

**20-я конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА» ИКИ РАН Москва ноябрь 2022**

**Исследование радиационных
процессов в атмосфере радиозондом с
оптическим датчиком**



Кочин Александр Васильевич

Центральная аэрологическая обсерватория

Актуальность проблемы

Проведение дистанционного зондирования поверхности Земли и ее атмосферы в оптическом диапазоне требуют учета информации о затухании света в атмосфере. Интегральное значение этого параметра измеряется мировой актинометрической сетью. Однако интегральное ослабление зависит от двух независимых параметров, а именно: коэффициента поглощения и толщины поглощающего слоя. Ранее в СССР с использованием актинометрических радиозондов проводились регулярные измерения радиационного баланса атмосферы, что позволяло получить подобную информацию. Однако они были прекращены ввиду заметной стоимости расходных материалов – актинометрических радиозондов. Сейчас эта работа была бы востребована, а тогда прогностические модели не могли усваивать информацию подобного рода, а методы дистанционного зондирования поверхности Земли и ее атмосферы не были созданы. Разработка недорогого актинометрического радиозонда для организации регулярных наблюдений является задачей настоящей работы. С этой целью стандартный радиозонд был оборудован недорогим оптическим датчиком. Полученные с помощью разработанного радиозонда данные анализируются в свете исследования радиационных процессов в атмосфере.

Радиозонд с оптическим датчиком

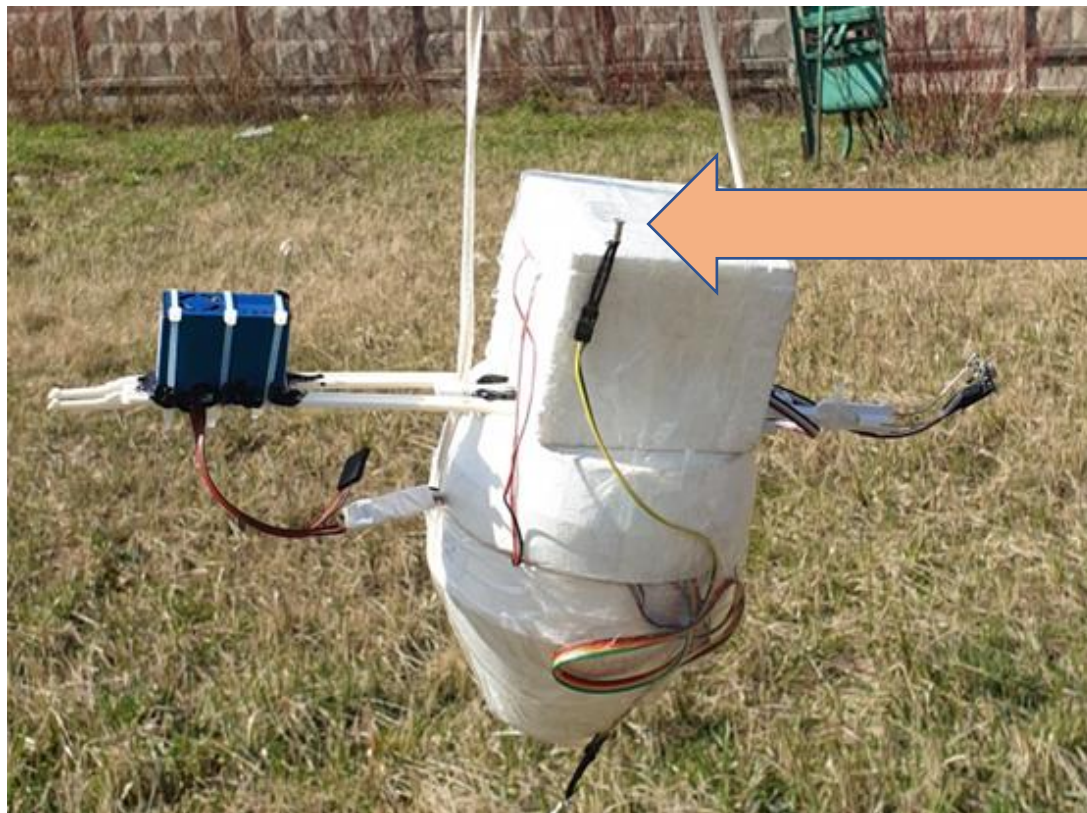


Рис.1. Внешний вид радиозондов с оптическими датчиками. Слева MODEM Франция, справа MP3-3, Россия. Датчик отмечен стрелкой.

Данные сдвоенного пуска.

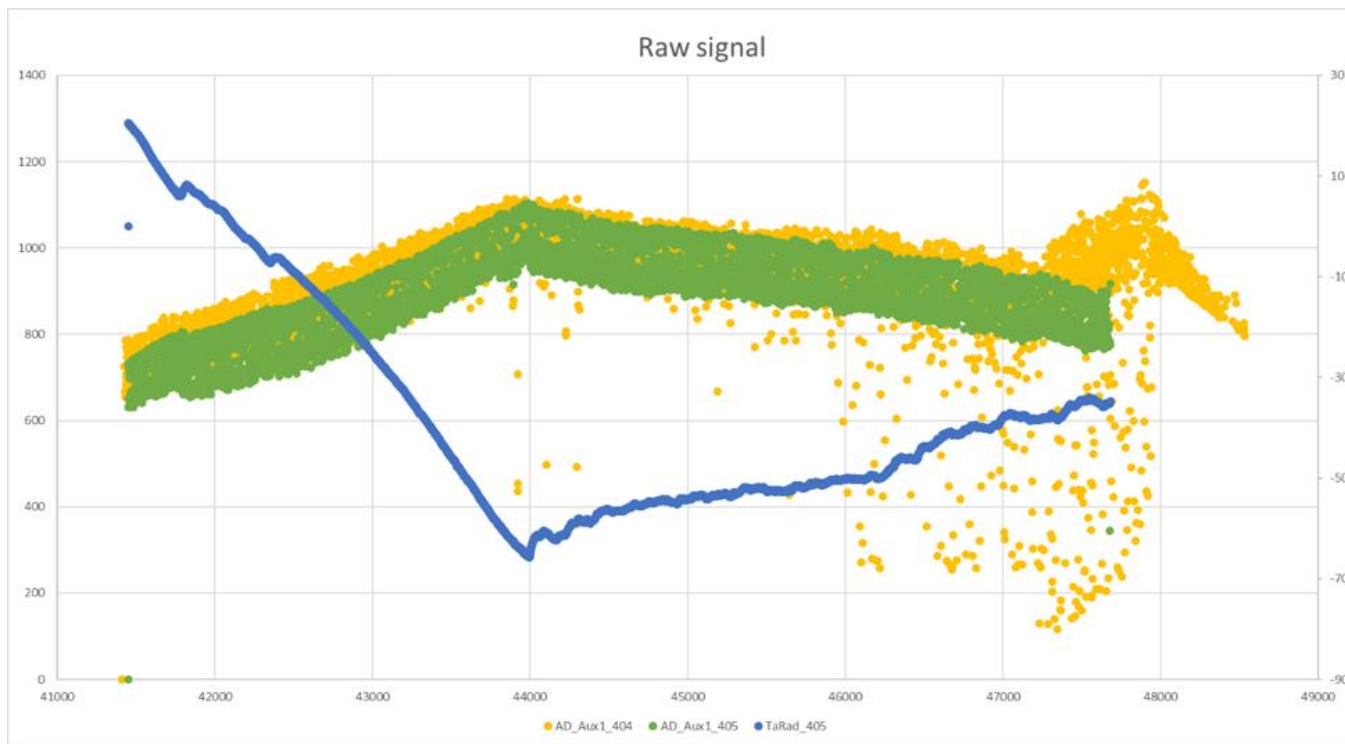


Рис 2. Данные сдвоенного запуска радиозондов. Сырые сигналы оптических датчиков видимого диапазона показаны зеленым и желтым цветом. Синей линией показана температура. Время в секундах по горизонтальной оси. Уровень сигнала оптических датчиков в кодовых единицах АЦП по левой вертикальной оси. Правая шкала это температура, градусы Цельсия.

Данные от датчиков видимого и ИК спектров.

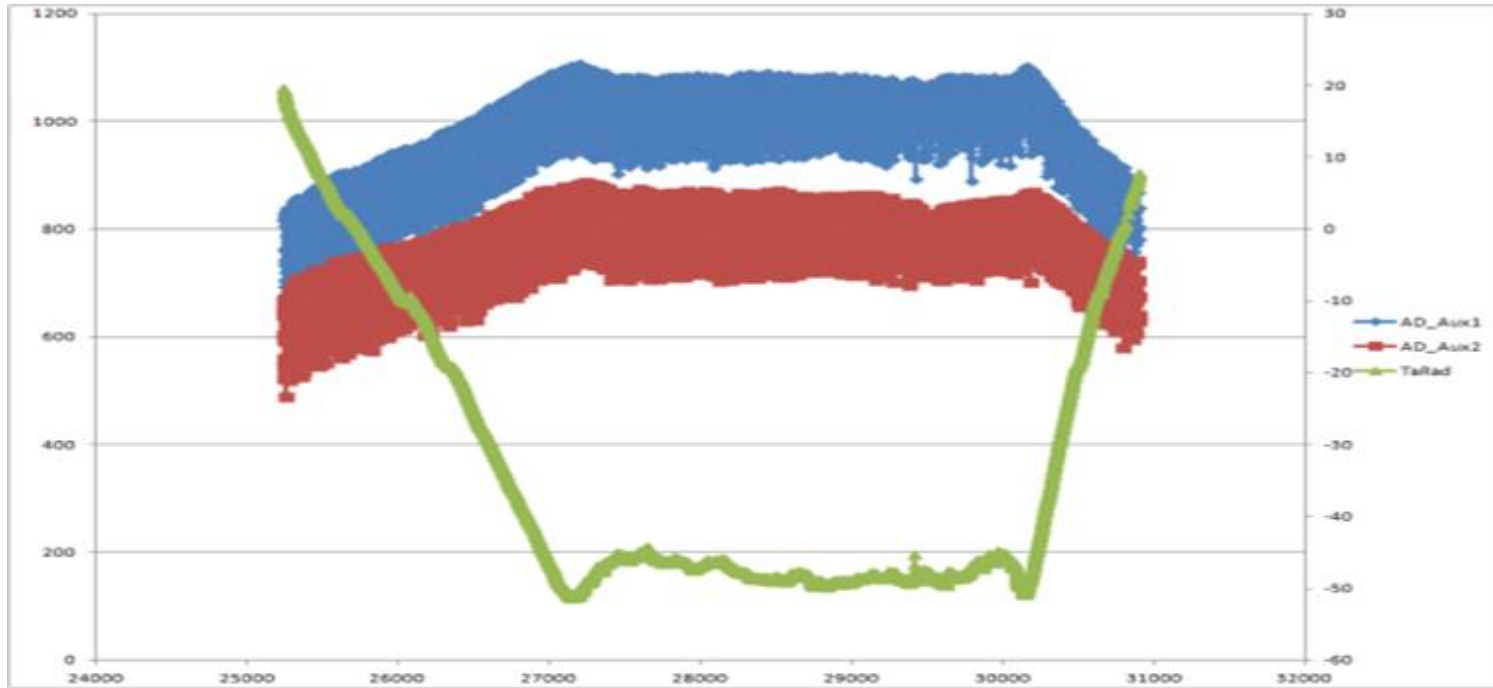


Рис.3. Исходные данные, скорректированные на изменение высоты Солнца. Синяя линия видимый диапазон, красная линии ИК диапазон, порядка 1 мкм., Зеленая линия - температура. Время в секундах по горизонтальной оси.

Характер изменения сигнала.

Во всех пусках характер изменения сигналов оптических датчиков радиозондов был одинаковый. Сигнал увеличивался до некоторой высоты, а затем уменьшался, как показано на рис.2,3 и рис.4. Увеличение сигнала вызвано уменьшением ослабления солнечного излучения из-за уменьшением оптической массы воздуха. Затем сигнал уменьшается из-за уменьшения высоты Солнца, так как запуски производились в 15 часов по местному времени. Перегиб в сигнале оптического датчика всегда соответствовал перегибу в температуре. В соответствии с критериями выбора нижней границы тропопаузы перегиб соответствует высоте нижней границы тропопаузы.

Алгоритм обработки сигнала

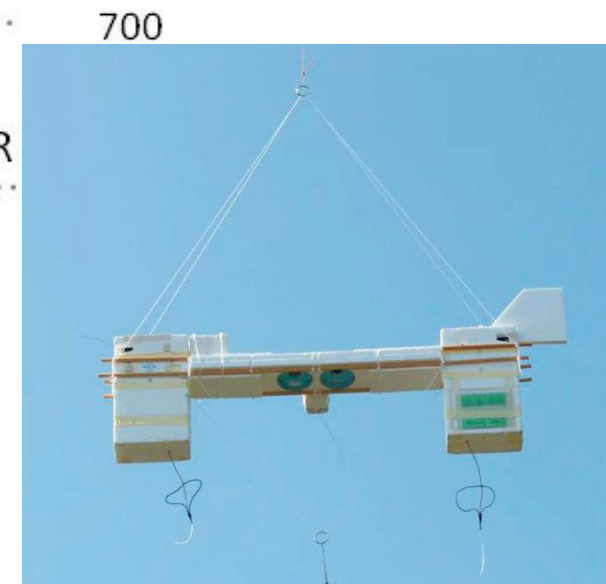
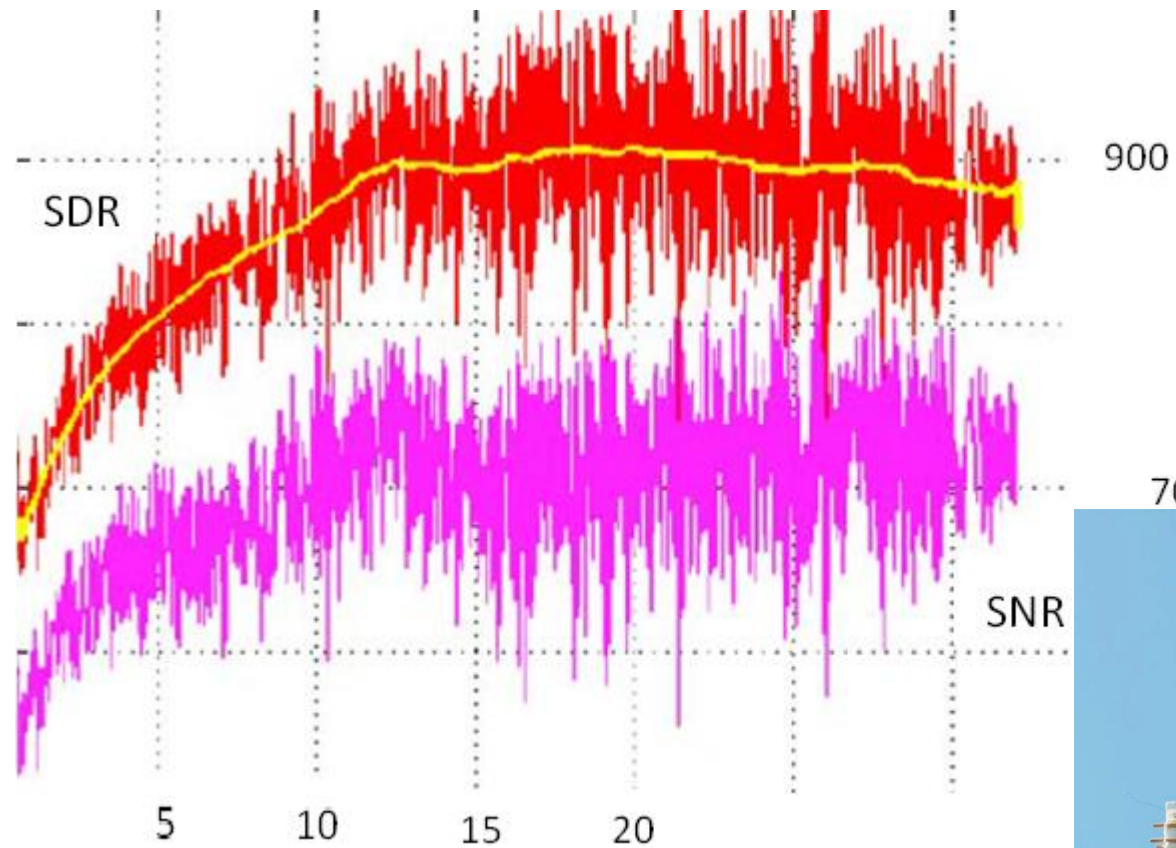
При анализе данных выяснилось, что средний уровень сырого сигнала уменьшается от тропопаузы до поверхности Земли на 30 % (что близко к известной величиной ослабления видимого света в атмосфере с учетом оптической толщины атмосферы в 15 часов местного времени), что указывает на возможность получения информации о затухании света. Сырой сигнал был скорректирован на высоту Солнца. После коррекции сигнал выше тропопаузы не меняется. Сырой сигнал очень сильно флуктуирует, причем вид распределения флуктуаций трудно формализовать. Для обработки был выбран эмпирический метод построения сигнала по максимумам. В скользящем окне из 30 значений выбирался максимум сигнала и это значение записывалось в файл. Полученный файл дифференцировался по высоте. На высоте 2, 5 и 5 км были обнаружены резкие изменения в величине производной, которые совпали с инверсионными слоями в профиле температуры. Это соответствует известным представлениям об уменьшении в инверсионном слое концентрации аэрозолей и увеличении их концентрации под ним, что дает изменения в коэффициенте затухания света. Поэтому значение производной далее рассматривалось как величина коэффициента затухания света.

Наличие флуктуаций подтверждено экспериментом в Швейцарии.

Rolf Philipona, Andreas Kräuchi, and Emmanuel Brocard.

Solar and thermal radiation profiles and radiative forcing measured through the atmosphere.

GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS 2012



Коэффициент ослабления в сдвоенном пуске.

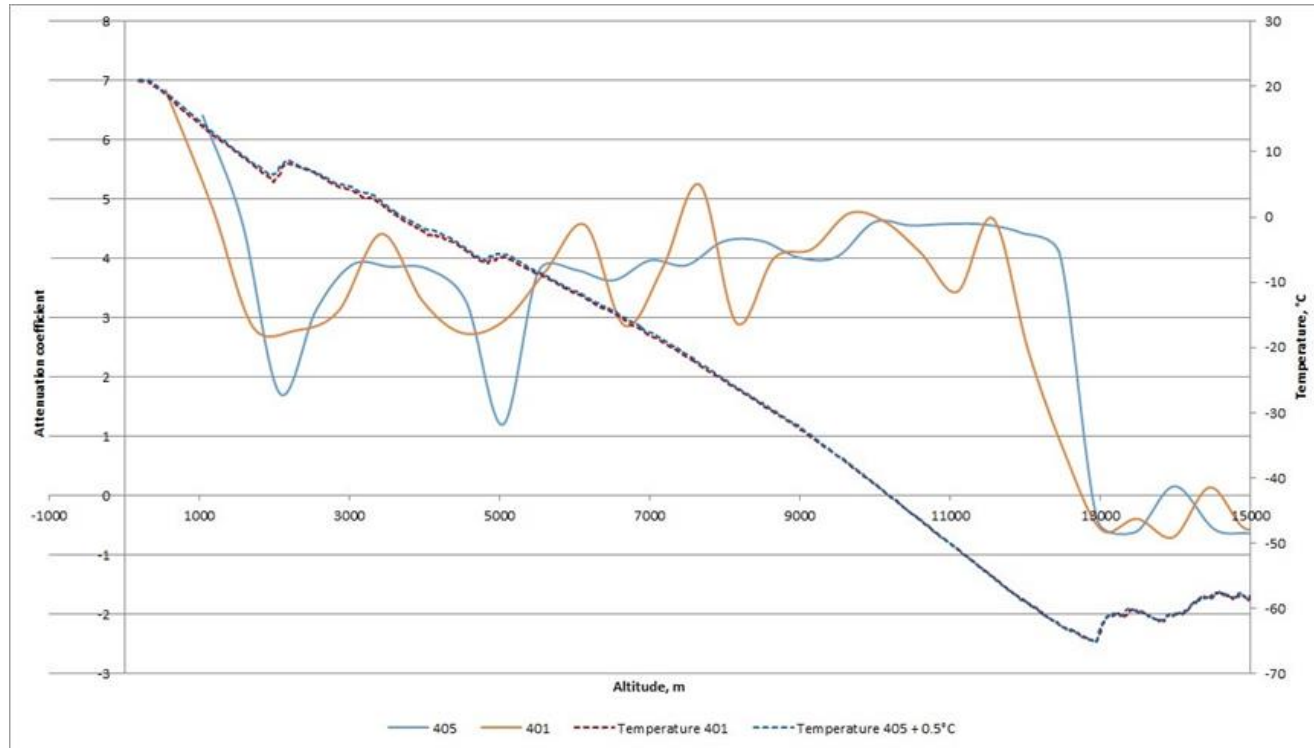


Рис 5. Результаты одновременного выпуска двух радиозондов. Желтым цветом показан рассчитанный коэффициент затухания по данным радиозонда с частотой 401 МГц, голубым цветом показан рассчитанный коэффициент затухания по данным радиозонда с частотой 405 МГц, пунктирные линии это температура по данным обоих радиозондов. Горизонтальная ось это высота, м, вертикальная шкала слева это коэффициент затухания 10^{-2}км^{-1} , а правая шкала это температура, градусы Цельсия.

Сравнение коэффициентов ослабления в сдвоенном пуске, рассчитанных разными способами.

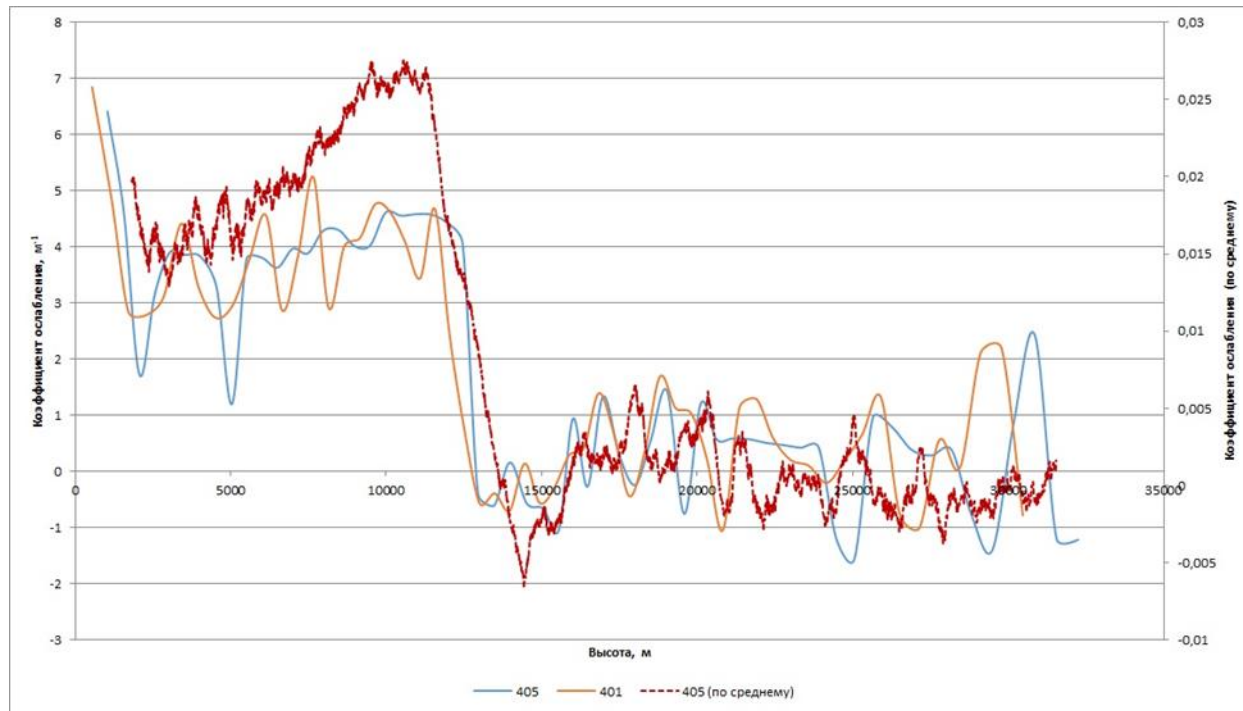


Рис.6. Коэффициента ослабления в сдвоенном пуске, рассчитанные по осреднению в окне 1,5 км (красная линия) и по огибающей максимумов в окне 150 метров .

Высота тропопаузы и полное ослабление.

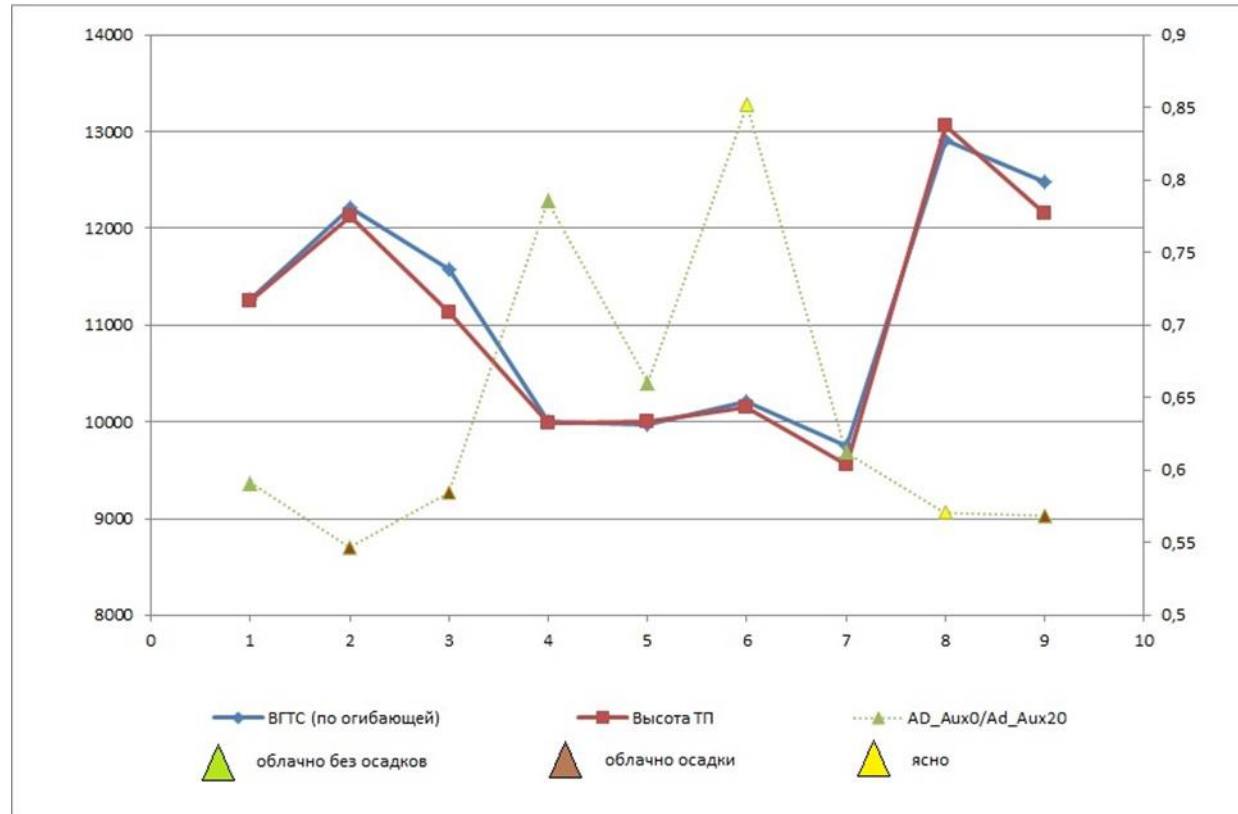


Рис.7. Красная линия показывает высоту тропопаузы по профилю температуры, синяя линия показывает высотой тропопаузы по коэффициенту ослабления. Пунктиром показано соотношение сигналов оптического датчика у Земли и на высоте 20 км. Треугольниками показаны случаи ясного неба, облаков без осадков и облаков с осадками.

Результаты анализа данных.

Для определения соотношения между высотой тропопаузы по профилю температуры и по коэффициенту ослабления были обработаны результаты 9 пусков (рис.7). Оказалось, что эти высоты практически не отличаются. Иногда высота тропопаузы по коэффициенту ослабления выше примерно на 0,5 км. Таким образом, существующий метод расчета высоты тропопаузы по профилю температуры правильно определяет высоту аэрозольного слоя в тропосфере, что подтверждается данными экспериментов.

Анализ соотношения сигналов оптического датчика у Земли и на высоте 20 км показал, что полное ослабление солнечного излучения в видимом диапазоне главным образом определяется высотой тропопаузы.

Абсолютная калибровка датчиков различных диапазонов.

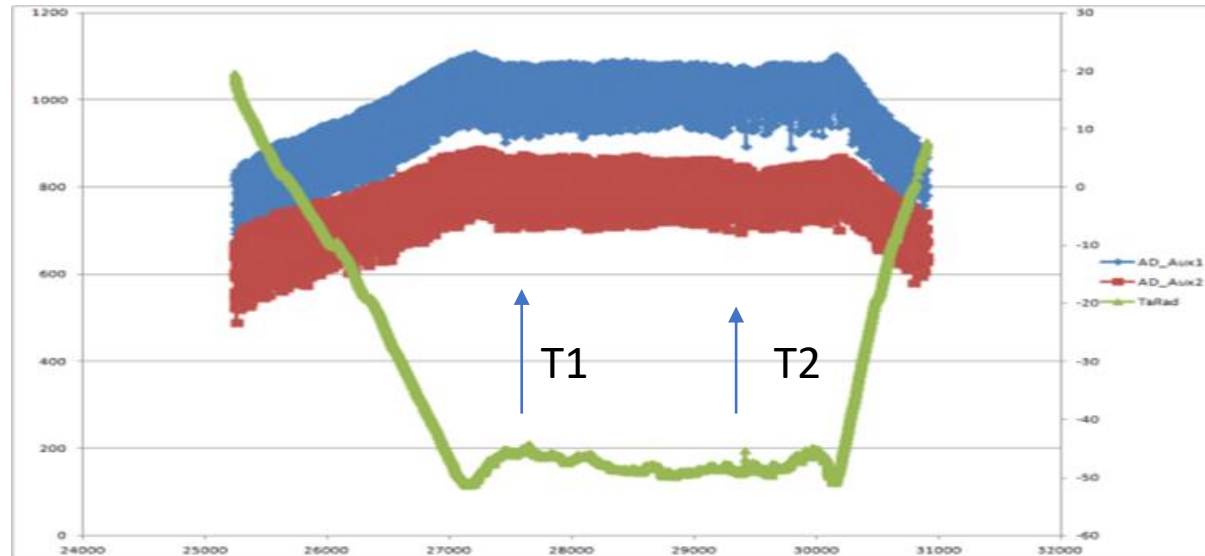


Рис.10. Исходные данные, скорректированные на изменение высоты Солнца. Синяя линия видимый диапазон, красная линии ИК диапазон, порядка 1 мкм., Зеленая линия - температура. Время в секундах по горизонтальной оси.

Абсолютная калибровка датчиков, особенно ИК или УФ диапазонов, представляет собой сложную задачу. Решением является использование угловой зависимости интенсивности света от высоты Солнца. Величины косинусов угла падения света в моменты T1 и T2 позволяет осуществить абсолютную калибровку.

$$A/I = [K(T1) - K(T2)] / [\cos(T1) - \cos(T2)]$$

Оценка качества работы датчиков влажности

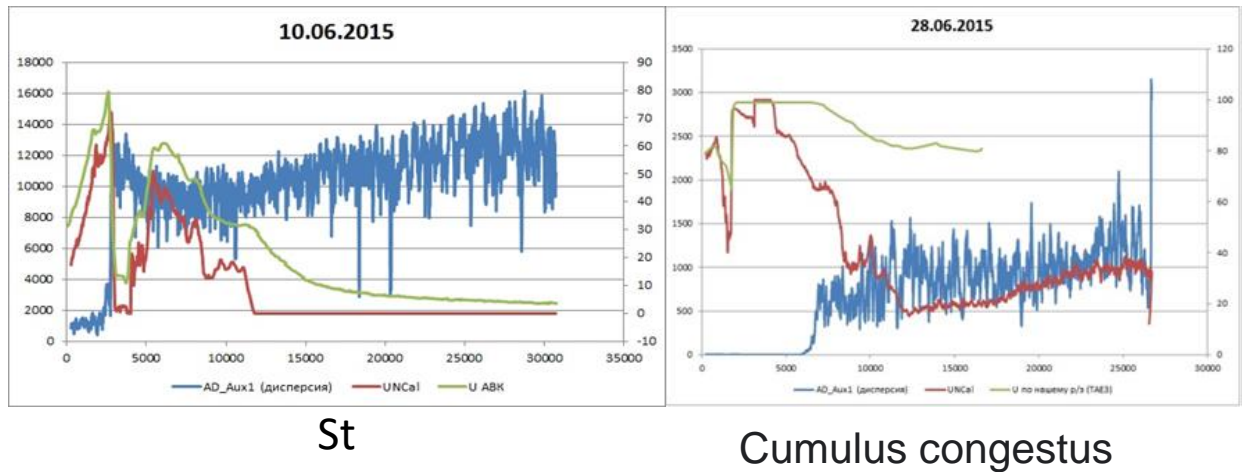


Рис. 9. Профили влажности и высота ВГО. Синяя линия дисперсия, увеличение которой соответствует высоте ВГО. Зеленая линия данные датчика влажности радиозонда МРЗ-З, красная - р/з MODEM. Слева слоистая облачность без осадков, справа кучево-дождевое облако с интенсивными осадками. По горизонтали высота, м. Шкала справа относительная влажность %.

Оценка качества работы датчиков влажности может быть сделана по данным оптического датчика. Наличие облачности, а также высоту ВГО, можно определить по величине дисперсии сигнала оптического датчика (синяя линия). В слоистой облачности без осадков показания датчиков влажности радиозондов МРЗ-З и MODEM близки. В кучево-дождевом облаке с интенсивными осадками датчик МРЗ-З намок и завышал влажность до конца полета. На высоте 7 км датчик МРЗ-З показал влажность, близкую к 70%. При такой влажности уже начинается процесс облакообразования. Датчик MODEM показал 50 %, что соответствует отсутствию облачности. Кроме того датчик МРЗ-З значительно завышает влажность в тропопаузе и выше нее. Учет величины коэффициента ослабления света позволяет скорректировать эти ошибочные значения.

Использование на сети.

Результаты работы подтвердили способность радиозонда с оптическими датчиками измерять коэффициент ослабления света в атмосфере и высоту границы между воздушными массами тропосферы и стратосферы. Кроме того можно будет измерять высоту ВГО для мониторинга спутниковых данных. Простота использования и низкая стоимость расходных материалов являются ключевыми факторами для устройств, используемых в сети. В этой работе используются простейшие датчики. Ориентировочная стоимость радиозонда с оптическим датчиком будет примерно на 1 % выше, чем на сегодняшний день. Таким образом, дополнительные расходы не превысят 50 тыс. руб. на аэрологическую станцию в год.

Выводы:

1. Существующий метод расчета высоты тропопаузы по профилю температуры дает значение, соответствующее высоте верхней границе аэрозольного слоя в тропосфере.
2. Полное ослабление солнечного излучения в видимом диапазоне главным образом определяется высотой тропопаузы.
3. Исследование влияния особенностей вертикального коэффициента затухания света на погодные и климатические процессы представляется перспективным направлением.
4. С помощью оптического датчика можно оценить качество работы датчика влажности.