

# Интерпретация данных прямых измерений относительной влажности внутри облака

*Кочин А. В.*

Центральная аэрологическая обсерватория,  
Долгопрудный, e-mail: amarl@mail.ru

# Теоретические и экспериментальные данные о величине относительной влажности в облаке

Общепринятым критерием формирования облачности является достижении 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 облакометром, 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

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

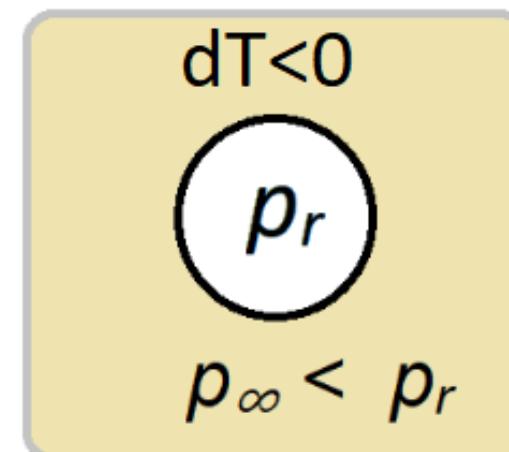
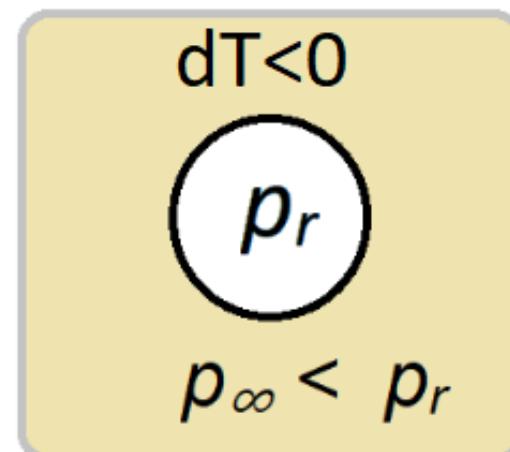
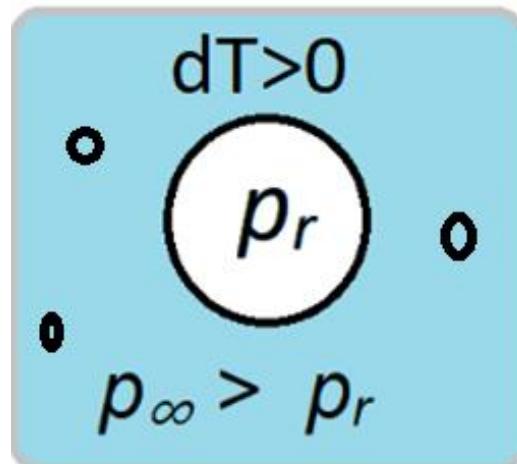
Уравнение для испарения

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

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 большой. При увеличении давление пара выше насыщенного увеличивается число капель из-за вовлечения и обводнение 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 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.

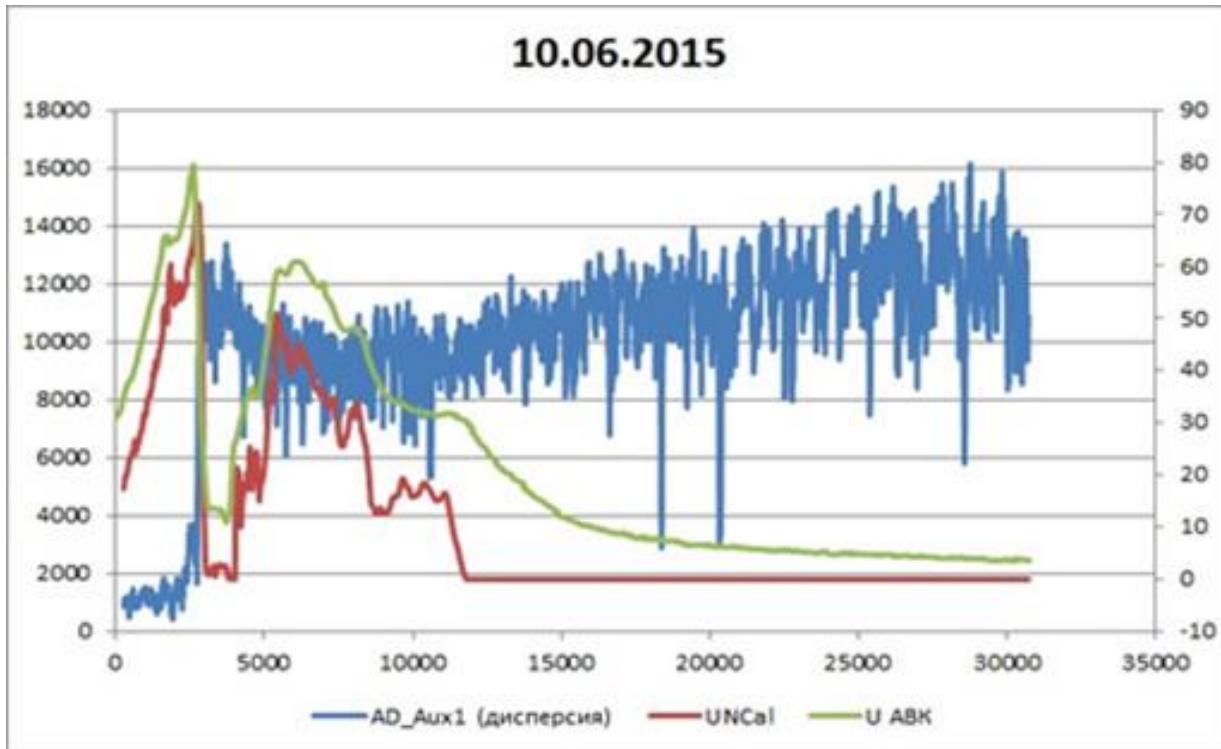


Рис. 1. Профили влажности по датчика влажности радиозонда МРЗ-3 - зеленая, красная - р/з MODEM. Синяя линия дисперсия, увеличение которой соответствует высоте ВГО. Вверху слоистая облачность без осадков, внизу кучево-дождевое облако с интенсивными осадками. По горизонтали высота, м. Шкала справа относительная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

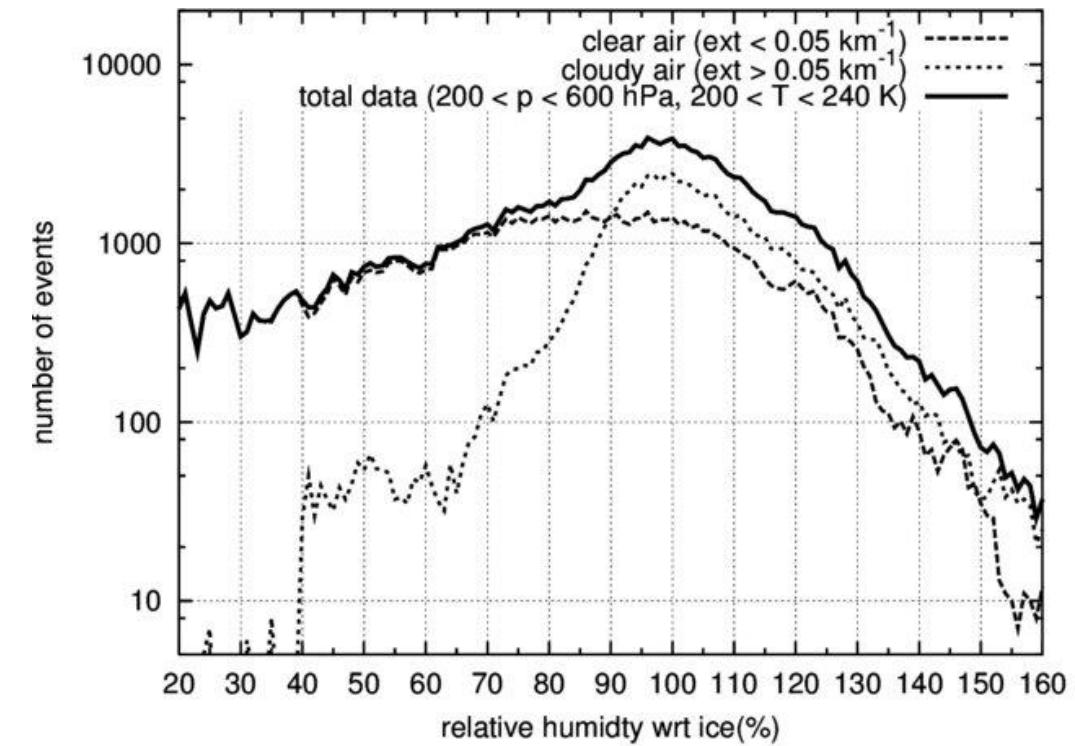


Рис.2. Распределение относительной влажности в перистых облаках по данным самолетных измерений (Spichtinger, P. 2004. <https://doi.org/10.5194/acp-4-639-2004>).

# 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 поддерживания насыщения.

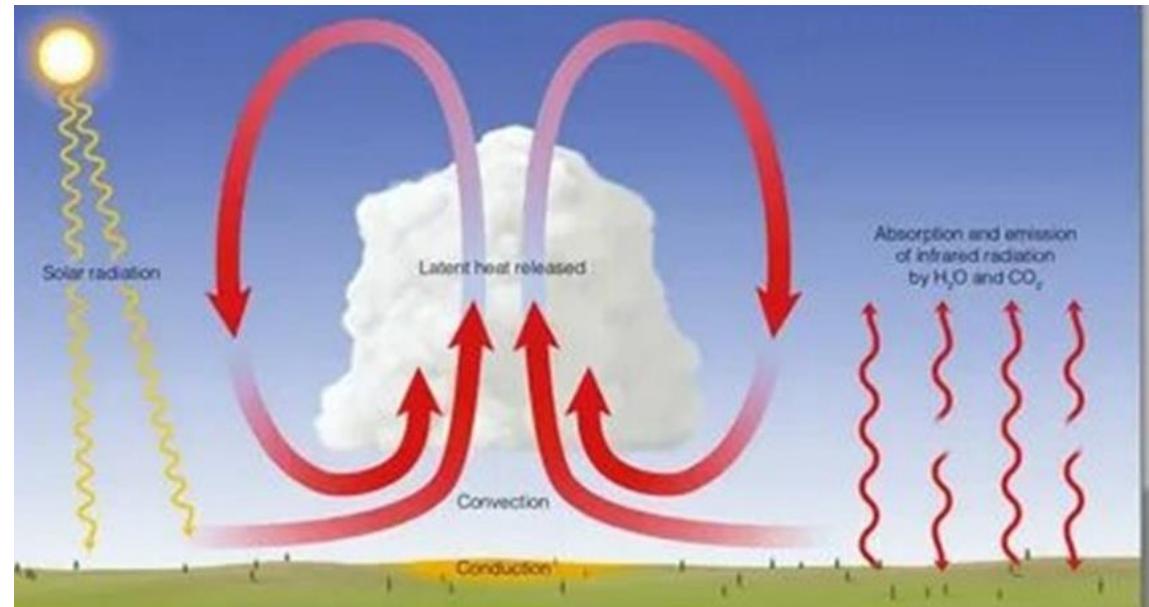


Рис. 3. Структура воздушных потоков в конвективной ячейке, которая приводит к формированию области со 100 % влажностью по центру ячейки. На периферии относительная влажность меньше фоновой, чтобы реализовывался режим испарения .

# Моделирование облаков

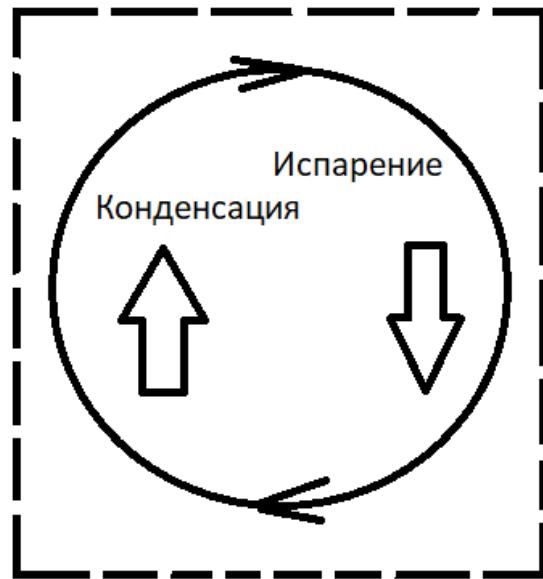


Рис. 4. Структура ячейки с турбулентным вихрем

Моделирование слоистых облаков исследовательским коллективом из Израиля (Khain и др.) выполнено методом разделения облачного пространства на ячейки (parcell), в каждой из которых присутствует турбулентных 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 %.

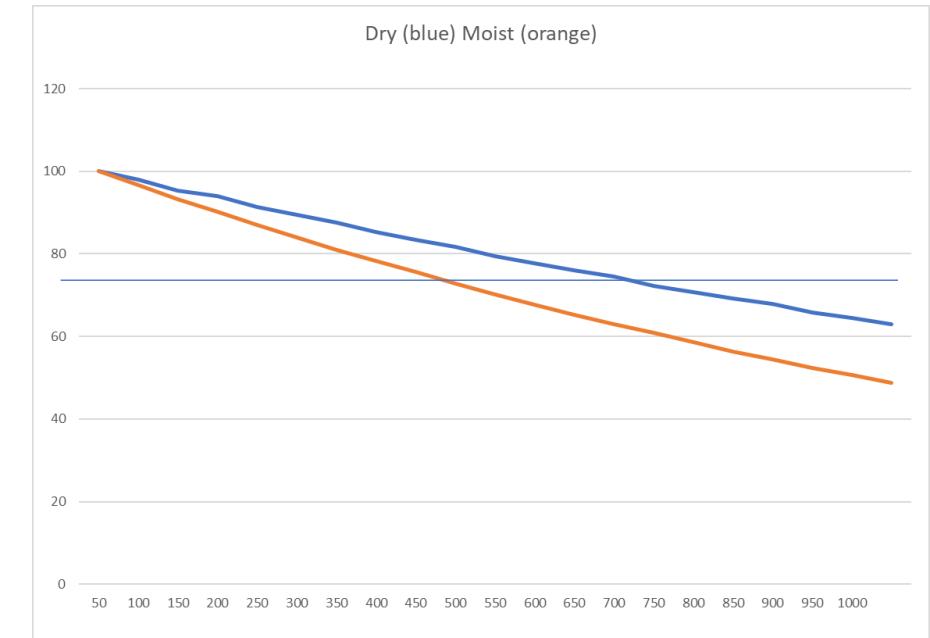


Рис. 5. Величина уменьшения относительной влажности как функция размера вихря. Горизонтальная линия соответствует 75 %.

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



Рис. 6. Величина относительной влажности в вихре по радиозонду

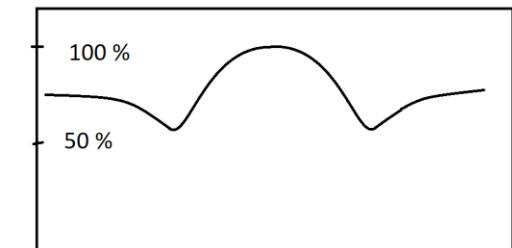
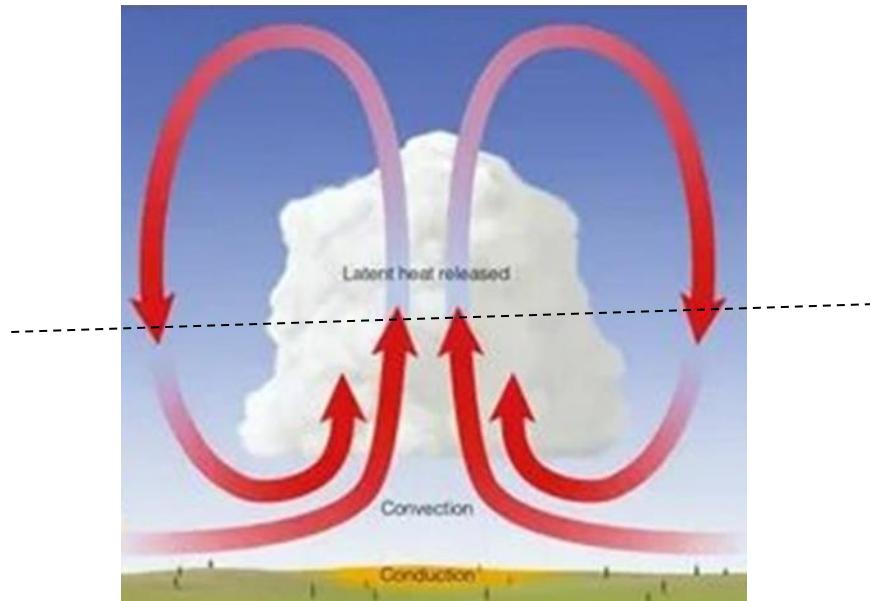


Рис. 7. Величина относительной влажности в облаке по самолетным данным

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

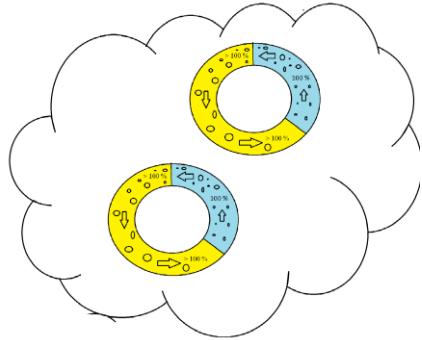


Рис. 8. Изменение оптических характеристик облачной среды в вихре

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.

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

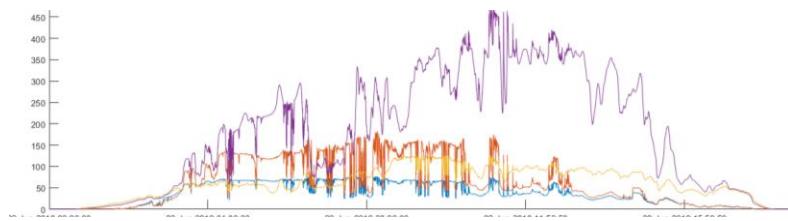


Рис. 9. Примеры изменчивости освещенности при наличии облачности.

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 флюктуации 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. Spichtinger 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. Pinsli 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](https://doi.org/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.