

УДК 523.64, 520.27

## Наблюдения комет C/2009 R1 (МакНота) и 17P/Холмса в линии ОН на длине волны 18 см

Л.Н. Вольвач<sup>1</sup>, А.А. Бережной<sup>2</sup>, А.Е. Вольвач<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Лаборатория радиоастрономии НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория», РТ-22, Кацивели, АР Крым, Украина, 98688

*volvach@ukrpost.ua*

<sup>2</sup> Государственный астрономический институт им. Штернберга, МГУ, Москва, Россия

Поступила в редакцию 11 января 2013 г.

**Аннотация.** Представлены результаты наблюдений комет C/2009 R1 (МакНота) 14–28 июня 2010 года и 17P/Холмса 6–10 ноября и 25 ноября – 3 декабря 2007 года в линии молекулы гидроксила ОН на длине волны 18 см. Определена газопроизводительность молекул ОН в комете C/2009 R1 (МакНота) в зависимости от гелиоцентрического расстояния (0.42–0.62 а. е.).

OBSERVATIONS OF COMETS C/2009 R1 (MCNAUGHT) AND 17P/HOLMES IN OH LINE AT 18 CM, by L.N. Volvach, A.A. Berezhnoj, A.E. Volvach. The paper presents results of observations of comets C/2009 R1 (McNaught) on June 14–28, 2010 and 17P/Holmes on November 6–10 and November 25 – December 3, 2007 in the line of OH molecule at 18 cm. The OH gas production rate of comet C/2009 R1 (McNaught) versus the heliocentric distance between 0.42 and 0.62 AU is estimated.

**Ключевые слова:** кометы, мазеры, радиоизлучение

---

## 1 Введение

Состав кометных ядер представляет большой интерес для понимания происхождения комет. Из-за слабого гравитационного поля кометных ядер их атмосферы свободно расширяются в межпланетной среде. Скорость расширения атмосферы – параметр, который имеет решающее значение для интерпретации наблюдений комет и моделирования кометных явлений.

Новая эра в исследовании комет началась в 1973 году с наблюдений на длине волны 18 см линий ОН радикала, обнаруженного в комете Когоутека 1973 XII (Тернер, 1974). Радикал ОН в кометных атмосферах происходит от фотодиссоциации воды – основной составляющей кометных льдов. Прямое наблюдение с Земли H<sub>2</sub>O в кометах сложно и обычно приходится использовать вторичные продукты, такие как ОН, чтобы оценить газопроизводительность кометы и ее эволюцию.

Данные наблюдений комет в линии ОН в радиодиапазоне позволяют получить значения ряда физических параметров, характеризующих газовую и пылевую компоненты кометных атмосфер, а также проследить их временную и пространственную эволюцию, что актуально для

Наблюдения комет C/2009 R1 (МакНота) и 17P/Холмса...

определения времен жизни комет, их происхождения и определения масштабов уровня опасности при столкновениях кометных ядер с Землей.

Радионаблюдения линий ОН на длине волны 18 см значительно отличаются от спектральных наблюдений в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах. Радиолинии полностью разрешены, а их доплеровские профили позволяют исследовать кинематические свойства кометных атмосфер. Диаграмма направленности радиотелескопа охватывает большую часть комы кометы, что требует минимальной экстраполяции (в отличие от оптических или УФ-спектроскопических наблюдений, когда видна только небольшая часть комы). Радионаблюдения на длине волны 18 см почти не чувствительны к погодным условиям.

Однако из-за особенностей механизма возбуждения радикала ОН, который зависит от гелиоцентрической радиальной скорости, наблюдения линий ОН на длине волны 18 см возможны в определенном диапазоне гелиоцентрических скоростей. Возбуждение посредством УФ-накачки и последующей флуоресценции приводит к инверсии (или антиинверсии) в основном состоянии  $\Lambda$ -дублета радикала ОН. Наиболее заметное расхождение между двумя моделями инверсии (Деспюис и др., 1981; Шлейхер и др., 1988) наблюдается при таких гелиоцентрических скоростях, при которых происходит кроссовер от инверсии к антиинверсии заселенности основного состояния.

В период с 1973 по 1999 гг. с помощью радиотелескопа радиоастрономической обсерватории Нансэ (Франция) успешно выполнены наблюдения 52 комет (Кровисиер и др., 2002). В 2000 году радиотелескоп был модернизирован и с чувствительностью, возросшей примерно в два раза, проведены исследования более 40 комет (<http://www.lesia.obspm.fr>).

В 2005 году в лаборатории радиоастрономии НИИ «КрАО» разработана методика, и с помощью РТ-22 начаты наблюдения комет в линии ОН на волне 18 см. Результаты наблюдений комет 9P/Темпеля 1 и Лулинь C/2007 N3 представлены в работе (Вольвач и др., 2011).

В данной работе представлены результаты исследования комет C/2009 R1 (МакНота) и 17P/Холмса.

## 2 Наблюдения и обработка данных

С помощью РТ-22 КрАО для дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн разработана приемная аппаратура для наблюдений источников мазерного излучения на молекулах гидроксила. Для проведения наблюдений излучения основного состояния  $^2\Pi_{1/2}$  молекулы ОН (на частотах 1.612 ГГц, 1.665 ГГц, 1.667 ГГц, 1.720 ГГц) использовался как криогенный, так и неохлаждаемый приемники, имеющие собственную шумовую температуру приемных систем  $T_{ш} \approx 10$  К и  $T_{ш} \approx 30$  К соответственно.

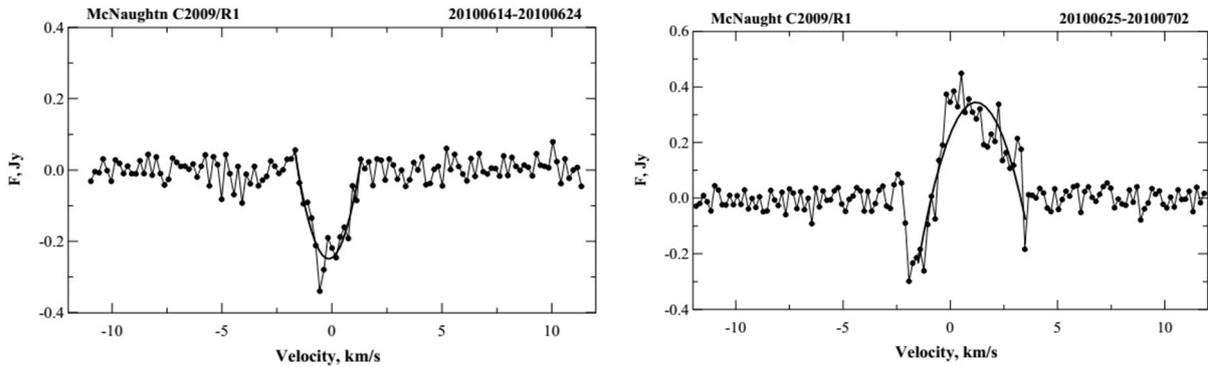
Для проведения регистрации спектров источников использовался Фурье спектр анализатор параллельного типа.

С имеющимися параметрами системы радиотелескоп-радиометр с помощью РТ-22 можно уверенно зарегистрировать излучение кометы в линиях ОН, если блеск кометы превышает  $6^m$ . В среднем на РТ-22 можно наблюдать одну комету в линиях ОН в течение 1–2 лет.

### 2.1 Наблюдения кометы C/2009 R1 (МакНота)

Комета C/2009 R1 (МакНота) открыта Робертом МакНотом 9 сентября 2009 года как объект 17.3 звездной величины (Марсен, 2009). Наблюдения кометы C/2009 R1 (МакНота) с помощью РТ-22 КрАО на длине волны 18 см проведены с 14 июля вплоть до прохождения перигелия 2 июля 2010 года. Наблюдения 29 июня – 2 июля были неудачными из-за плохой погоды. На рис. 1 приведены спектры кометы, полученные с усреднением в течение нескольких

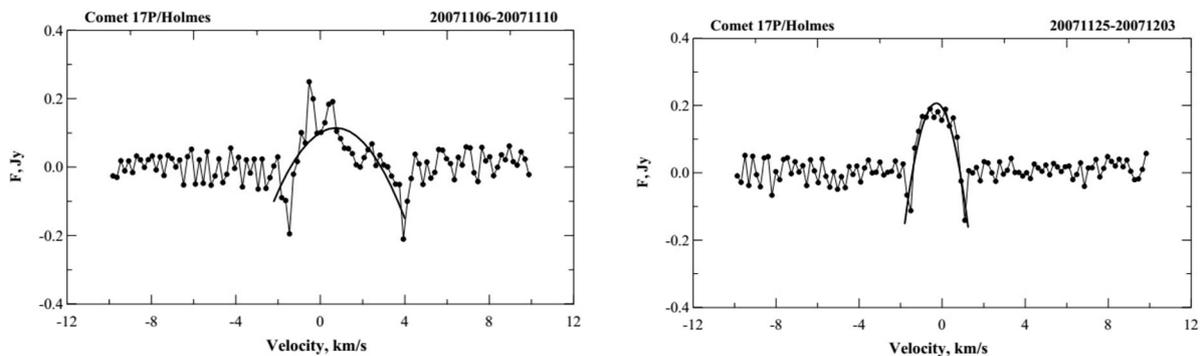
дней, чтобы улучшить отношение сигнал/шум. Время накопления сигнала в течение одного сеанса наблюдений составляло 1–2 часа.



**Рис. 1.** Усредненные спектры кометы C/2009 R1 (МакНота) по результатам наблюдений 14–24 июня (слева) и 25 июня – 2 июля 2010 г. (справа)

## 2.2 Наблюдения кометы 17P/Холмса

Комета 17P/Холмса открыта Эдвином Холмсом 6 ноября 1892 г. вскоре после мощной вспышки этой кометы. Наблюдения кометы проведены с помощью РТ-22 на длине волны 18 см спустя несколько дней после новой мощной вспышки блеска 24 октября 2007 года. На рис. 2 приведен спектр кометы, полученный с усреднением в течение нескольких дней для улучшения отношения сигнал/шум. Время накопления сигнала в течение одного сеанса наблюдений составляло 4–5 часов.



**Рис. 2** Усредненные спектры кометы 17P/Холмса 6–10 ноября (слева) и 25 ноября – 3 декабря 2007 г. (справа)

## 3 Анализ данных

Для определения площади линии (единицы измерения – Ян×км/с) полученные профили излучения комет в линиях ОН аппроксимировались параболой. Для оценки величины газопроизводительности комет (число радикалов ОН, доставляемых в кому кометы каждую секунду) применялось уравнение (4) из работы (Бокили-Морван и др., 1990):

$$f\Gamma = 2.33 \times 10^{34} A^2 S / i T_{bg}, \quad (1)$$

Наблюдения комет C/2009 R1 (МакНота) и 17P/Холмса...

где  $\Gamma$  – общее количество радикалов OH в коме,  $S$  – площадь 1667 МГц линии OH в Ян км/с,  $f$  – доля наблюдаемых радикалов OH, находящихся в равновесной флюоресценции,  $\Delta$  – расстояние между кометой и Землей в астрономических единицах,  $i = -0.3 - 0.5$  – инверсия основного состояния  $\Lambda$ -дублета (зависит от гелиоцентрической скорости кометы),  $T_{bg} = 3-5$  К – температура фона радиоизлучения. Температура фона радиоизлучения оценивалась на основании данных обзора яркостной температуры неба на длине волны 21 см (Рейч, 1982) в предположении, что спектральный индекс излучения галактического фона равен  $-2.6$ , а температура реликтового радиоизлучения равна 2.7 К. Инверсионный фактор оценивался на основании модели (Деспюис и др., 1981). Линия OH аппроксимировалась трапецией.  $\Lambda$ -дублет радикала OH действует как слабый мазер усиления (или ослабления) в соответствии с его инверсией (или антиинверсией) фона континуума на длине волны 18 см. Большую часть времени температурный фон  $T_{bg}$  близок к 3 К, но может быть значительно выше, когда комета пересекает галактическую плоскость или в диаграмму направленности попадает случайный дискретный источник радиоизлучения. Фактор закалки  $f$  оценен в рамках модели (Шлоерб и др., 1986), причем радиус закалки  $r_q$  рассчитывался как  $83\,500 \times (Q(OH)/10^{29})^{0.5}$  км, отношение содержаний ионов и электронов в коме кометы принято равным 1%, а расстояние кометы от Солнца – 1 астрономическая единица в соответствии с приближениями, используемыми при расчетах (Шлоерб, 1988).

Газопродуктивность кометы определяется выражением:

$$Q(OH) = \Gamma(OH) / \tau(OH), \quad (2)$$

где время жизни OH,  $\tau(OH) = \tau(OH, 1 \text{ а. е.}) \times r^2$ , где  $\tau(OH, 1 \text{ а. е.}) = 1.1 \times 10^5$  с – время жизни OH на расстоянии в 1 астрономическую единицу от Солнца (Хуебнер и др., 1992),  $r$  – расстояние между кометой и Солнцем в астрономических единицах.

В табл. 1 приведены величины газопродуктивности комет Холмса и Темпеля в линии гидроксила OH.

**Таблица 1.** Результаты наблюдений комет C/2009 R1 (МакНота) 1 и 17P/Холмса

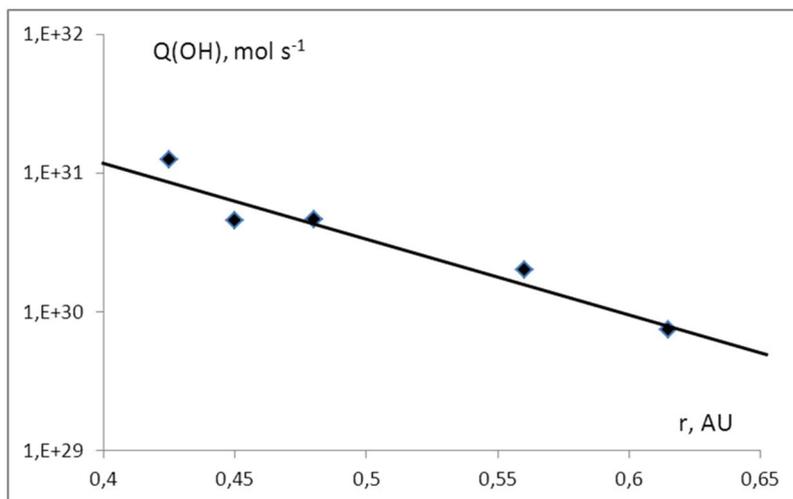
Комета	Дата наблюдений	r, AU	$T_{bg}$ , К	S, Ян км с <sup>-1</sup>	dr, km/s	i [2]	i [3]	f [3]	Q(OH), молекул/с [1]	Q(OH), молекул/с [2]
17P/Холмса	6–10.11.2007	2.49	3.8	0.052	6.84	-0.04	0.001	1*	$-7 \times 10^{28}$	$2.7 \times 10^{30}$
17P/Холмса	25.11–03.12.2007	2.58	3.6	0.146	7.1	-0.07	-0.004	1*	$-10^{29}$	$-2 \times 10^{30}$
C/2009 R1 (МакНота)	14–15.06.2010	0.615	3.7	-0.21	-31.4	-0.15	-0.17	0.71	$8.4 \times 10^{29}$	$7.4 \times 10^{29}$
C/2009 R1 (МакНота)	17–18.06.2010	0.57	3.6	-0.23	-29.6	-0.05	-0.11	0.56	$5.4 \times 10^{30}$	$2.0 \times 10^{30}$
C/2009 R1 (МакНота)	20–21.06.2010	0.52	3.8		-26.9	0.13	0.12			
C/2009 R1 (МакНота)	22–23.06.2010	0.48	3.5	0.91	-24.2	0.39	0.34	0.45	$4.1 \times 10^{30}$	$4.7 \times 10^{30}$
C/2009 R1 (МакНота)	24–26.06.2010	0.45	3.4	1.00	-19.7	0.46	0.46	0.45	$4.6 \times 10^{30}$	$4.6 \times 10^{30}$
C/2009 R1 (МакНота)	27–28.06.2010	0.425	3.4	0.96	-14	0.26	0.23	0.38	$1.1 \times 10^{31}$	$1.3 \times 10^{31}$

\* – из-за неопределенности в определении Q(OH) для кометы 17P/Холмса принято, что  $f = 1$ . [1] – по модели (Деспюис и др., 1981), [2] – по модели (Шлейхер и др., 1988)

Период наблюдений кометы 17P/Холмса и частично кометы C/2009 R1 (МакНота) совпал с моментом кроссовера от инверсии к антиинверсии заселенности основного состояния Л-дублета радикала ОН. Из-за неопределенности (близкого к нулю) в этот период времени значения инверсионного фактора  $i$  в формуле (1) затруднена оценка газопродуктивности молекул ОН для кометы 17P/Холмса по данным наших наблюдений. Скорее всего, обе модели (Деспюис и др., 1981; Шлейхер и др., 1988) в диапазоне гелиоцентрических скоростей 6.8–7.1 км/с выдают неверные оценки инверсионного фактора, так как газопродуктивность кометы Холмса является отрицательной величиной. По этой же причине из табл. 1 исключены результаты наблюдений кометы C/2009 R1 (МакНота), проведенные 16 и 19–21 июня 2010 г.

Радионаблюдения кометы Холмса в диапазоне от дециметровых до субмиллиметровых длин волн были проведены вскоре после мощной вспышки кометы, произошедшей 24.2 октября 2007 г., и в радиоастрономической обсерватории Нансэ (Кровисиер и др., 2009). Из данных этих радионаблюдений газопродуктивность кометы также не была надежно оценена по причине близкого к нулю инверсионного фактора. По результатам инфракрасной спектроскопии высокого разрешения газопродуктивность молекул  $H_2O$  для кометы была равна  $4.5 \times 10^{29}$ ,  $1.8 \times 10^{29}$ ,  $6.6 \times 10^{28}$  молекул/с в октябре 27.6, 31.3 и ноябре 2.3, 2007 соответственно (Делло Руссо и др., 2008). Этим наблюдениям не противоречат результаты исследований кометы Холмса с помощью узкополосной фотометрии, согласно которым газопродуктивность была равна  $5.2 \times 10^{29}$ ,  $1.2 \times 10^{29}$ ,  $6.5 \times 10^{28}$ ,  $2.9 \times 10^{28}$ ,  $2.8 \times 10^{28}$  молекул/с в ноябре 1.2, 11.2, 20.2 и декабре 3.3, 4.3, 2007 соответственно (Шлейхер, 2009).

Согласно нашим наблюдениям газопродуктивность кометы C/2009 R1 (МакНота) быстро возрастала по мере приближения к перигелию (рис. 3).



**Рис. 3** Зависимость газопродуктивности кометы C/2009 R1 (МакНота) от гелиоцентрического расстояния

Комета C/2009 R1 (МакНота) также наблюдалась в период 25, 29, 31 мая, и 1, 10, 14 и 22 июня 2010 года с помощью миллиметровых и инфракрасных телескопов. Обнаружено излучение HCN,  $H_2CO$ ,  $CH_3OH$ , CO,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $H_2O$ , CS, ОН (Милам и др., 2010), химический состав кометы оказался близок к среднему. Спектральные оптические наблюдения кометы C/2009 R1 (МакНота) позволили обнаружить излучение  $C_2$ , CN, CH,  $NH_2$ ,  $CO^+$ ,  $CH^+$  и определить отношение газопродуктивностей  $Q(C_2)/Q(CN)$ ,  $Q(CH)/Q(CN)$ ,  $Q(NH_2)/Q(CN)$  (Корсун и др., 2012).

#### 4 Выводы

С помощью РТ-22 начаты работы по исследованию комет в линии ОН на длине волны 18 см. Проведены наблюдения комет C/2009 R1 (МакНота) и 17P/Холмса. Для кометы C/2009 R1 (МакНота) определена газопроизводительность молекул гидроксила ОН в зависимости от гелиоцентрического расстояния – газопроизводительность кометы быстро возрастала по мере приближения к перигелию.

Работа поддержана российско-украинским грантом РФФИ НАНУ 63–02–12.

#### Литература

- Бокили-Морван и др. (Bockelee-Morvan D., Crovisier J., Gerard E.) // *Astron. Astrophys.* 1990. V. 238. P. 382.
- Вольвач А.Е., Бережной А.А., Вольвач Л.Н. и др. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2011. Т. 107. № 1. С. 178.
- Делло Руссо и др. (Dello Russo N., Vervack R.J., Weaver H. A., et al.) // *Astrophys. J.* 2008. V. 680. P. 793.
- Деспоис и др. (Despois D., Gerard E., Crovisier I., et al.) // *Astron. Astrophys.* 1981. V. 99. P. 320.
- Корсун и др. (Korsun P., Kulyk I., Velichko S.) // *Planetary Space Sci.* 2012. V. 60. Issue 1. P. 255.
- Кровисиер и др. (Crovisier J., Biver N., Bockelee-Morvan D., et al.) // *Planetary Space Sci.* 2009. V. 57. Issue 10. P. 1162.
- Кровисиер и др. (Crovisier J., Colom P., Gerard E., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 393. P. 1053.
- Марсден (Marsden B.G.) // *Minor Planet Electronic Circ.* 2009. R33.
- Милам и др. (Milam S.N., DiSanti M.A., Bonev B.P., Charnley S.B.) // *Bull. Am. Astron. Soc.* 2010. V. 42. P. 963.
- Рейч (Reich W.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1982. V. 48. P. 219.
- Тернер (Turner B.E.) // *Astrophys. J.* 1974. V. 189. P. 137.
- Шлейхер (Schleicher D.G.) // *Astrophys. J.* 2009. V. 138. P. 1062.
- Шлейхер и др. (Schleicher D.G., A'Hearn M.F.) // *Astrophys. J.* 1988. V. 331. P. 1058.
- Шлоерб и др. (Schloerb F.P., Claussen M.J., Tacconi-Garman L.) // *ESA Proceedings of the 20<sup>th</sup> ESLAB Symposium on the Exploration of Halley's Comet.* 1986. V. 1. P. 583.
- Шлоерб (Schloerb F.P.) // *Astrophys. J.* 1988. V. 332. P. 524.
- Хуебнер и др. (Huebner W.F., Keady J.J., Lyon S.P.) // *Astrophys. Space Sci.* 1992. V. 195. № 1. P. 291.