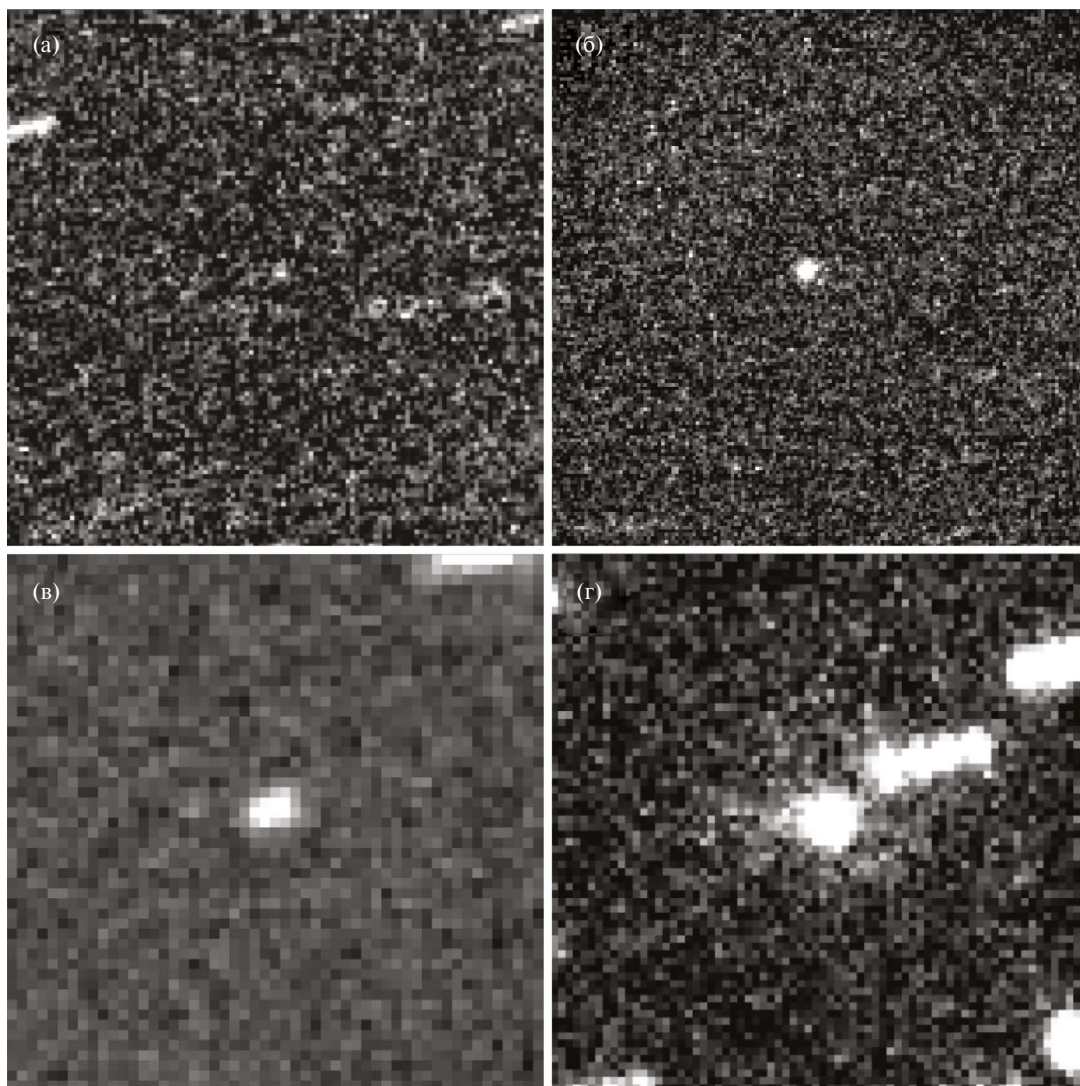


Рис. 1. Примеры изображений кометы 7P/P–W: (а) – 29.11. 2020, $G = 20.5$ (1.0-m RC*, неактивна); (б) – 04.02.2021 г., $G = 18.7$ (1.0-m RC, неактивна); (в) – 11.02.2021 г., $G = 18.7$ (0.36-m RC, близко к моменту начала активности); (г) – 15.03.2021 г., $G = 16.3$ (0.35-m N, активна). * – Телескопы в скобках имеют те же обозначения, что и в табл. 2. Каждая из врезок имеет поле зрения $90''$.

Впоследствии мы регулярно отслеживали 7P/P–W, измеряя ее интегральный блеск и изучая внешний вид объекта в сравнении с профилями звезд поля на ПЗС-изображениях, сделав 17 наблюдений вплоть до 14 апреля 2021 г. К этому моменту комета уже подошла близко к Солнцу ($r_H = 1.34$ а. е.), показывая сконденсированное псевдоядро и тусклую диффузную газовую кому (рис. 1г).

В начале и конце мая 2021 г. мы провели еще две серии наблюдений на 1.0-метровом телескопе Цейсс-1000 в период, когда комета была близка к перигелию и, очевидно, активна (см.

табл. 2). Эти наблюдения использовались для определения пылепроизводительности (см. раздел “Темпы производства пыли”) и общего уровня активности кометы (см. раздел “Модель сублимации и процент...”).

Абсолютный блеск ядра и начало активности

После переоткрытия в январе 2020 г. 7P/P–W наблюдалась вблизи противостояния на полуторамесячной дуге (см. раздел “Блеск и физические...”). Основываясь на предположении, что ядро было неактивно в эпоху

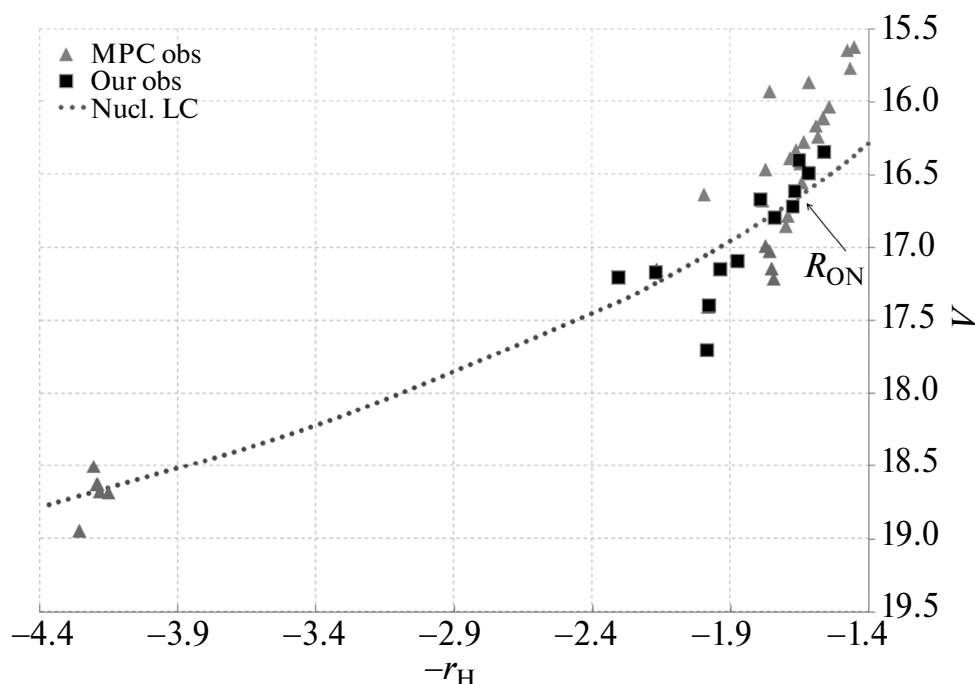


Рис. 2. Кривая блеска кометы 7P/P–W на гелиоцентрических расстояниях r_H $-4.4 \dots -1.45$ а. е. (минус означает период времени до перигелия, ось X). Показана кривая блеска неактивного ядра (nucl. LC), а также скорректированные к полосе V (ось Y) наблюдения: из базы MPC (MPC obs) и наши собственные (our obs). Стрелочкой показан примерный момент начала активности (RON).

первых наблюдений, мы определили его абсолютную звездную величину и построили кривую изменения его блеска в соответствии с $H-G$ -моделью (Dymock, 2007) для астероидов (приняв значение параметра $G = 0.15$). После этого нанесли на эту кривую собственные наблюдения и данные из архива Центра малых планет.

Момент начала активности на основе авторских данных. Анализируя обзорные и собственные наблюдения, мы нашли, что блеск кометы стал, очевидно, ярче ожидаемой астероидной кривой к 14 ± 2 февраля 2021 г. ($r_H = 1.72 \pm 0.02$ а. е., см. рис. 1).

Момент начала активности на основе данных обзора ZTF. Однородные данные обзора транзиев Цвикки (ZTF) свидетельствуют (Kelley, 2021) о чуть более раннем моменте начала активности – около 5 февраля 2021 г. ($r_H = 1.78$ а. е.); при этом за три дня до этого ($r_H = 1.80$ а. е.) комета испытала кратковременную вспышку блеска на 0.4^m . Соответственно, с учетом наших данных в совокупности с данными обзора ZTF, мы используем для расчетов усредненное расстояние начала активности

$R_{ON} = 1.76 \pm 0.05$ а. е. Отметим, что оно невелико и сравнимо с расстояниями активации других старых короткопериодических комет, таких как 2P/Encke или 169P/NEAT (Ferrín, 2010).

Абсолютный блеск и диаметр ядра. Используя наблюдения 7P/P–W на неактивной стадии (январь 2020 г. и с конца ноября 2020 г. до конца января 2021 г.), мы определили абсолютный блеск ядра как $H_V = 15.52 \pm 0.12$, что соответствует эффективному диаметру ядра $D_N = 5.23 \pm 0.30$ км (в предположении геометрического альбедо $A_V = 0.04$). Это согласуется с оценкой $D_N = 5.2$ км из (Lamy и др., 2004), которую мы приводили в разделе “Введение”. Это еще раз косвенно подтверждает, что в использованный для расчетов период кометное ядро действительно было неактивно.

Эволюционный статус кометы

Чтобы охарактеризовать эволюционный статус кометы, мы используем понятие “фотометрический возраст” P_{AGE} , предложенное Ferrín (2010),

Таблица 2. Журнал авторских наблюдений кометы 7P/Pons–Winnecke

Tel ¹	Scale ²	UT Date ³	Elev. ⁴	Exp. ⁵	FWHM ⁶	r _H ⁷	Δ ⁸	α ⁹	App. ¹⁰	Mag ¹¹
1.0-m RC	0.78	2020 Nov. 29.10	+39	9 × 60s (C)	1.9	2.307	2.602	22.2	S	20.45 ± 0.15
0.36-m RC	1.72	2020 Dec. 17.00	+40	59 × 60s (C)	4.1	2.171	2.288	25.3	S	19.93 ± 0.24
0.36-m RC	1.72	2020 Dec. 29.03	+43	53 × 60s (C)	4.0	2.078	2.080	27.4	ND	>19.4
0.36-m RC	1.72	2021 Jan. 10.02	+51	34 × 60s (C)	5.0	1.985	1.877	29.3	S	20.15 ± 0.26
0.36-m RC	1.72	2021 Jan. 11.02	+51	46 × 60s (C)	5.2	1.978	1.861	29.5	S	19.83 ± 0.24
1.0-m RC	0.97	2021 Jan. 16.05	+33	10 × 60s (C)	3.1	1.939	1.779	30.3	S	19.51 ± 0.19
0.36-m RC	1.72	2021 Jan. 24.05	+58	60 × 60s (C)	4.7	1.652	1.877	31.6	S	19.33 ± 0.18
1.0-m RC	0.58	2021 Feb. 04.10	+50	20 × 60s (C)	1.9	1.793	1.484	33.3	S	18.72 ± 0.06
0.36-m RC	1.72	2021 Feb. 11.04	+59	60 × 60s (C)	4.4	1.741	1.384	34.5	S	18.73 ± 0.12
1.0-m RC	0.78	2021 Feb. 20.09	+50	5 × 60s (C)	1.8	1.674	1.261	36.0	S	18.48 ± 0.15
1.0-m RC	0.78	2021 Feb. 21.10	+52	9 × 60s (C)	1.9	1.667	1.248	36.2	S	18.37 ± 0.12
1.0-m RC	0.78	2021 Feb. 23.13	+55	15 × 120s (C)	3.1	1.652	1.221	36.5	S	18.12 ± 0.19
0.36-m RC	1.72	2021 Feb. 28.02	+55	50 × 60s (C)	4.2	1.617	1.159	37.4	S	18.12 ± 0.17
1.0-m RC	0.78	2021 Mar. 08.05	+61	12 × 60s (C)	2.3	1.561	1.063	38.9	A	17.83 ± 0.07
0.35-m N	1.26	2021 Mar. 15.06 ^A	+48	5 × 180s (C)	3.3	1.514	0.984	40.3	A	16.3
0.35-m N	1.26	2021 Apr. 10.07 ^B	+51	8 × 180s (C)	3.9	1.361	0.733	46.0	A	----
0.35-m N	1.26	2021 Apr. 14.07 ^B	+51	9 × 180s (C)	4.0	1.342	0.500	46.9	A	----
1.0-m RC	0.44	2021 May 03.02	+40	8 × 60s (R)	2.2	1.269	0.568	50.6	A	----
1.0-m RC	0.44	2021 May 05.04	+43	6 × 60s (R)	1.7	1.264	0.556	50.7	A	----
1.0-m RC	0.44	2021 May 06.02	+40	8 × 60s (R)	1.4	1.261	0.550	50.9	A	----
1.0-m RC	0.44	2021 May 08.02	+39	9 × 60s (R)	1.6	1.257	0.539	51.1	A	----
1.0-m RC	0.44	2021 May 10.00	+33	10 × 60s (R)	2.6	1.252	0.529	51.3	A	----
1.0-m RC	0.58	2021 May 24.01	+30	8 × 30s (B) 4 × 30s (V) 13 × 30s (R)	1.9	1.235	0.471	51.7	A	----
1.0-m RC	0.58	2021 May 25.02	+31	4 × 60s (B) 5 × 60s (V) 16 × 30s (R)	2.4	1.235	0.468	51.6	A	----
1.0-m RC	0.58	2021 May 26.04	+34	33 × 30s (R)	1.6	1.234	0.466	51.6	A	----
1.0-m RC	0.58	2021 May 27.02	+30	16 × 30s (R)	1.6	1.234	0.463	51.5	A	----

Примечания:

Пустой строкой разделены наблюдения, использовавшиеся для определения момента начала активности (выше пустой строки) и наблюдения, использовавшиеся для определения пылепроизводительности (ниже).

¹ — Используемый инструмент: 1.0-m RC (1.0-метровый телескоп Цейсс-1000 Симеизской обсерватории ИНАСАН); 0.36-m RC (0.36-метровый телескоп обсерватории ISON-Китаб).

² — Масштаб ПЗС-изображений, '' на 1 пиксель.

³ — Среднее время данного наблюдения.

⁴ — Средняя высота объекта над горизонтом во время наблюдения, градусы.

⁵ — Используемая выдержка и фильтр (количество кадров × экспозиция одного кадра и в скобках — фильтр).

⁶ — FWHM звезд поля.

⁷ — Гелиоцентрическое расстояние объекта в момент проведения наблюдений.

⁸ — Геоцентрическое расстояние объекта в момент проведения наблюдений.

⁹ — Фазовый угол объекта в момент проведения наблюдений.

¹⁰ — Краткое описание внешнего вида объекта: ND — не обнаружен, S — выглядит звездообразно, блеск согласуется с ожидаемым блеском неактивного ядра кометы; A — объект показывает явные признаки активности (очевидную диффузность или кому).

¹¹ — Измеренный блеск в полосе Gaia DR2 G. Для незафиксированного объекта — предел яркости, определенный по звездам с отношением сигнал/шум SNR = 5; для активных объектов — интегральный блеск (вместе с комой).

^A — 2021 Mar. 15: тусклая диффузная кома 1'.5.

^B — 2021 Apr. 10, 14: комета в густом звездном поле, оценка интегральной яркости затруднена.

$$P_{AGE} = \frac{1440}{A_{SEC}(1;1) \cdot (-R_{ON} + R_{OFF})}. \quad (1)$$

Мы получаем P_{AGE} в условных единицах — кометных годах (comet years, с.у.). R_{ON} и R_{OFF} — моменты начала и окончания активности кометы (в а. е.), а A_{SEC} — амплитуда кривой блеска — определяется как

$$A_{SEC}(1;1) = H_V - m1(1;1;0), \quad (2)$$

т.е. A_{SEC} — разница между интегральным блеском активной кометы на расстояниях 1 а. е. от Солнца и Земли при фазовом угле 0° и абсолютным блеском ее ядра.

Амплитуда A_{SEC} . 7P/P–W проходит перигелий на расстоянии $q = 1.23$ а. е. от Солнца, нам же нужен блеск на расстоянии $r_H = 1.0$ а. е. от Солнца и $\Delta = 1.0$ а. е. от Земли (для расчета величины $m1(1;1;0)$). Поэтому мы применили экстраполяцию доперигелийной кривой блеска, которая с момента низких уровней активности (с начала марта 2021 г.) и до перигелия хорошо описывается уравнением:

$$m1 = 10.0 + 5 \lg D + 2.5 \cdot 9.7 \lg r_H. \quad (3)$$

Для расчета этого уравнения мы использовали совокупную выборку визуальных и фотографических оценок блеска из кометной базы COBS. Поскольку основной вклад в видимый блеск 7P/P–W вносит пыль (см. раздел “Показатели цвета”), оценки были скорректированы к фазовому углу $\phi = 0^\circ$ в рамках композитной фазовой функции кометной пыли от Schleicher (2010).

Базируясь на этом уравнении, мы получили $A_{SEC}(1;1) = 5.5^m$. Отметим, что за исследованный близкий к перигелию период времени комета быстро наращивала свой блеск, поэтому к экстраполяции между реальным перигелием ($q = 1.23$ а. е.) и расстоянием от Солнца $r_H = 1.0$ а. е. следует отнестись с осторожностью: вполне возможно, что в экстраполируемом промежутке расстояний ($q = 1.23 \dots 1.0$ а. е.) столь быстрый рост блеска не будет продолжаться.

Проверить это на практике можно будет начиная с возвращения 2039 г., когда расстояние перигелия 7P/P–W вновь станет < 1 а. е.

Расстояние окончания активности R_{OFF} . Для определения момента окончания активности использовались доступные в базе Центра малых планет наблюдения для появления 2015 г., поскольку в появлении 2021 г. в нужный период

времени комета не наблюдалась из-за соединения с Солнцем.

Анализируя эти данные, мы выяснили, что комете свойственна выраженная тепловая инертность, в целом характерная для слабоактивных короткопериодических комет: после перигелия активность сходит на нет значительно дальше, чем начинается на восходящей дуге орбиты (до перигелия). Отчасти это может быть ложным ощущением из-за крупных частиц пыли с медленной динамикой: когда ядро кометы уже перестает сублимировать, они могут все еще оставаться поблизости (после чего либо отдаляются, либо оседают обратно на ядро), увеличивая видимый блеск псевдоядра кометы даже в тот период времени, когда реальная активность уже завершена.

Основываясь на данных появления 2015 г. мы определили момент времени, когда блеск кометы становится таким, какой мы ожидаем от неактивного ядра: $R_{OFF} = 3.05 \pm 0.1$ а. е., и именно это значение использовано в дальнейших расчетах. Значительно более далекое расстояние инактивации в сравнении с расстоянием активации вносит некоторые неопределенности в характеристику эволюционного статуса кометы (см. раздел “Фотометрический возраст”). В целом такая особенность является типичной чертой поведения периодических комет и возникает, вероятно, из-за термической инертности ядра (постепенное охлаждение по мере отдаления от Солнца) и остаточной сублимации вскрытых вблизи перигелия активных областей.

Фотометрический возраст. Подставляя в формулу (1) все значения, мы получаем, что для кометы 7P/P–W $P_{AGE} = 54.4$ кометного года (сокращенно — с.у. от “comet years”). В рамках классификации Ferrín (2010) это соответствует средневозрастной ($30 < P_{AGE} < 70$ с.у.) комете, схожей по этому параметру с 67P/Churyumov–Gerasimenko или C/1983 H1 (IRAS–Araki–Alcock), но значительно более молодой в сравнении с классическими примерами “старых” комет — 2P/Encke, 26P/Grigg–Schjellerup, 169P/NEAT.

С другой стороны, амплитуда кривой блеска 7P/P–W точно соответствует величине, определенной Ferrín (2010, рис. 5) в качестве границы между стареющими и старыми кометами, но позднее окончание активности поднимает комету выше этой границы, поэтому мы описываем ее как стареющую, на переходной стадии между средневозрастными и старыми.

ФОТОМЕТРИЯ

Мы измеряли 7P/P–W на суммах кадров, сложенных по направлению движения кометы; для получения сигнала звезд сравнения использовались суммы тех же кадров, сложенные по звездам. Использовалась апертурная фотометрия; фон измерялся в кружке, расположенном за пределами видимой комы кометы или на расстоянии нескольких FWHM от неактивного ядра 7P/P–W.

Подход к фотометрии, использовавшийся на стадии неактивного ядра, описан в разделе “Авторские наблюдения”. Для определения показателей цвета кометной пыли (см. раздел “Показатели цвета”) и пылепроизводительности (см. раздел “Темпы производства пыли”) использовались снимки в широкополосных фильтрах *B*, *V* и *R* (фотометрическая система Johnson–Cousins, см. табл. 2). Значения блеска звезд сравнения извлекались из каталогов AAVSO APASS и, при необходимости (для перевода в R_c -блеск), пересчитывался из фотометрической системы обзора SDSS с использованием опубликованных формул соответствия (Transformation between ...).

В качестве звезд сравнения использовались звезды с высоким отношением сигнал/шум ($\text{SNR} > 100$) звезды поля с околосолнечными показателями цвета (показатели цвета $B-V$ в диапазоне 0.45 ... 0.85), от 3 до 7 штук, а иногда и больше для каждой серии.

Мультиапертурная фотометрия, сделанная в радиусе 2...10 пикселей, позволила построить профили яркости кометы для каждой отснятой вблизи перигелия серии и рассчитать блеск внутри радиусов, соответствующих необходимым для определения пылепроизводительности физическим размерам (см. раздел “Темпы производства пыли”). Рассчитанный блеск был приведен к фазовому углу $\alpha = 0^\circ$ с использованием комбинированной функции Schleicher, 2010 для кометной пыли, а после пересчитана в абсолютный блеск H_R по формуле:

$$H_R = m_0 - 5\lg(r_H D), \quad (4)$$

где m_0 — скорректированный блеск комы кометы, приведенный к фазовому углу $\alpha = 0^\circ$.

Показатели цвета

Для определения показателей цвета внутренней комы кометы использовались серии

в фильтрах *BVR*, полученные вблизи перигелия 7P/P–W, в последовательные ночи 23/24 и 24/25 мая (см. табл. 2).

В обоих случаях измерения сигнала кометы проводились внутри нескольких последовательных круговых апертур с диаметром от 5.2 до 11.0'' (соответствует физическому размеру от 1.8 до 3.7 тыс. км на расстоянии кометы для обеих дат). По мере удаления от псевдоядра 7P/P–W значения показателей цвета изменялись в пределах погрешности, поэтому в табл. 3 мы представляем усредненные значения.

Таблица 3. Показатели цвета кометы 7P/Pons–Winnecke вблизи перигелия в сравнении с показателями цвета Солнца и средними значениями показателей цвета для активных комет семейства Юпитера (КЦЮ)

Date	<i>B–V</i>	<i>V–R</i>	<i>B–R</i>
2021 May 24.01	0.75 ± 0.03	0.40 ± 0.03	1.15 ± 0.03
2021 May 25.02	0.90 ± 0.03	0.43 ± 0.03	1.31 ± 0.03
Солнце ¹	0.64 ± 0.02	0.35 ± 0.01	1.00 ± 0.02
Активные КЦЮ ²	0.75 ± 0.02	0.47 ± 0.02	1.22 ± 0.02

Примечания: ¹ — Приведены показатели цвета Солнца из Holmberg и др. (2006);

² — Данные по активным КЦЮ из Solontoi и др. (2012).

Цвета кометы 7P/P–W несколько краснее солнечных и соответствуют средним цветам активных КЦЮ.

Эти соответствия подтверждают, что основной вклад в измеряемый поток кометы (особенно на снимках в фильтре R_c , использовавшихся для измерения пылепроизводительности) вносил отраженный от пылевых частиц комы солнечный свет.

Из-за интенсивных эмиссий кометных газов, в основном приходящихся на широкополосные фильтры *B* и *V* (эту мысль иллюстрирует спектр типичной кометы, наложенный на чувствительность широкополосных фотометрических фильтров; напр., см. на сайте Bryssinck, 2021), цвета “газовых” комет часто значительно отклоняются от референсных значений. Поскольку частицы газа движутся намного быстрее более массивных частиц пыли, это проявляется тем сильнее, чем дальше от ядра проводятся измерения. Даже у 2P/Encke, которая является ярким примером “газовой” кометы, в излучении самых внутренних частей комы доминирует отражение солнечного света от пыли (Jockers и др., 2005).

Поскольку показатели цвета 7P/P–W в нашем случае соответствует средним цветам пылевых ком похожих комет, а измерения проводились в пределах околоядерной области, мы можем использовать эти данные для характеристики кометной пыли.

ПАРАМЕТРЫ КОМЕТНОЙ ПЫЛИ

Фотометрический базис

Пылепроизводительность ядра кометы определялась фотометрически. Для этого мы использовали две серии снимков, полученных в период с 3 по 9 мая 2021 г. (за ~3 недели до перигелия гелиоцентрическое расстояние r_H кометы ~1.26 а. е.) и с 24 по 27 мая 2021 г. (непосредственно перед перигелием, $r_H \sim 1.24$ а. е.) в Симеизской обсерватории ИНАСАН (см. сводку журнала наблюдений в табл. 2). Наблюдения проводились с использованием фотометрического фильтра R_c (Johnson–Cousins system) с целью отграничить пылевую компоненту комы от ярких (в полосах B и V , которые также использовались для измерения показателей цвета кометы) газовых эмиссий.

Рассчитанный по формуле (4) абсолютный блеск пересчитывался в площадь сечения пыли C_e (в км²) с использованием формулы (Jewitt, 2017):

$$C_e = \frac{1.5 \times 10^6}{p_V} 10^{-0.4H_V}. \quad (5)$$

Здесь p_V — геометрическое альbedo кометной пыли в полосе V . Абсолютный блеск H_R в фильтре R приводился к абсолютному блеску H_V в фильтре V с использованием определенного нами показателя цвета $V-R = 0.415$ (см. табл. 3 в разделе “Показатели цвета”).

При расчете площади сечения пыли мы сделали коррекцию на присутствие ядра внутри комы, вычитая из полученного значения блеска внутри фотометрической апертуры ожидаемый средний блеск ядра 7P/P–W (см. раздел “Наблюдения”), хотя его вклад на наибольшей стадии активности близ перигелия практически не оказывал влияния на результат.

Размеры и скорости пылевых частиц

Размер пылевых частиц. Для оценки размера преобладающих пылевых частиц мы исследовали морфологию пылевой компоненты комы кометы по глубоким любительским изображениям, опубликованным в интернете. Так, на снимке от 18 мая 2021 г. (автор — Jäger) пылевой хвост 7P/P–W

можно проследить до длины 3'.5 (см. рис. 3), что соответствует 95.6 тыс. км (исходя из упрощения, что хвост направлен в антисолнечном направлении) на гелиоцентрическом расстоянии кометы $\Delta = 0.493$ а. е. с учетом фазового угла $\phi = 51^\circ.8$.

Считая, что на формирование хвоста такой длины понадобилось ~73 суток (именно такое время прошло с момента начала активности ядра кометы до момента указанного наблюдения, см. раздел “Абсолютный блеск ядра и начало активности”), можно оценить типичную скорость кометной пыли в хвосте 7P/P–W как $U \approx 15.2$ м/с.

Отметим, что множество самых мелких пылинок отдалились намного дальше от ядра и перестали быть видимы из-за низкой плотности, а значит, и поверхностной яркости отдаленных частей хвоста. В то же время наиболее крупные частицы движутся медленнее и сохранились в более близких к ядру видимых частях хвоста.

Скорость кометной пыли зависит от размеров пылевых частиц и действия внешних сил. Расстояние L , на которое давление солнечного света способно “сдвинуть” пылевые частицы с течением времени можно оценить как (Jewitt, 2019)

$$L = \frac{\beta g}{2r_H^2} t^2, \quad (6)$$

где $g = 0.006$ м/с² — характеристика солнечной гравитации на расстоянии кометы от Солнца $r_H = 1$ а. е., β — параметр, представляющий собой отношение двух сил, влияющих на пылевую частицу — давления солнечного света и гравитации. Чем меньше величина параметра β , тем крупнее пылевая частица.

Чтобы в первом приближении оценить средний размер пылевых частиц, мы использовали (Jewitt, 2019)

$$\beta = \frac{1}{\alpha}, \quad (7)$$

где размер пылевых частиц α выражен в мкм (10^{-6} м).

Подставляя $L = 95.6$ тыс. км, $t = 6.3 \times 10^6$ с и используя среднее (с момента начала активности до момента указанного наблюдения, 18 мая) гелиоцентрическое расстояние $r_H = 1.38$ а. е. в формулу (4), получаем $\beta = 0.0015$. Получается, в пылевой коме 7P/P–W преобладают довольно крупные (миллиметрового класса) частицы со средним размером ~0.65 мм. Вероятно, это значение является в той или иной степени завышенным, поскольку более удаленные от ядра, следовательно, более рассеянные, тусклые и неплотные части хвоста просто не проработались на исследованных изображениях.

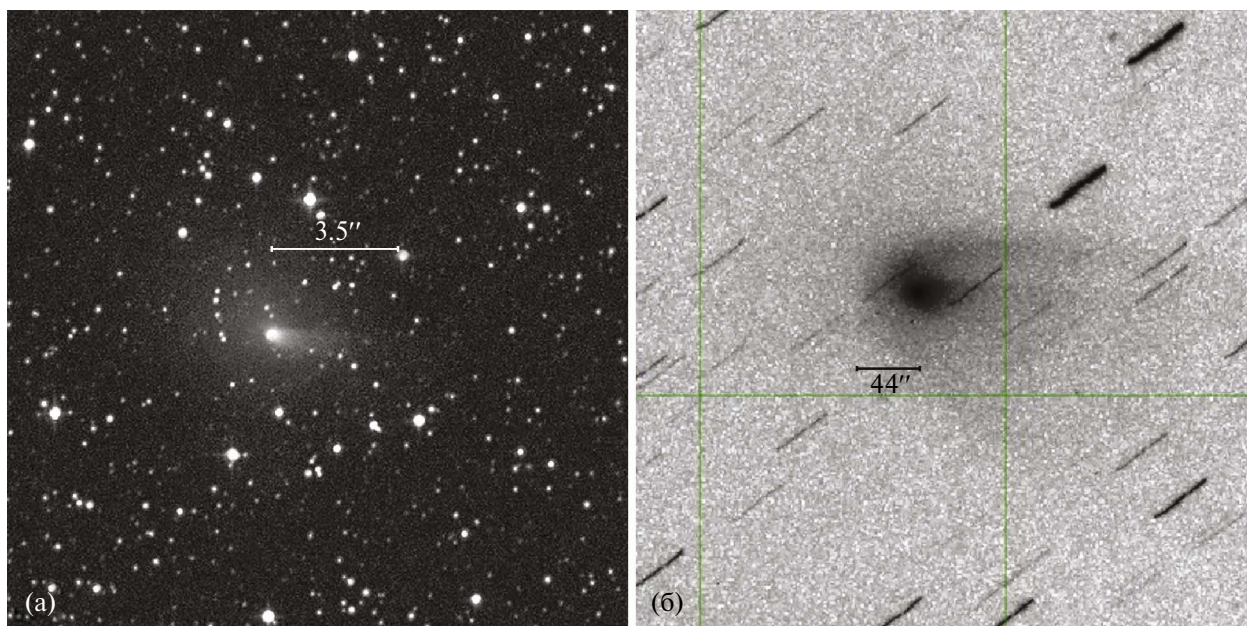


Рис. 3. Любительские изображения кометы 7P/P–W, позволившие определить размерные параметры облака пыли кометы. Север сверху, восток слева. Обозначено антисолнечное направление (–S) и вектор обратного движения (–V): (а) – полученный 18 мая 2021 г. снимок М. Jäger (с 0.3-метровым телескопом), на котором пылевой хвост прослеживается до 3′.5; (б) – снимок Т. Angel, полученный 4 июня 2021 г. (2.0-метровый телескоп Фолкса), показывает пылевую кому после недавней вспышки. Параболическая форма комы сформировалась в условиях гравитации и давления солнечного света. Показано угловое расстояние до вершины параболы, определенной по видимому контрасту комы.

Начальная скорость выброса частиц. Для оценки начальной скорости выброса кометной пыли мы, с разрешения авторов, использовали опубликованные в Интернете любительские снимки, полученные после вспышки 7P/P–W в начале июня, когда внутренняя пылевая кома кометы приобрела параболическую форму с четко очерченной вершиной, направленной к Солнцу. Например, на снимке Т. Angel (4 июня) угловое расстояние от псевдоядра кометы до вершины параболической части комы – 44′′ (что соответствует $s = 14265$ км на удалении кометы).

Зная это, можно оценить скорость выброса направленных к Солнцу частиц V по формуле (Jewitt и др., 2015)

$$s = \frac{V^2 r_H^2}{2\beta g}. \quad (8)$$

Подставляя $s = 14265$ км, $\beta = 0.0015$ и $r_H = 1.24$ а. е., получаем $V = 12.9$ м/с, что в целом соотносится с рассчитанной ранее типичной скоростью кометной пыли ($U > 15.2$ м/с, см. выше в этом же разделе).

Поскольку гелиоцентрическое расстояние r_H между 4 июня (момент получения снимка, на основе которого определялась скорость) и датами авторских наблюдений (2–9 мая и 24–27 мая) изменялось незначительно (на несколько сотых а. е., см раздел “Фотометрический базис” и табл. 2), мы принимаем это значение без изменений для оценки пылепроизводительности в течение двух майских периодов.

Темпы производства пыли

Пылепроизводительность кометы $\bar{M}$ рассчитывалась по формуле (Jewitt, 2019)

$$\bar{M} = \frac{4\rho\bar{\alpha}\Delta C_e}{3\Delta t}, \quad (9)$$

где ρ – объемная плотность пылевых зерен комы [г/см³], $\bar{\alpha}$ – средний размер пылевых частиц [мм], Δ – геоцентрическое расстояние кометы [а. е.], C_e – площадь поперечного сечения пыли внутри измеряемой апертуры [км²], t – время [с]. Плотность пылевых частиц кометы 7P/P–W точно не известна, поэтому для расчетов

мы использовали значение $\rho = 0.5 \text{ г/см}^3$, полученное для другой короткопериодической кометы — 67P/Churyumov–Gerasimenko — в ходе миссии Rosetta (Fulle и др., 2018).

При расчете пылепроизводительности мы использовали полученную выше (см. раздел “Начальная скорость выброса...”) информацию о скорости пылевых частиц, измеряя на снимках каждой серии только наиболее внутреннюю, двухдневную часть комы с радиусом $r = 2229 \text{ км}$ (считая, что средняя скорость частиц составляла 12.9 м/с).

Таблица 4. Пылепроизводительность кометы 7P/Pons–Winnecke вблизи перигелия

Date	C_e	$\bar{M}$
2021 May 03.02	27.30	68.5
2021 May 05.04	27.42	68.7
2021 May 06.02	26.65	66.8
2021 May 08.02	31.38	78.7
2021 May 10.00	32.46	81.4
2021 May 24.01	35.89	90.0
2021 May 25.02	55.91	140.2
2021 May 26.04	40.94	102.7
2021 May 27.02	31.23	78.3

Примечание: горизонтальной полосой в табл. 4 разделены два набора данных: начало мая и конец мая 2021 г.; C_e — суммарная площадь сечения двухдневной (в радиусе $r = 2229 \text{ км}$) пыли [км^2]; $\bar{M}$ — темпы производства пыли [кг/с].

В табл. 4 приведены значения полученных площадей сечения пыли C_e и средней пылепроизводительности за двое суток до момента каждого наблюдения, рассчитанные по формулам (5) и (9).

Как видим, 7P/P–W вблизи перигелия демонстрирует не выдающиеся, но все еще весьма значительные ($67\text{--}140 \text{ кг/с}$) темпы производства пыли. Отметим, что это значение может быть завышено, если оценка среднего размера пылинок преувеличена (см. раздел “Размер пылевых частиц”). Если так, его можно рассматривать как верхний предел, верный по порядку величины.

В целом, полученные значения намного меньше, если сравнивать с наиболее активными кометами. Так, гигантская C/1995 O1 (Hale–Bopp) в период близости к Солнцу теряла ~ 2 тыс. т пыли в 1 с. (Jewitt, Matthews, 1999), а комета Галлея вблизи перигелия 1986 г. — $3.1 \times 10^3 \text{ кг/с}$ (McDonnell и др., 1986). С другой

стороны, пылепроизводительность 7P/P–W сравнима с ней же для активных комет семейства Юпитера, см., например, 67P/Churyumov–Gerasimenko ($180 \pm 50 \text{ кг/с}$ (Ishiguro, 2008)) или 22P/Kopff (260 кг/с (Moreno и др., 2012)).

В заключение отметим, что активность 7P/P–W намного выше, чем у комет на финальных этапах перехода к инертным объектам или комет Главного пояса астероидов. В качестве примера малоактивных комет можно привести 252P/LINEAR или P/2006 HR₃₀ (Siding Spring), которые близ перигелия ($q = 1.00$ и 1.23 а. е. соответственно) производили лишь $\sim 4 \text{ кг/с}$ пыли (Coulson и др., 2017; Hicks, Bauer, 2007). Кометы Главного пояса показывают еще меньшие цифры: так, 238P/Read испускала 0.2 кг/с пыли в период своего перигелия в 2005 г. (Hsieh и др., 2008), а едва активная 133P/Elst–Pizarro — еще на порядок меньше, $2 \times 10^{-2} \text{ кг/с}$ (Hsieh и др., 2004).

Все это позволяет считать 7P/P–W кометой семейства Юпитера на промежуточной стадии эволюции — умеренно активной, но еще далекой от затухания и перехода к внешней инертности.

МОДЕЛЬ СУБЛИМАЦИИ И ПРОЦЕНТ АКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ ЯДРА

Чтобы дополнительно количественно охарактеризовать пылепроизводительность ядра, а именно долю его активной площади, используем простейшую модель сублимации (как в (Jewitt и др., 2015) или (Meech и др., 2017)). Эта модель позволяет рассчитать массу сублимирующего газа при известном потоке поступающего от Солнца тепла. Улетающие молекулы газа увлекают за собой пыль, формируя пылевую кому, значительно (в разы, десятки или сотни раз) увеличивающую видимый блеск объекта.

Свободные параметры модели — свойства ядра (радиус, плотность, альbedo, коэффициент излучения (англ. emissivity), свойства пыли (размер, плотность, фазовая функция) и доля активной площади ядра.

Поздняя активация 7P/P–W при малом расстоянии перигелия позволяет нам априори предположить, что за активность отвечает сублимация водяного льда — самого тугоплавкого, а значит, и долгоживущего среди распространенных кометных газов.

Используем уравнение энергетического баланса ядра кометы (Meech и др., 1986)

$$\frac{F_S(1-A)}{R^2} = \chi \left[\epsilon \sigma T^4 + L(T) \frac{dm_s}{dt} + \kappa \frac{dT}{dz} \right]. \quad (10)$$

Здесь левая часть уравнения характеризует поглощенное солнечное тепло, а правая — энергию абсолютно черного тела вкупе с энергетикой сублимации и прогрева недр кометного ядра. Мы предполагаем, что эта величина, описываемая последним слагаемым в правой части уравнения, пренебрежимо мала, и не используем последнее слагаемое правой части уравнения в расчетах. Параметр χ связан со скоростью вращения ядра и показывает, насколько оно изотермально. Он может принимать значения от 2 (медленно вращающийся объект со значительной разницей дневных и ночных температур) до 4 (очень быстро вращающийся изотермальный объект с примерно одинаковыми дневными и ночными температурами). Потеря массы на единицу площади (dm_s/dt) связана с давлением паров сублимирующего газа и средней скоростью его молекул.

Равновесная температура ядра $T = T_{BB}(r)$ для данного гелиоцентрического расстояния r_H рассчитывалась по формуле (Jewitt, 2013)

$$T_{BB}(r_H) = \sqrt[4]{\frac{F_S}{4\sigma r_H^2}}.$$

(11)

Значение параметра удельной теплоты парообразования воды $L(T)_{H_2O}$ рассчитано по данным из (Meesch и др., 1986).

Используя для расчетов перечисленные в табл. 5 значения, мы получаем, что для объяснения наблюдающихся темпов производства пыли необходимо 1.2 км² (1.4% при диаметре 5.2 км) активной площади ядра, что в целом свидетельствует об относительно низком, но все еще существенном уровне активности.

Активная площадь может быть еще ниже, если соотношение пыли и газа в коме кометы меньше 1. Эта величина обладает значительной вариабельностью у различных комет и судить о ней достоверно без спектроскопических и инфракрасных наблюдений не получится. Например, у кометы галлеевского типа 126P/IRAS она равна ~3.3 (Lisse и др., 2004), а у особенно богатой льдами кометы 252P/LINEAR ~0.025 (Coulson и др., 2017).

Кроме того, процент активной площади не стоит воспринимать прямолинейно: величина верна только в том случае, если сублимация идет с чистого льда, что в случае старых, покрытых мантией из инертной темной пыли комет является очевидным упрощением. В реальности активность (от слабой до умеренной) сосредоточена в отдельных районах ядра, а также небольших по площади областях, где инертная мантия

Таблица 5. Численные значения параметров сублимационной модели, использованные для расчетов

Параметр	Значение
F_S — солнечная постоянная	1361 Вт/м ²
A — альбедо Бонда ядра	0.04 ²
χ — характеристика изотермальности ядра	2 ¹
ε — коэффициент излучения	0.9 ²
σ — постоянная Стефана–Больцмана	5.67×10^{-8} Вт м ⁻² К ⁻⁴
$T_{BB}(r_H)$ — равновесная температура ядра для данного гелиоцентрического расстояния r_H	251 К ³
$L(T)_{H_2O}$ — удельная теплота парообразования	2.47×10^6 Дж/кг
Соотношение пыли и газа в массе комы	1 ⁴
r_H — расстояние от Солнца	1.23 а. е. ³
Пылепроизводительность кометы	102.8 кг/с ³

Примечания:

¹ — Ядро 7P/P–W вращается медленно, период вращения $6.8 \leq P_{\text{rot}} \leq 9.5$ (Snodgrass и др., 2005).

² — Предполагаемое усредненное значение.

³ — Использовано усредненное расстояние четырех наиболее близких к перигелию наблюдений наблюдений 24–27 мая 2021 г. (см. табл. 2).

⁴ — Хотя это значение может сильно меняться от кометы к комете, у многих короткопериодических комет оно близко к 1 (например, у хорошо изученной 67P/Churyumov–Gerasimenko (Marschall и др., 2020)).

истончается или “прорывается”. В результате на относительно коротких интервалах времени происходит активная сублимация, приводящая к выбросам в космос большого количества пыли (Sierks и др., 2015).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обладающая относительно крупным ($D_N = 5.2$ км (Lamy и др., 2004)) ядром комета 7P/P–W неактивна на большей части своей орбиты; активность начинается на гелиоцентрическом расстоянии $R_{ON} = \sim 1.76$ а. е., продолжается в течение ~13 месяцев вокруг перигелия и заканчивается на значительно больших

гелиоцентрических расстояниях по сравнению с началом: $R_{\text{OFF}} = 3.05 \pm 0.1$ а. е.

2. Амплитуда вековой кривой блеска кометы $A_{\text{SEC}}(1;1) = 5.5^m$, фотометрический возраст $P_{\text{AGE}} = 54.4$ кометного года, что в совокупности соответствует переходной средневозрастной комете по классификации Ferrin (2010).

3. Максимальная пылепроизводительность кометы в перигелии не превышает 1.5×10^2 кг/с (типично — менее 100 кг/с). Если в ее основе лежит сублимация воды, то лишь 1.4% активной площади ядра достаточно для поддержания этого уровня активности.

Авторы выражают признательность ЦКП “Терскольская обсерватория” ИНАСАН за возможность использования данных, полученных на телескопе Цейсс-1000 Симеизской обсерватории.

Авторы также благодарят любителей астрономии Michael Jäger и Tony Angel за возможность использовать их снимки для определения размерных параметров облака пыли кометы, а также телескопы им. Фолкса (Faulkes Telescopes Project...), на одном из которых было получено второе изображение, и сообщество наблюдателей “Охотники за кометами” (Comet Chasers Team), в рамках которого работает Tony Angel.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета научных организаций. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Всехсвятский С.К. Физические характеристики комет. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1958. 575 с. *Alí-Lagoa V., Delbo M., Libourel G.* Rapid temperature changes and the early activity on comet 67P/Churyumov–Gerasimenko // *Astrophys. J. Lett.* 2015. V. 810. № 2. id. L22 (5 p.).
2. Band Conversion //URL: <https://www.minorplanetcenter.net/iau/info/BandConversion.txt>
3. Bryssinck E. Optical filters for Afp-observations of comets //URL: http://www.astronomie.be/erik.bryssinck/filters_for_afrho.html Дата обращения 01.09.2023
4. Coulson I.M., Cordiner M.A., Kuan Y.J., Tseng W.L., Chuang Y.L., Lin Z.Y. JCMT Spectral and Continuum Imaging of Comet 252P/LINEAR // *Astron. J.* 2017. V. 153. № 4. P. 153–169.
5. Dymock R. The H and G magnitude system for asteroids // *J. British Astron. Assoc.* 2007. V. 117. № 6. P. 342–343.
6. Fernández J.A., Gallardo T., Brunini A. Are there many inactive Jupiter-family comets among the near-Earth asteroid population? // *Icarus.* 2002. V. 159. № 2. P. 358–368.
7. Fernández Y.R., Lowry S.C., Weissman P.R., Mueller B.E.A., Samarasinha N.H., Belton M.J.S., Meech K.J. New near-aphelion light curves of Comet 2P/Encke // *Icarus.* 2005. V. 175. № 1. P. 194–214.
8. Ferrín I. Atlas of secular light curves of comets // *Planet. and Space Sci.* 2010. V. 58. № 3. P. 365–391.
9. Faulkes Telescope Project //URL: <https://www.faulkes.com/ Faulkes-telescope-project>
10. Fulle M., Bertini I., Della Corte V., Güttler C., Ivanovski S., La Forgia F., Lasue J., Levasseur-Regourd A.C., Marzari F., Moreno F., Mottola S., Naletto G., Palumbo P., Rinaldi G., Rotundi A., and 32 co-authors. The phase function and density of the dust observed at comet 67P/Churyumov–Gerasimenko // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2018. V. 476. № 2. P. 2835–2839.
11. Jewitt D., Matthews H. Particulate mass loss from comet Hale-Bopp // *Astron. J.* 1999. V. 117. № 2. P. 1056–1062.
12. Jewitt D. Properties of near-Sun asteroids // *Astron. J.* 2013. V. 145. № 5. id. 133 (6 p.). Jewitt D., Li J., Agarwal J., Weaver H., Mutchler M., Larson S. Nucleus and mass loss in active asteroid 313P/Gibbs // *Astron. J.* 2015. V. 150. № 3. id. 76 (11 p.).
13. Jewitt D., Hui M.T., Mutchler M., Weaver H., Li J., Agarwal J. A comet active beyond the crystallization zone // *Astrophys. J. Lett.* 2017. V. 847. № 2. id. L19 (5 p.).
14. Jewitt D., Agarwal J., Hui M.T., Mutchler M., Weaver H. Distant comet C/2017 K2 and the cohesion bottleneck // *Astrophys. J.* 2019. V. 157. № 2. id. 65 (11 p.).
15. Jockers K., Kiselev N., Bonev T., Rosenbush V., Shakhovskoy N., Kolesnikov S., Efimov Yu., Shakhovskoy D., Antonyuk K. CCD imaging and aperture polarimetry of comet 2P/Encke: Are there two polarimetric classes of comets? // *Astron. and Astrophys.* 2005. V. 441. № 2. P. 773–782.
16. Hicks M.D., Bauer J.M. P/2006 HR30 (Siding Spring): A low-activity comet in near-Earth space // *Astrophys. J.* 2007. V. 662. № 1. P. L47–L50.
17. Holmberg J., Flynn C., Portinari L. The colours of the Sun // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2006. V. 367. № 2. P. 449–453.
18. Hsieh H.H., Jewitt D.C., Fernández Y.R. The strange case of 133P/Elst-Pizarro: a comet among the

- asteroids // *Astron. J.* 2004. V. 127. № 5. P. 2997–3017.
19. *Hsieh H.H., Jewitt D., Ishiguro M.* Physical properties of main-belt comet P/2005 U1 (Read) // *Astron. J.* 2008. V. 137. № 1. P. 157–168.
 20. *Ishiguro M.* Cometary dust trail associated with Rosetta mission target: 67P/Churyumov–Gerasimenko // *Icarus.* 2008. V. 193. № 1. P. 96–104.
 21. *Kelley M.S.P.* Small outbursts of comet 7P/Pons-Winnecke // *Comets-MI mailing list.* 2021. № 29575. URL: <https://groups.io/g/comets-ml/message/29575>
 22. *Kelley M.S.P., Lister T.* Small Apparent Outbursts of Comet 7P/Pons-Winnecke // *Astronomer's Telegram.* 2021. № 14486. URL: <https://www.astronomerstelegram.org/?read=14486>. *Kelley M.S., Ye Q., Donaldson A., Murphy B., Snodgrass C., Opatom C.* Apparent outburst of Comet 7P/Pons-Winnecke // *Astronomer's Telegram.* 2022. № 15772. URL: <https://www.astronomerstelegram.org/?read=15772>.
 23. *Kinoshita K.* Comet 7P/Pons-Winnecke orbit // Comet orbit home page. 2016. URL: <https://jcometobs.web.fc2.com/pcmtn/0007p.htm>
 24. *Lamy P.L., Toth I., Fernández Y.L., Weaver H.A.* The sizes, shapes, albedos, and colors of cometary nuclei // *Comets II* // Eds: Festou M.H., Keller U., Weaver H.A. Tucson: Univ. Arizona Press, 2004. P. 223–264.
 25. *Lisse C.M., Fernández Y.R., A'Hearn M.F., Grün E., Käufl H.U., Osip D.J., Lien D.J., Kostiuk T., Peschke S.B., Walker R.G.* A tale of two very different comets: ISO and MSX measurements of dust emission from 126P/IRAS (1996) and 2P/Encke (1997) // *Icarus.* 2004. V. 171. № 2. P. 444–462.
 26. *Marschall R., Markkanen J., Gerig S.B., Pinzón-Rodríguez O., Thomas N., Wu J.S.* The dust-to-gas ratio, size distribution, and dust fall-back fraction of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko: inferences from linking the optical and dynamical properties of the inner comae // *Frontiers in physics.* 2020. V. 8. P. 227–242.
 27. *McDonnell J., Alexander W.M., Burton W.M., Bussoletti E., Clark D.H., Grard R.J.L., Grün E., Hanner M.S., Hughes D.W., Igenbergs E., Kuczer H., and 18 co-authors.* Dust density and mass distribution near comet Halley from Giotto observations // *Nature.* 1986. V. 321. Suppl. 6067. P. 338–341.
 28. *Meech K.J., Jewitt D., Ricker G.R.* Early photometry of comet P/Halley: Development of the coma // *Icarus.* 1986. V. 66. № 3. P. 561–574.
 29. *Meech K.J., Schambeau C.A., Sorli K., Kleyna J.T., Micheli M., Bauer J., Denneau L., Keane J.V., Toller E., Wainscoat R., Hainaut O., Bhatt B., Sahu D., Yang B., Kramer E., Magnier G.* Beginning of activity in long-period comet C/2015 ER61 (PANSTARRS) // *Astron. J.* 2017. V. 153. № 5. id. 206 (11 p.).
 30. *Moreno F., Pozuelos F., Aceituno F., Casanova V., Sota A., Castellano J., Reina E.* Comet 22P/Kopff: Dust environment and grain ejection anisotropy from visible and infrared observations // *Astrophys. J.* 2012. V. 752. № 2. id. 136 (12 p.).
 31. *Prialnik D., Bar-Nun A.* Crystallization of amorphous ice as the cause of comet P/Halley's outburst at 14 AU // *Astron. and Astrophys.* 1992. V. 258. P. L9–L12.
 32. *Sierks H., Barbieri C., Lamy P.L., Rodrigo R., Koschny D., Rickman H., Keller H.U., Agarwal J., A'Hearn M., Angrilli F., Auger A.-T., and 54 co-authors.* On the nucleus structure and activity of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko // *Science.* 2015. V. 347. № 6220. id. aaa1044.
 33. *Schleicher D.* *Composite Dust Phase Function for Comets* // 2010. URL: <https://asteroid.lowell.edu/comet/dustphase/>
 34. *Snodgrass C., Fitzsimmons A., Lowry S.C.* The nuclei of comets 7P/Pons-Winnecke, 14P/Wolf and 92P/Sanguin // *Astron. and Astrophys.* 2005. V. 444. № 1. P. 287–295.
 35. *Solontoi M., Ivezić Ž., Jurić M., Becker A.C., Jones L., West A.A., Kent S., Lupton R.H., Claire M., Knapp G.R., Quinn T., Gunn J.E., Schneider D.P.* Ensemble properties of comets in the Sloan Digital Sky Survey // *Icarus.* 2012. V. 218. № 1. P. 571–584.
 36. The AAVSO Photometric All-Sky Survey DR10 // URL: <https://www.astronomerstelegram.org/?read=14486> <https://www.aavso.org/apass/>
 37. Transformations between SDSS magnitudes and other systems Introduction // URL: <http://www.sdss3.org/dr8/algorithms/sdssUBVRITransform.php>