

# Наблюдения эффекта Сюняева – Зельдовича в скоплении Abell 2319 на радиотелескопе РАТАН-600.

В.А. Столяров,<sup>1,2</sup> М.Г. Мингалиев,<sup>1,3</sup> П.Г. Цыбулёв,<sup>1</sup> П. Карвалхо,<sup>2</sup> Т. Муфахаров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167, Россия*

<sup>2</sup>*Кавендишевская Лаборатория, Кембриджский Университет,  
Кембридж, СВЗ ОНЕ, Великобритания*

<sup>3</sup>*Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Казань, Россия*

В статье приводятся результаты наблюдений эффекта Сюняева – Зельдовича в кластере Abell 2319, которые проводились в САО РАН на радиотелескопе РАТАН-600 на частоте 30 ГГц в период с ноября 2011 по март 2012-го года.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

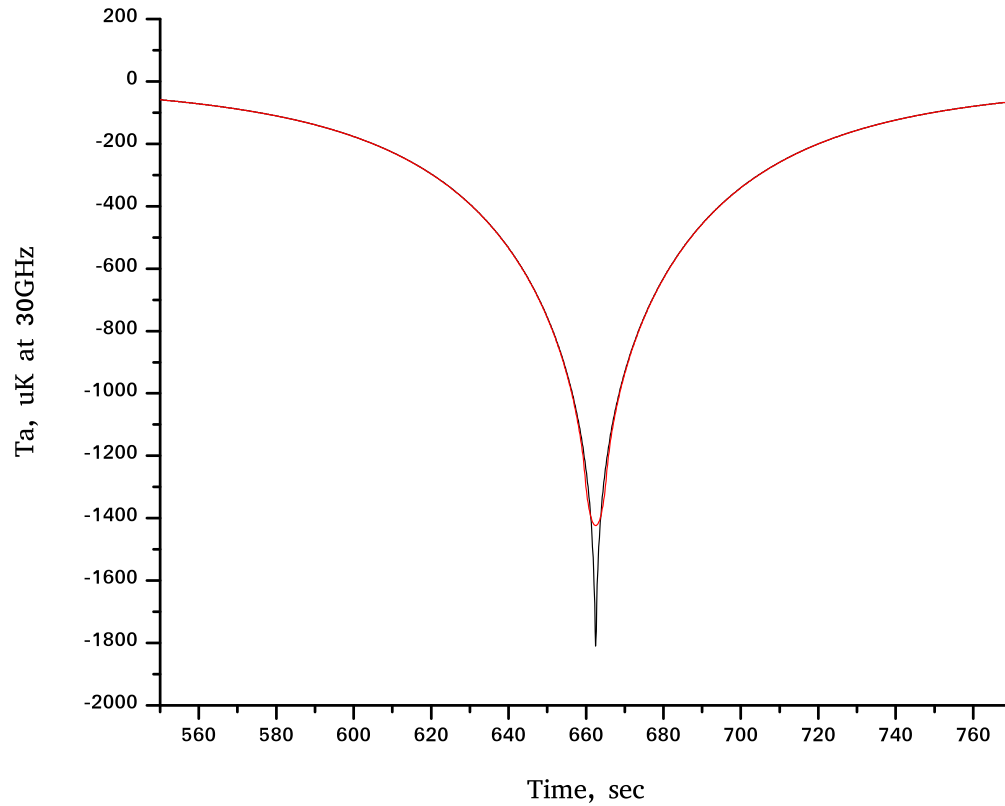
## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

При моделировании вклада Abell 2319 на частоте наблюдения 30 ГГц были получены оценки амплитуды эффекта в его центре порядка  $T_{cmb} = 0.8 - 1.5 mK$ , что с точностью до одного процента соответствует его антенной температуре. Учитывая коэффициент перевода  $I/T_{cmb}$  на частоте 30 ГГц из  $K$  в единицы интенсивности  $MJy/Sr$  порядка 27, получим интенсивность в центре кластера  $I \approx 0.02 - 0.04 MJy/Sr$ . Зная размер центральной части диаграммы порядка  $0'.1 \times 0'.5$  можно оценить поток в  $mJy$ , что будет составлять порядка  $0.085 - 0.170 mJy$ .

Необходимо учитывать, что эффект Сюняева–Зельдовича на частотах меньше 220 ГГц проявляется в уменьшении фоновой температуры, и профиль кластера будет иметь отрицательную амплитуду. На Рис. 1, 2 и 3 приведены модельные профили кластера Abell 2319 на частоте 30 ГГц для различных режимов наблюдения.

## 3. НАБЛЮДЕНИЯ

Для наблюдения кластера Abell 2319 было заказано 100 суток наблюдений на РАТАН-600, длина записей составляла порядка 10 минут времени. Наблюдения проводились с ноября 2011 по март 2012 г. на комплексе радиометров МАРС-3, установленном на 2-м облучателе РАТАН-600. Центральная частота составляла  $\nu_c = 30$  ГГц, с полосой  $\Delta\nu/\nu = 0.1$ . Комплекс МАРС-3 состоит из 16-ти независимых радиометров, каждый из которых оснащён двумя рупорами,

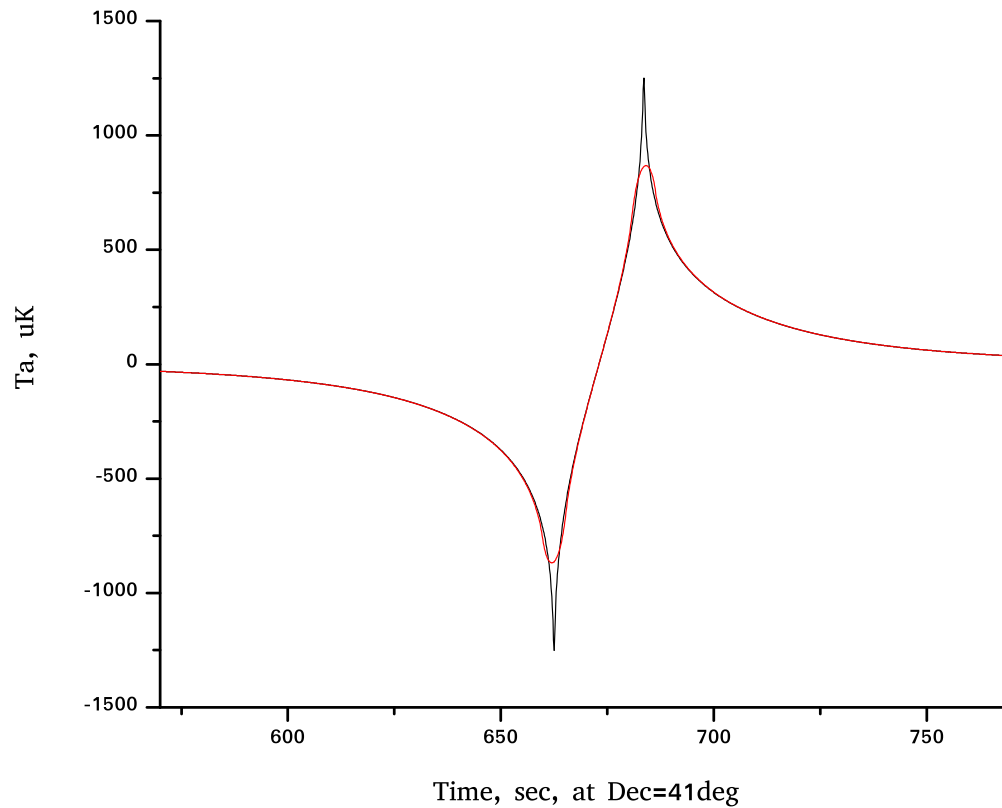


**Рис. 1.** Модельный профиль кластера на частоте 30ГГц в однорупорном режиме наблюдения (total power). Красным цветом показан сглаженный профиль с окном 1 сек.

работающими в горизонтальной поляризации, и расположенными под углом 90 градусов друг к другу. Такая конфигурация позволяет наблюдать один из двух параметров Стокса ( $Q$  или  $U$ ) на каждом из 16-ти радиометров, что, впрочем, не являлось целью данных наблюдений. Поскольку сигнал регистрировался отдельно с каждого из 32-х рупоров, программным образом можно было реализовать различные режимы обработки, в том числе и в интенсивности – что и было сделано.

15-я пара рупоров была исключена из обработки всвязи с неисправностью данного радиометра. После предварительной редукции было оставлено 1140 записей (38 дней) с хорошей атмосферой, и 330 записей (11 дней) с умеренным атмосферным вкладом.

В качестве опорного источника использовался 3C84, имеющий близкое к Abell 2319 склонение.

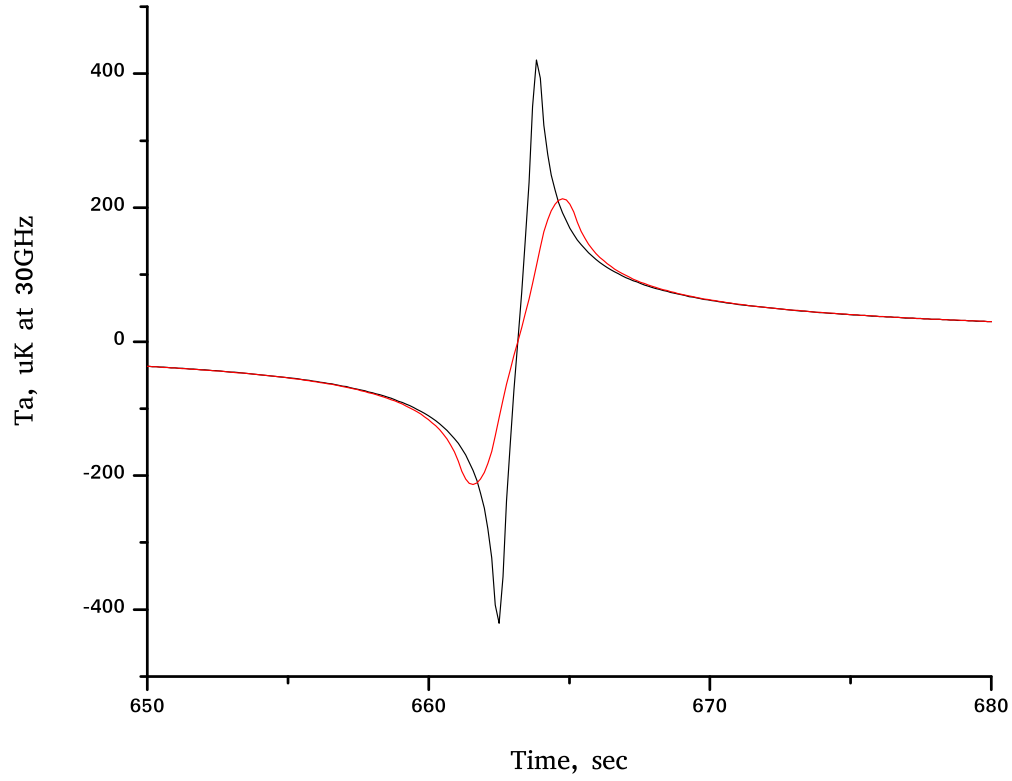


**Рис. 2.** Модельный профиль кластера на частоте 30ГГц в режиме вычитания через половину линейки рупоров с шагом 21.17 сек (1-9, 2-10 итд. – beam switching). Красным цветом показан сглаженный профиль с окном 1 сек.

#### 4. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Первичная обработка данных включала в себя визуальный контроль записей и удаление испорченных сканов, а так же отягощённых сильным атмосферным вкладом, после чего для дальнейшей обработки было выбрано 1140 записей. Записи с умеренной атмосферой на этом этапе не использовались, поскольку их включение приводило к увеличению шума в осреднённой записи.

Обработка проводилась в трёх режимах - осреднение в полной мощности (total power), осреднение с программным вычитанием сканов через половину линейки рупоров (beam switching) и осреднение с вычитанием сканов с двух рупоров одного радиометра (polarized mode).



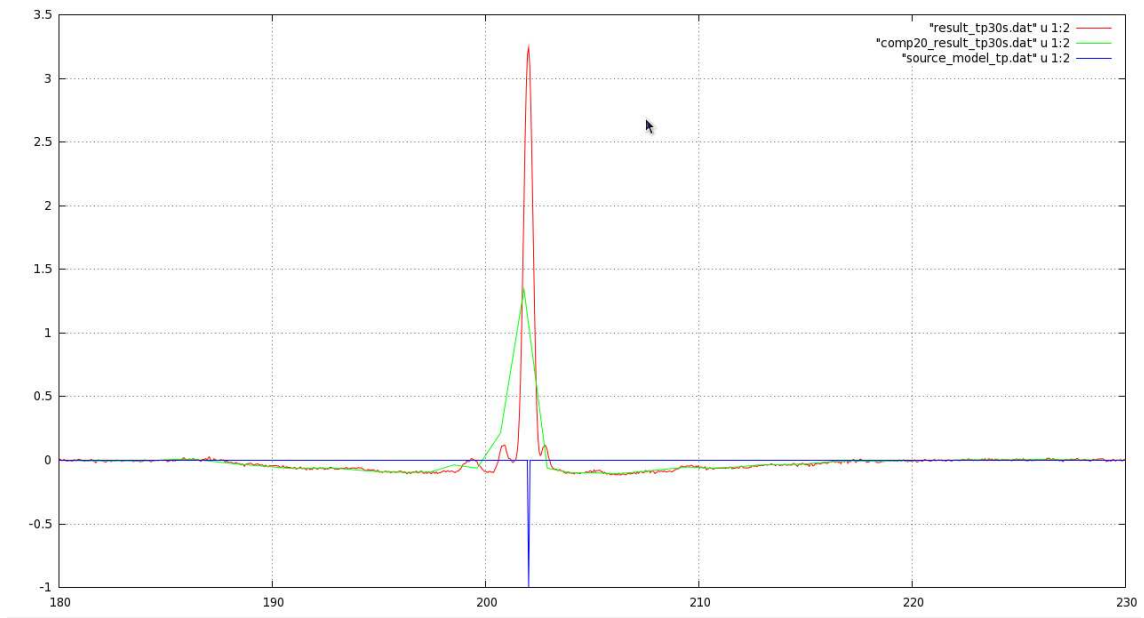
**Рис. 3.** Модельный профиль кластера на частоте 30ГГц в режиме вычитания двух соседних рупоров с шагом 1.323 сек(1a-1e, 2a-2e итд, т.н. polarized mode). Красным цветом показан сглаженный профиль с окном 0.5 сек.

#### 4.1. Осреднение в полной мощности

Простейший режим осреднения – это осреднение всех записей со сдвигом, соответствующим временной задержке между первым и  $i$ -м рупором. Осреднение можно производить как с вычитанием какого-либо фона (полинома или скользящего среднего с некоторым временным окном порядка нескольких десятков секунд для подавления атмосферных флуктуаций), так и без него. Осреднённая запись будет определяться выражением

$$S_{tp}(t) = \frac{1}{N_{tot}} \sum_{i=1}^N S_i(t + (i - 1) \times \Delta t), \quad (1)$$

где  $S_{tp}(t)$  - осреднённая запись,  $N=32$  - общее число рупоров в линейке,  $N_{tot}$  - количество используемых рупоров,  $S_i(t)$  - скан, полученный с  $i$ -го рупора,  $\Delta t=1.323$  сек - запаздывание между соседними рупорами. Если все радиометры исправны, то  $N = N_{tot}$ , а если какой-то



**Рис. 4.** Обработка опорного источника 3C84 в режиме осреднения в полной мощности со сдвигом. Для подавления атмосферы вычитался фон – скользящее среднее с окном 30 сек. Красная кривая – результирующая запись без компрессии, зелёная кривая - компрессия в 20 раз (шаг порядка 1 сек), синим отмечено положение источника по информации из заголовка F-файла. Единицы измерения по оси Y – градусы антенной температуры.

радиометр неисправен, то соответствующие сканы нужно исключить.

В этом режиме атмосфера частично подавляется путём вычитания фона, но в обработанной записи остаётся  $1/f$ -компонента шума радиометров, также как и белая компонента.

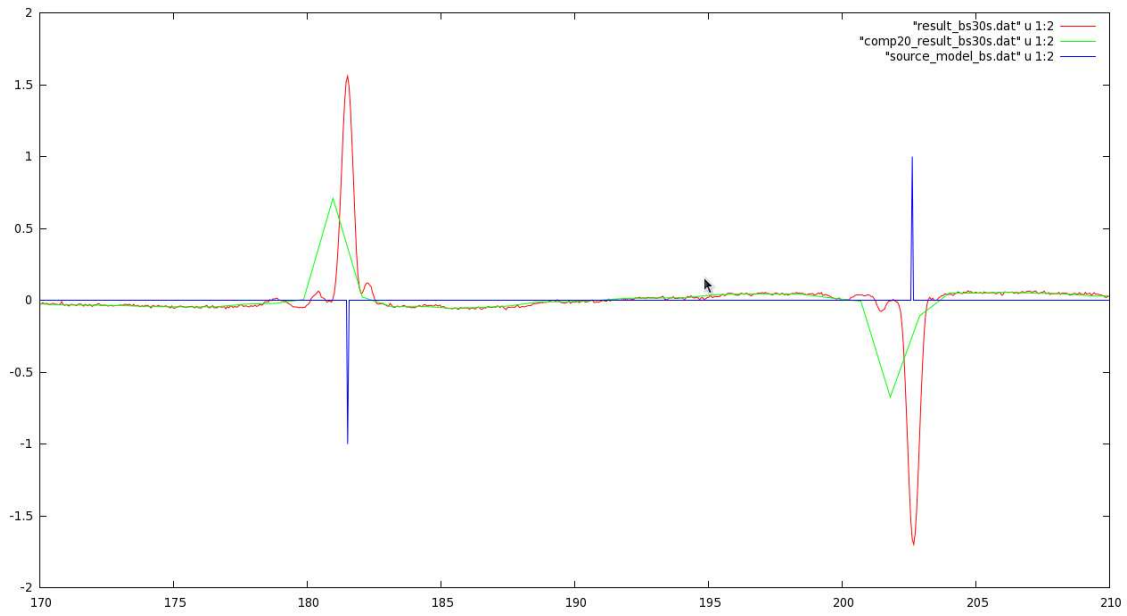
На Рис 4 приведён пример обработанных записей опорного источника 3C84.

#### 4.2. Осреднение разностных сканов с шагом в половину линейки

Если источник достаточно компактен, то для подавления атмосферных флуктуаций можно конструировать разностные записи между  $i$ -м и  $i + N/2$ -м рупорами, которые затем нужно осреднять с соответствующим сдвигом. В этом случае результат будет описываться следующим выражением:

$$S_{bs}(t) = \frac{1}{N_{tot}} \sum_{i=1}^{N/2} (S_i(t + (i - 1) \times \Delta t) - S_{i+N/2}(t + (i - 1) \times \Delta t)), \quad (2)$$

где используются те же обозначения, что и в Ур 1. Здесь так же можно предварительно проводить и вычитать фон для более сильного подавления атмосферы.



**Рис. 5.** Обработка опорного источника 3C84 в режиме осреднения разностных сканов со сдвигом. Для подавления атмосферы вычитался фон – скользящее среднее с окном 30 сек. Красная кривая – результирующая запись без компрессии, зелёная кривая - компрессия в 20 раз (шаг порядка 1 сек), синим отмечено положение источника по информации из заголовка F-файла. Единицы измерения по оси Y – градусы антенной температуры.

В этом режиме атмосфера подавляется не только с помощью вычитания фона, но и путём вычитания  $i + N/2$ -й записи из  $i$ -й. Однако, в обработанной записи вместе с белой компонентой остаётся  $1/f$ -компонента шума радиометров, а так же подавляются временные масштабы больше  $\Delta t \times N/2$  сек. Источник в этом случае идентифицируется в виде двух гауссиан половинной амплитуды с разной полярностью, разнесённых друг от друга на  $\Delta t \times N/2$  сек.

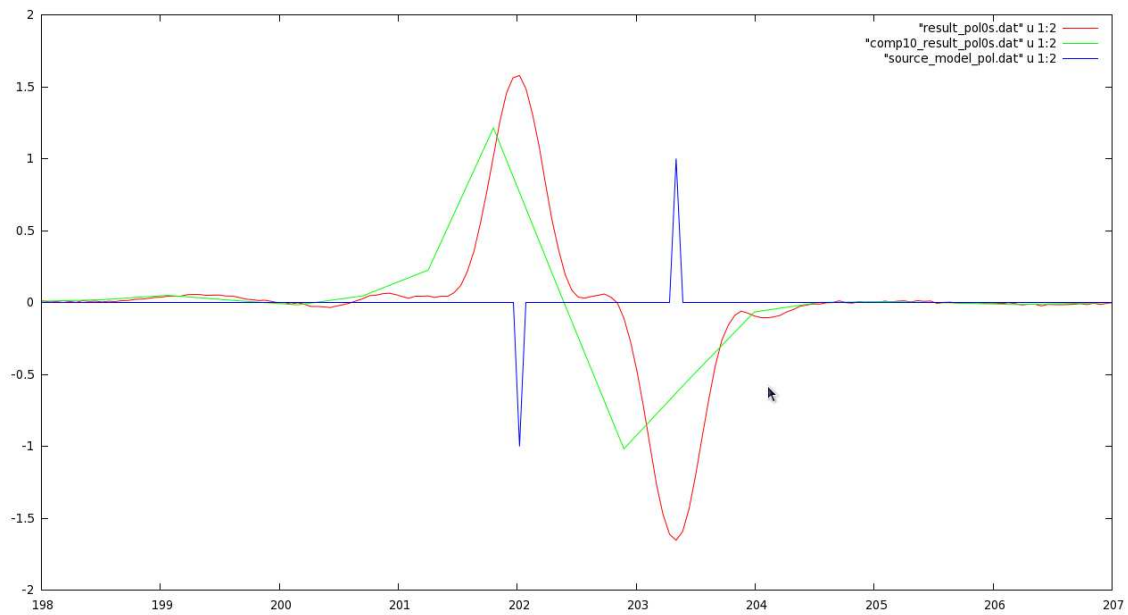
На Рис 5 приведён пример обработанных записей опорного источника 3C84 в этом режиме.

#### 4.3. Осреднение разностных сканов двух соседних рупоров (поляризационный режим)

Этот режим используется для наблюдения  $Q$  или  $U$  параметров Стокса, но если источник очень компактный, то можно попытаться его использовать для наблюдения интенсивности на масштабах меньше чем  $\Delta t = 1.323$  сек. Результат описывается выражением

$$S_{pol}(t) = \frac{1}{N_{tot}} \sum_{i=1}^{N/2} (S_{2i-1}(t + (2i - 2) \times \Delta t) - S_{2i}(t + (2i - 2) \times \Delta t)) \quad (3)$$

где используются те же обозначения, что и в Ур 1 и Ур 2.



**Рис. 6.** Обработка опорного источника 3C84 в режиме осреднения разностных сканов двух соседних рупоров. Красная кривая – результирующая запись без компрессии, зелёная кривая - компрессия в 10 раз (шаг порядка 0.5 сек), синим отмечено положение источника по информации из заголовка F-файла. Единицы измерения по оси Y – градусы антенной температуры.

Здесь мы получаем существенное увеличение чувствительности за счёт подавления атмосферных флуктуаций и  $1/f$  компоненты шума радиометра, но за счёт удаления всех временных масштабов больше  $\Delta t$  сек.

На Рис 6 приведён пример обработанных записей опорного источника 3C84 в данном режиме.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЙ ABELL 2319

Наблюдения скопления Abell 2319 были обработаны каждым из вышеперечисленных методов без вычитания фона, и с вычитанием фона в 30 сек. Достигнутые значения  $r.m.s$  в обработанных записях для несжатых и для сжатых записей сведены в Таблицу 1.

Осреднённые записи для всех режимов обработки приведены на Рис 7, 8 и 9.

В Таблице 2 приведены значения  $r.m.s$ . полученные при осреднении записей с отдельных рупоров.

**Таблица 1.** Достигнутые значения  $r.m.s.$  в  $mK$  в обработанных записях. Здесь TP - осреднение в полной мощности, без вычитания и с вычитанием 30-ти секундного скользящего среднего, BS - осреднение разностных записей со сдвигом, Pol - поляризационный режим.

Режим обработки,	Без компрессии	Компрессия в 20 раз
TP	5.04	4.96
TP, 30s	0.98	0.48
BS	1.43	1.14
BS, 30s	0.97	0.46
Pol	0.69	0.18
Pol, 30s	0.69	0.16

**Таблица 2.** Достигнутые значения  $r.m.s.$  в  $mK$  в обработанных записях с шагом 0.054837 сек для отдельных рупоров в режиме полной мощности с вычитанием 30-ти секундного скользящего среднего. Также приведены значения  $r.m.s$  для сжатых записей 1:20, с шагом 1.09674 сек.

Рупор	M01a	M01e	M02a	M02e	M03a	M03e	M04a	M04e	M05a	M05e	M06a	M06e	M07a	M07e	M08a	M08e
1:1	5.24	5.18	5.06	5.07	4.92	4.97	5.36	5.34	5.37	5.29	4.71	4.71	5.55	5.55	5.12	5.05
1:20	2.36	2.39	2.32	2.32	1.97	2.11	2.24	2.25	2.64	2.65	2.19	2.18	2.54	2.54	2.29	2.31

Рупор	M09a	M09e	M10a	M10e	M11a	M11e	M12a	M12e	M13a	M13e	M14a	M14e	M15a	M15e	M16a	M16e
1:1	5.30	5.35	5.65	5.59	6.17	6.12	5.89	5.78	5.21	5.14	5.47	5.48	—	—	4.83	4.86
1:20	2.54	2.49	2.69	2.66	2.79	2.84	2.79	2.69	2.25	2.30	2.56	2.66	—	—	2.19	2.20

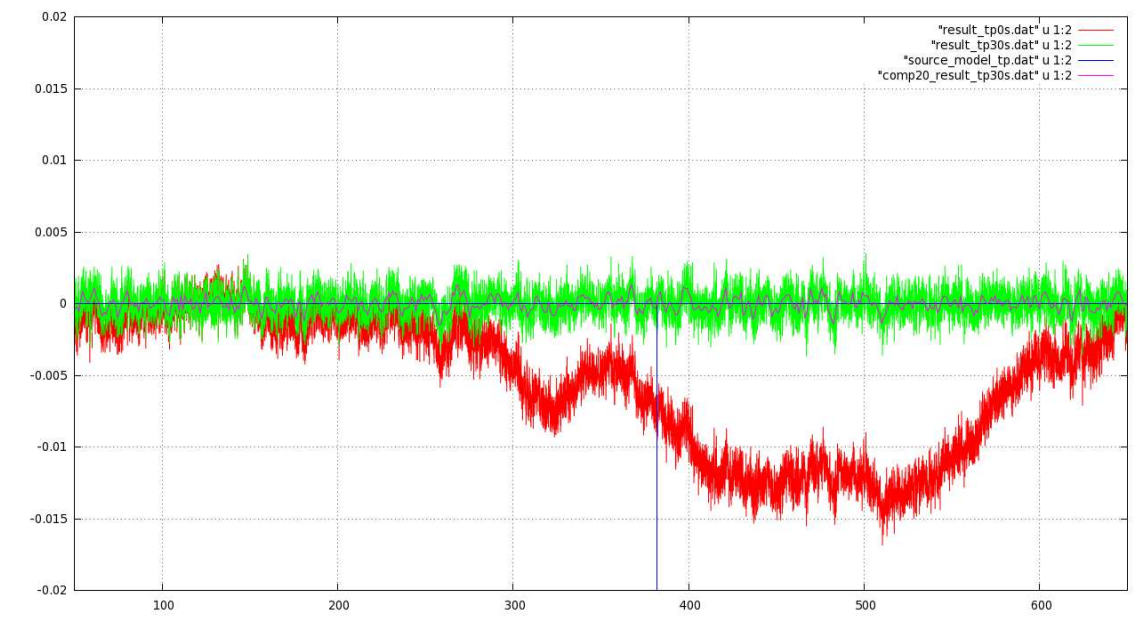
## 6. ВЫВОДЫ

После осреднения записей объект обнаружить не удалось в режимах total power и beam switching. Возможно, что структуры амплитудой порядка  $0.2 - 0.5$  mK, видимые в обработанной записи в поляризационном режиме (close beam switching) на месте, где должен быть кластер, имеют к нему отношение.

Для улучшения отношения  $S/N$  можно использовать

- Весовое осреднение записей с весом  $1/\sigma^2$ .
- Более точное вычитание атмосферы в режиме beam switching с оптимизацией коэффициента  $k$ ,  $S_{bs} = S_i - k \times S_{i+N/2}$ .



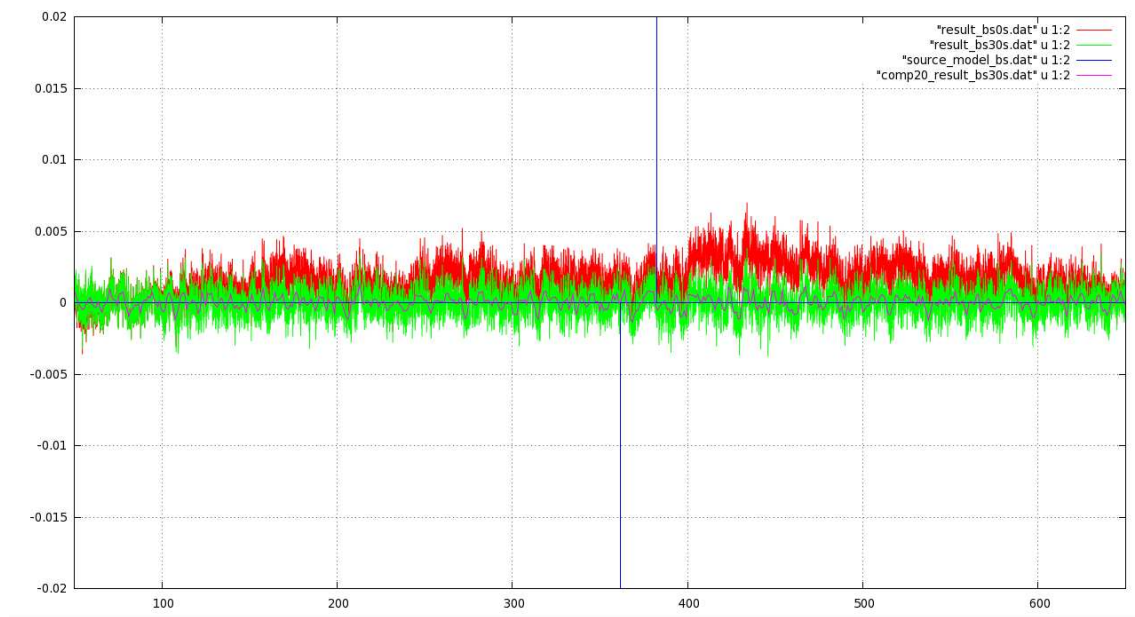


**Рис. 7.** Обработка кластера Abell 2319 в режиме осреднения в полной мощности со сдвигом. Красная кривая – результат без вычитания фона и компрессии, зелёная кривая – для подавления атмосферы вычитался фон – скользящее среднее с окном 30 сек. Розовая кривая - компрессия в 20 раз (шаг порядка 1 сек), синим отмечено положение источника по информации из заголовка F-файла. Единицы измерения по оси Y – градусы антенной температуры.

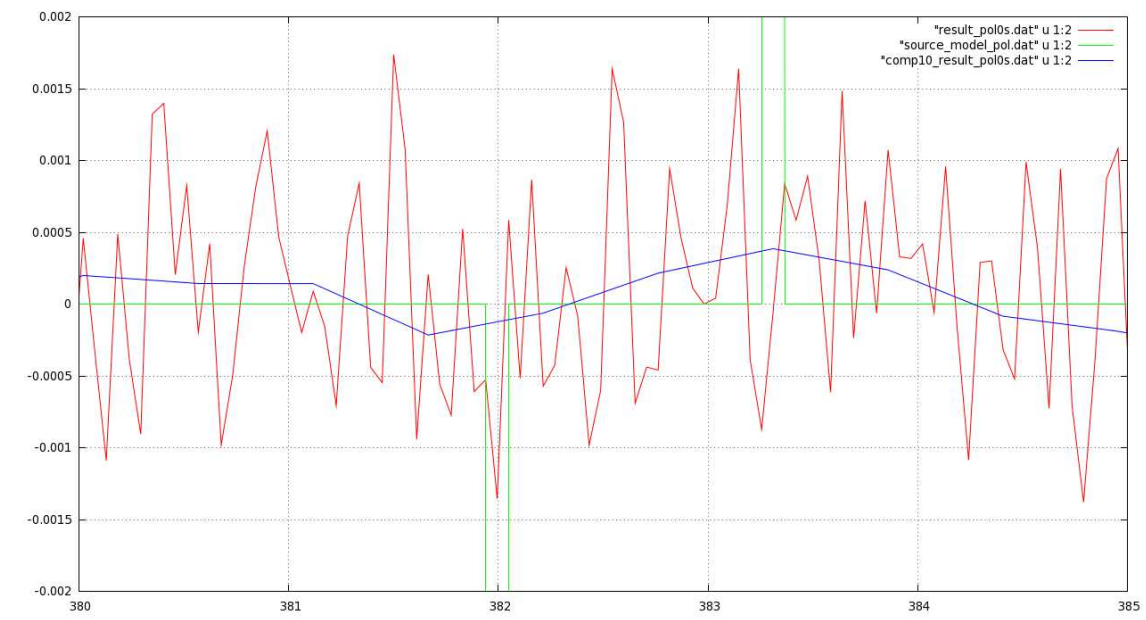
- Добавление записей с умеренной атмосферой в случае успеха вышеупомянутой оптимизации.
- Использование режима наблюдения "рупор в небо" для подавления  $1/f$  компоненты шума радиометров.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации (ГК16.518.11.7062 и 16.552.11.7028).



**Рис. 8.** Обработка кластера Abell 2319 в режиме осреднения разностных сканов со сдвигом. Красная кривая – результат без вычитания фона и компрессии, зелёная кривая – для подавления атмосферы вычитался фон – скользящее среднее с окном 30 сек. Розовая кривая - компрессия в 20 раз (шаг порядка 1 сек), синим отмечено положение источника по информации из заголовка F-файла. Единицы измерения по оси Y – градусы антенной температуры. Для соответствия с моделью на Рис 2 амплитуды нужно увеличить вдвое.



**Рис. 9.** Обработка кластера Abell 2319 в режиме осреднения разностных сканов двух соседних рупоров. Красная кривая – результирующая запись без компрессии, синяя кривая - компрессия в 10 раз (шаг порядка 0.5 сек), зеленым отмечено положение источника по информации из заголовка F-файла. Единицы измерения по оси Y – градусы антенной температуры. Для соответствия с моделью на Рис 3 амплитуды нужно увеличить вдвое.