

## **Влияние облачности на излучательную способность атмосферы в диапазоне частот 22-38ГГц**

А.Г.Горелик, Т.А.Точилкина

*ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, ул. Первомайская 3, e-mail: radiometeo@mail.ru*

*В работе, базируясь на результаты обработки и анализа данных многолетних непрерывных измерений уровня теплового излучения атмосферы в диапазоне частот 22-38ГГц, полученных на уникальном радиометрическом комплексе, разработанном в ЦАО, в лаборатории дистанционного зондирования, показано, что процесс формирования собственного излучения в указанном диапазоне частот значительно более сложен, чем предполагалось ранее. В результате совместного анализа данных, полученных на различных частотах, отмечена значительная роль, не учитываемых в теоретических моделях факторов, влияющих на формирование излучения, как безоблачной атмосферы, так и атмосферы при наличии облачности в различных стадиях ее развития. Излагаются методы анализа и геофизической интерпретации микроволновых радиометрических измерений для различных временных интервалов и метеоусловий. Предложенный анализ данных позволяет исследовать излучающие свойства атмосферы, что может оказаться полезным при составлении прогноза погоды.*

Исследование излучения атмосферы в полосе частот 22-38ГГц представляет большой научный интерес, так как оно формируется всей толщей тропосферы. При направлении антенны радиометра в зенит это происходит как при безоблачной атмосфере, так и при большинстве форм облачности. Зимой это справедливо практически при любых погодных условиях. Наличие «полупрозрачной» атмосферы облегчает геофизическую интерпретацию сложного процесса формирования теплового излучения, которое регистрируется при помощи современной высокочувствительной аппаратуры, работающей в этом диапазоне частот. На эту полосу частот приходится центр линии поглощения водяного пара: 22,5ГГц и окно прозрачности атмосферы: 32-39ГГц.

Особый интерес может представлять привлечение к анализу дополнительной информации, получаемой на основе радиозондирования, которое проводится одновременно с радиометрическими измерениями и, совмещено с ним в пространстве. Желательно привлечение данных фоторегистрации облачности и радиолокационного зондирования.

Начиная с середины 60-х, начала 70-х годов прошлого столетия в нашей стране и за рубежом опубликованы десятки работ, в которых приводятся данные об излучающих и поглощающих свойствах атмосферы для этого частотного диапазона [1,2,4]. Кроме того, проведено множество теоретических работ по расчету уровня теплового излучения и поглощения ( $\tau$  и  $T_g$ ) атмосферы и облачности различной микроструктуры [1,4,10,13]. Исследовались зависимости  $\tau$  и  $T_g$  от различных параметров облачности, показана значительная роль излучения мелких капель, находящихся при отрицательных температурах в переохлажденном состоянии [1,14,15].

Принимая во внимание, что облака, даже при температурах около минус 40<sup>0</sup>С, могут содержать переохлажденную воду, необходимо учитывать, что уровень излучения обусловленный ледяными кристаллами много меньше излучения капель при том же содержании воды в них. Поэтому при увеличении толщины кристаллического облака основной вклад на частоте 22,5ГГц вносит водяной пар, содержащийся в облаке. Причем вклад водяного пара может быть весьма значительным, так как облако может иметь толщину несколько километров [5,14].

Совместный анализ данных, полученных при помощи радиометрической аппаратуры, прокалиброванной по единой методике, открывает возможность для определения количества жидкокапельной ( $W$ ) и парообразной влаги ( $R$ ) и помогает установить возможные зависимости между этими величинами для широкого диапазона погодных условий. На

основании расчетов получено, что влияние жидкокапельной влаги на частотах (32-39)ГГц приблизительно в 3 раза больше излучения на частотах 22-24 ГГц.

В работах [ 10,6,7,8 ] приведены соотношения и значения коэффициентов, связывающие радиояркостную температуру с термодинамическими параметрами атмосферы и водозапасом:

$$T_{я\lambda} = A\lambda + B\lambda R + C\lambda W \quad (1)$$

$$\tau\lambda = a\lambda + b\lambda R + c\lambda W \quad (2)$$

Обычно, термодинамические параметры атмосферы определяются, опираясь на данные радиозондирования и модели, учитывающие форму линий поглощения и их зависимость от давления, температуры и влажности. Теоретически рассчитываются значения параметров, входящих в соотношение (2)  $a_\lambda$  и  $b_\lambda$ , а затем, опираясь на данные о микроструктуре жидкокапельного облака [5,10,14] рассчитывается коэффициент  $c_\lambda$  и осуществляется переход от поглощения к радиояркостным температурам. Воспользуемся известным соотношением (3):

$$T_{я} = T_{эфф}(1 - e^{-\tau}), \quad (3)$$

$$\tau = \tau_{o_2} + \tau_{H_2O} + \tau_{обл} \quad (4)$$

где  $\tau_{o_2}$  – поглощение в молекулярном кислороде,

$\tau_{H_2O}$  – поглощение в водяном паре атмосферы,

$\tau_{обл}$  – поглощение в облаке,

$T_{эфф}$  - эффективное значение собственного излучения атмосферы, которое в свою очередь можно определить используя соотношение :

$$T_{эфф} = \frac{\int_0^\infty T(h)\alpha(h) \exp(-\tau)dh}{\int_0^\infty \alpha(h) \exp(-\tau)dh} \quad (5)$$

$$\tau = \int_0^\infty \alpha(h)dh$$

или

$$\tau = \ln\left(\frac{T_{я}}{T_{эфф}} - 1\right) \quad (6)$$

где  $\alpha(h)$  коэффициент поглощения, который зависит от высоты  $h$  и обусловлен всеми параметрами атмосферы, формирующими ее собственное излучение.

Обратим внимание, что первоначально теоретически рассчитывается не  $T_{я}$ , а  $\tau$  в то время, как большинство экспериментальных работ определяет  $T_{я}$ .

Ниже приводятся коэффициенты, которые взяты из работ [ 6,9,16 ].

$$T_{я0,8} = (12,8 \pm 0,07) + (0,69 \pm 0,31)R \quad (7)$$

$$T_{я1,35} = (9,1 \pm 0,61) + (1,76 \pm 0,03)R \quad (8)$$

$$\tau_{0,8} = (0,052 \pm 0,0026) + (0,025 \pm 0,00011)R \quad (9)$$

$$\tau_{1,35} = (0,033 \pm 0,0076) + (0,074 \pm 0,00013)R \quad (10)$$

В работе [10 ] уравнения имеют вид:

$$T_{я0,8} = (17,3 \pm 4,4) + (0,3 \pm 0,4) R + (59,8 \pm 19,1) W, \quad (11)$$

$$T_{я1,35} = (9,1 \pm 2,8) + (1,54 \pm 0,9) R + (32,0 \pm 18,7) W \quad (12)$$

Используя (5) и (6) можно определить значение  $R$  при безоблачной атмосфере, когда  $T_{я0,8\text{см}} = T_{я1,35\text{см}}$ . В этом случае

$$R = A_{0,8} - A_{1,35} / B_{1,35} - B_{0,8}.$$

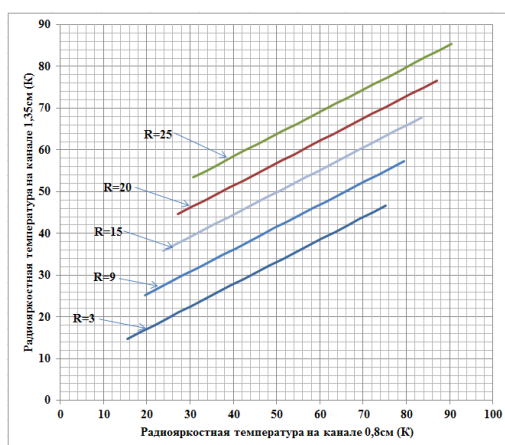
Подставим значения, взятые из (7) и (8). Тогда  $R$  должно составлять около 4 кг/м<sup>2</sup>, а если использовать данные из (11) и (12),  $R$  равно 7кг/м<sup>2</sup>. Причины такого большого расхождения результатов расчетов и натурных измерений требует дополнительного исследования. Обратимся к анализу взаимозависимости  $T_{я1,35}$  как функции  $T_{я0,8}$ , полученной на базе уравнений (1) и (2), графически представленных на рис.1. Влияние

атмосферы на коэффициенты  $A_{1,35}$  к  $A_{0,8}$  обусловлено молекулярным кислородом. На представленной зависимости соотношения этих коэффициентов имеют вид отдельной точки, для реальной атмосферы они изображаются в виде некоторой области, форма и размеры которой зависят от термодинамического состояния атмосферы.

На основании этих уравнений построен ряд зависимостей  $T_{я1,35}$  от  $T_{я0,8}$  для различных значений водо и влагозапаса. (для определенного значения  $R$ ,  $W$  изменяется от 0,01 до 1,01 кг/м<sup>2</sup>, с шагом 0,05)

Влияние, содержащегося в атмосфере водяного пара на этой диаграмме представлено в виде линейной зависимости отношения  $B_{1,35}$  как функции  $B_{0,8}$ . Значение  $R$  может варьировать для наших широт от 1-2 до 30-40 кг/м<sup>2</sup>. Влияние жидкокапельной влаги, содержащейся в атмосфере представляется в виде отношения коэффициентов  $C_{1,35}/C_{0,8}$ . Коэффициенты  $C_{1,35}$  и  $C_{0,8}$  различны на длине волны 1,35 и 0,8 см. и может отделяться от прямой зависимостей  $B_{1,35}/B_{0,8}$  при разных значениях общего влагосодержания атмосферы. Отклонения экспериментальных данных от этой идеальной модели происходят под действием возможных вариаций водяного пара и жидкокапельной влаги, базирующейся на положения, заложенные в теории, описывающей перенос теплового излучения в атмосфере.

Возможные вариации могут быть связаны с влиянием вариаций высотных и пространственных распределений термодинамической температуры, влажности и давления. Сопоставление данных натуральных радиометрических измерений и данных, представленных на рисунке 1, открывает возможность для более глубокой и точной геофизической интерпретации, связанной с аномалиями собственного теплового излучения атмосферы в указанном диапазоне длин волн.



**Рис. 1. Совокупность зависимостей радиояркостной температуры на канале 1,35 см от радиояркостной температуры на канале 0,8 см. Зависимости рассчитаны теоретически на основании формул (1) и (2).  $W$  изменяется от 0,01 до 1,01 кг/м<sup>2</sup>, при фиксированном значении  $R$  ( $R=3,9,15,20,25$ ). На рисунке данные значения обозначены рядом с соответствующей зависимостью.**

Обратим внимание на значения, которые приводят различные авторы и их возможные отклонения от средних значений. Надо отметить значительное расхождение коэффициентов. К сожалению, нет анализа причин такого расхождения, не указаны причины расхождения коэффициентов даже для безоблачной атмосферы. Вместе с тем, если представить совместный анализ данных работ и эксперимента, можно предположить причины такого расхождения: в работах используются различные виды аппаратуры, различная методика измерений, как радиометрических, так и радиозондовых. Кроме того: результаты измерений относятся к различным сезонам года, различным погодным условиям и климатическим зонам.

Необходимо обратить внимание на радиометрический комплекс, работающий на различных частотах. Выходным параметром может служить напряжение, например на

частотах 23 и 38 ГГц, желательно, чтобы каналы имели одинаковые постоянные времени и усиление. При этом возможен учет несоответствия этих параметров при окончательной обработке информации, полученной радиометрически при разработке различных методик.

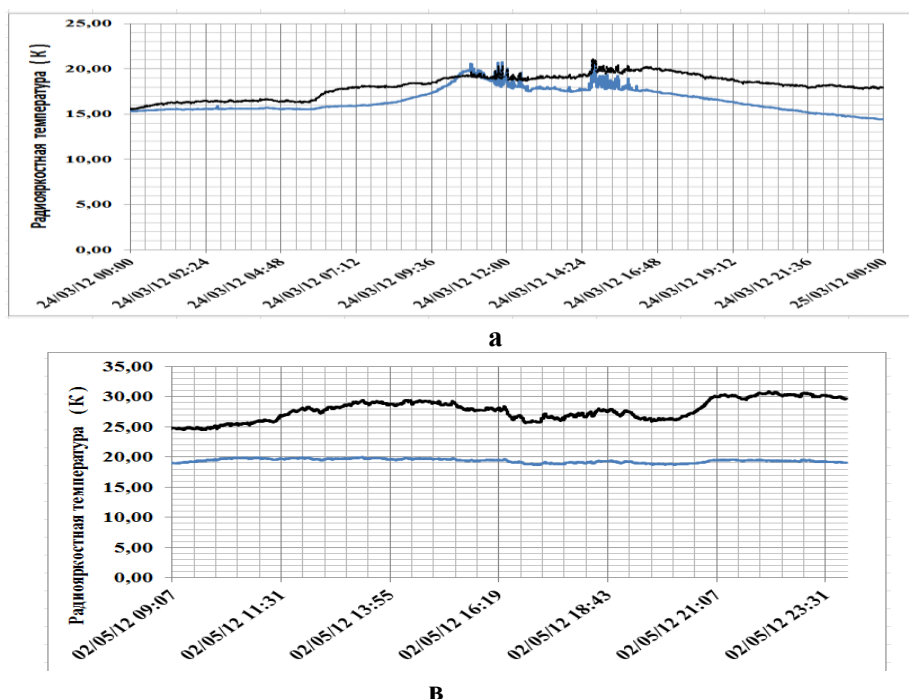
Применение такого анализа данных измерений были впервые изучены в работах [ 6,7 ], показан сложный характер формирования излучения в диапазоне 22 – 38 ГГц или, соответственно, в диапазоне длин волн 0,8см. – 1,35см., как в условиях облачной атмосферы, так и при отсутствии облачности.

В представленной работе, опираясь на опыт исследований, обработанных по единой методике, использующих 2-х, а иногда многоканальную радиометрическую аппаратуру созданную под руководством Е.Н.Кадыгрова [7,11,12], удалось на обширном экспериментальном материале показать сложность процессов, приводящих к формированию теплового излучения в указанном диапазоне частот пространственно - временных масштабов.

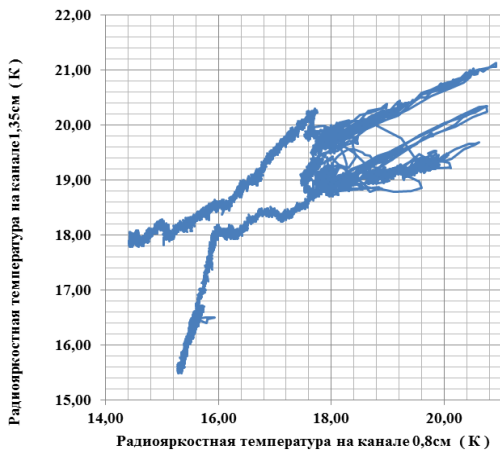
Уравнения регрессии имеют вид линейных. На практике мы сталкиваемся с более интересными процессами, проходящими как в течении дня (см рис.3. а, б, в, г, д, е) так и за более короткие промежутки времени.

Сравнивая характер протекающих процессов на каналах 0,8см. и 1,35см за различные дни, обратили внимание, что общий вид этих кривых может быть совершенно различен. Было выявлено несколько возможных сочетаний поведения кривых, выражающих ход радиояркостных температур на 0,8см. и 1,35см.

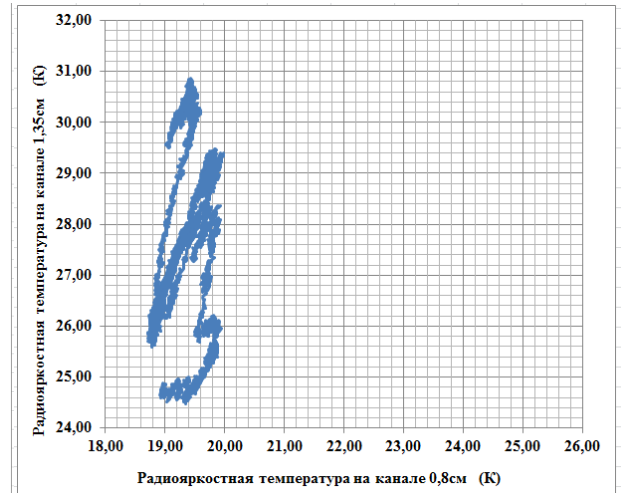
По характеру изменения радиояркостной температуры можно наблюдать следующие возможные сочетания процессов на 0,8см. и 1,35см: 1. Радиояркостная температура на канале 0,8 см медленно падает, на канале 1,35 см падает медленнее. 2. Радиояркостная температура на канале 0,8 см медленно падает, на канале 1,35 см растет, 3. на канале 1,35 см падает, на 0,8 см незначительно растет, 4. гораздо более быстрый рост Радиояркостная температура на канале 1,35 см по сравнению с 0,8 см, 5. на протяжении некоторого времени Радиояркостная температура на 0,8 см и 1,35 см идут практически параллельно или изменяются синхронно. На рис.2 (а,в) приведены примеры возможных сочетаний Радиояркостных температур на каналах 0,8см и 1,35см



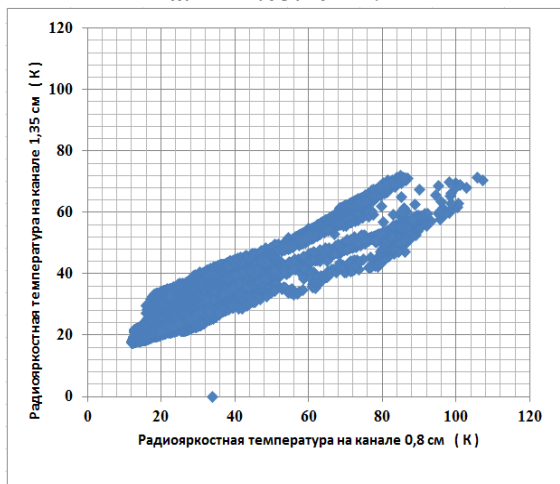
**Рис. 2. Пример записи сигналов каналов 0,8 см и 1,35см за а-24,03,2012г., в-02,05,2012г. Нижняя кривая-значения радиояркостных температур на канале-0,8см , верхняя кривая –на канале-1,35см**



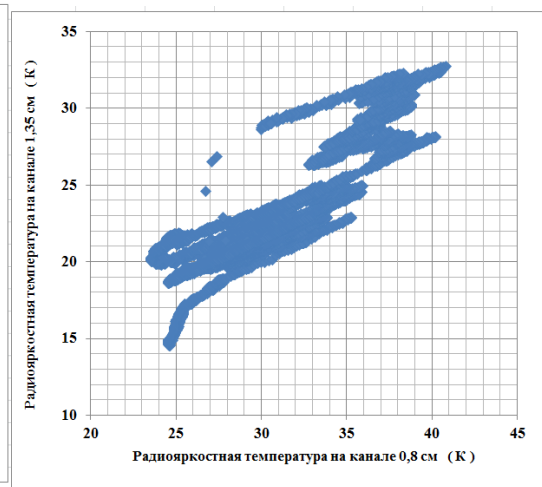
**а. 24.03.2012г.**



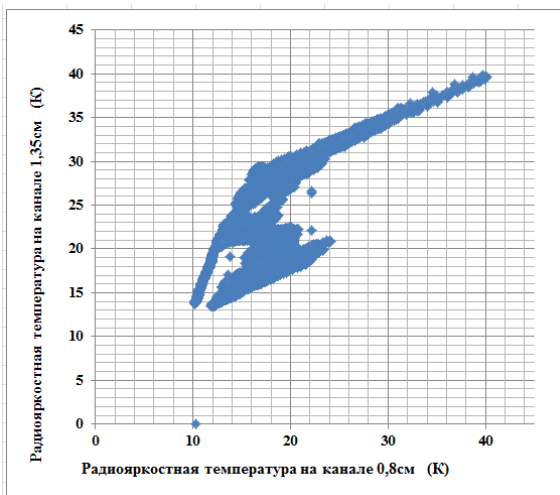
**б. 02.05.2012г.**



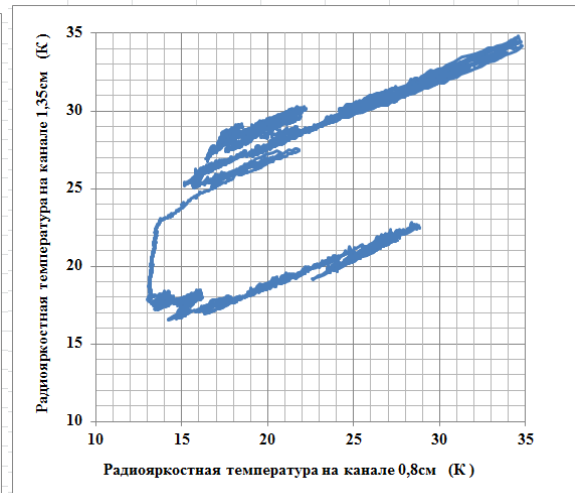
**в. 24.12.2015г.**



**г. 18.12.2015г.**

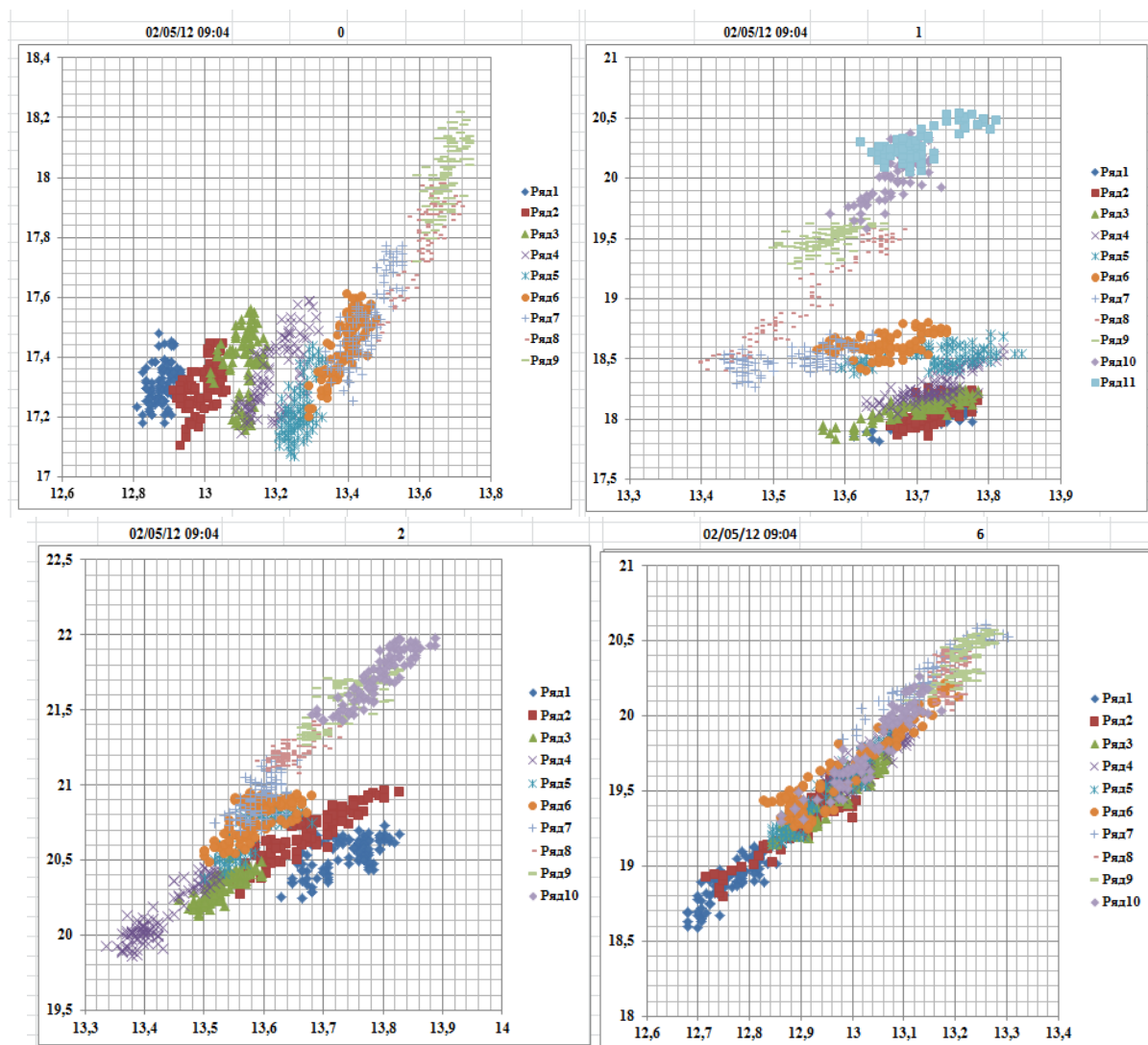


**д. 10.12.2015г.**



**е. 07.02.2016г.**

**Рис. 3. Зависимость радиояростной температуры на 1,35 от радиояростной температуры на 0,8 за 24 часа а – 24.03.2012, б – 02.05.2012г, в – 24.12.2015, г – 18.12.2015г, д – 10.12.2015г, е – 07.02.2016г.**



**Рис.4.** Зависимость , радиояростной температуры на 1,35 от Тя0,8. По горизонтальной оси – температура на канале 0,8 см; по вертикальной оси – температура на канале 1,35 см.

Показаны отдельные участки зависимостей радиояростных температур 02,05,2012г за период 0 с 00:00 по 01:14 , за период 1 с 01:14 по 02:46 , за период 2 с 02:46 по 04:09 , за период 6 с 08:19 по 09:43. Каждая из этих зависимостей разбита на еще на отдельные участки, приблизительно по 100 точек каждый. Здесь изображения представлены в другом масштабе, чем на рис. 3. для большей наглядности.

Приведенные данные указывают на большую изменчивость процессов в атмосфере даже за малые промежутки времени. Так как канал, работающий на длине волны 0,8см, обладает повышенной чувствительностью к содержанию жидкой фракции в облаке, 1,35см обладает повышенной чувствительностью к парообразной влаге и, базируясь на большом экспериментальном материале, был сделан вывод, что формулы регрессии должны обязательно содержать даже для безоблачной атмосферы сложный коэффициент, описывающий жидкокапельную фракцию. Это отдельные капли, обводненная аэрозоль, обводненные кристаллы. По характеру поведения взаимозависимостей можно сказать о процессах, происходящих в атмосфере, связанных с увеличением или уменьшением жидкокапельной или парообразной влаги над пунктом зондирования (когда радиометр ориентирован в зенит). Одновременно с радиометрическими данными анализировалась метеорологическая обстановка. Важно отметить, что наличие «ясных» дней очень мало. Даже в такие дни не редко можно наблюдать дымку, или ясным является только определенный отрезок времени.

В данной работе в основном анализируются материалы, относящиеся к формированию облачности, находящейся на стадиях, когда крупные капли начинают только образовываться, осадки в виде дождя и снега не выпадают.

В общем случае облака можно разбить на две группы: - из которых осадки достигают земли, или те, из которых крупные частицы на землю не попадают. В этом случае водные частицы либо находятся во взвешенном состоянии внутри облака, либо, выпадая, испаряются в процессе своего падения.

С целью получения информации возможно использовать и другие типы разбиения облаков на группы. Для дальнейшего изучения предлагается использовать разности между излучением ясного неба и излучением от различных точек интересующего нас облака. Обработка большого экспериментального материала позволяет провести соответствующую классификацию облачности, привязав изменение уровня и особенности их теплового излучения к водозапасу облака и изменению их микроструктуры.

Представленные рисунки это незначительная часть полученного материала. За период с 2011 по 2016г.г. получено большое количество экспериментального материала, дающего возможность проследить изменение радиоярких температур и их взаимозависимостей на различных длинах волн, что обеспечивает детальное исследование влияния различных геофизических факторов, как в течении продолжительного времени, так за различные малые временные промежутки.

Повышение технических параметров радиометрической аппаратуры порождает новые проблемы при получении соотношений, связывающих  $T_{ял}$  и  $t_{л}$  на различных длинах волн, так как приходится учитывать ряд новых факторов, влияющих на уровень теплового излучения даже для безоблачной атмосферы, которые невозможно было учесть в ранее проведенных теоретических схемах, на базе которых рассчитывались параметры, описывающие зависимости поглощения от погодных условий.

### Литература

1. Кутуза Б.Г., Яковлев О.И. Данилычев М.В. Спутниковый мониторинг Земли. Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. Москва, ЛЕНАНД, 2015, 336с.
2. Вопросы радиометеорологии. Сборник статей памяти В.Д. Степаненко С-Петербург 2013 329с.
3. Жевакин С.А. О радиотеплолокационном определении интегральной влажности атмосферы и интегральной водности, температуры и высоты капельной фазы облаков //Изв. Вузов. Радиофизика, 1978, XXI, №8, С.1122-1131.
4. Справочник по радиолокации под ред. Скольник М. Москва, Сов. Радио 1974
5. Мазин И.П. , Шметер С.М. Облака – строение и физика образования. Л., Гидрометеиздат, 1983.
6. Горелик А.Г., Фролов Ю.А., Шукин Г.Г. Комплексные СВЧ и ИК радиометрические исследования оптически полупрозрачной облачности Труды 7 Всесоюзного совещания по радиометеорологии Суздаль 1986 Л. Гидрометиздат 1989, с28-29
7. Е.Н. Кадыгров, А.Г. Горелик, Точилкина Т.А. Результаты исследований водозапаса облаков радиометрическим комплексом «Микрорадком». Томск, «Оптика атмосферы и океана», Т.27, №6, 2014, С.546-552
8. Е.Н. Кадыгров, А.Г. Горелик, Точилкина Т.А. Результаты исследований водозапаса облаков радиометрическим комплексом «Микрорадком». Томск, «Оптика атмосферы и океана», Т.27, №6, 2014. С.546-552
9. Горелик А.Г., Калашников В.В., Райкова Л.С., Фролов Ю.А. Радиотепловые измерения влажности атмосферы и интегральной водности облаков //Изв.АН СССР. Физ. атмосфер. и океана 1973, №5. С928-936.
10. В.П. Борин., А.П. Наумов К расчету коэффициента поглощения сантиметровых и миллиметровых радиоволн в атмосферном кислороде. Радиотехника и электроника, 1965, т.10, №6, с.987-996.

11. E.N. Kadygrov, A.G.Gorelik, and T.A.Tochilkina Study of Liquid Water in Glouds with the “Mikroradkom” Radiometric Sustem ISSN 1024-8560. Atmospheric and Oceanic Optics, 2014, Vol.27, No 6, pp 596-604
12. Ю.А.Борисов, Е.В.Ганьшин, А.Г.Горелик, Е.Н.Кадыгров, А.К.Князев, Е.А.Миллер, В.В.Некрасов, Т.А.Точилкина, А.В.Троицкий, А.Н. Шапошников. Мониторинг термодинамических характеристик тропосферы радиометрическим комплексом «Микрорадком»// XXIV Всероссийская конференция «Распространение радиоволн», Иркутск, 29 июня-5июля 2014г., Труды конференции. Т.3., С. 184-187.
13. Г.Г.Щукин, Д.М. Караваем. Разработка критериев развития облачности и осадков с использованием наземных радиотеплолокационных данных и радиолокационной информации. Труды ГГО 2008 вып. 557, стр 119-132
14. Geoffrey E Hill Analysis of Supercooled Liquid Water Measurements Using Microware Radiometer and Vibrating Wire Devices. Journal of Atmospheric and Oceanic Technologi. Volume 11/
15. Б.Г. Кутуза. Поглощение миллиметровых и сантиметровых волн в облачных образованиях и его зависимость от температуры. В кн. Электромагнитные волны в атмосфере и космическом пространстве. М. 1986, с.180-192.
16. А.Г.Горелик, Ю.А. Фролов, Г.Г. Щукин. Комплексные СВЧ и ИК –радиометрические исследования облачности. //Труды ГГО, Л., Гидрометеиздат, Выпуск 526, С.3-15.