

# Интерпретация данных прямых измерений относительной влажности внутри облака

*Кочин А. В.*

Центральная аэрологическая обсерватория,  
Долгопрудный, e-mail: [amarl@mail.ru](mailto:amarl@mail.ru)

# Теоретические и экспериментальные данные о величине относительной влажности в облаке

Общепринятым критерием формирования облачности является достижение воздухом точки росы, когда относительная влажность достигает 100% и водяной пар начинает конденсироваться в капли или кристаллы льда. Из этого критерия делается вывод, что типичное значение относительной влажности в облаке — 100% или чуть выше.

**Данные измерений** свидетельствует, скорее, об обратном. Например, средняя относительная влажность по данным радиозонда на АЭ Долгопрудная на высоте нижней границы облака, определенной лазерным облакомером, равна 75 %. Причиной подобной разницы может являться как неправильное функционирование датчиков влажности, так и наше неверное представление о средней величине относительной влажности в облаке.

Целью настоящего исследования является попытка объяснить противоречие между экспериментальными данными и устоявшимися в литературе представлениями о величине относительной влажности в облаке. Так как определения профиля влажности по данным дистанционного зондирования основано на решении обратной задачи с использованием информации прямых измерений, подобная информация важна для обеспечения точности и надежности дистанционных измерений.

# Уравнения роста и испарении капли

Уравнение роста капли в насыщенном паре

$$\frac{dr}{dt} = \frac{D(p_{\infty} - p_r)}{r\rho_l R_v T}$$

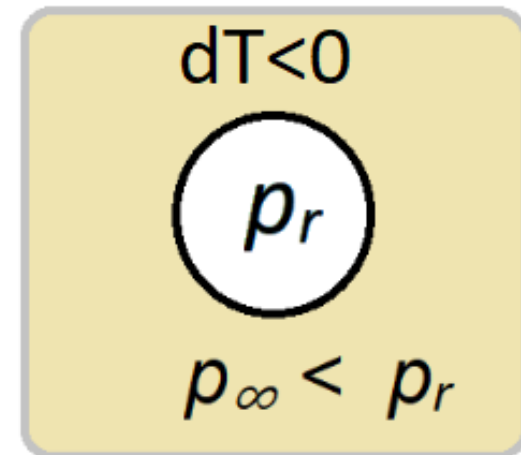
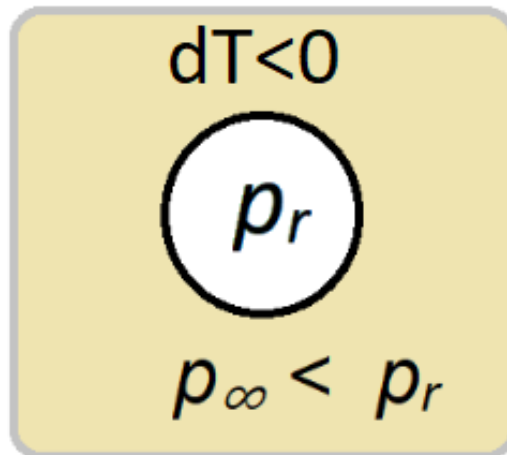
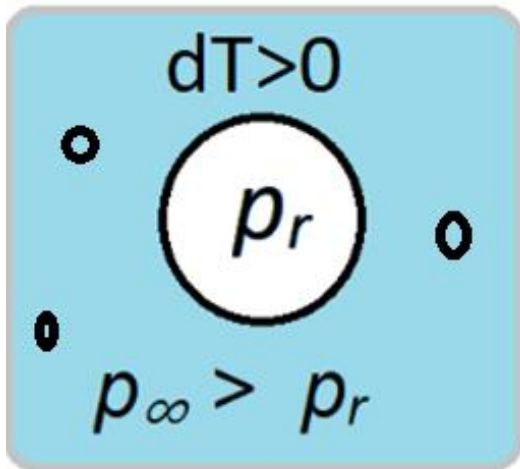
Уравнение для испарения

$$\frac{dr^2}{dt} = -\frac{2D(p_r - p_{\infty})}{\rho_l R_v T}$$

Если испарение лимитируется подводом тепла:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{k\Delta T}{r\rho_l L}$$

$R$  – радиус капли,  $D$  – коэффициент диффузии пара,  $p_{\infty}$  – давление пара вдали от капли,  $p_r$  – равновесное давление пара над поверхностью капли,  $\rho_l$  – плотность жидкости,  $R_v$  – газовая постоянная для пара,  $T$  – температура,  $k$  – теплопроводность газа,  $L$  – удельная теплота испарения,  $\Delta T$  – разность температур.



## Асимметрия процессов испарения и конденсации и реакция датчика влажности

Скорость конденсации и испарения разная, потому что при конденсации непосредственно над каплей  $p_r$  (равновесное давление пара над поверхностью) всегда близко к насыщенному и мало отличается от насыщенного давления  $p_\infty$  вдали от капли, а при испарении капли разница этих давлений может быть большой. При увеличении давления пара выше насыщенного увеличивается число капель из-за вовлечения и обводнения новых ядер конденсации. При испарении же число капель уменьшается. Также объем с конденсацией всегда теплее окружающего воздуха и имеет положительную плавучесть, в то время как объем с испарением может быть как холоднее и иметь отрицательную плавучесть, что усиливает испарение, так и теплее с положительной плавучестью, что блокирует испарение.

Реакция датчика на влажность выше и ниже насыщенной принципиально разная. Если влажность более 100%, то водяной пар конденсируется на поверхности датчика и пересыщение не может быть заметным. Наоборот, при влажности менее 100 % поток водяного пара начинает зависеть от скорости движения датчика относительно воздуха, потому что это определяет не только поток водяного пара, но и поток тепла. Кроме того при низкой влажности заметно влияет стратификация температуры в окружающем пространстве. Ввиду разных процессов постоянные времени для увеличения показаний и для уменьшения имеют разную величину, что сдвигает среднее значение показаний.

Для исключения эффектов конденсации водяного пара фирма Vaisala устанавливает на радиозонде два датчика, работающие попеременно. Один нагревается и сохнет, а после остывания используется для измерений.

# Относительная влажность в облаках.

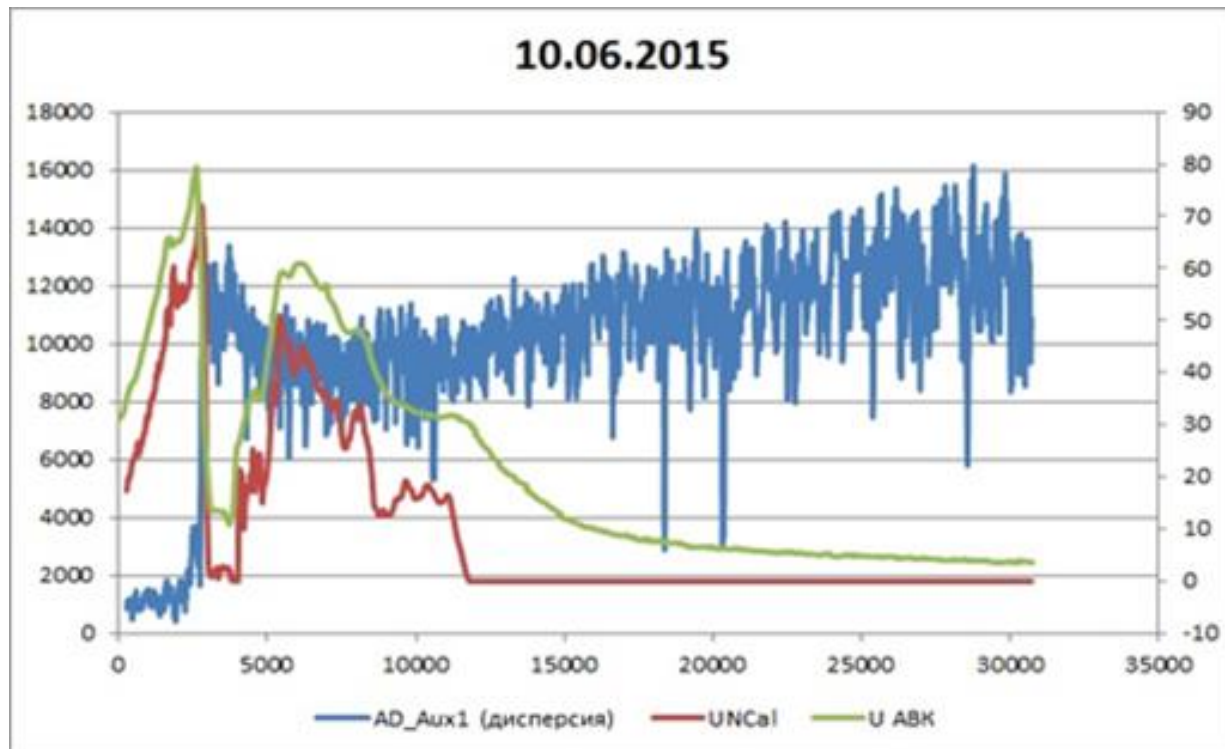


Рис. 1. Профили влажности по датчика влажности радиозонда МРЗ-3 - зеленая, красная - р/з MODEM. Синяя линия дисперсия, увеличение которой соответствует высоте ВГО. Вверху слоистая облачность без осадков, внизу кучево-дождевое облако с интенсивными осадками. По горизонтали высота, м. Шкала справа относительная влажность %.

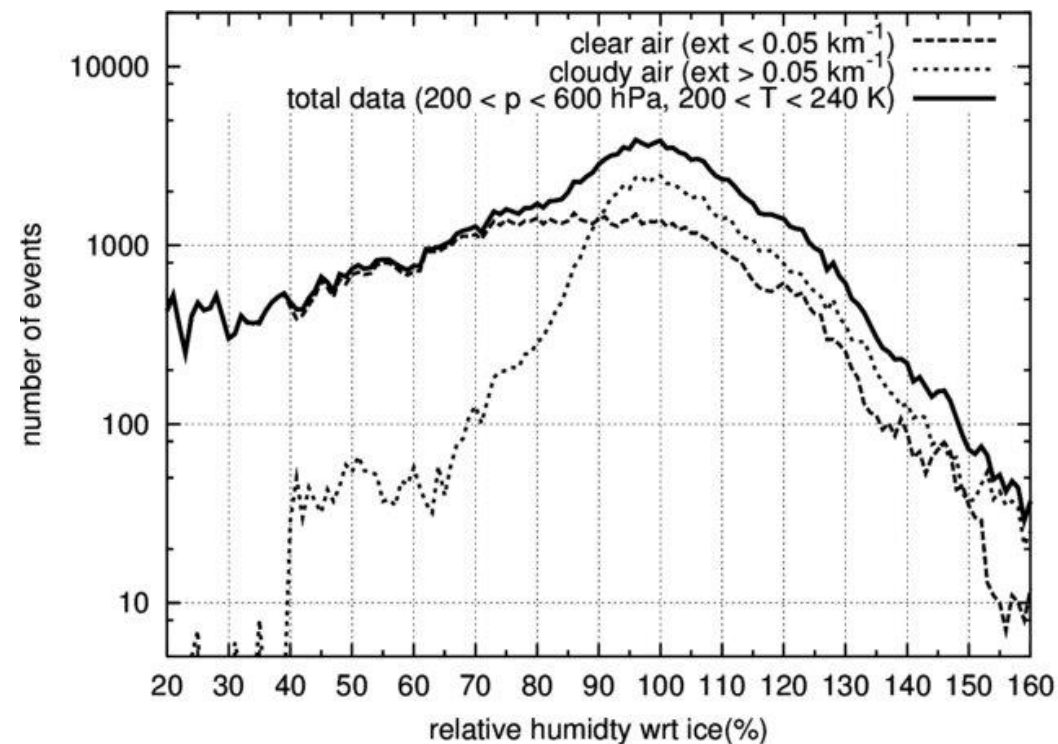


Рис.2. Распределение относительной влажности в перистых облаках по данным самолетных измерений (Spichtinger, P. 2004. <https://doi.org/10.5194/acp-4-639-2004>).

# Процесс достижения состояния насыщения

Состояние насыщения воздуха возникает вследствие уменьшения температуры при адиабатическом охлаждении поднимающегося объема воздуха, когда некоторый объем достигает уровня конденсации и формируется структура подобная конвективной ячейке. Процесс начинается с конденсации водяного пара в объеме, что приводит к возникновению силы плавучести и подъему этого объема. Подъем вызывает охлаждение и дальнейшую конденсацию в силу поддержания насыщения.

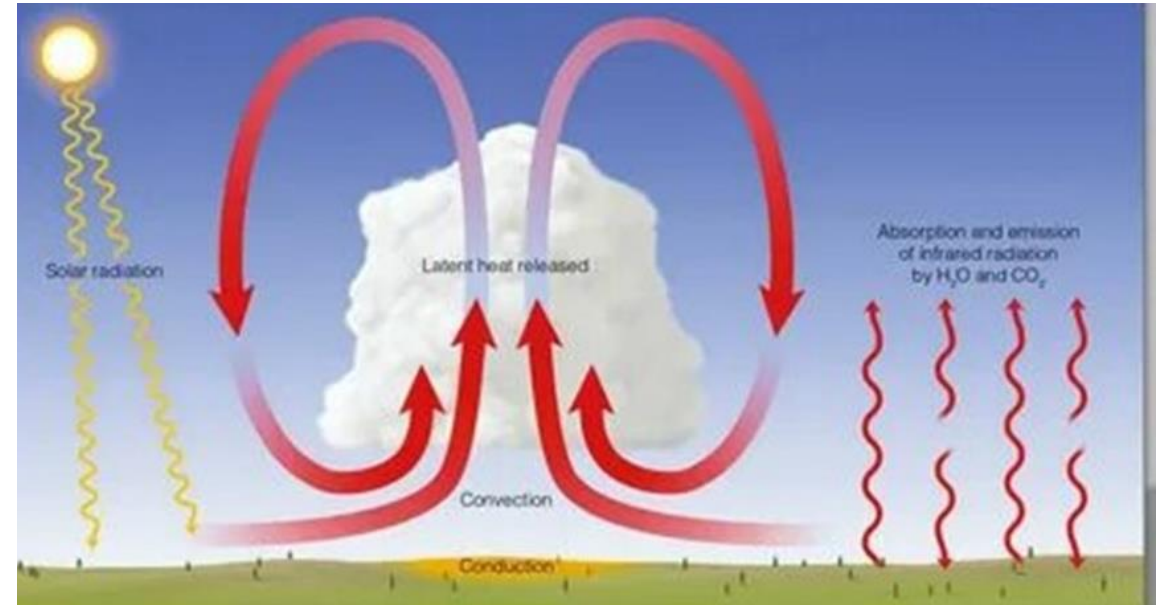


Рис. 3. Структура воздушных потоков в конвективной ячейке, которая приводит к формированию области со 100 % влажностью по центру ячейки. На периферии относительная влажность меньше фоновой, чтобы реализовывался режим испарения .

# Моделирование облаков

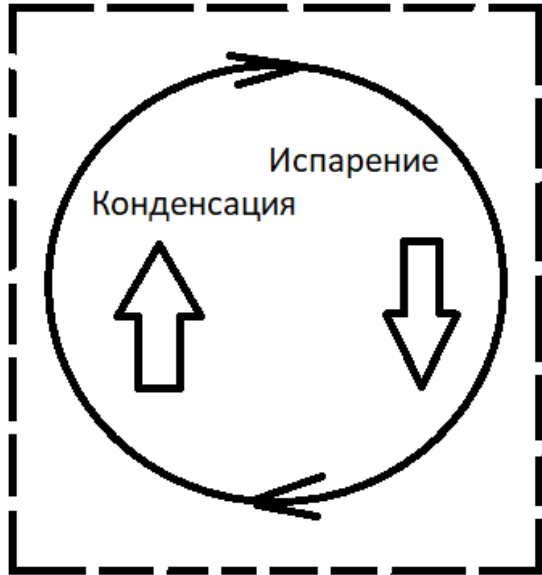


Рис. 4. Структура ячейки с турбулентным вихрем

Моделирование слоистых облаков исследовательским коллективом из Израиля (Khain и др.) выполнено методом разделения облачного пространства на ячейки (parcell), в каждой из которых присутствует турбулентный вихрь. В результате происходит периодическая конденсация и испарение гидрометеоров. Размер ячеек был выбран 40 метров, что согласовано с самолетными экспериментами Мазина и др., в которых изменения спектра гидрометеоров фиксировалось на масштабе десятков метров. Соответственно внутри ячейки периодически появляются и исчезают области как с насыщенным водяным паром, так и области с относительной влажностью менее 100 %. Соответственно датчик влажности будет показывать значение относительной влажности менее 100 % вследствие турбулентного переноса водяного пара вихрями разного масштаба. Восходящая ветвь дает 100 % влажность, а нисходящая менее 100 %.

Показания U датчика влажности соответствуют некоторой усредненной относительной влажности с учетом постоянной времени.

# Уменьшение относительной влажности при опускании объема на масштабе L

Принципиальная особенность при испарении (желтая линия) в том, что влажность в окружающем пространстве должна быть меньше 100 %, а градиент температуры больше влажно-адиабатического.

Время испарения капли размером 100 микрон составляет 20 минут или 1200 секунд. При скорости потока в турбулентной пульсации, например, 0,5 м/с масштаб 500 метров требует для прохождения время 1000 секунд. Капли не успевают испариться.



Таким образом крупные капли, которые образовались при слиянии, не испарятся и в начале восходящей ветви потока влажность будет меньше 100 %.

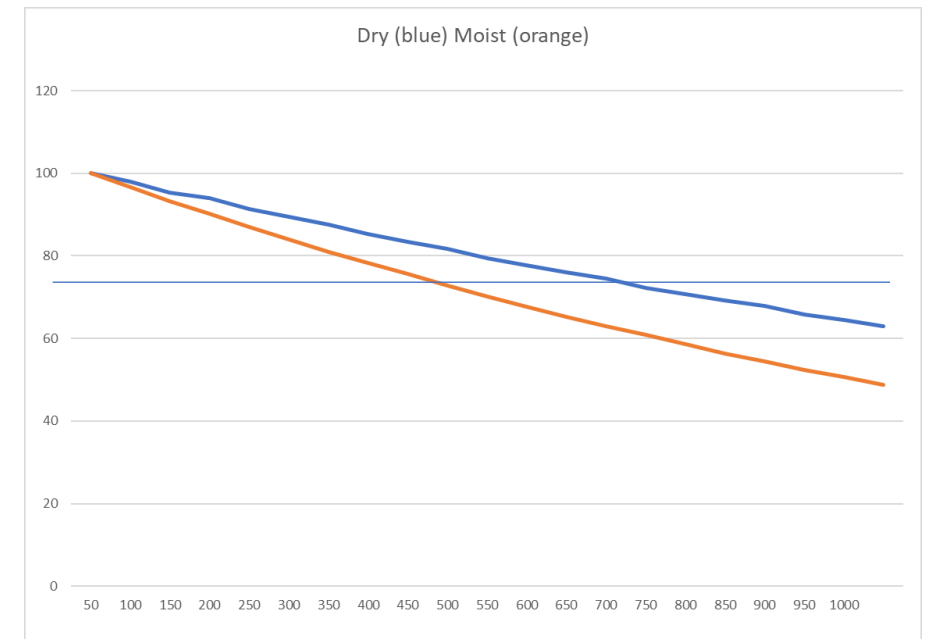


Рис. 5. Величина уменьшения относительной влажности как функция размера вихря. Горизонтальная линия соответствует 75 %.



Величина относительной влажности при пересечении внутри облачной турбулентной зоны с вертикальными потоками радиозондом (слева) и самолетом (справа)

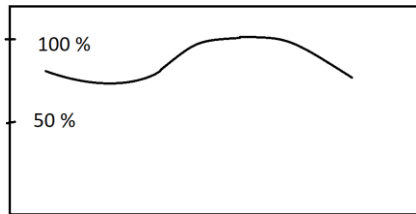
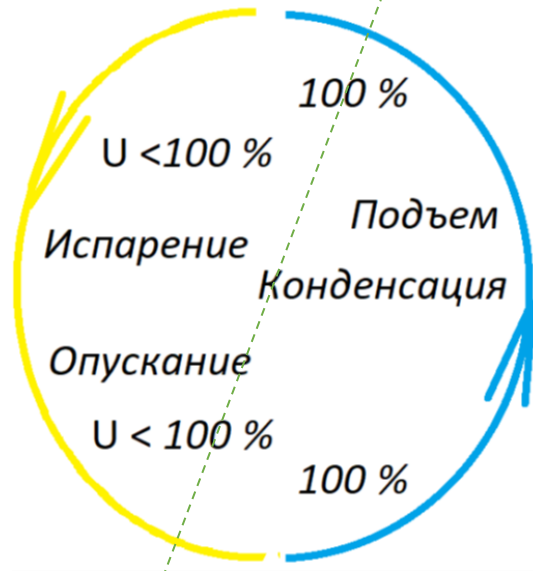


Рис. 6. Величина относительной влажности в вихре по радиозонду

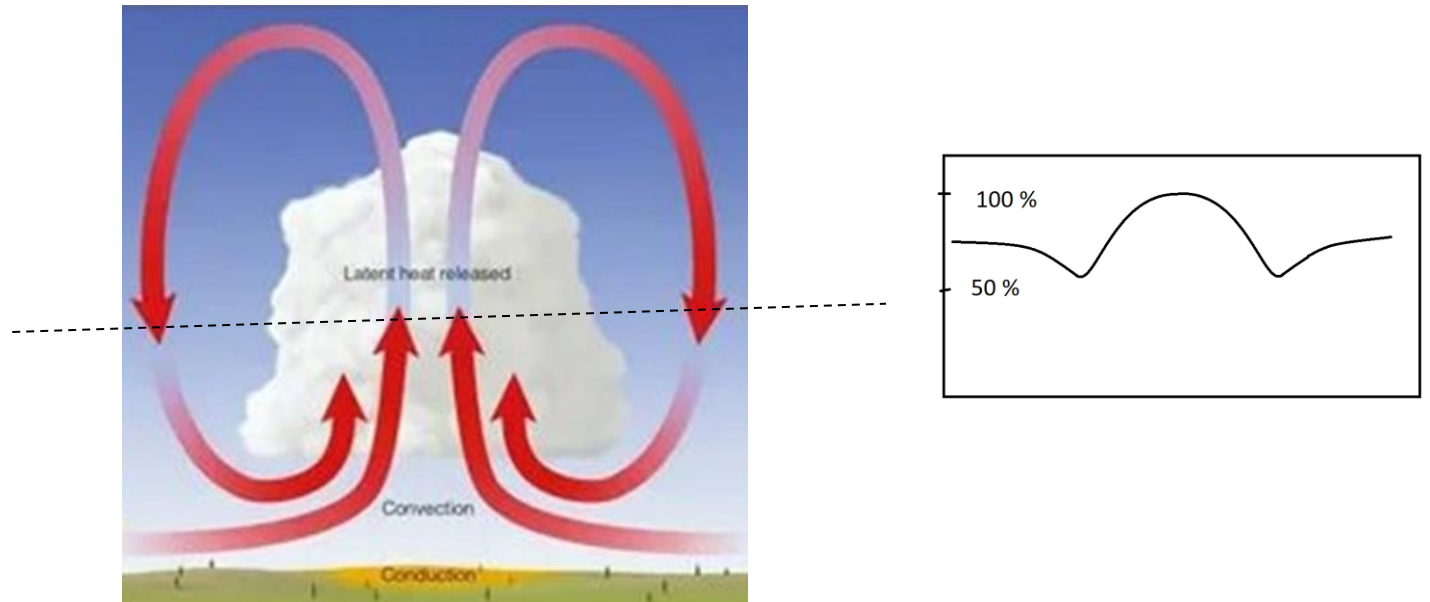
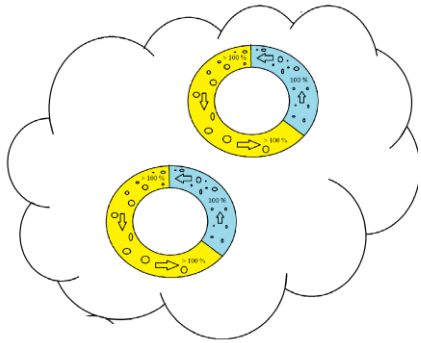


Рис. 7. Величина относительной влажности в облаке по самолетным данным

# Влияние конденсации/испарения водяного пара в турбулентных вихрях на оптические характеристики облаков



Области с уменьшенной влажностью и испаряющимися каплями (на рисунке отмечены желтым) будут отличаться по оптическим характеристикам от областей, где происходит конденсация водяного пара (отмечены голубым). Концентрация капель в области конденсации выше сама по себе, причем особенно высока концентрация мелких капель, которые определяют затухание света. В области испарения концентрация мелких капель мала, а крупные капли не дают заметного ослабления света.

Рис. 8. Изменение оптических характеристик облачной среды в вихре

Табл.1. Масштаб пространственной неоднородности облачности (МПО) по изменению оптических характеристик (ослабление света) в два раза. Косарев и др. 1976, Фейгельсон 1984.

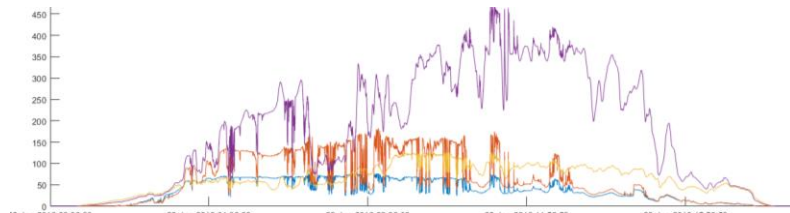


Рис. 9. Примеры изменчивости освещенности при наличии облачности.

Повторям. %	St	Sc	Ns	Ac
25	100	120	100	100
50	300	320	340	220
75	1050	1000	980	700
90	3000	3050	3250	1750

# Выводы

Величина относительной влажности внутри облака 100 % присутствует только в областях с восходящими потоками. В областях с нисходящими потоками величина относительной влажности меньше 100 %, хотя оптическая длина соответствует критерию облачной среды, потому что облачные частицы еще не испарились. Показания датчика менее 100 % внутри облака не являются ошибочными.

Конденсации/испарения водяного пара в турбулентных вихрях изменяет оптические характеристики облаков, что приводит к флуктуации коэффициента затухания.

Остается открытым вопрос о постоянной времени датчика при увеличении и уменьшении относительной влажности. Постоянная времени датчиков на увеличение и уменьшение относительной влажности может быть разной, что способно дать смещение среднего уровня, причем смещение будет отличаться у различных датчиков даже одного типа, а для разных типов эта величина может исказить результаты наблюдений.

# Направления исследования

Согласование результатов измерений относительной влажности в облаках при радиозондировании и в самолетных экспериментах путем моделирования пространственно-временной структуры зон восходящего и нисходящего потоков при конвективном и турбулентном перемешивании..

Оценка изменения оптические характеристики облаков и, в частности, коэффициента затухания света за счет конденсации/испарения водяного пара в турбулентных вихрях.

Определение требований к процедурам и оборудованию для калибровки датчиков влажности.

# Литература

*P. Spichtinder et al.* 2004. On the Distribution of Relative Humidity in Cirrus Clouds  
April 2004 Atmospheric Chemistry and Physics 4(3)  
DOI: 10.5194/acp-4-639-2004.

A.Khain, M. Pinsky et al. 2000. **Notes on the state-of-the-art numerical modeling cloud microphysics**  
[Atmospheric Research](#) 55(3-4):159-224 DOI: [10.1016/S0169-8095\(00\)00064-8](#)

Фейгельсон Е. М. 1984. Радиация в облачной атмосфере

Косарев и др. Оптическая плотность облаков. Труды ЦАО. Вып. 124. 1976 г.