



Тема 1. Солнечная и внесолнечные планетные системы

В.И. Шематович

Институт астрономии РАН



Солнечная система: *содержание*

Лекция 1 (2 часа): Основные характеристики планет Солнечной системы.

Лекция 2 (2 часа): Малые тела Солнечной системы. Спутники и кольца планет.

Лекция 3 (2 часа): Кометы и астероиды.

Лекция 4 (2 часа): Атмосферы планет и малых небесных тел.

Лекция 5 (2 часа): Экзопланеты.

Лекция 6 (2 часа): Атмосферы экзопланет. Зона обитаемости.

Физика космоса: кометы

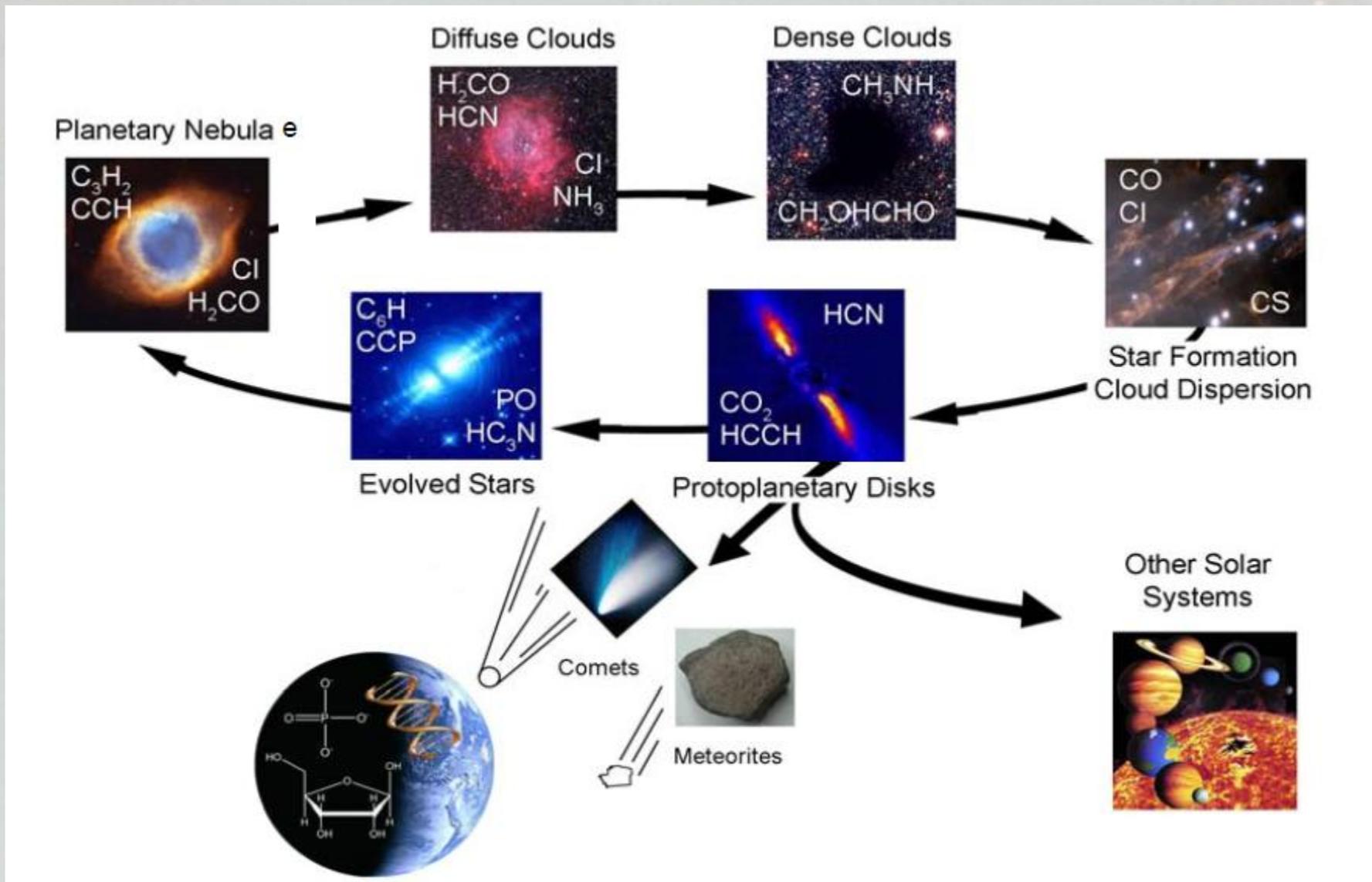
Исследование комет связано с решением важнейших фундаментальных задач физики космоса и современной астрофизики:

- Как образовалась Солнечная система?**
- Как возникла жизнь на Земле?**

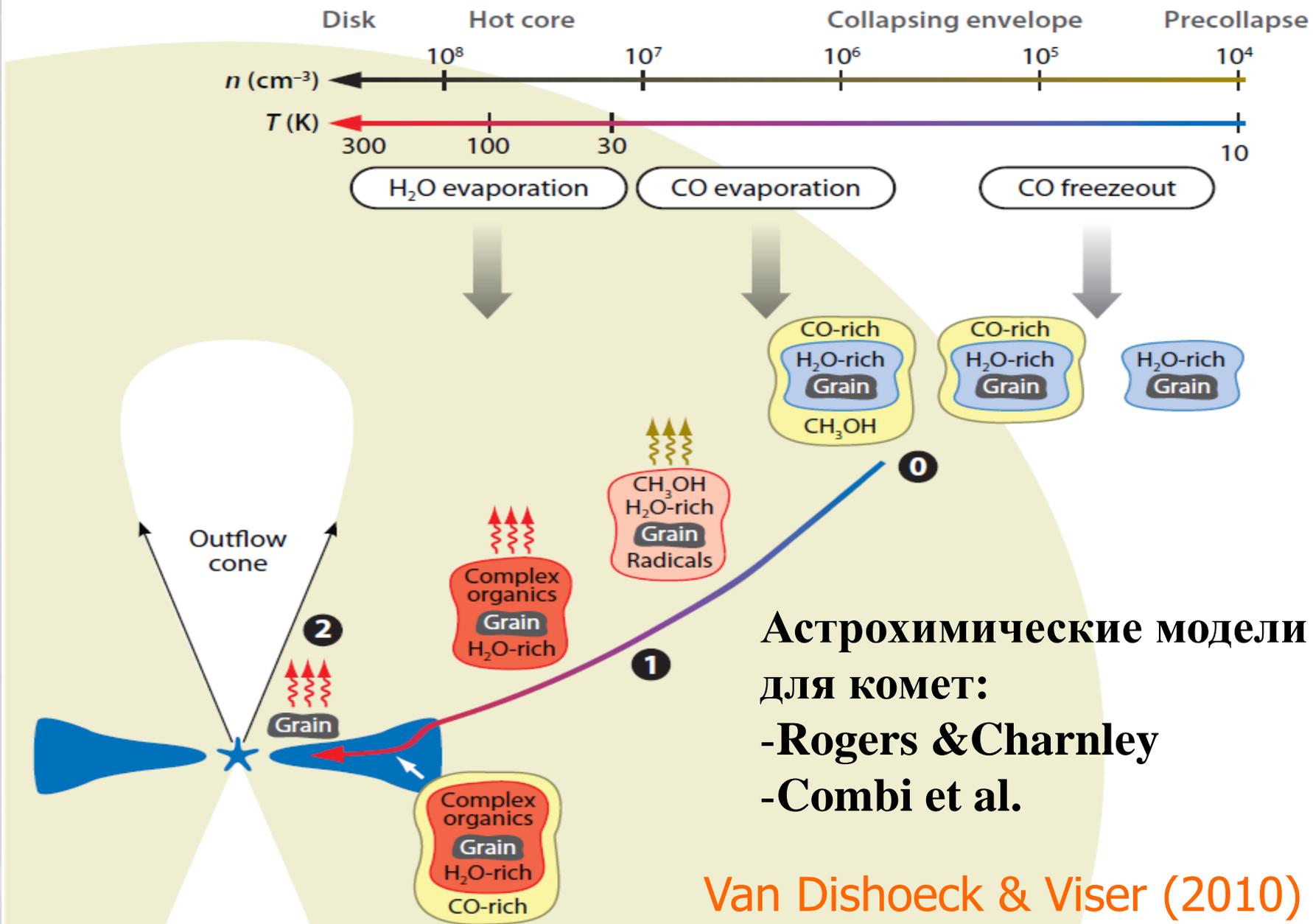
Содержание:

- ❖ Кометные ядра – состав летучих**
- ❖ Астрохимия -химическая сложность от до- и прото-звездных ядер молекулярных облаков до комет в планетных системах**
- ❖ Некоторые первые результаты КА ROSETTA**

Жизненный цикл межзвездной среды по наблюдениям молекул (Ziurys et al., 2010)



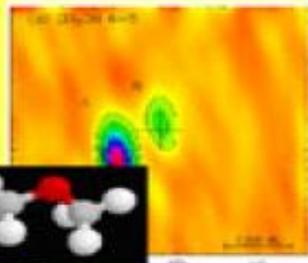
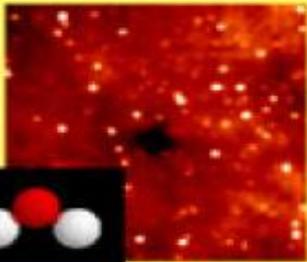
Химия до- и прото-звездных ядер



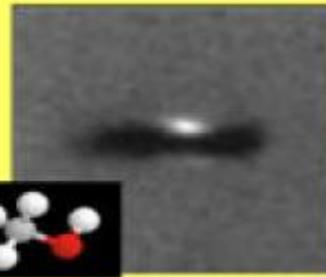
Астрохимия космоса: кометы

FROM A DIFFUSE CLOUD TO A SUN + PLANETARY SYSTEM FROM ATOMS & SIMPLE MOLECULES TO LIFE

1- PRE-STELLAR PHASE: cold and dense gas
FORMATION OF SIMPLE MOLECULES



2- PROTOSTELLAR PHASE: collapsing, warm dense gas
FORMATION OF COMPLEX MOLECULES



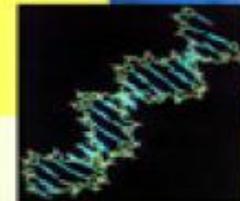
3- PROTOPLANETARY DISK PHASE:
cold and warm dense gas
SIMPLE & COMPLEX MOLECULES



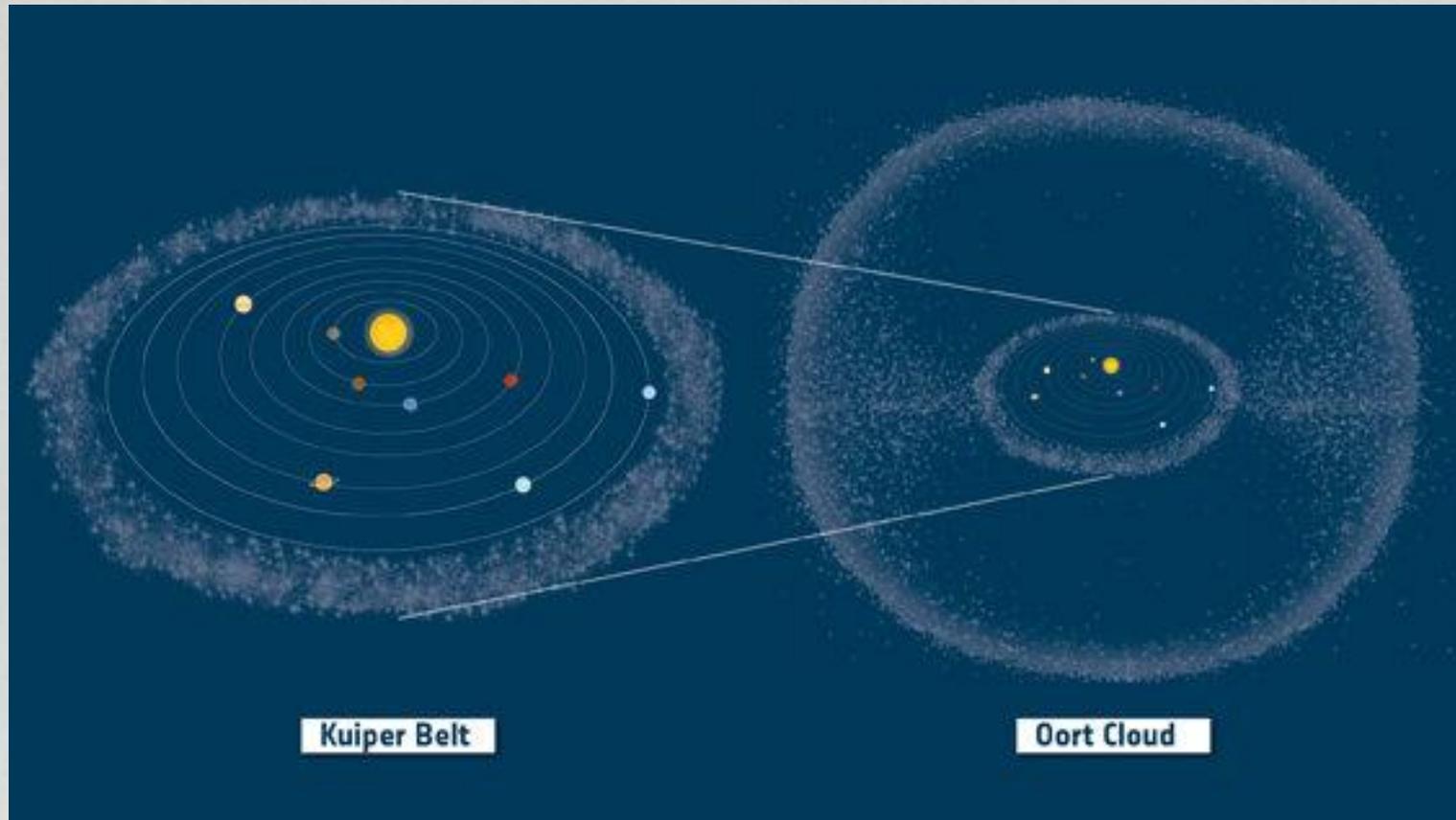
4- PLANETESIMAL FORMATION : grains agglomeration

5- PLANET FORMATION AND THE "COMET/ASTEROID RAIN"

CONSERVATION AND DELIVERY OF OLD MOLECULES + LIFE



Области образования комет

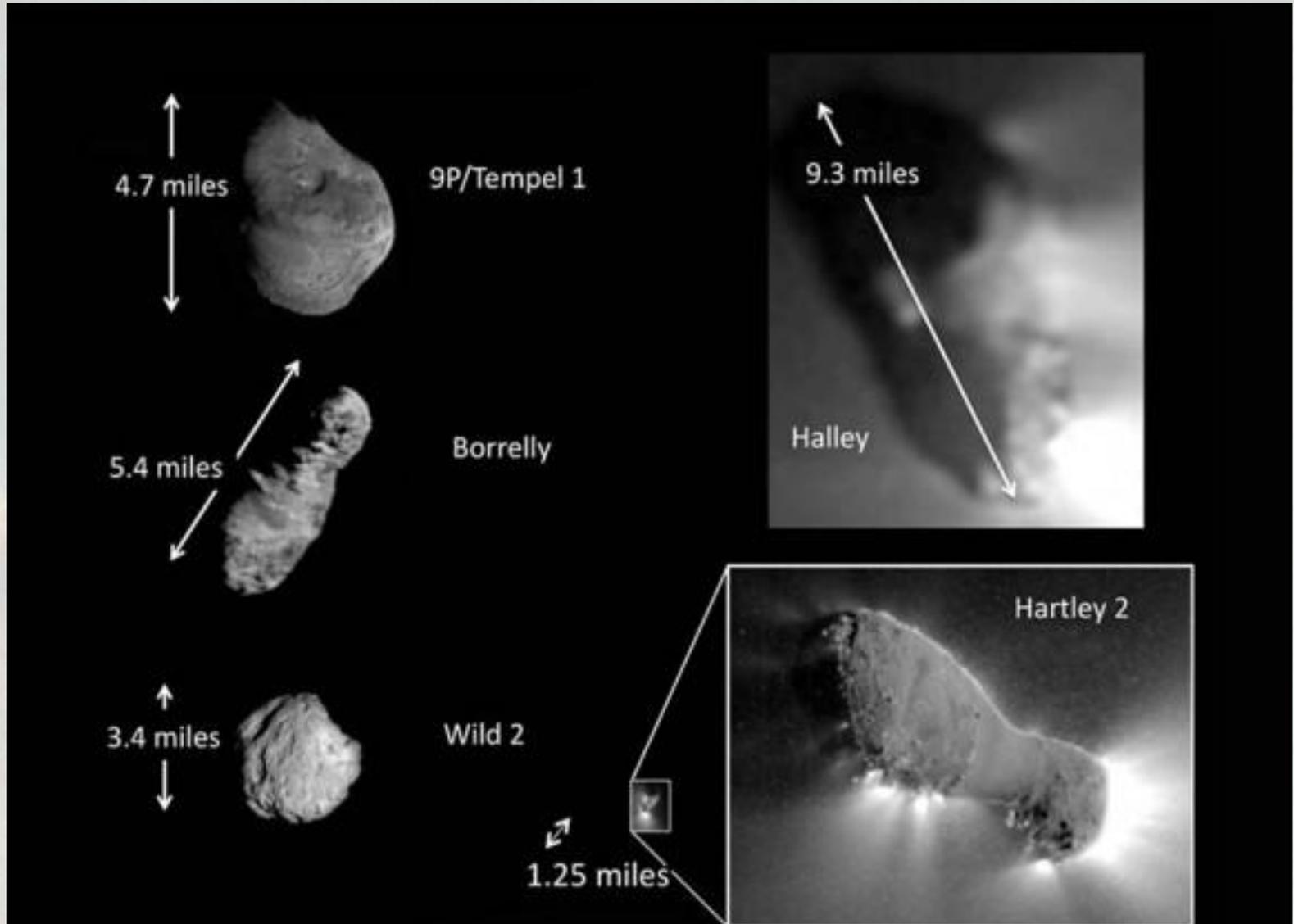


Kuiper Belt

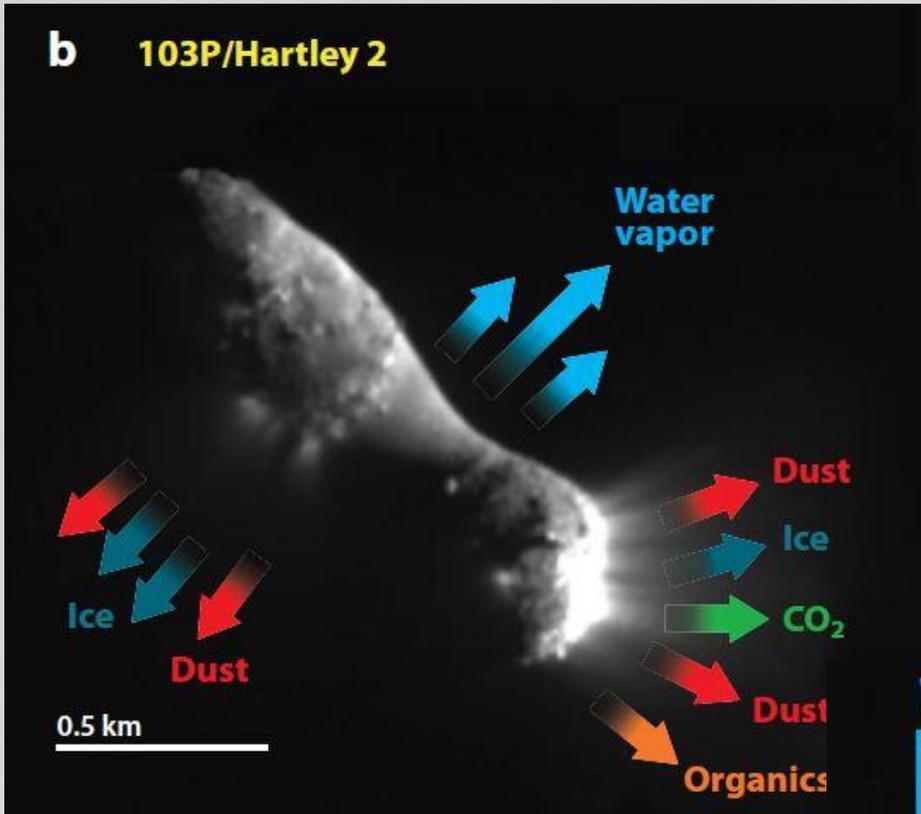
Oort Cloud

Резервуары кометных ядер – периферийные области:
облако Оорта ($> 50\,000$ а.е.), пояс Койпера (30 – 50 а.е.).
Комета 1P (Галлея) прибыла вероятно из облака Оорта, а
комета 67P (Чурюмова-Герасименко) – из пояса Койпера.

Кометные ядра по данным пролетных наблюдений КА

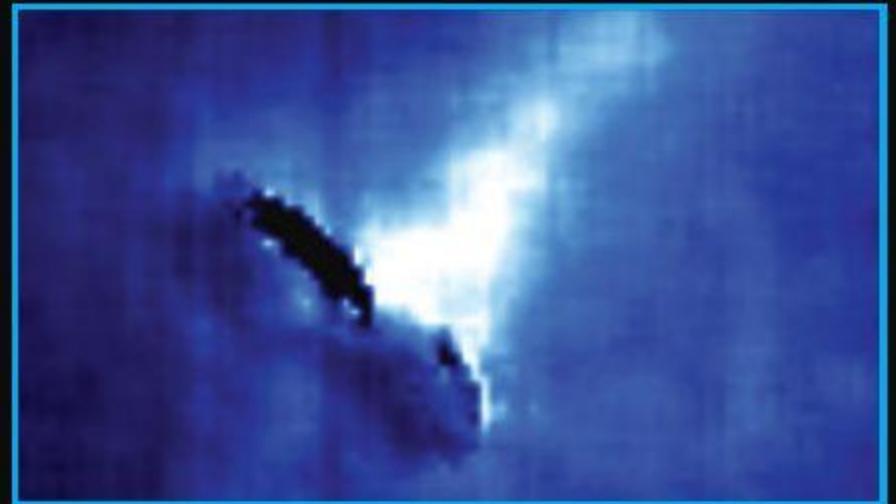


Кометные ядра



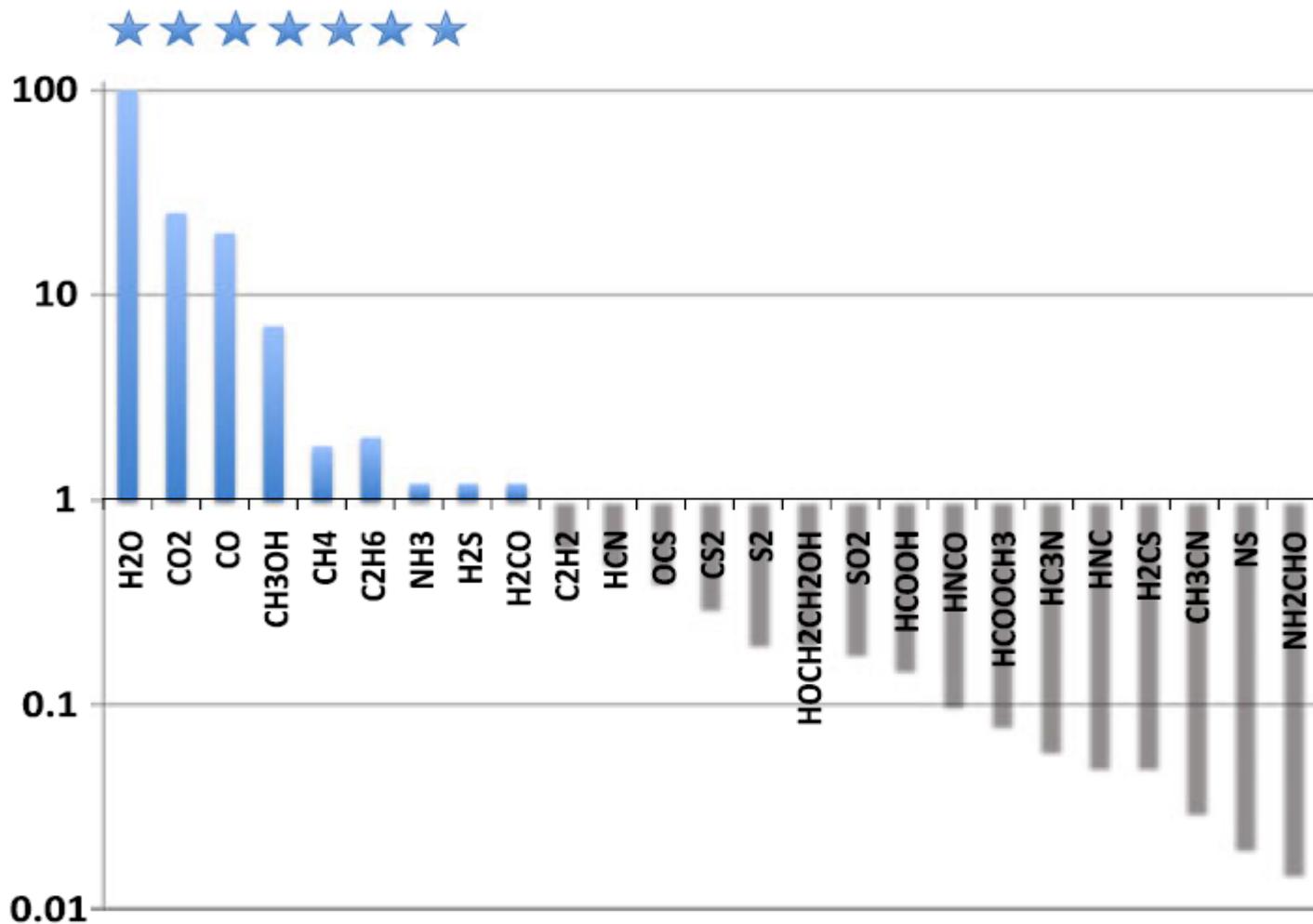
По данным КА ЕРОХІ и
КО Гершель
(Mumma et al., 2011)

Water vapor



Первичные летучие:
H₂O, CO₂, CO, C₂H₆,
HCN, CH₃OH

Кометные ядра: состав летучих



Содержание различных молекул в кометах относительно – H₂O. Звездочками отмечены также молекулы, обнаруженные на объектах пояса Койпера.

Химическое разнообразие комет

Первичные летучие: H_2O , CO_2 ,
 CO , HCN , H_2CO , CH_3OH , ...

(Crovisier et al., 2009):

- **Короткопериодические кометы**
(семейство Юпитера);

- **Долгопериодические кометы**
(облако Оорта и КВО).

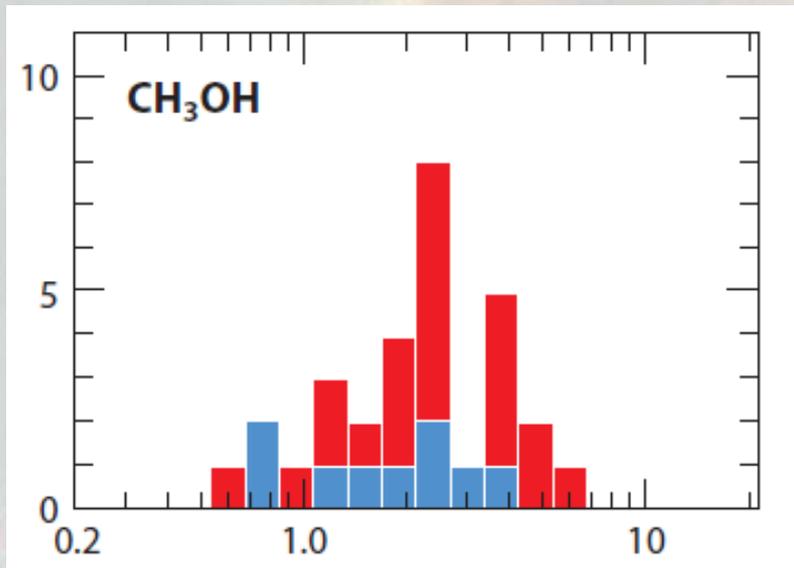
Открытые вопросы:

- Возможные летучие
кометного ядра –какова
степень их химического
разнообразия?

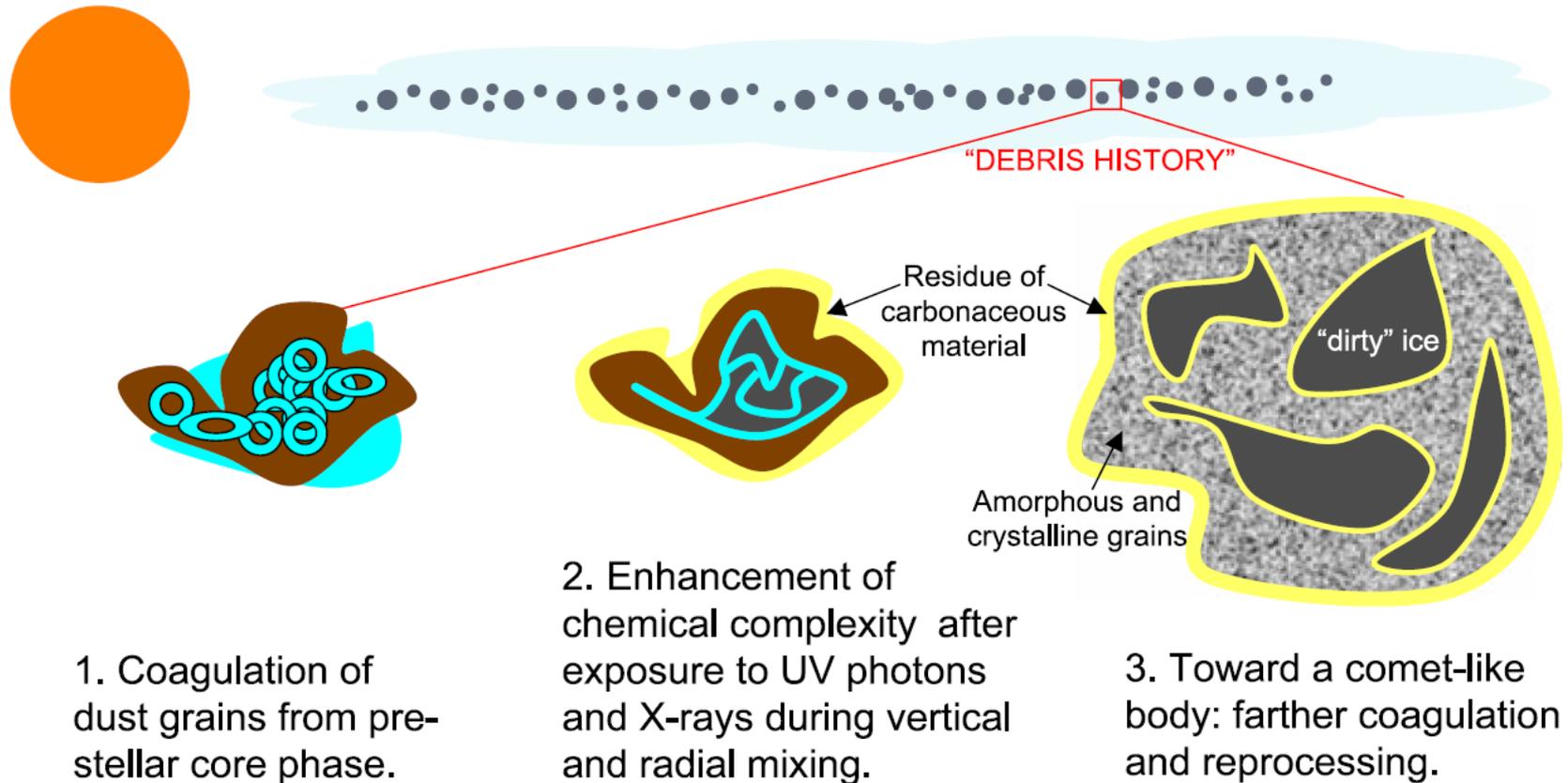
-

Открытые вопросы:

- В какой степени ядра
комет представляют
собой первичное
(примитивное)
вещество
межзвездной среды?



Кометные ядра: образование



Возможная история образования протокометных тел в осколочном диске (debris disk) : 1) коагуляция пылевых зерен; 2) рост химического разнообразия за счет воздействия УФ- и X-лучей и образование тугоплавкой оболочки; 3) рост планетезималей.

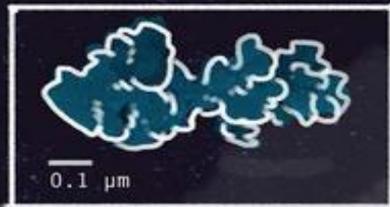
Кометные ядра: структура

National Aeronautics and
Space Administration



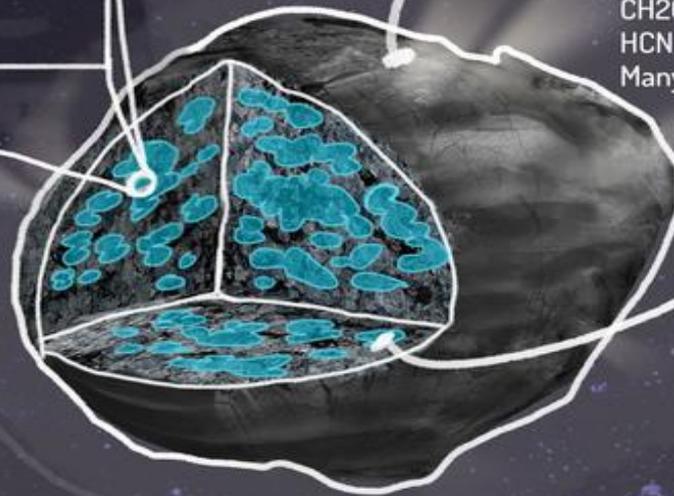
WHAT IS A COMET MADE OF?

INTERPLANETARY DUST PARTICLE



FROZEN GAS

CO
CO₂
H₂O
NH₃
CH₃OH
CH₂OH
HCN
Many More



INTERPLANETARY DUST PARTICLE

DIAMOND
GRAPHITE
SILICON CARBIDE
TITANIUM CARBIDE (TiC)
SILICON NITRIDE (Si₃N₄)
CORONDUM (Al₂O₃)
SPINEL (MgAl₂O₄)
HIBONITE ((Ca,Ce)(Al,Ti,Mg)₁₂O₁₉)
TITANIUM OXIDE (TiO₂)
SILICATE MINERALS (OLIVINE AND PYROXENE)

COMETOPAUSE

MAGNETIC BARRIER

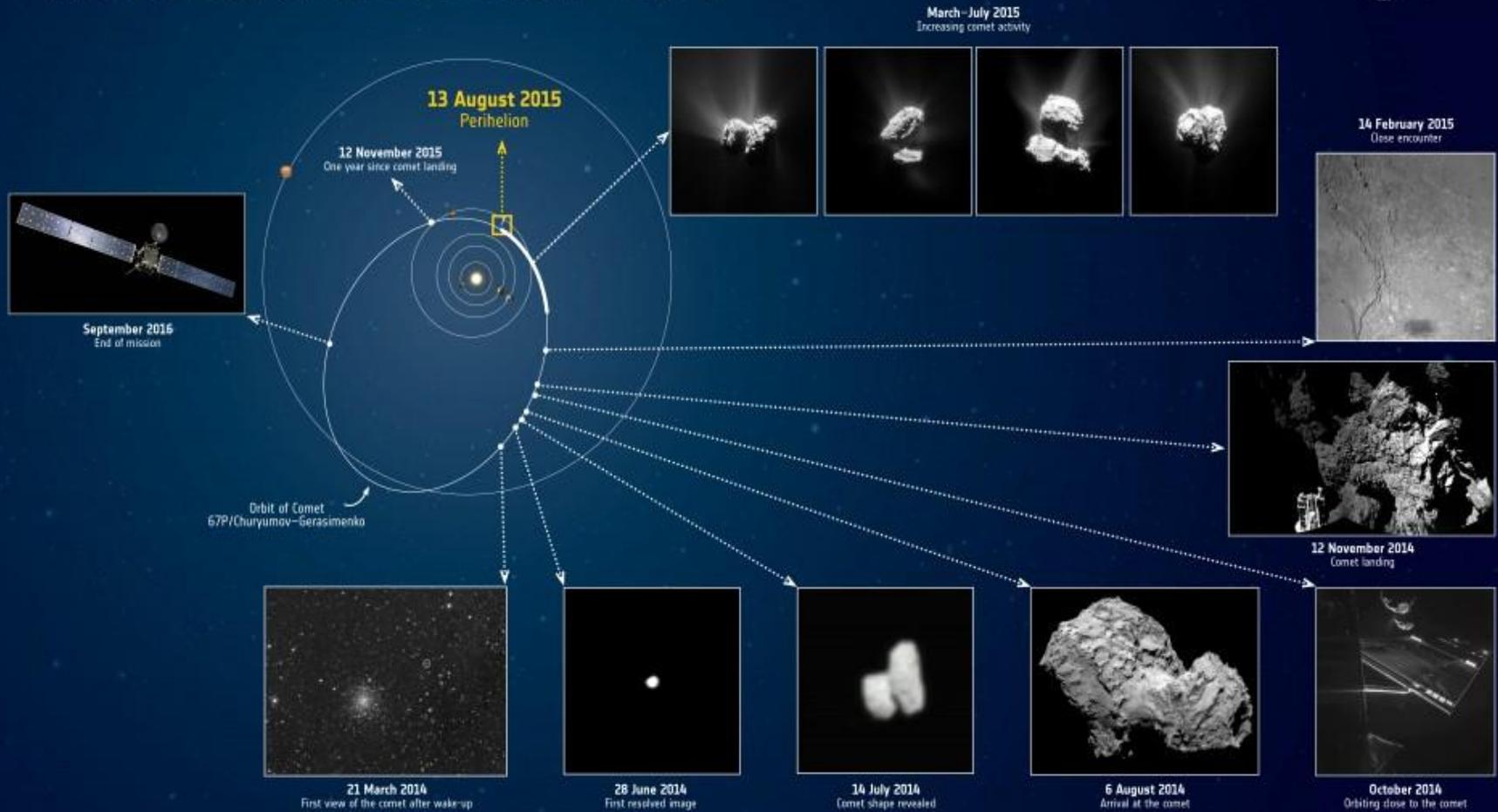
BOWSHOCK

Заключение по введению

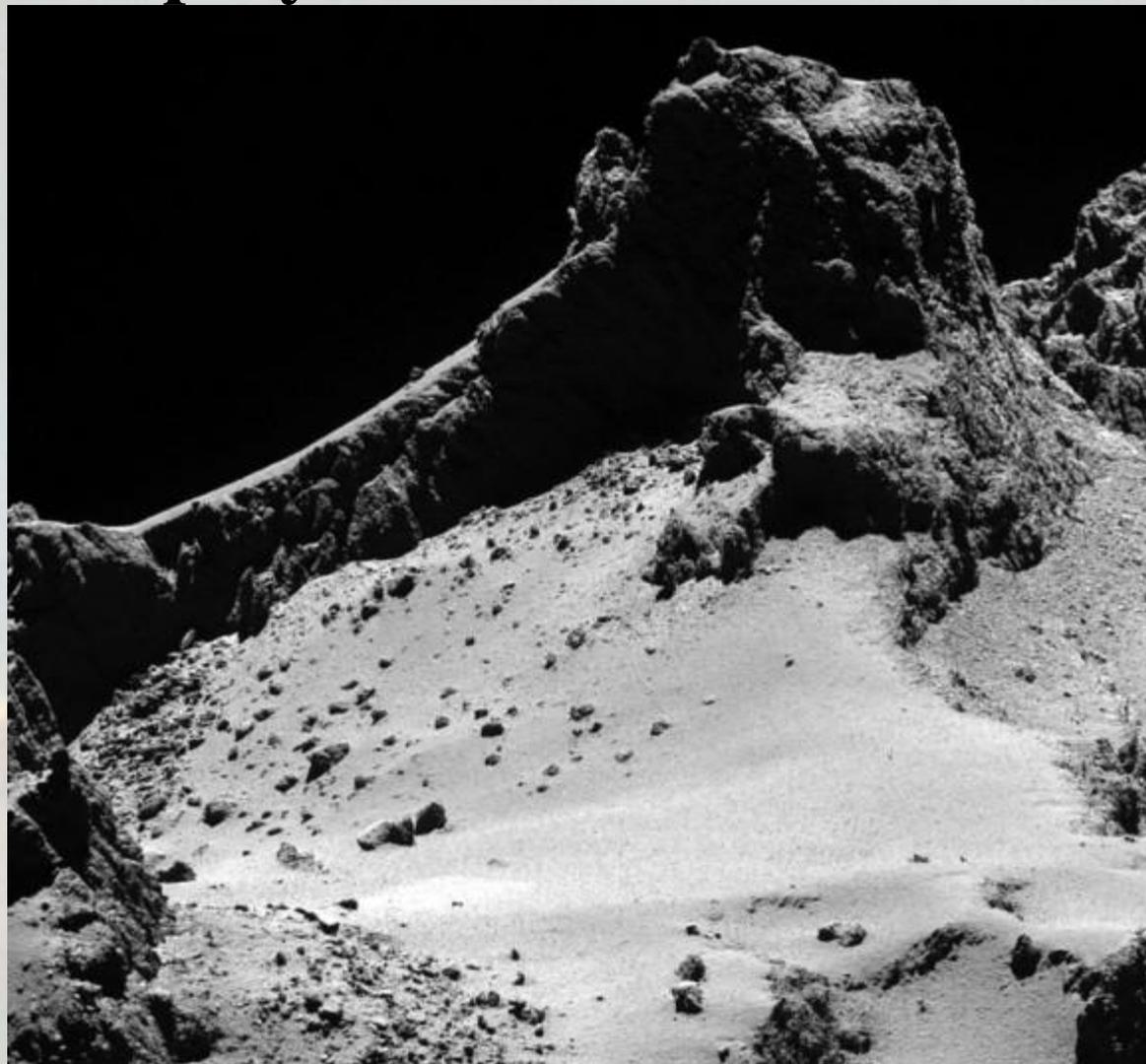
- **Химическая сложность межзвездной среды возникает на ранних стадиях образования звезд.**
- **Плотные холодные (дозвездные) и горячие (протозвездные) ядра являются эффективными молекулярными фабриками.**
- **Сложные органические молекулы могут сохраняться в ледяных мантиях частиц пыли и включены в кометные ядра при образовании планетных систем.**

КА ESA ROSETTA: год с кометой 67P

→ ROSETTA: LIVING WITH A COMET

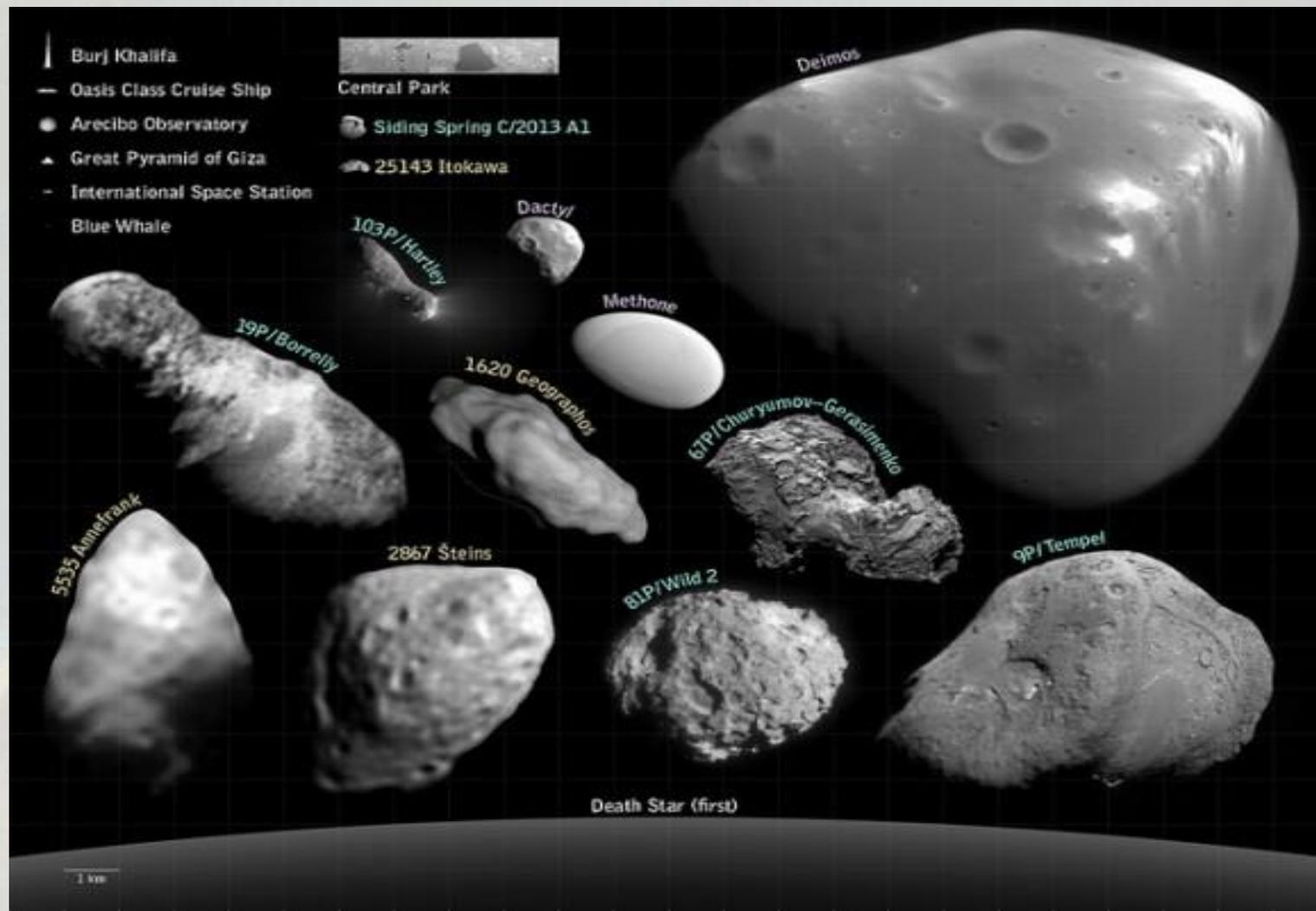


Первые результаты КА ESA ROSETTA



Суровый, но живописный пейзаж усыпанной камнями области «головы» ядра кометы 67P/С-G, снятый камерой КА ROSETTA с расстояния всего лишь 8 км от поверхности.

Первые результаты КА ESA ROSETTA



Комета 67P по сравнению с другими кометами и астероидами и др. объектами (иллюстрация Judy Schmidt).

Первые результаты КА ESA ROSETTA

Выпуск журнала Science от 23 января 2015 г, в котором приведены 8 статей с первыми результатами космической миссии ESA ROSETTA.

H. Sierks et al., On the nucleus structure and activity of comet 67P/C-G

A. Rotundi et al., Dust measurements in the coma of comet 67P/C-G inbound to the Sun

F. Capaccioni et al., The organic-rich surface of comet 67P/C-G as seen by VIRTIS/Rosetta

H. Nilsson et al., Birth of a comet magnetosphere: A spring of water ions

N. Thomas et al., The morphological diversity of comet 67P/C-G

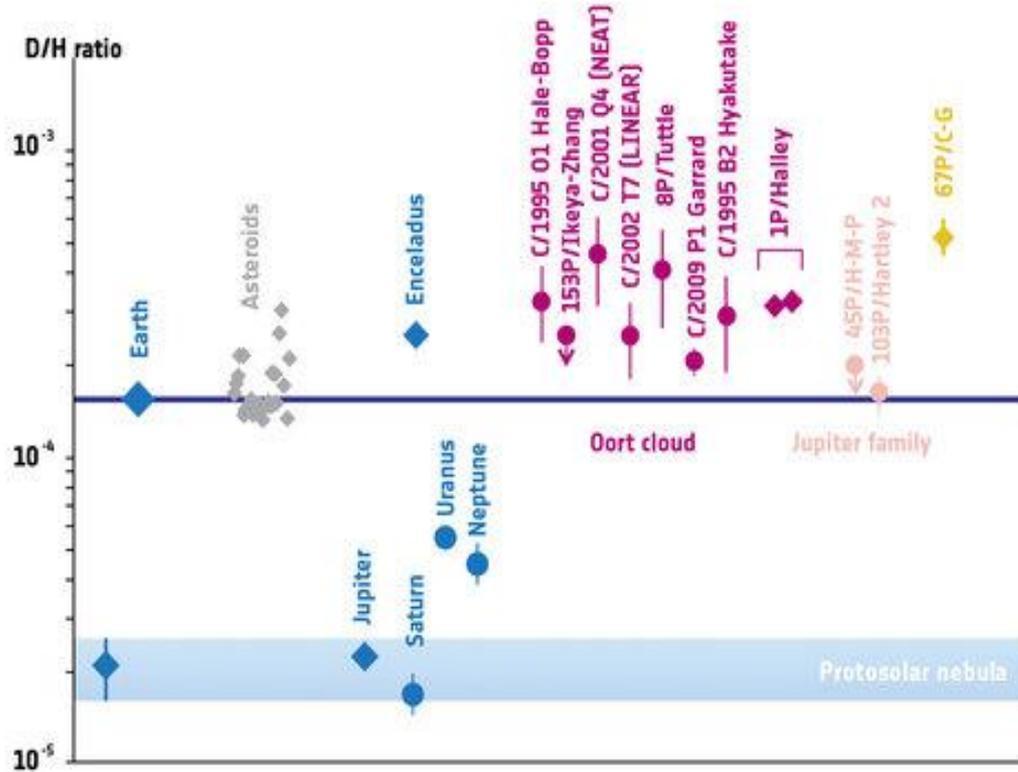
K. Altwegg et al., 67P/C-G, a Jupiter family comet with a high D/H ratio

M. Hässig et al., Time variability and heterogeneity in the coma of 67P/C-G

S. Gulikis et al., Subsurface properties and early activity of comet 67P/C-G

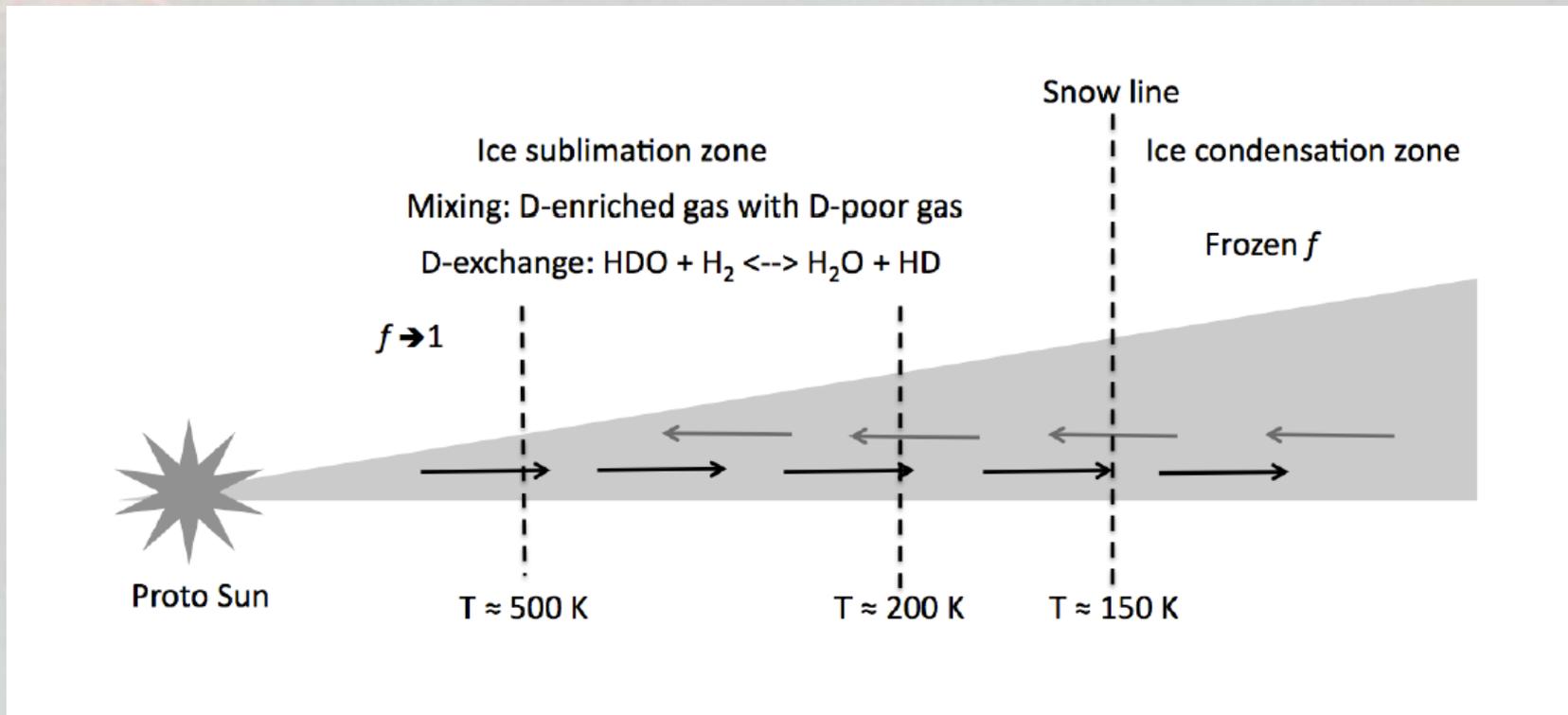


Ядро кометы 67P: *Отношение D/H*



Отношение дейтерия к водороду для объектов в Солнечной системе. Оценка для 67P/C-G – 5.3×10^{-4} , что превышает более чем в 3 раза значение для земного океана (Altwegg et al., Science, 2014).

Ядро кометы 67P: *Отношение D/H*



Схематическое представление протосолнечной туманности- это турбулентный диск с переносом вещества к и от протозвезды. Линия снега со временем движется во внешние области, что приводит к сублимации льдов и обогащению газа дейтерием за счет реакции $\text{H}_2\text{O} + \text{HD} \leftrightarrow \text{HDO} + \text{H}_2$ для $T \geq 200\text{ K}$. Затем движущийся наружу диска газ конденсирует, образуя ледяную мантию на пылевых частицах. Таким образом **во внешних областях диска сохраняется повышенное значение D/H.**

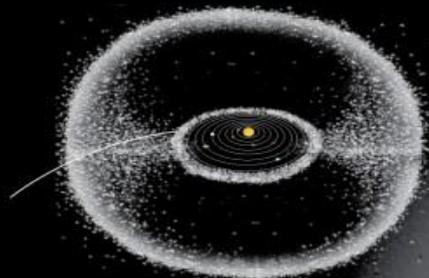
Ядро кометы: комета 67P/C-G формировалась при очень низких температурах

Rosetta has made the first detection of molecular nitrogen at a comet



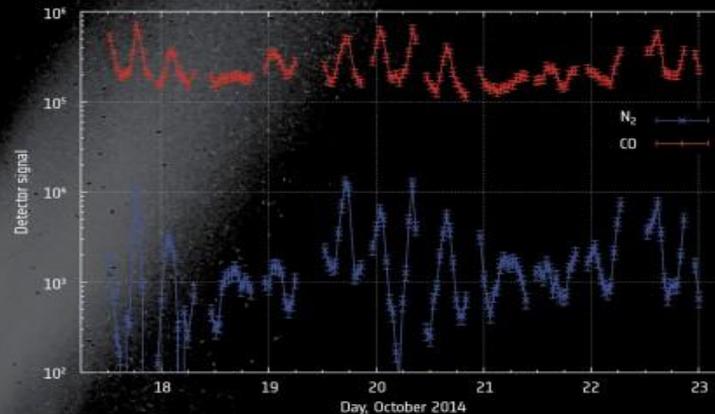
The measurements were taken 17–23 October 2014

By comparing the ratio of N_2 to CO at the comet with that of the protosolar nebula, it was discovered the comet must have formed at low temperatures, consistent with the Kuiper Belt.



78%
of Earth's atmosphere is
molecular nitrogen, N_2 .

Although comets could have delivered some nitrogen to Earth, the new study suggests that Jupiter-family comets like 67P/C-G are not the major source.

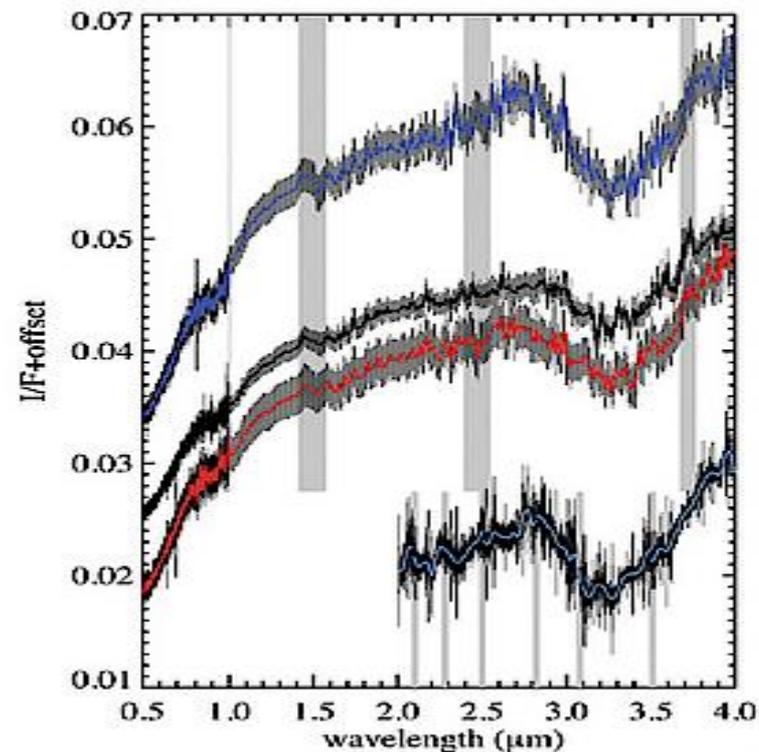
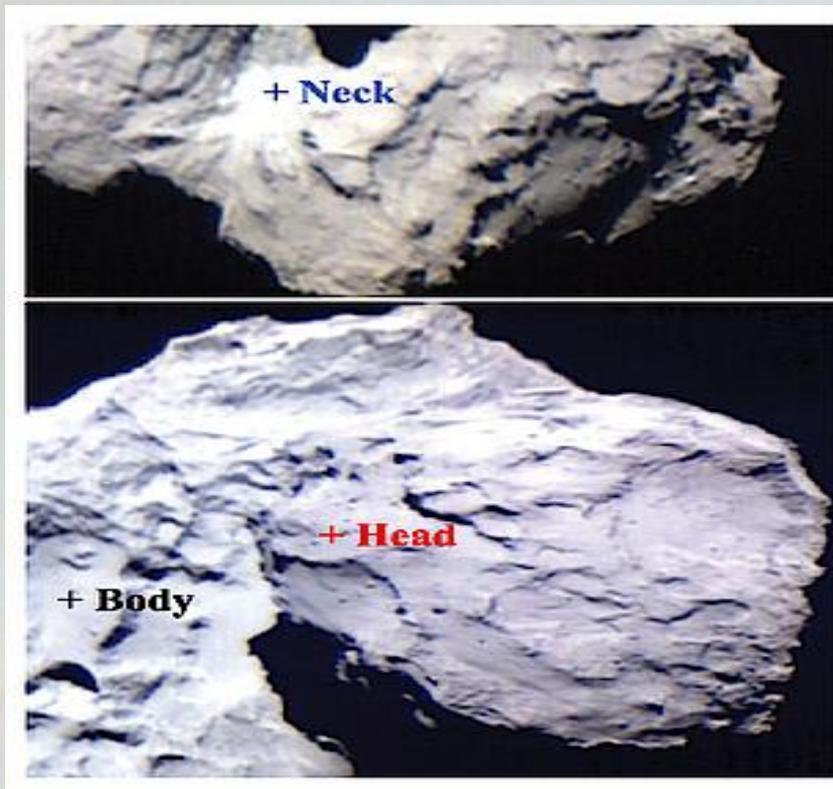


ROSINA recorded variations in the amount of molecular nitrogen (N_2) and carbon monoxide (CO) detected as a function of time, comet rotation and position of the spacecraft above the comet. An average ratio of N_2/CO of $(5.70 \pm 0.66) \times 10^{-3}$ was determined, with minimum and maximum values of 1.7×10^{-3} and 1.6×10^{-2} , respectively.

The detector signal is integrated over 20 seconds. A correction factor accounting for the instrument sensitivity is applied in order to derive the ratio.

Количество молекулярного азота было невелико и в среднем составляло всего $(5.70 \pm 0.66) \cdot 10^{-3}$ от количества угарного газа. При этом оно резко менялось от одного измерения к другому. В серии из 138 замеров отношение N_2/CO менялось от $1.7 \cdot 10^{-3}$ до $1.6 \cdot 10^{-2}$ по данным ROSINA (Rubin et al., Science, March 20, 2015).

Поверхность кометы 67P/С-G: сухая, темная и богатая органикой: данные *VIRTIS* показывают нам сухую темную поверхность ядра кометы, богатую нелетучими органическими веществами.



Спектры «головы», «шеи» и «тела» ядра кометы 67P/С-G. По вертикальной оси отложено альbedo, т.е. отношение отраженного света к падающему. Для большей наглядности спектры сдвинуты относительно друг друга на 0.01 и 0.02.

Поверхность кометы 67P/C-G: сухая, темная и богатая органикой: *данные VIRTIS (Caraccioli et al).*

Из чего же состоит темная кора кометы Чурюмова-Герасименко?

Сравнение лабораторных спектров различных типов углистых хондритов (CI, CM и CR) со спектрами поверхности ядра кометы показало их явные различия. Спектр отражения нерастворимого органического остатка из метеорита Мёрчисон (Murchison) показал больше сходства. Кроме того, исследователи сравнили спектры кометы с лабораторными спектрами различных темных веществ (сульфидов железа и никеля, сажи и энстатита). Они отметили, что различные сульфиды вполне могут отвечать за наклон спектра ядра в диапазоне 0.5-1 мкм.

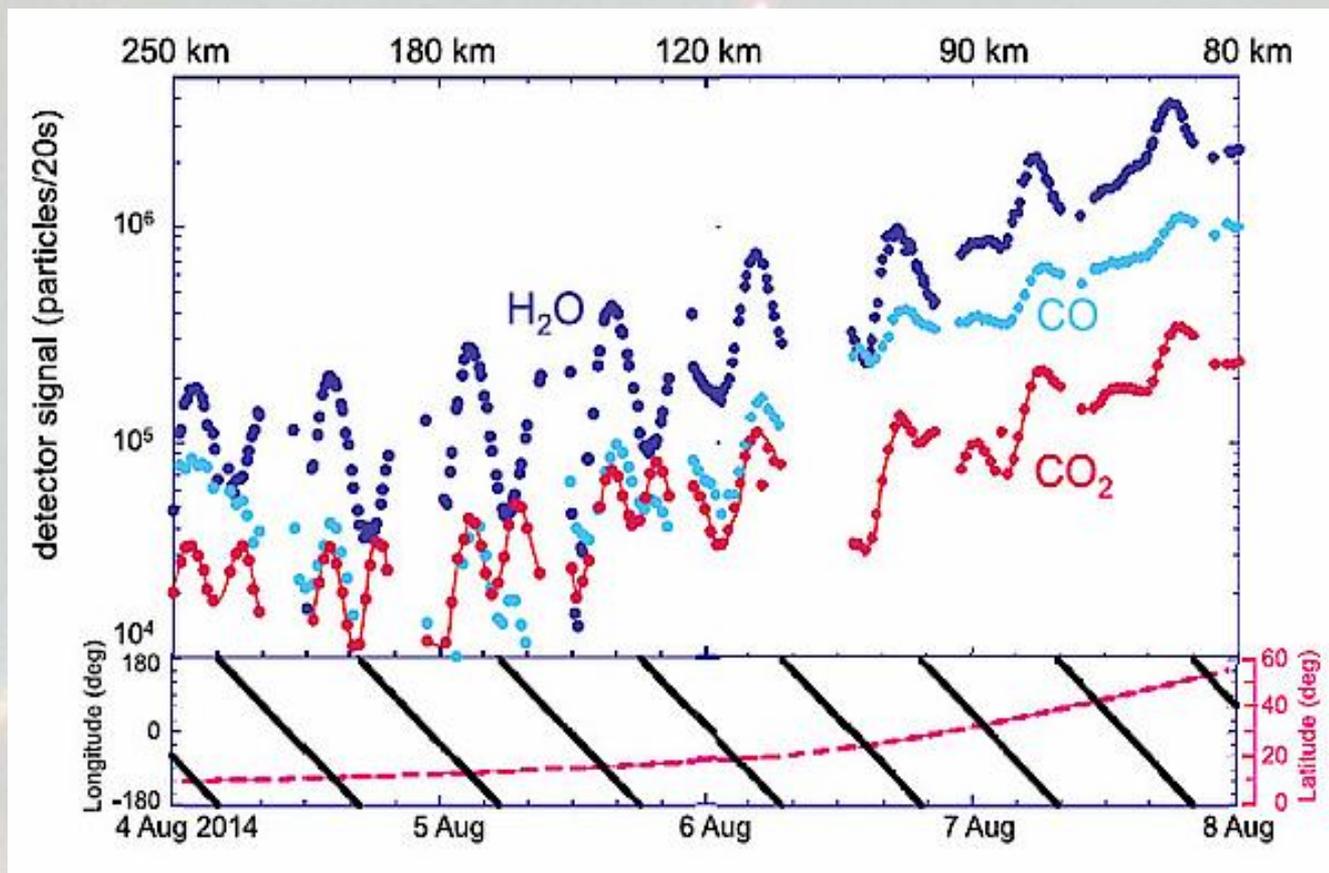
Еще интереснее оказался поиск веществ, отвечающих за полосу поглощения в области 2.9-3.6 мкм. Авторы сравнили спектр ядра в диапазоне 2.5-4.5 мкм со спектрами различных органических веществ. Наибольшее сходство было получено со спектром смеси веществ под названием «Exp Or1», полученной путем ультрафиолетового облучения смеси $\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_3\text{OH}:\text{NH}_3:\text{CO}:\text{CO}_2$ в отношении 2:1:1:1:1.

Поверхность кометы 67P/C-G: сухая, темная и богатая органикой: *данные VIRTIS показывают нам сухую темную поверхность ядра кометы, богатую нелетучими органическими веществами (Caraccioli et al).*

Несмотря на регулярные процессы омолаживания, действующие на ядро кометы Чурюмова-Герасименко во время каждого ее возвращения к Солнцу, состав поверхности ядра, по данным VIRTIS, весьма однороден. Это говорит о том, что космическое выветривание сыграло второстепенную роль в формировании состава поверхности. Вещество ядра кометы оказывается практически нетронутым с момента ее образования.

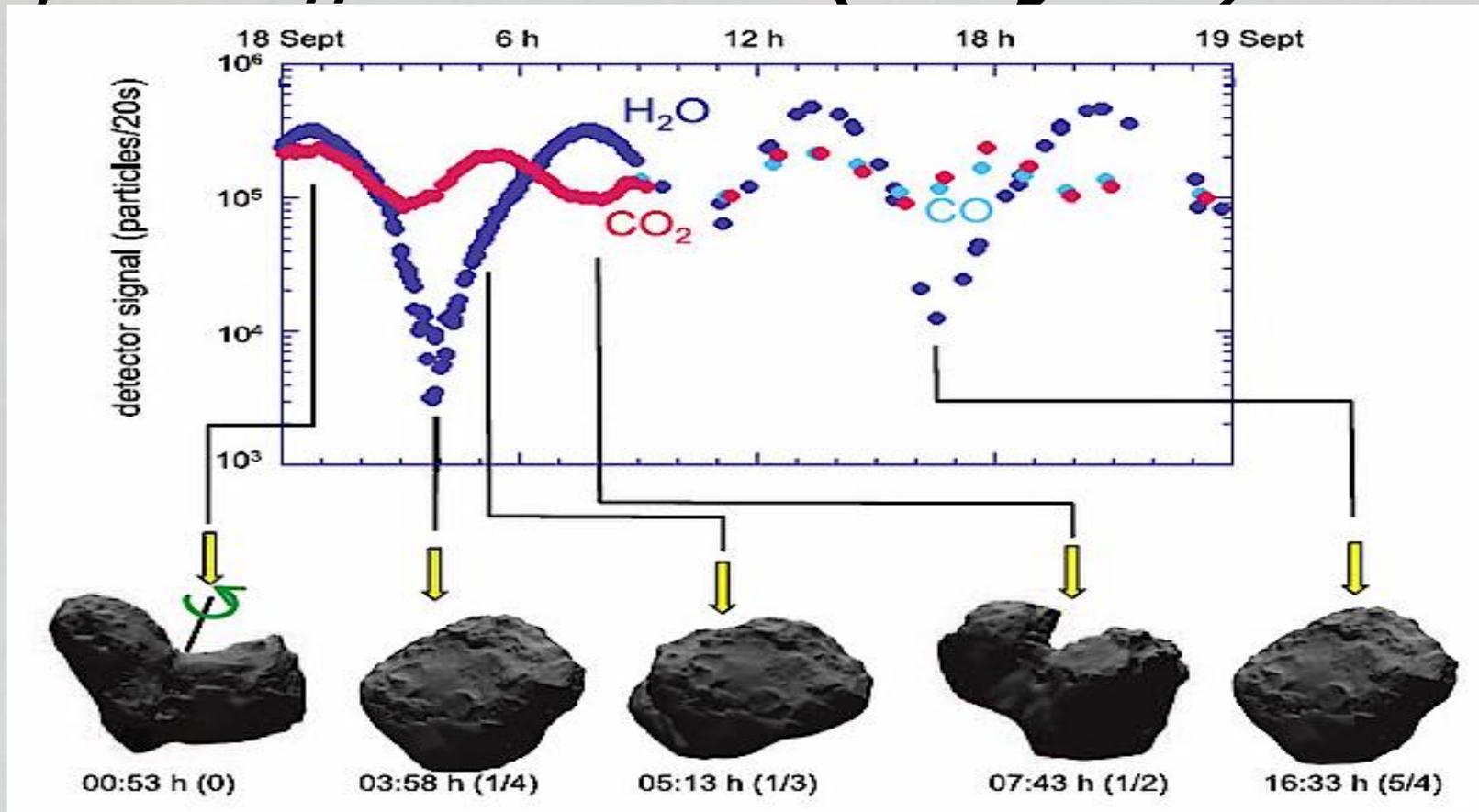
Органические вещества, входящие в состав ядра, образовались из смеси льдов летучих веществ (метана, аммиака, метанола, угарного и углекислого газов) при низких температурах путем облучения ультрафиолетом и космическими лучами. Все это согласуется с гипотезой, что комета Чурюмова-Герасименко сравнительно недавно покинула пояс Койпера и перешла на орбиту кометы семейства Юпитера.

Об изменчивости и неоднородности комы кометы 67P/C-G: по данным ROSINA (Hässig et al.)



Содержание водяного пара, угарного и углекислого газов в коме кометы 67P/C-G по данным масс-спектрометра ROSINA. Сверху отложено расстояние между «Розеттой» и ядром кометы, снизу – время. Также на нижней панели отображены координаты ближайшей к космическому аппарату точки на поверхности ядра.

Об изменчивости и неоднородности комы кометы 67P/C-G: по данным ROSINA (Hässig et al.)



Пики в содержании водяного пара наблюдались, когда в прямой видимости с «Розетты» оказывалась зона перешейка, отличающаяся наибольшей активностью. Напротив, глубокие минимумы в содержании водяного пара фиксировались тогда, когда ядро поворачивалось к «Розетте» южной частью своей большей половины (т.н. «телом»).

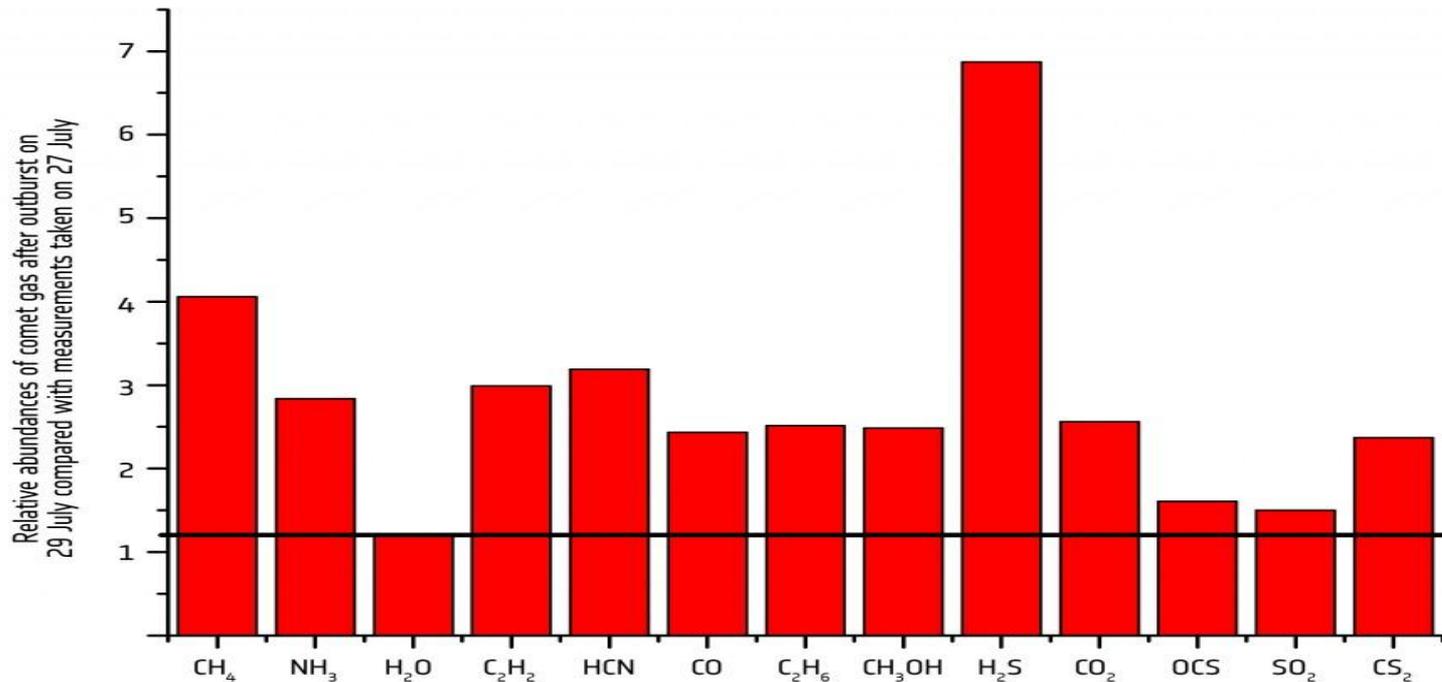
Об изменчивости и неоднородности комы кометы 67P/С-G: короткоживущая, но сильная струя



Короткоживущая струя с поверхности кометы 67P была захвачена камерой OSIRIS KA Rosetta 29 июля 2015. Изображение слева было принято в 13:06 (по Гринвичу), и не обнаруживает никаких видимых признаков струи. Очень сильная струя видна на среднем изображении, полученном в 13:24. Остаточные следы деятельности струи очень слабо видны на правом изображении, полученном в 13:42.

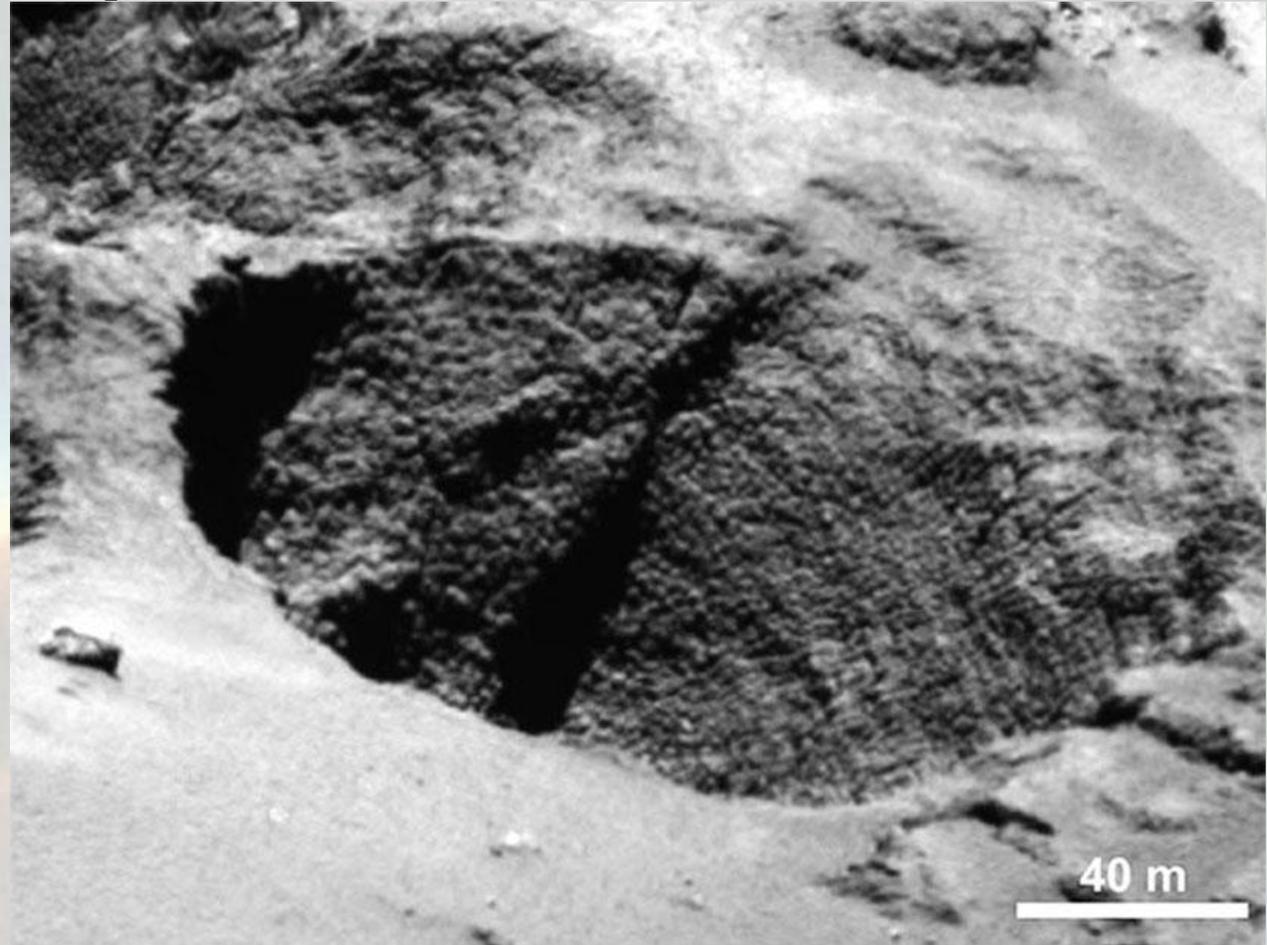
Об изменчивости и неоднородности комы кометы 67P/C-G: короткоживущая, но сильная струя

→ ROSINA MEASUREMENTS OF COMET GAS FOLLOWING OUTBURST



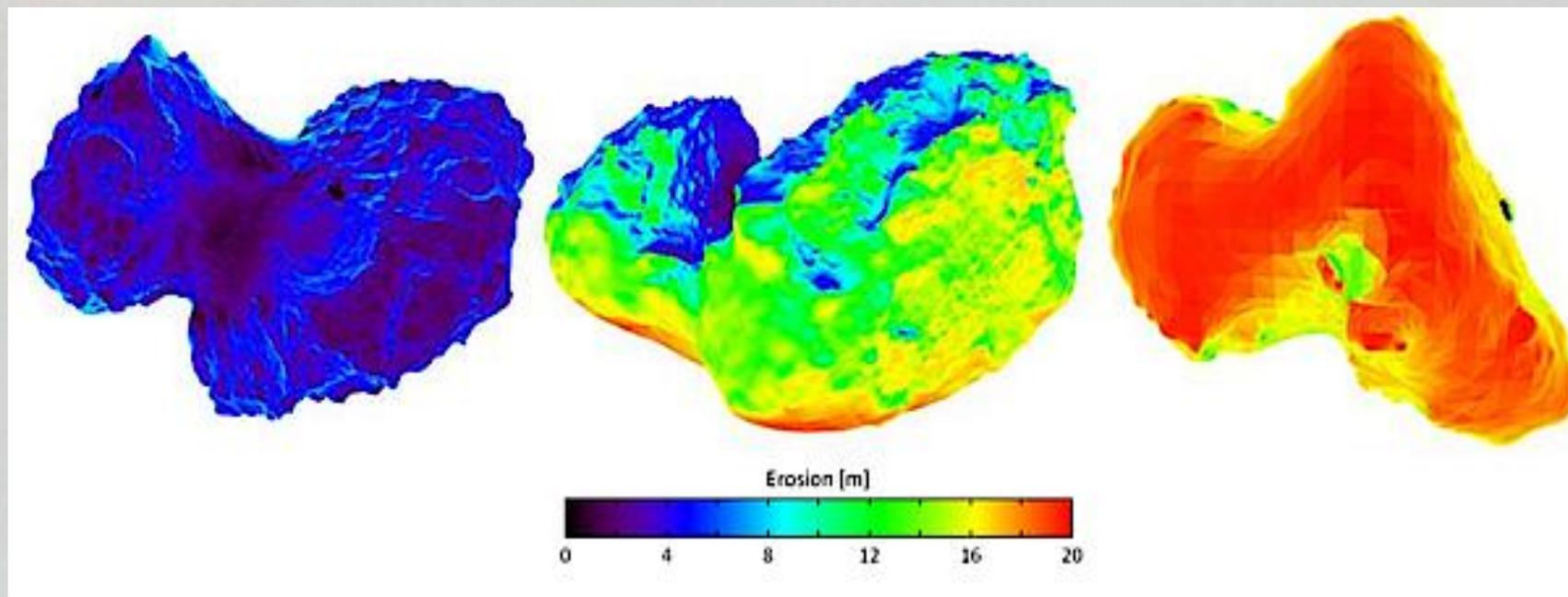
Во время выброса газопылевой струи с ядра кометы 67P 29 июля 2015 года, при помощи инструмента ROSINA были обнаружены изменения в составе газов по сравнению с предыдущими днями. На графике показаны относительные обилия различных газов после выброса по сравнению с более ранними измерениями (водяной пар обозначается черной линией).

О разнообразии рельефа поверхности ядра кометы 67P/C-G (Sierks et al.):



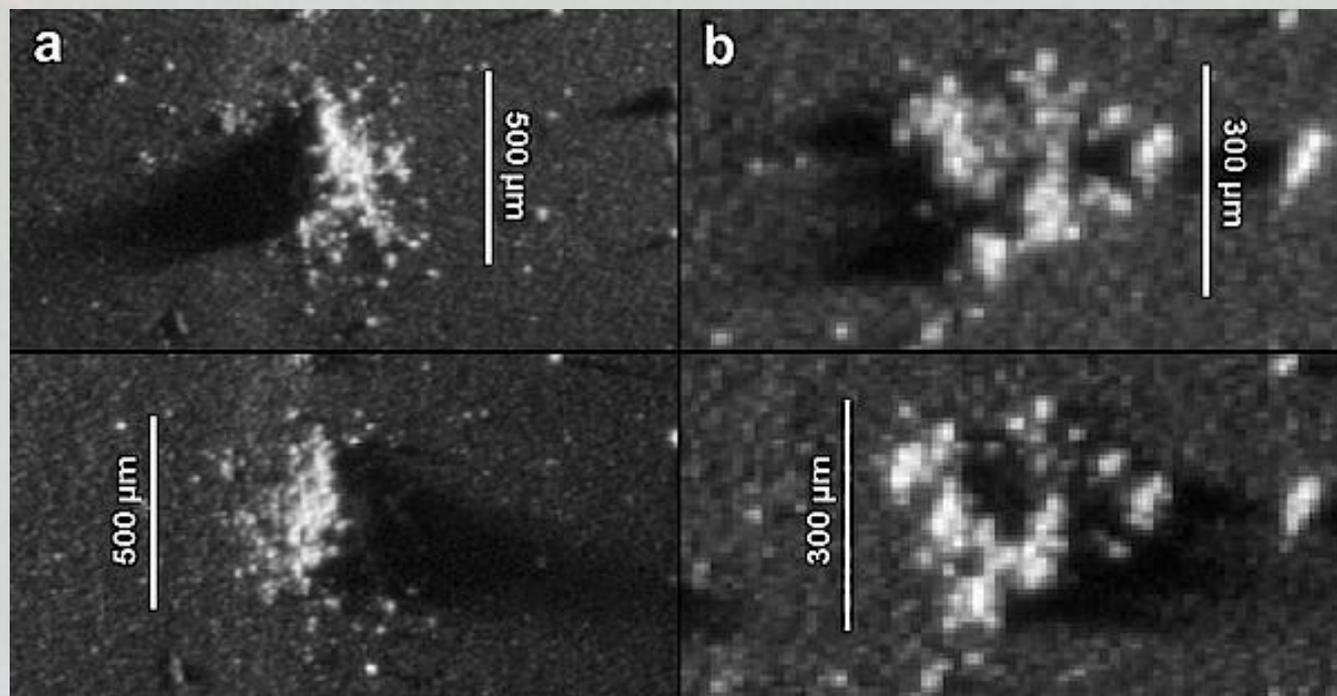
Среди загадочных форм рельефа, обнаруженных исследователями на снимках OSIRIS, можно назвать участки т.н. «гусиной кожи», наблюдаемые на самых крутых склонах. «Пупырышки» на этой «коже» имеют характерный размер 3 метра. Что это такое – пока совершенно не ясно.

Прогноз погоды для кометы 67P/C-G (Sierks et al.):



Большой наклон оси вращения и эксцентричная орбита (эксцентриситет орбиты кометы достигает 0.641) приводит к необычной смене сезонов. В северном полушарии кометы лето длится 5.6 лет, но комета в это время находится далеко от Солнца и нагревается слабо. В южное полушарие лето приходит только на 10 месяцев, но это очень жаркие месяцы, поскольку именно в это время комета проходит перигелий. Из-за этого темпы эрозии северного и южного полушарий отличаются очень сильно. Южное полушарие ядра кометы (показано справа) теряет за один оборот вокруг Солнца слой вещества толщиной до 20 метров!

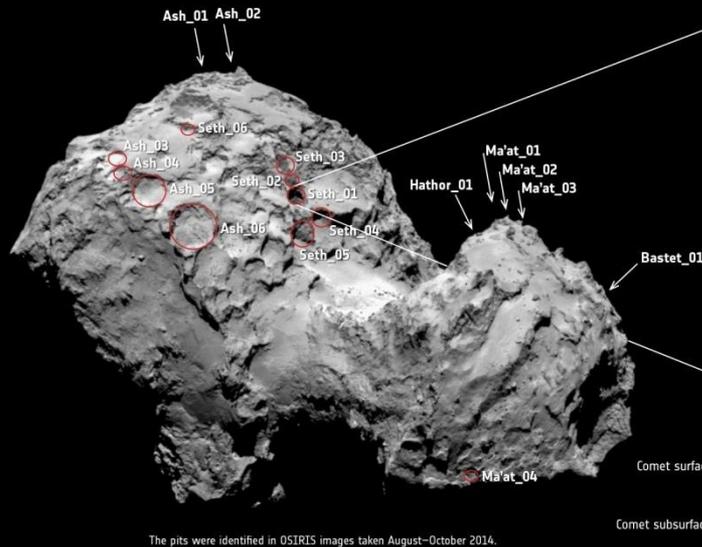
Пушистая пыль кометы 67P/C-G: по данным COSIMA



Найдено, что пылевые частицы, покидавшие комету Чурюмова-Герасименко в начальный период ее активности, «пушистые», рыхлые, сухие и богатые натрием. Другими словами, они могут рассматриваться как источник межпланетной пыли. Пылевые агломераты, обнаруженные COSIMA, образовались на поверхности ядра кометы после предыдущего прохождения перигелия, когда газовые потоки ослабли и уже больше не могли эффективно сдувать пыль с поверхности (Schulz et al., Nature, 2015).

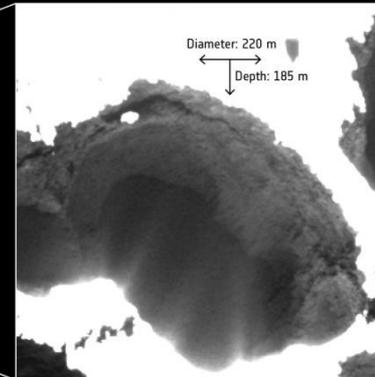
Ядро кометы 67P-G: воронки на поверхности, через которые происходит генерация струй

→ ACTIVE PITS ON COMET 67P/CHURYUMOV–GERASIMENKO



The pits were identified in OSIRIS images taken August–October 2014.

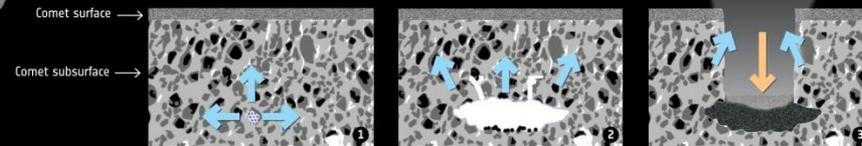
→ Close-up of Seth_01 shows jets emanating from the pit walls



→ Active pits contribute to the comet's overall activity seen from afar.



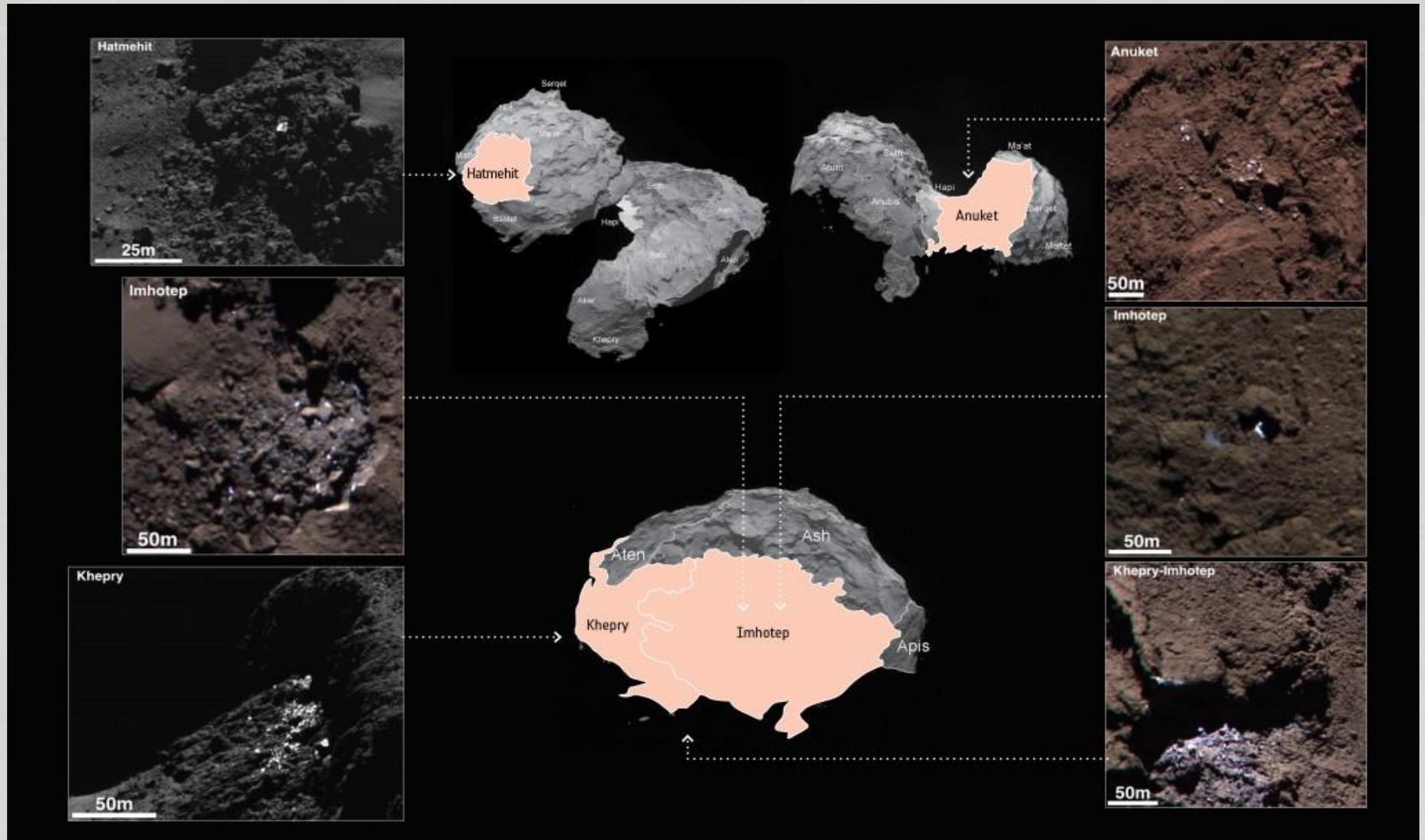
→ Pit formation via sinkhole collapse



1. Heat causes subsurface ices to sublimate (blue arrows), forming a cavity (2). When the ceiling becomes too weak to support its own weight, it collapses, creating a deep, circular pit (3, orange arrow). Newly exposed material in the pit walls sublimates, accounting for the observed activity (3, blue arrows).

Ряд газопылевых струй, выходящих с поверхности ядра, можно связать с активными воронками, которые были, вероятно, образованы за счет внезапного обрушения поверхности. Эти "провалы" предоставляют возможность заглянуть в хаотичный и разнообразный интерьер ядра кометы.

Ядро кометы 67РС-G: *водяной лед на поверхности*

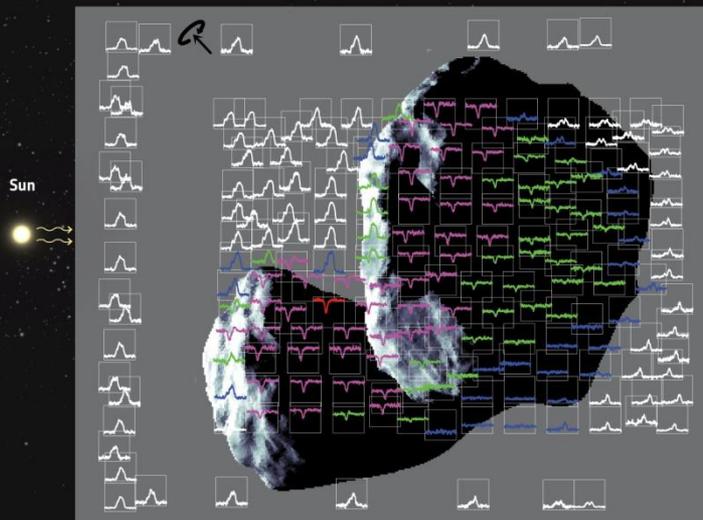


В данных наблюдений камеры высокого разрешения OSIRIS выявлено более ста участков водяного льда размером в несколько метров в на поверхности кометы 67P.

Ядро кометы 67P-C/G : пары воды около ядра по данным наблюдений инструмента MIRO



→ Rosetta's first map of water vapour around Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko

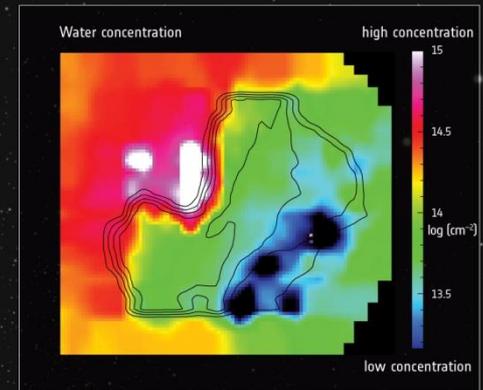
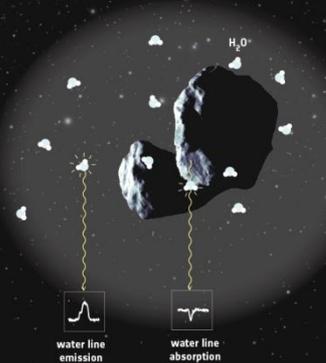


This figure provides an indication of the relative position of each spectrum with respect to the nucleus. The scanning procedure lasted almost four hours, and the nucleus rotated by about 90 degrees in the meantime.

The colour scale refers to the temperature of background emission from the nucleus (blue: < -223 °C, green: -223 °C to -173 °C, pink: -173 °C to -123 °C, and red > -123 °C).



The data were collected on 7 September 2014



The colour map is based on MIRO's spectral mapping and shows the concentration of water around the comet. The black contours show emission at submillimetre wavelengths measured by MIRO, with increasing emission from the edges inwards.

Key results:

- Highest water concentration above neck region
- Significant amounts of water across the day side
- Very little water on the night side (especially near the south pole)

Индикация положения каждого из спектров инструмента **MIRO** по отношению к соответствующей области кометного ядра. Солнце находится слева. Данные Biver соавт. (2015); ядро представлено в соответствии с моделью 5 формы кометы из Jorda et al. (2015).

Ядро кометы 67P-G: *данные посадочного модуля Philae*

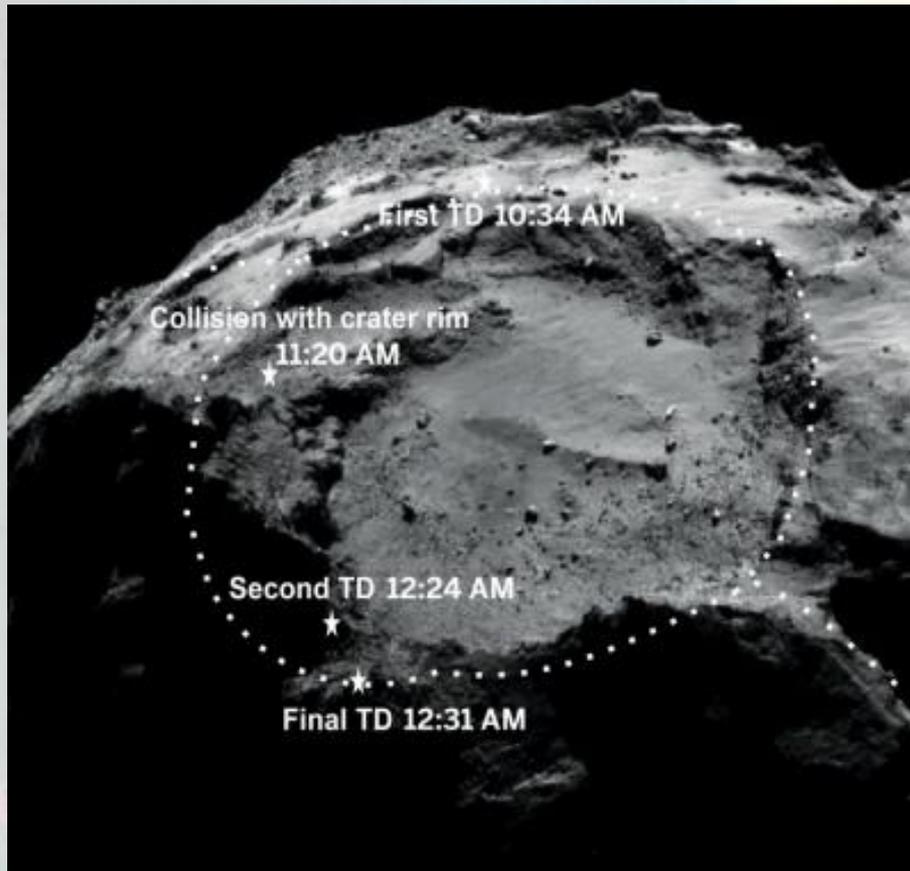


Анализ данных с инструментов зонда "Розетта" и посадочного модуля "Фила" показал, что недра кометы Чурюмова-Герасименко состоят по большей части из органики и зерен первичной пыли Солнечной системы, а не преимущественно из льда, как считалось ранее.

Данные спектроскопии показывают, что освещенная Солнцем поверхность ядра окутана оболочкой на основе углерода, без существенных областей ледяного покрова. "Мы исследуем комету 67P, которая является, возможно, более первичной и более представительной для условий ранней Солнечной системы, чем другие объекты".

Ядро кометы 67РС-G: *данные посадочного модуля Philae*

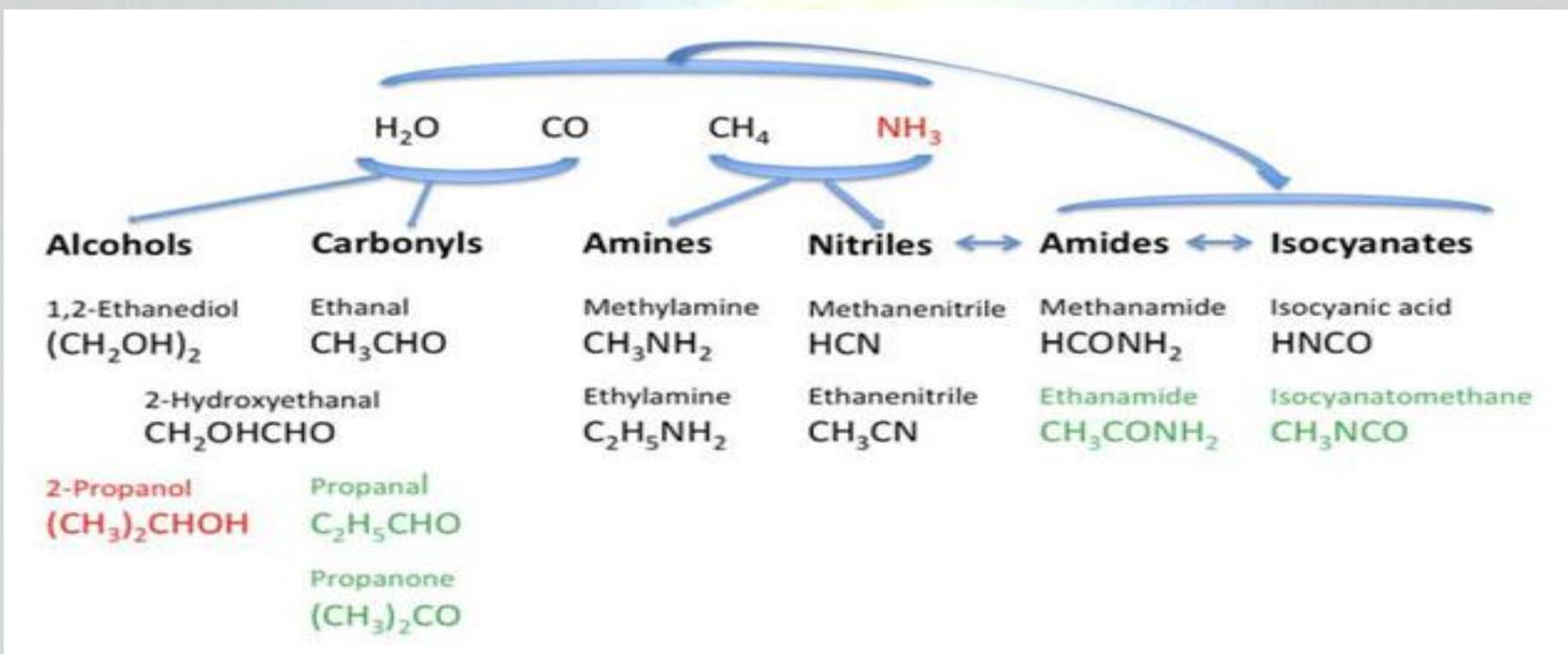
Самым главным открытием исследователи назвали обнаружение на зернистой поверхности кометы гранул размером 1 мм или чуть меньше. Они состоят из сложных органических молекул, которые поглощают свет.



"Фила" обнаружил, что недра кометы по большей части состоят не из льда, как ожидали планетологи, а зерен пыли и органики. Комета представляет собой не "грязный ледяной шар", а "замороженный грязевой шар". Эта неожиданная картина "кометного мира" была расширена в статьях, опубликованных в Science. Модулю "Фила" удалось обнаружить в недрах кометы огромное количество пустот, на которые приходится примерно 75-85% от ее объема.

Ядро кометы 67P-C: *данные посадочного модуля Philae*

Самым главным открытием исследователи назвали обнаружение на зернистой поверхности кометы гранул размером 1 мм или чуть меньше. Они состоят из сложных органических молекул, которые поглощают свет. Органические молекулы на основе углерода многими учеными рассматриваются в качестве блоков для «строительства жизни».



Возможные пути формирования соединений на ядре кометы 67P. Зеленым выделены соединения, впервые определенные для комет.

Ядро кометы 67РС-G: *данные посадочного модуля Philae*

Анализ этой пыли при помощи прибора COSAC показал, что поверхность кометы очень богата органикой, в том числе и веществами, которые раньше не обнаруживались на других кометах – метилизоцианат, ацетон, пропальдегид, ацетамид и гликольальдегид. Достаточно неожиданным образом другому химическому инструменту "Филы" Ptolemy не удалось найти на поверхности кометы соединений серы, которые "Розетта" учуяла с орбиты.

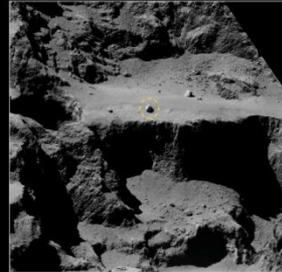
Первые четыре вещества, как подчеркивают ученые, могут служить "кирпичиками" для образования аминокислот, основы белков и нуклеотидов, "букв" ДНК, а последнее – базой для появления примитивных сахаров. Все это означает, что ранняя Солнечная система содержала в себе все необходимые компоненты для зарождения жизни. Кроме того, планетологи подозревают, опираясь на данные с Ptolemy, что на поверхности 67P могут присутствовать примитивные полимеры, что опять же увеличивает вероятность того, что кометы были "поставщиками органики" для Земли.

67P/C-G: обрушивающиеся скалы показывают интерьер кометы



→ COMET CLIFF COLLAPSE

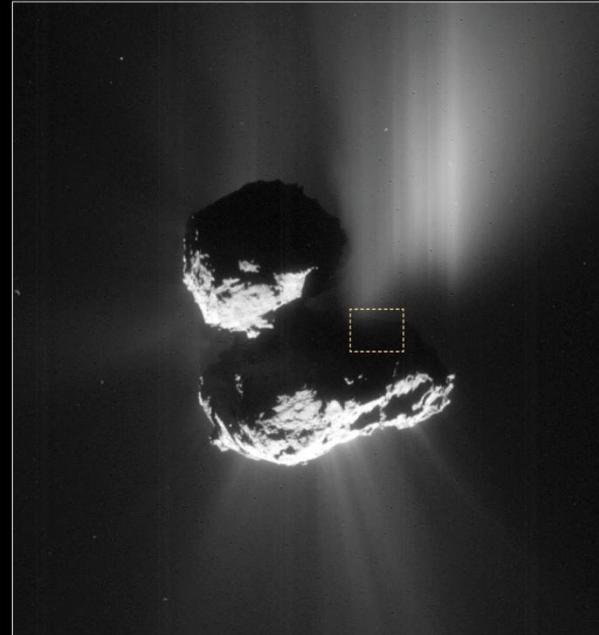
Before



19 Sep 2014



21 Sep 2014



10 Jul 2015

After



26 Dec 2015



8 Jun 2016

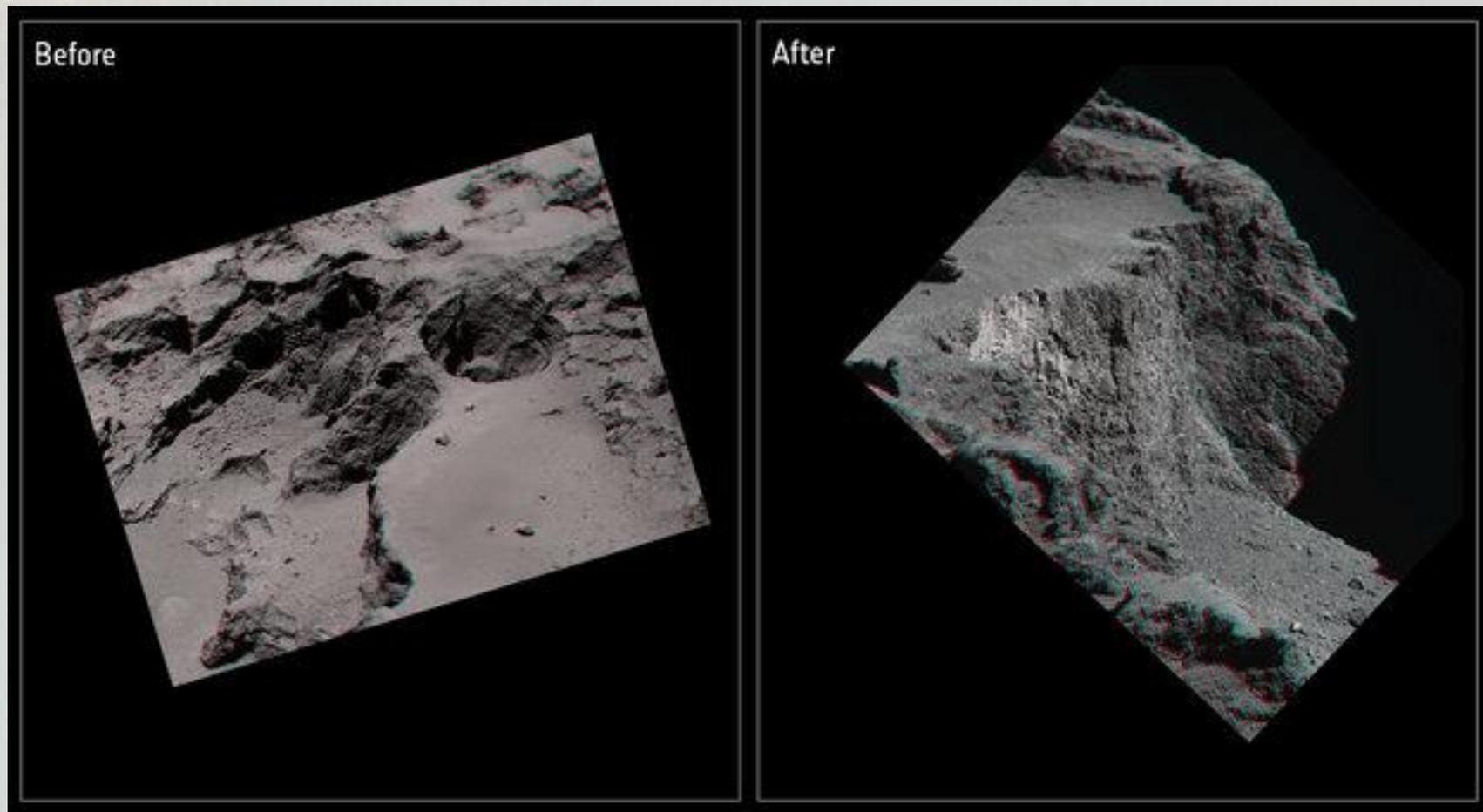
www.esa.int

Credits: NavCam: ESA/Rosetta/NavCam – CC BY-SA IGO 3.0; OSIRIS: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA

European Space Agency

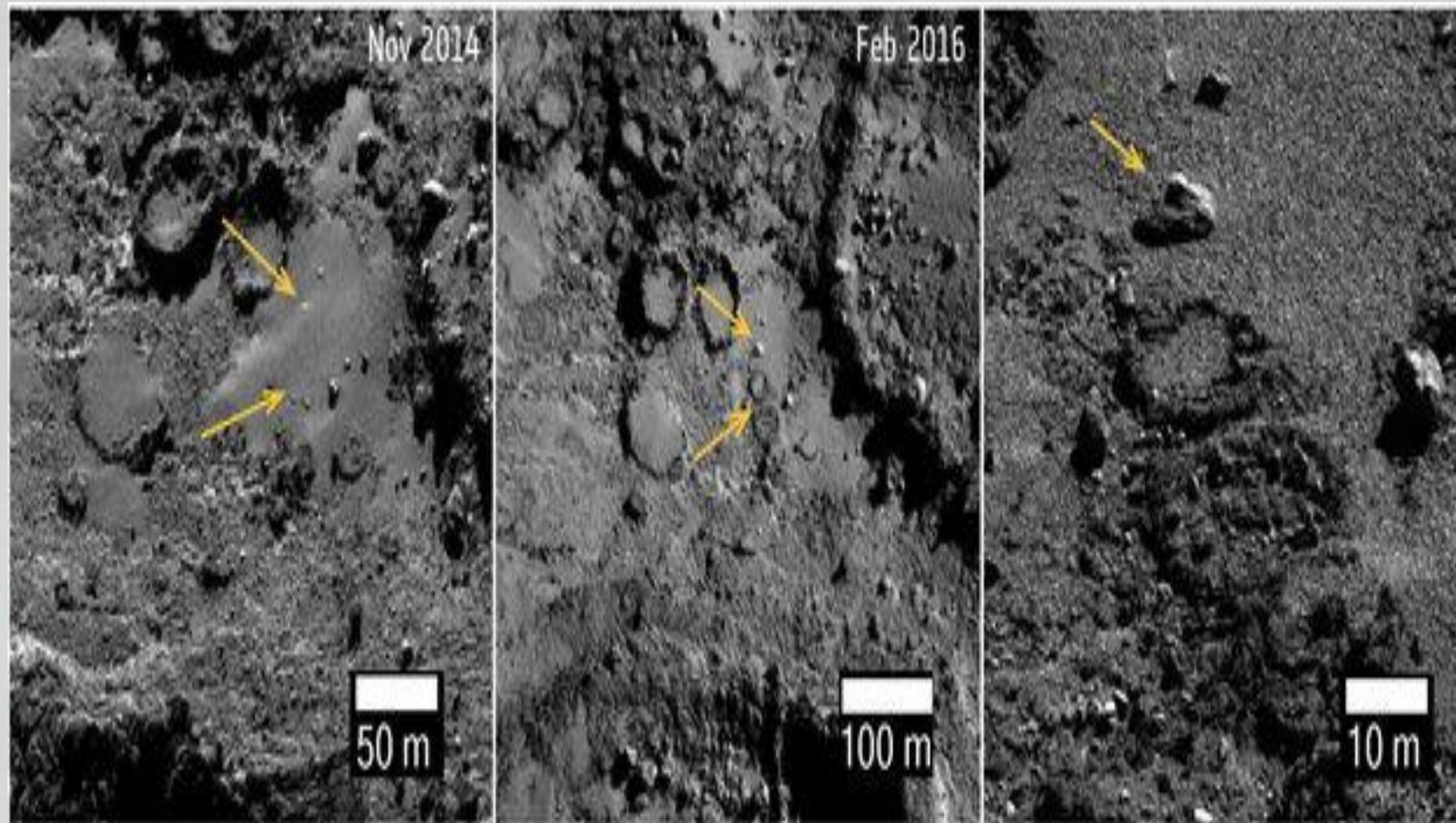
Внезапные и короткоживущие выбросы газа и пыли часто наблюдались во время двухлетней миссии Rosetta к комете 67P/C-G. Хотя их точные механизмы образования все еще обсуждаются, выбросы, указывают на обрушение слабых и эродированных поверхностей, с последующим нагревом летучих на открытых новых поверхностях.

Об изменчивости и неоднородности ядра кометы 67P/C-G:



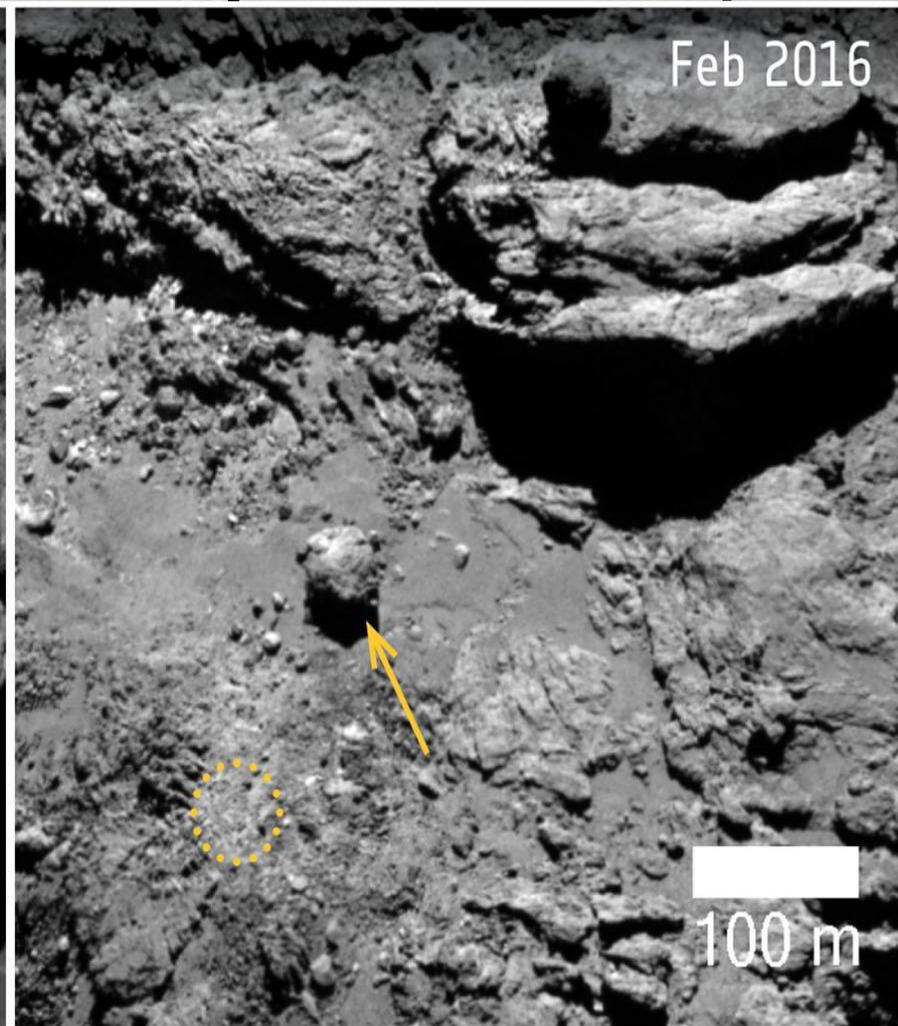
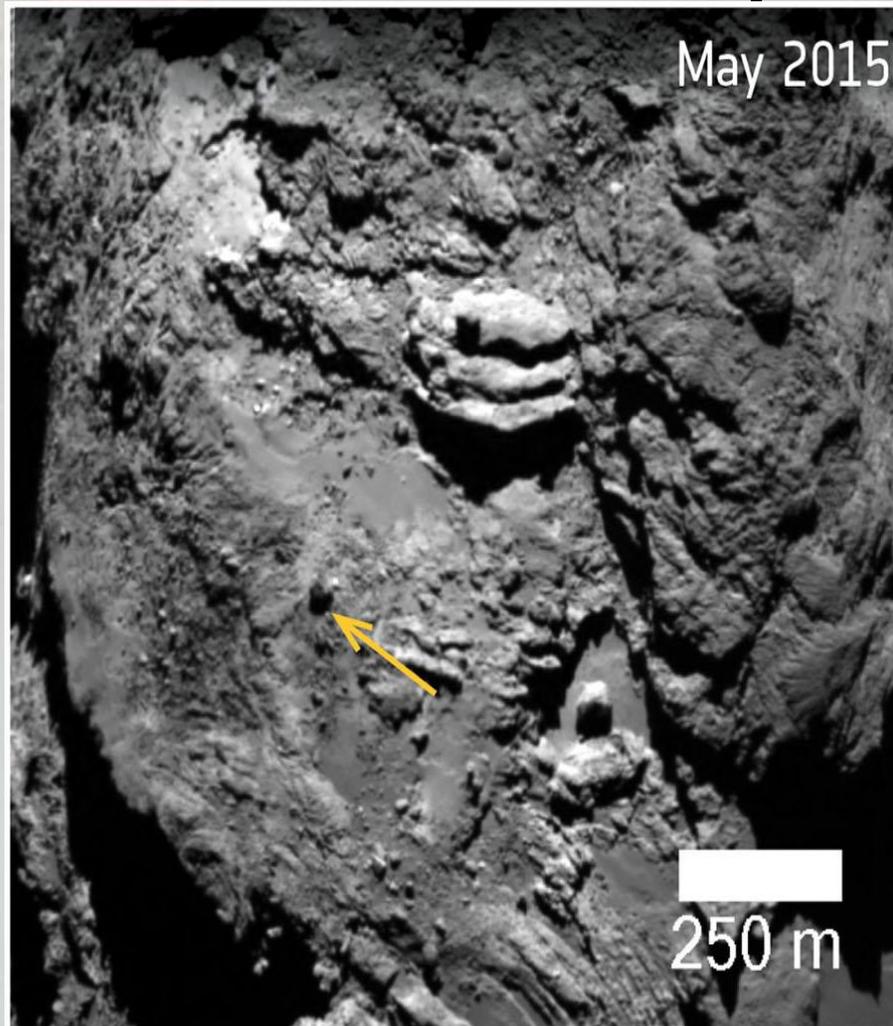
После обрушения оценено, что облучаемая солнечным излучением скала стала, по крайней мере, в шесть раз ярче, чем общая средняя поверхность ядра кометы. К 26 декабря 2015 года яркость уменьшилась наполовину, что говорит о том, что большая часть водяного льда уже испаривалась к тому времени.

Изменения ядра кометы 67P/C-G: эрозия и извлечение твердой фракции на Imhotep (Pajola et al., Science, 2017)



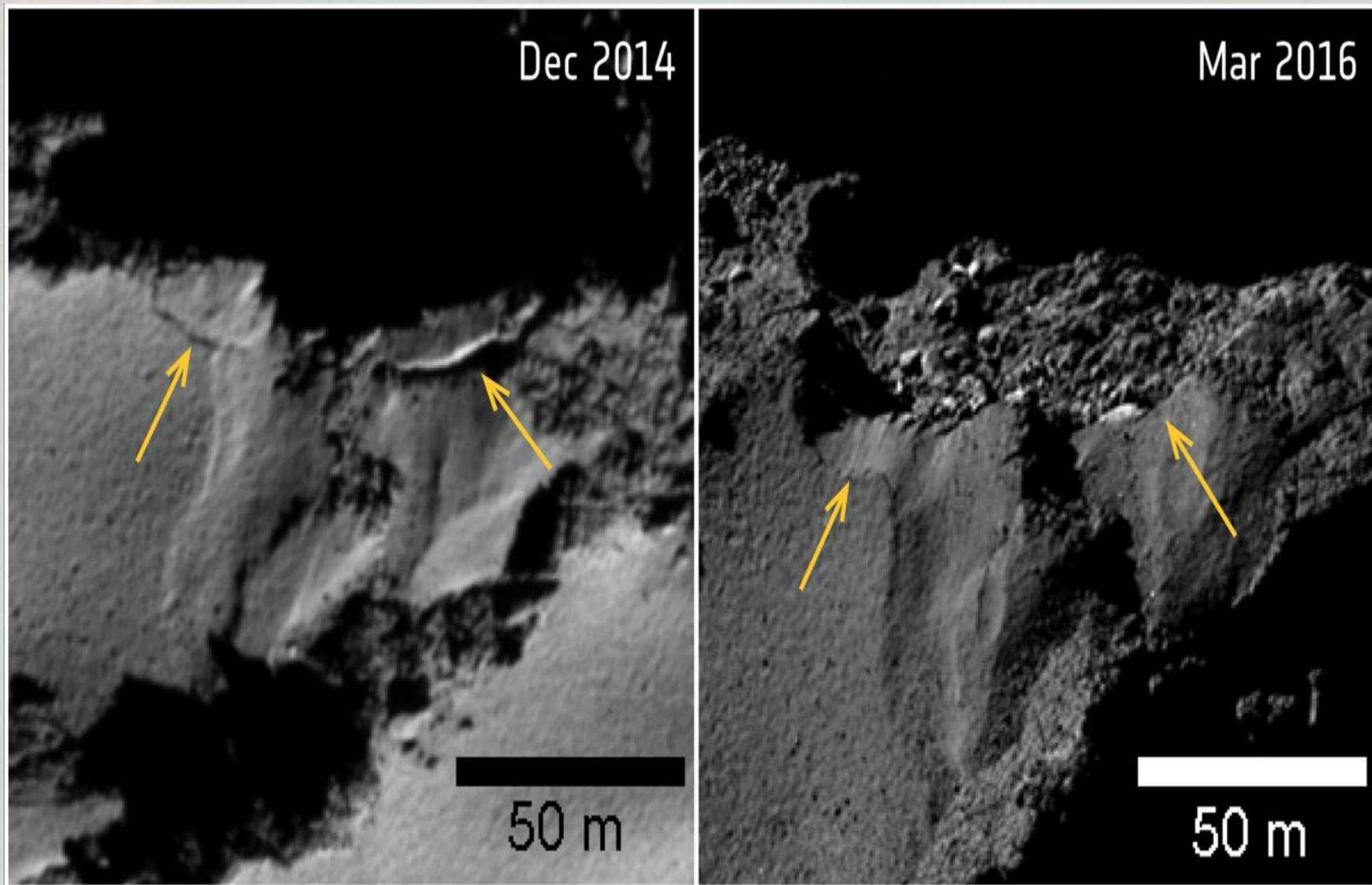
Эрозия, вызванная сублимацией летучих, и осаждение пыли, выпадающей из выбросов, полагаются ответственными за изменение ландшафта за счет либо обнажения ранее скрытых поверхностей, либо осаждения вещества в других местах.

Об изменениях на поверхности ядра кометы 67P/C-G:



Например, установлено, что валун размером 30 м и весом 12,8 миллионов кг переместился на 140 м на поверхности ядра 67P/C-G в преддверии перигелия в августе 2015 года, когда активность кометы была на самом высоком уровне. Credits: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team.

Об изменениях на поверхности ядра кометы 67P/C-G:



В ходе миссии Розетта было выявлено несколько участков обрушения скал на поверхности ядра кометы. Credits: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team

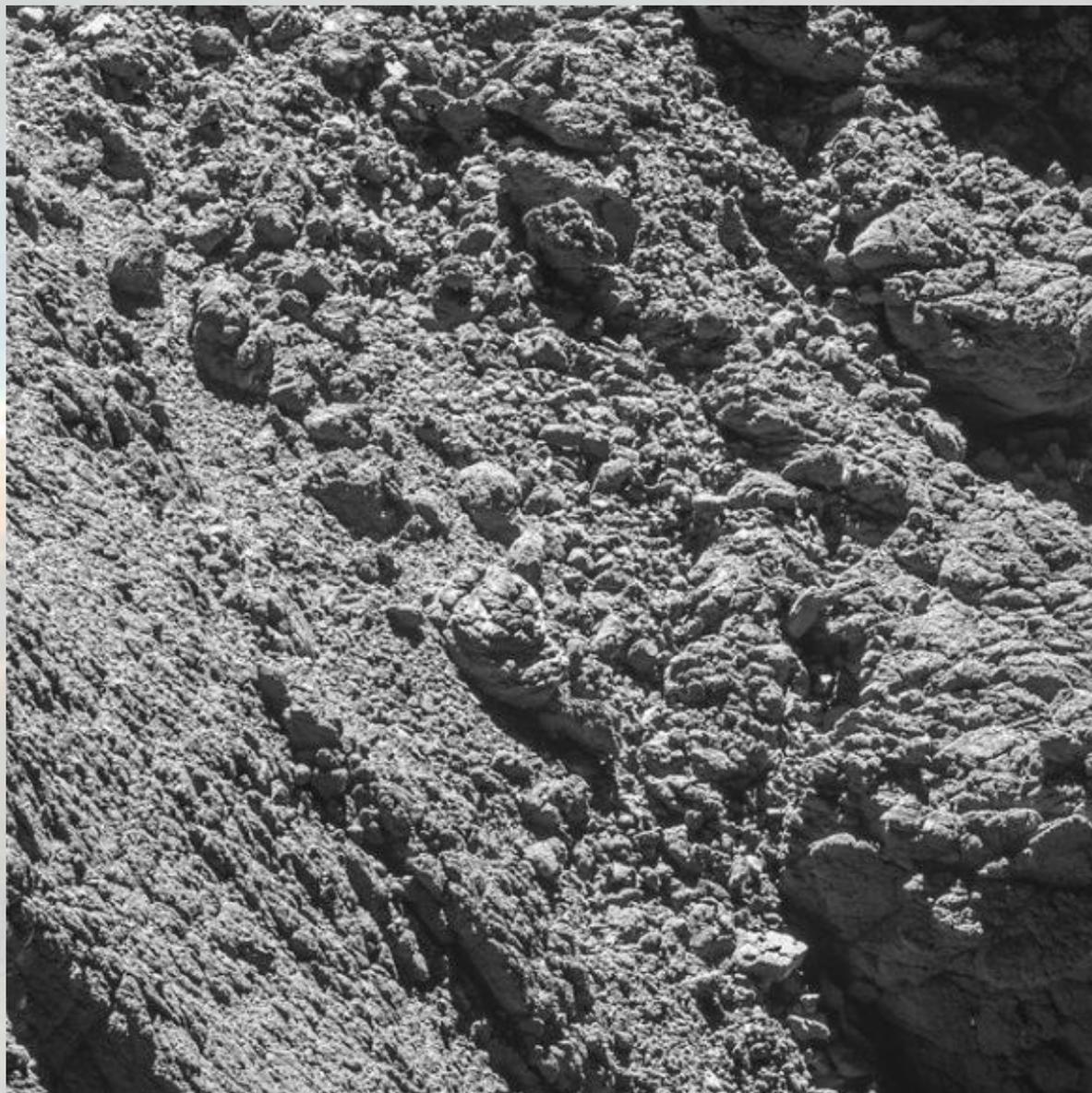
Об изменениях на поверхности ядра кометы 67P/С-G:

Высокие скалы на поверхности ядра кометы по изображениям КА Rosetta. Image Credit & Licence (CC BY-SA 3.0 IGO): ESA, Rosetta spacecraft, NAVCAM.



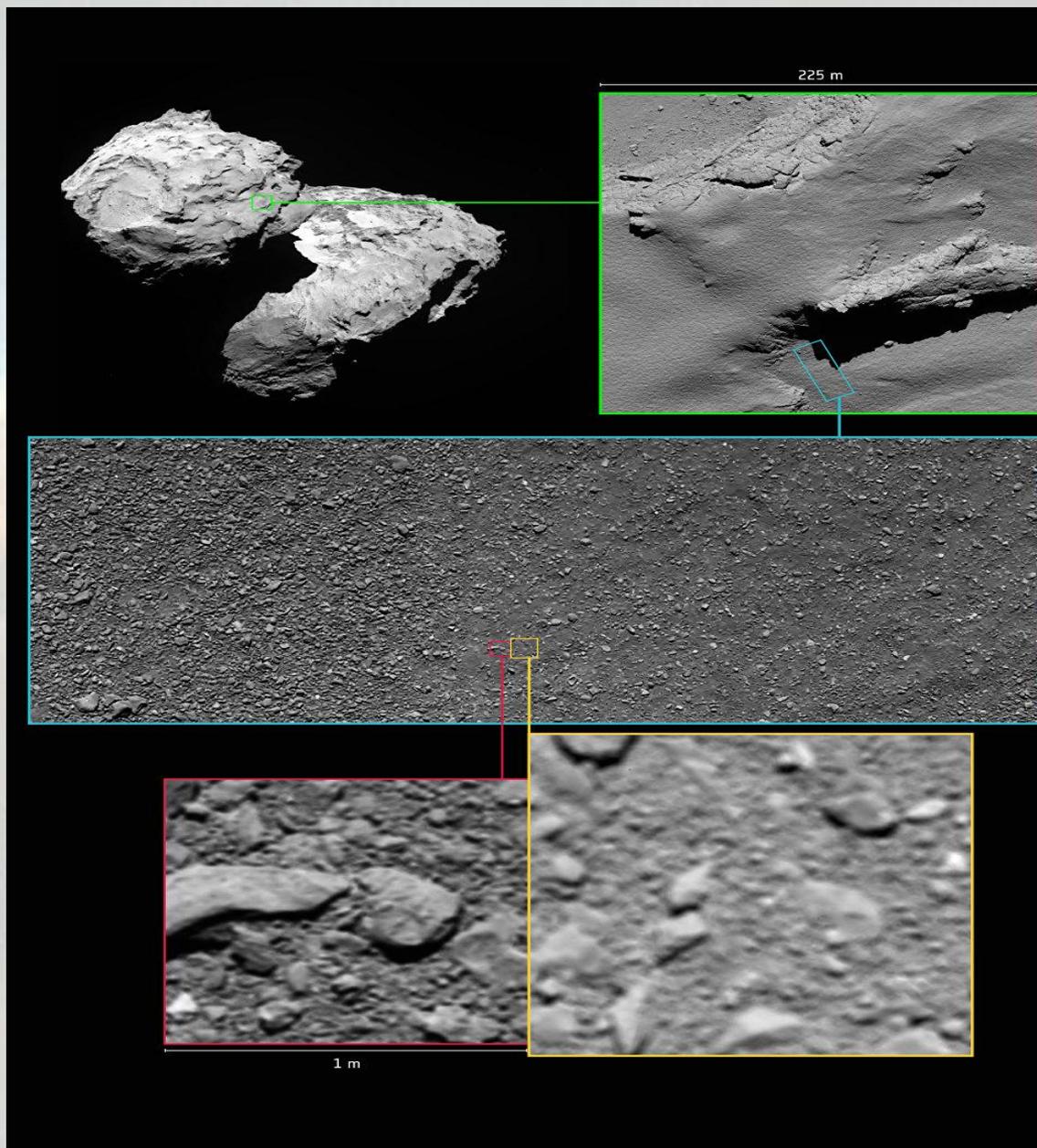
Об изменениях на поверхности ядра кометы 67P/С-G:

Снимок узкоугольной камеры OSIRIS, сделанный 2 сентября 2016 года с расстояния 2,7 км, на котором был найден CA Philae. CA Philae находится в правой части картинке, чуть выше центра. Масштаб изображения составляет около 5 см/пиксель. Credits: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team



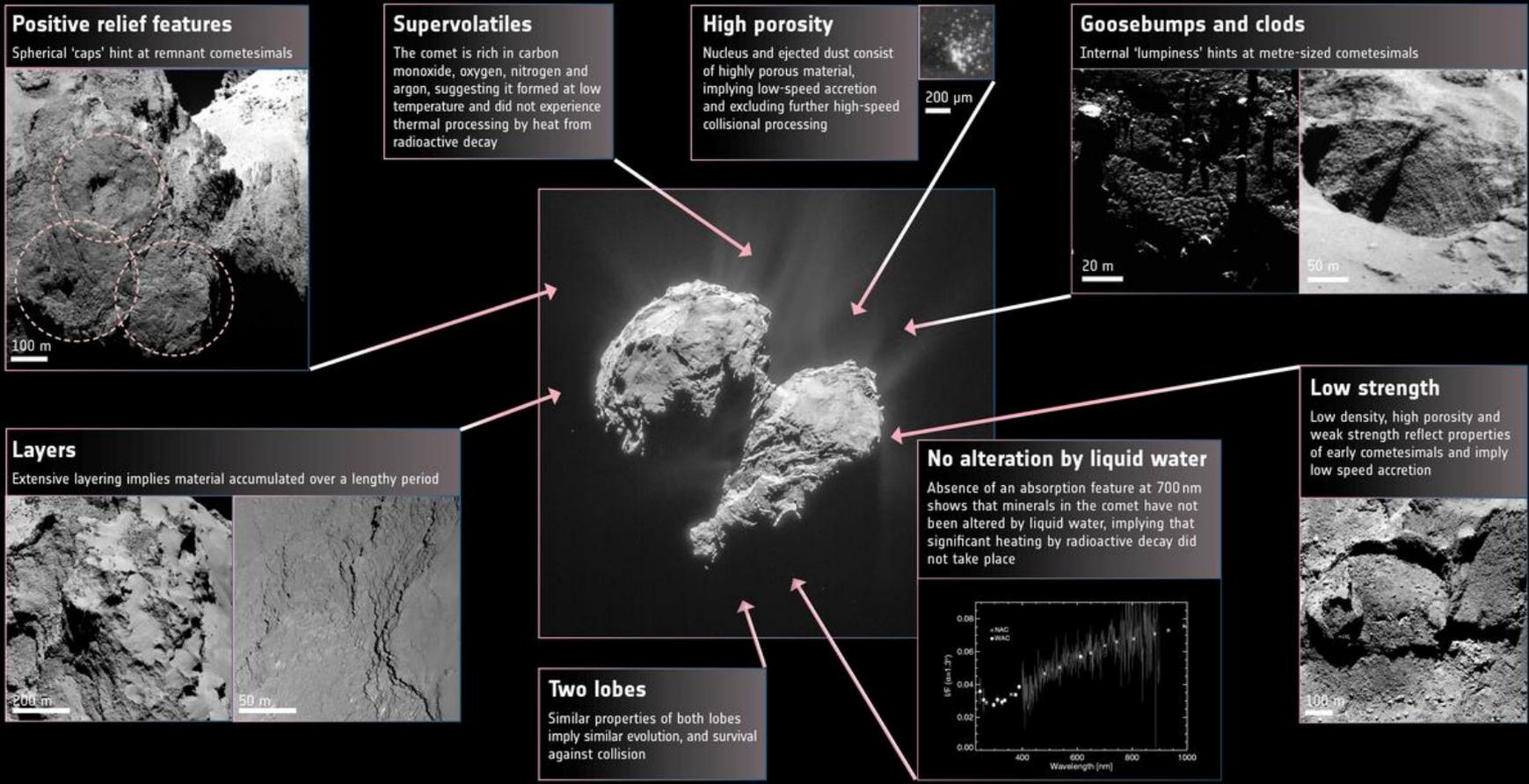
Об изменениях на поверхности ядра кометы 67P/С-G:

Последние снимки, которые ESA Rosetta передавал в разные моменты своего приземления на комету (ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team).



Как образовались ядра комет?

→ PROFILE OF A PRIMORDIAL COMET



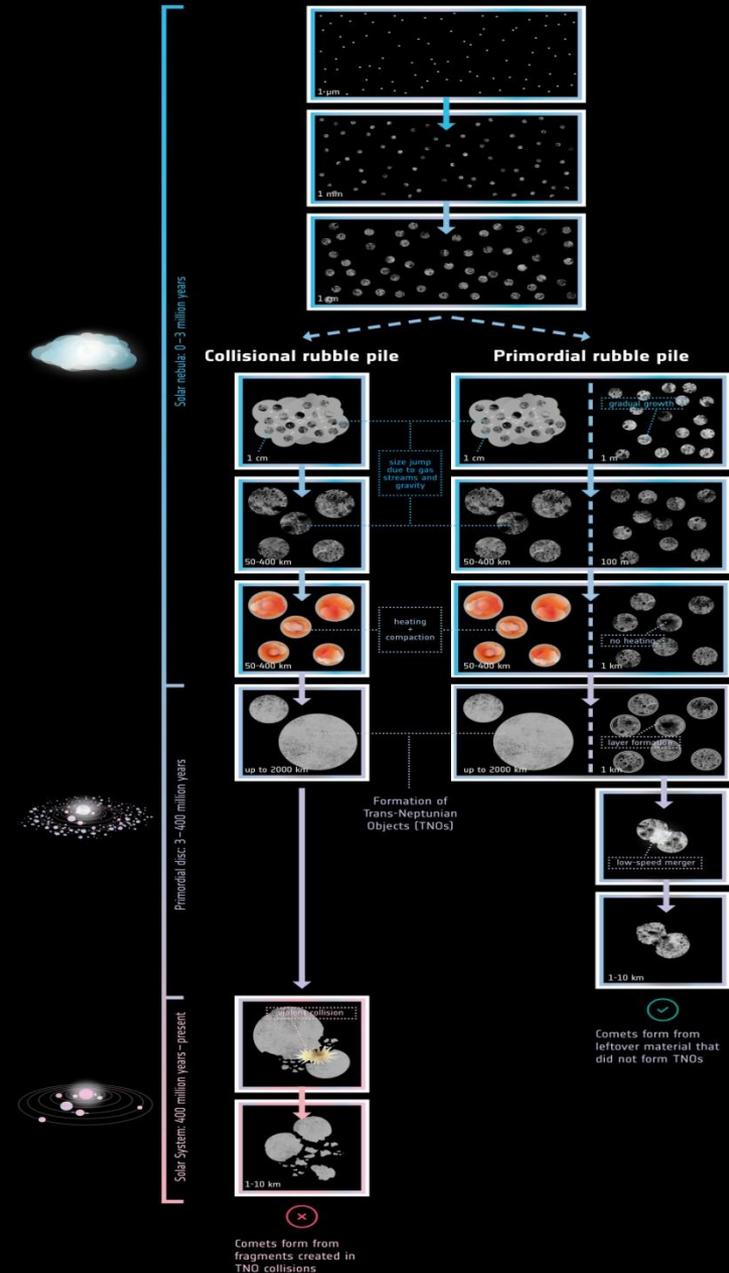
Доказательства того, что комета 67P/C-G состоит из древнего материала, сохранившегося от образования ранней Солнечной системы, собранные Розеттой, заключаются в структурных свойствах кометы, обнаруженных газах, покидающих ядро, и наблюдениях за особенностями поверхности.

Как образовались ядра комет?

Two main theories exist for how comets are born:

-In both cases, 'pebbles' start assembling from debris in the solar nebula, reaching sizes of about 1 cm.

-Then, according to the collisional rubble pile theory (left column), large objects such as the trans-Neptunian objects (TNOs) formed rapidly, within the first one million year of the solar nebula, aided by turbulent gas streams and gravity that rapidly accelerated their growth to sizes of up to 400 km. These objects also underwent internal heating caused by the decay of radioactive substances, which resulted in their dense, low-porosity structure, and kept growing over the following 400 million years, some of them even reaching sizes of Pluto or Triton-sized objects. In this scenario, comets form from fragments created in collisions between TNOs in the outer Solar System, and therefore are relatively young.

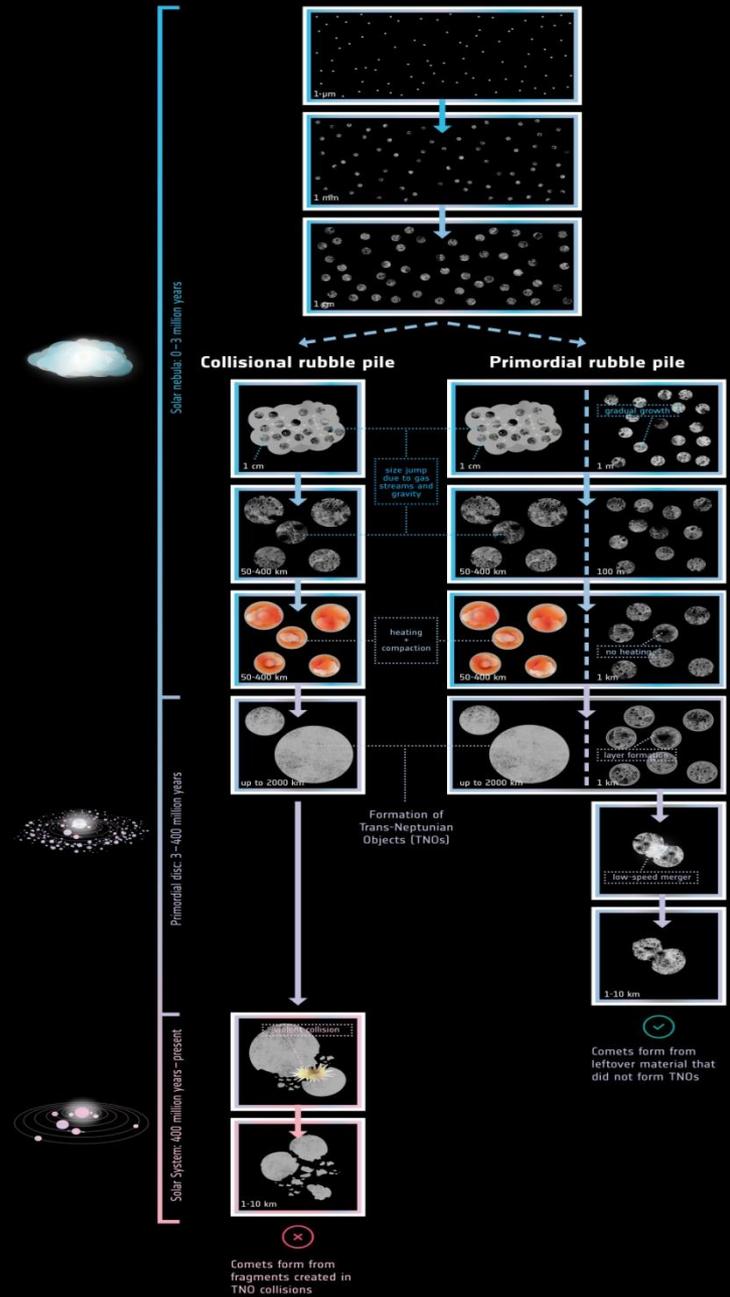


Как образовались ядра комет?

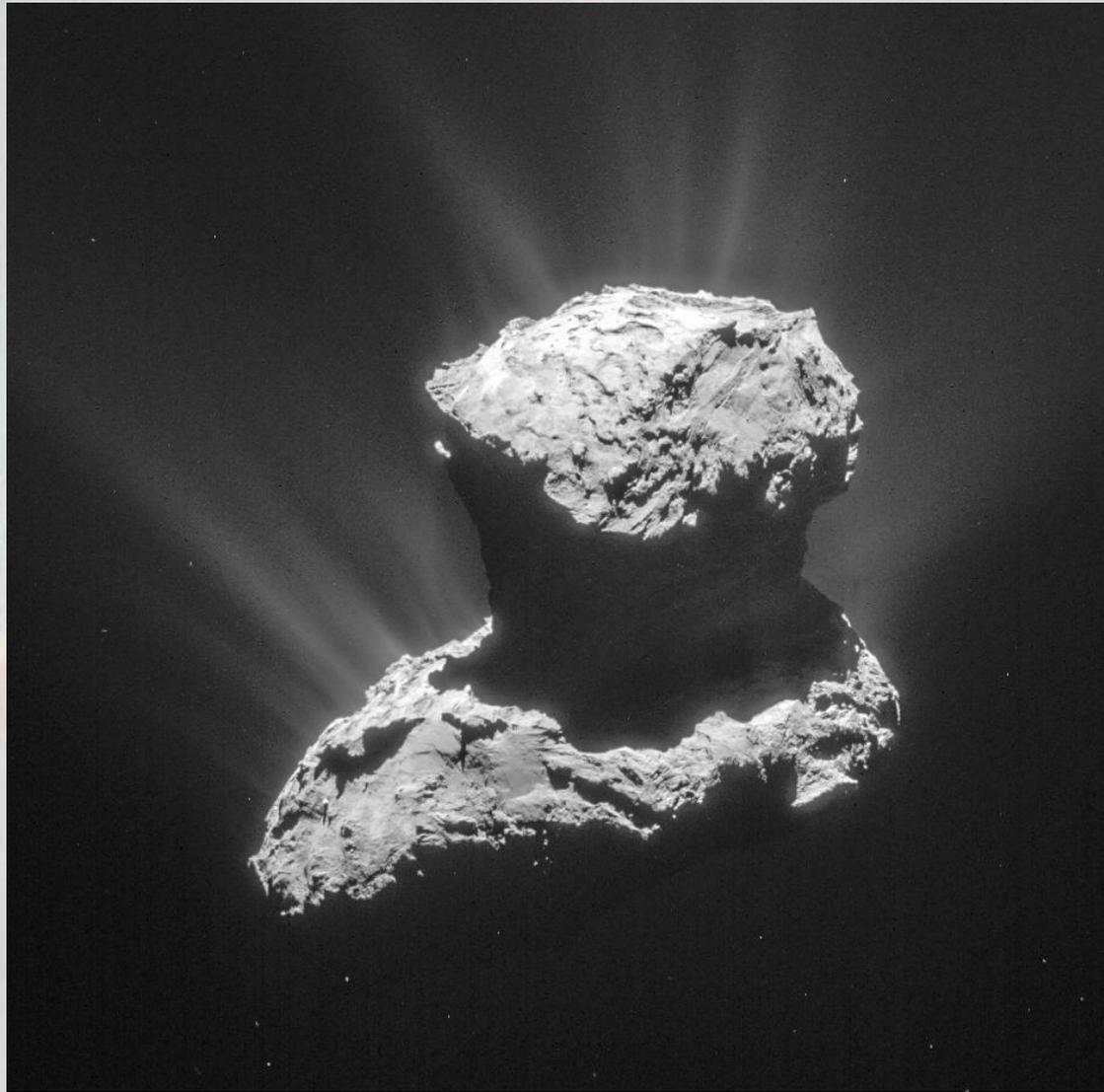
Two main theories exist for how comets are born:

- According to the primordial rubble pile theory (right), instead, comets took a different path. After the rapid initial growth phase of the TNOs, leftover grains and 'pebbles' of icy material in the cold, outer parts of the solar nebula started to come together at low speed, undergoing a gradual growth with no thermal processing to their interior and yielding comets roughly 5 km in size by the time gas has disappeared from the solar nebula.
- The larger TNOs played a further role in the evolution of comets: by 'stirring' the cometary orbits, additional material was accreted at somewhat higher speed over the next 25 million years, forming the outer layers of the comets. The stirring also made it possible for the few kilometre-sized objects in size to bump gently into each other, leading to the bi-lobed nature of some observed comets.

Evidence collected by Rosetta strongly favours the primordial rubble pile hypothesis, namely that comets were built up slowly through low-speed accumulation of primordial material into the shapes observed today.



Ядра комет как объекты астероидно-кометной опасности -АКО



С точки зрения АКО – опасны, но, с точки зрения астробиологии – возможно биохимически активны???!!!

Заключение

- **Представлен обзор лишь первых результатов космической миссии ESA ROSETTA**
- **Они уже поменяли наши представления о природе комет**
- **Ожидаемые новые результаты позволят продвинуться на пути решения упомянутых выше фундаментальных проблем физики и химии космоса.**

Спасибо за внимание!