

УДК 551.576

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОДО- И ВЛАГОЗАПАСА ОБЛАКОВ С ПОМОЩЬЮ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «МИКРОРАДКОМ»

Е.Н. КАДЫГРОВ, А.Г. ГОРЕЛИК, Т.А. ТОЧИЛКИНА

Показаны возможности применения разработанного в ЦАО микроволнового, высокостабильного, высокочувствительного радиометрического комплекса «Микрорадком» для изучения тонких термодинамических процессов протекающих в облачности в различные сезоны года. Приводятся соотношения, полученные авторами работы и позволяющие детально исследовать влияние фазового состояния и микроструктуры облачности на происходящие в облаке процессы в широком диапазоне временных масштабов. Применение современной высокочувствительной радиометрической аппаратуры и углубленный анализ информации на базе предлагаемых соотношений, позволяют глубже проникнуть в геофизические факторы и процессы, влияющие на формирование собственного излучения атмосферы.

**Ключевые слова:** физика облаков, микроволновая радиометрия, водозапас облаков, влагозапас атмосферы.

### Введение

Проблемами, связанными с применением аппаратуры для определения содержания в атмосфере парообразной и жидкокапельной влаги, а также для определения термодинамического режима в атмосфере занимаются уже более 50 лет. Этой теме посвящены сотни работ, как у нас в стране, так и за рубежом. Доказано, что радиометрия может обеспечить определение температурного и влажностного режима атмосферы с точностью, не уступающей современным системам радиозондирования. При этом такие измерения в отличие от радиозондирования можно проводить непрерывно и дополнительно получать информацию о содержании в облаках жидкокапельной влаги. Однако, высокие технические характеристики радиометрической аппаратуры, достигнутые в настоящее время, позволяют не только успешно решать задачи, сформулированные полвека назад, но также собирать достоверную информацию, позволяющую глубже понять процессы, протекающие в облачности и определяющие её собственное излучение.

В ЦАО создан многоканальный радиометрический комплекс «Микрорадком», работающий в диапазоне длин волн от 0,5 см – 1,35 см, а также широко известный комплекс «МТР-5», работающий в приземном слое атмосферы. Технические характеристики этих комплексов приведены в [3].

Создание аппаратуры и методики измерений, обеспечивающих синхронное определение нисходящего уровня излучения на различных длинах волн, приходящего из одного и того же объема пространства, обеспечивает уникальные возможности для геофизической интерпретации результатов измерений и для исследования облачности на различных стадиях ее развития. Высокая чувствительность позволяет изучать геофизические и термодинамические характеристики тонкой и оптически полупрозрачной облачности в различные сезоны года [3, 4]. Весь измерительный комплекс монтируется на базе тонара (прицеп-фургона) [16]. При этом внутри тонара находятся СВЧ радиометры для измерения профилей температуры тропосферы, водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы, а также аппаратный интерфейс, персональный компьютер, навигатор, блоки питания, система климат-контроля. Измерения производятся через окно, закрытое радиопрозрачным материалом с использованием металлического контррефлектора, расположенного под углом 45 градусов относительно стенки тонара. На крыше тонара расположены сканирующий радиометр канала измерения профилей температуры погранслоя (МТР-5), автоматическая метеостанция (WXT-520 Vaisala), контактный датчик температуры в метеозащите, видеокамеры наблюдения за облачностью.

### **К определению водо- и влагозапаса облаков**

Сложность применения радиометрии для решения задач состоит в том, что на характер принятого излучения влияют одновременно множество различных факторов и оценить влияние каждого из них очень сложно. Суммарное излучение формируется всей толщей атмосферы, попадающей в поле зрения прибора [1, 2], и может быть представлено формулой:

$$I_v = \frac{2k\nu^2}{c^2} \int_0^\infty T(H)\gamma_v(l)\exp(-\int_0^l \gamma_v(l)dl)dl + I_\phi \exp(-\gamma_v(l)dl) \quad (1)$$

где:  $I_v$ - интенсивность излучения,  $\gamma_v$  – коэффициент поглощения,  $\nu$ -частота,  $dl$  – элемент пути,  $k$ -постоянная Больцмана

Одновременно с  $I_v$  используется значение  $T_\lambda$  (радиояркостьная температура):

$$T_\lambda = \frac{c^2 I_v}{2k\nu^2} \quad (2)$$

Радиояркостьная температура – это температура абсолютно черного тела, излучающего в данном направлении излучение интенсивности  $I_v$ , равное излучению исследуемого тела [5].

На практике, учитывая, что основной вклад в поглощение вносят водяной пар, кислород и жидкокапельная влага, для определения радиояркостьной температуры часто используют уравнение регрессии, где радиояркостьная температура выражается через коэффициенты поглощения в этих составляющих [6, 10, 11].

$$T_{\lambda} = A_\lambda + B_\lambda R + C_\lambda W \quad (3)$$

где:  $R$  – влагозапас атмосферы (интегральное влагосодержание),  $W$  – водозапас атмосферы  $A_\lambda$ ,  $B_\lambda$ ,  $C_\lambda$  – коэффициенты связывающие уровень собственного излучения и поглощения с количеством поглощающих компонент.

На базе экспериментального материала, полученного с помощью радиометрических комплексов ЦАО, были рассчитаны значения радиояркостьных температур облачности за период с 01.02.2012 г. по 01.09.2015 и построены функции  $T_{\lambda 1,35} = f(T_{\lambda 0,8})$ , позволяющие подойти к более детальному изучению процессов, проходящих в атмосфере и облачности. Для изучения суточного изменения водо- и влагозапаса, указанная зависимость строилась для интервала времени, равного 24 часа (см. Рис. 1) с дискретизацией в десять секунд. На представленных рисунках видно, что характер зависимостей меняется с течением времени и может существенно отличаться от классической линейной зависимости.

На полученных графиках можно выделить отрезки времени с похожим поведением функции, которые можно соотнести похожими процессами, протекающими в атмосфере. Зависимости для отдельных промежутков времени (см. Рис. 2) и для диапазонов  $\Delta T_\lambda$  или  $\Delta W$ , соответствующих тем или иным типам облачности позволяют более детально представить характер графиков, изображенных на Рис. 1. На Рис.2 представлены примеры детальной структуры графиков, изображенных на Рис. 2.

Анализ поведения функции  $T_{\lambda 1} = f(T_{\lambda 2})$  может дать ценную информацию о тенденциях развития или распада облака или облачной системы, оценить диапазон пространственно-временных масштабов, в которых протекают указанные процессы. В этом случае удастся исследовать, как происходит изменение структуры, водо- и влагозапаса облачности или облачной системы в процессе ее прохождения над пунктом зондирования [3, 4, 16].

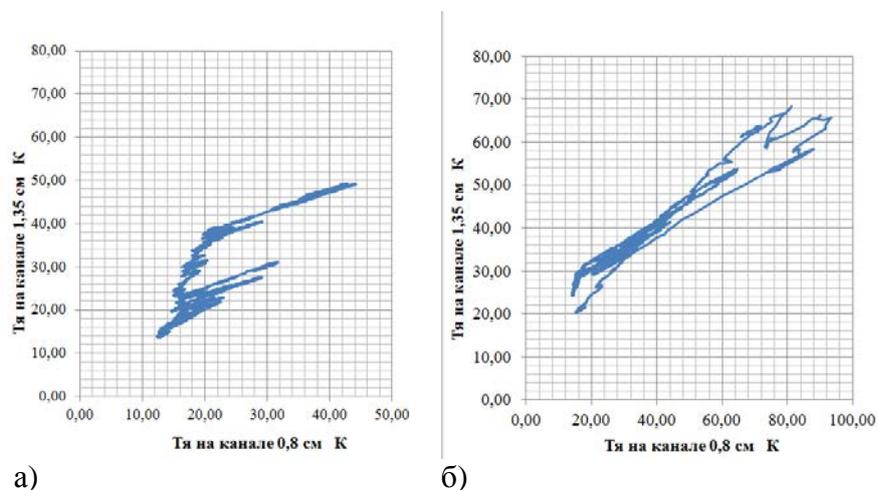


Рис. 1 Зависимость радиояркой температуры на канале 1,35 см от радиояркой температуры на канале 0,8 см за интервал времени с 00-00 часов до 24-00 часов.

а) 09.11.2013 г., б) – 13.10.2013 г.

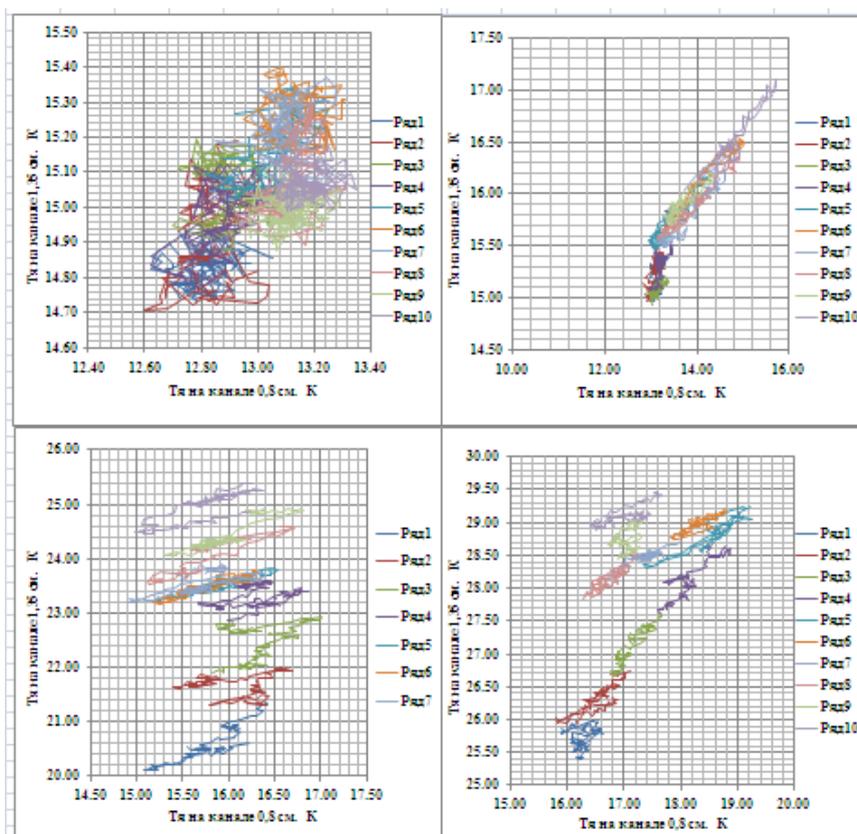


Рис. 2 Зависимости радиояркой температуры на канале 1,35 см. от радиояркой температуры на канале 0,8 см.

Выбраны четыре интервала по 1000 точек для различных участков времени 09.11.2013г.

Известно, что для безоблачной атмосферы, при измерении радиационных потоков на нескольких длинах волн должно выполняться соотношение [7-15, 17-19]:

$$\frac{T_{я1,35}}{T_{я0,8}} \text{ или } \frac{\tau_{1,35}}{\tau_{0,8}}$$

На практике, построив линию тренда по экспериментальным данным, можно наблюдать изменение угла наклона для различных периодов времени или различных облачных систем. Многообразие полученных результатов, только малая доля которых показана на Рис. 1 и Рис. 2., указывает на большое количество дополнительных факторов, влияющих на излучательные свойства атмосферы и облачности на той или другой длине волны, или на обеих длинах волн одновременно. Очень важно, что созданная в ЦАО аппаратура дает возможность проследить последовательность изменений и проводить изучение фазовых переходов, происходящих в облаке. В случае, когда угол наклона зависимости  $T_{я1,35} = f(T_{я0,8})$  становится меньше (приближается к горизонтальной оси) это указывает на относительное снижение роли водяного пара в формировании собственного излучения атмосферы и рост влияния жидкокапельной влаги при одновременном увеличении размеров капель в облаке. Полученное многообразие позволяет сделать вывод, что коэффициент  $C$  в предлагаемом уравнении (3) является величиной сложной и многофункциональной. С учетом этого радиояркостьная температура и поглощение на длине волны  $\lambda$  могут быть описаны формулами [4] и [5], отличными от используемых ранее [3]. Каждый из параметров влияет на характер взаимозависимости. Комплексное влияние этих параметров подчеркивает сложность процессов, протекающих в атмосфере при наличии облачности [3].

$$T_{я\lambda} = [A_{\lambda}(T) + B_{\lambda}(T, R) * R] + [B_{\lambda}(T, R) * \Delta R + C_{1\lambda}(T) * W_{мк} + C_2(T) * W_{кк} + C_3(T) * W_{ок}] \quad (4)$$

$$\tau_{\lambda} = [a_{\lambda}(T) + v_{\lambda}(T, R) * R] + [v_{\lambda}(T, R) * \Delta R + c_{1\lambda}(T) * W_{мк} + c_2 * W_{кк} + c_3(T) * W_{ок}] \quad (5)$$

где  $\Delta R$  - изменение интегрального влагосодержания за счет облачности;  $W_{мк}$  - водозапас определяемый мелкокапельной фракцией;  $W_{кк}$  - водозапас определяемый крупнокапельной фракцией;  $W_{ок}$  - водозапас определяемый обводненными кристаллами;  $A_{\lambda}(T)$ ,  $B_{\lambda}(T, R)$ ,  $C_{1\lambda}(T)$ ,  $C_2(T)$ ,  $C_3(T)$ ,  $a_{\lambda}(T)$ ,  $v_{\lambda}(T, R)$ ,  $c_{1\lambda}(T)$ ,  $c_2(T)$ ,  $c_3(T)$  - коэффициенты связывающие уровень собственного излучения и поглощения с соответствующей поглощающей компонентой.

Приведенные выше формулы (4) и (5) существенно отличаются от формулы (3) и показывают, что коэффициенты, входящие в эти уравнения, имеют более сложный, чем это принято считать, характер. Проведенный анализ взаимозависимостей, полученных за различные промежутки времени, указал на многообразие процессов, протекающих в облачных системах, и как следствие, на необходимость представлять значение радиояркостьной температуры (3) в более сложном виде (см (4), (5)).

Даже при сравнительно невысоком содержании в облаке жидкокапельной и парообразной влаги, присущем зимним облакам, с помощью разработанного в ЦАО высокочувствительного комплекса, мы получили возможность наблюдать характер изменения величины водои влагозапаса в атмосфере во времени. Авторами настоящей статьи продолжаются исследования на поиск связи между углом наклона зависимости  $T_{я1,35} = f(T_{я0,8})$  и водозапасом облаков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Боровиков А.М.** Физика облаков//Труды ЦАО, 1969, Вып. 90, с. 41-49.
2. Облака и облачная атмосфера. / Справочник под ред. Мазина И.П. и Хргиана А.Х. Л., Гидрометеиздат, 1989, 647 с.
3. **Кадыгров Е.Н., А.Г.Горелик, Е.А. Миллер, В.В.Некрасов, А.В.Троицкий, Т.А. Точилкина, А.Н. Шапошников.** Результаты мониторинга термодинамического состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом.//Оптика атмосферы и океана, 2013, Т.26, № 6, с.459-465.
4. **Кадыгров Е.Н., Горелик А.Г., Князев А.К., Миллер Е.А., Точилкина Т.А.** Результаты экспериментальных исследований водозапаса зимних облаков. // Тезисы XX Рабочей группы «Аэрозоли Сибири», Томск, ноябрь 2013, Изд. ИОА СО РАН, 78 с.
5. **Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т.** Радиоизлучение Земли как планеты. М., Наука, 1974, 188 с.
6. Жевакин С.А. О радиотеплокационном определении интегральной влажности атмосферы и интегральной водности, температуры и высоты капельной фазы облаков // Изв. вузов. Радиофизика, 1978, Т. XXI, № 8, с. 1122-1131.
7. **Степаненко В.Д., Шукин Г.Г., Бобылёв Л.П., Матросов С.Ю.** Радиотеплокация в метеорологии. Л., Гидрометеиздат, 1987, 283 с.
8. **Калашников В.В.** Применение информационно-измерительных СВЧ систем в метеорологии и гидрологии. М, Машиностроение, 2000, 231 с.
9. **Каравасев Д.М., Шукин Г.Г.** Применения методов СВЧ радиометрии для диагностики содержания жидкокапельной влаги в облаках // Труды НИЦДЗА, Прикладная метеорология, 2004, Вып. 5 (553), с. 99-120.
10. **Горелик А.Г., Калашников В.В., Райкова Л.С., Фролов Ю.А.** Радиотепловые измерения влажности атмосферы и интегральной водности облаков.//Известия АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1973, №5, с. 928-936.
11. **Горелик А.Г., Фролов Ю.А., Шукин Г.Г.** Комплексные СВЧ- и ИК- радиометрические исследования облачности.//Труды ГГО, Л., Гидрометеиздат, Выпуск 526, с.3-15.
12. **Рассадовский В.А., Троицкий А.В.** Радиометрические исследования влагосодержания и жидкокапельной фракции облачной атмосферы.//Труды 5-го Всесоюзного совещания по радиометеорологии. М., Гидрометеиздат, 1981, с. 173-176.
13. **Башаринов А.Е., Б.Г. Кутуза.** Исследование радиоизлучения и поглощения облачной атмосферы в миллиметровом и сантиметровом диапазонах волн//Труды ГГО,1968, Л., Гидрометеиздат, выпуск 222, с.100-110.
14. **Кадыгров Е.Н., А.В. Колдаев, М.Н. Хайкин.** Результаты измерения водозапаса облаков с помощью радиометров миллиметрового диапазона//Известия АН, Физика атмосферы и океана, 1994, Т. 30, № 2, с. 230-232.
15. **Колдаев А.В., Г.Г.Шукин.** Исследование водозапасов зимних облаков методами микроволновой радиометрии// Труды ГГО им. А.И. Воейкова, 2009, Вып.559, с. 210-236.
16. **Кадыгров Е.Н.,Ганьшин Е.В., Горелик А.Г., Князев А.К., Миллер Е.В., Некрасов В.В., Точилкина Т.А., Шапошников А.Н.** Экспериментальная оценка эффективности применения многоканального радиометрического комплекса для мониторинга термодинамического состояния тропосферы и исследования мезоструктурных параметров облаков.//Тез.докл. 21-й Рабочей группы «Аэрозоли Сибири». Томск: Изд-во ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН, 2014.с.71.
17. **Westwater E.R.** The accuracy of water vapor and cloud liquid determination by dual frequency ground-based radiometry//Radio Science, 1978, № 4, P. 667-685.
18. **Peter R., Kampfer N.,** Radiometric determination of water vapor and liquid water and its validation with other techniques. J. Geophys. Res., 1992, 97(D16), V.18, P.18.173-18.183.
19. **Matzler C., Morland J.** Advances in surface-based radiometry of atmospheric water. IAP Research Report, 2008, 2008-02-MW, University of Bern, Bern, Switzerland.

## **RESULTS OF LIQUID WATERPATH AND WATER CONTENT AND MIXING RATIO BY MEANS OF MICROWAVE RADIOMETER "MICRORADKOM" MADE IN CAO.**

**Gorelik A. G., Kadygrov E. N., Tochilkina T. A.**

The application of "Mikroradkom" microwave radiometer developed in CAO to the study of the fine thermodynamic processes occurring in the cloud in different seasons is discussed. The equations offered by the authors of the work make it possible to study in details all the effect of the phase state and microstructure of the cloud transformation during ongoing processes in it within a wide range of time scales. The application of modern highly sensitive radiometric equipment and in-depth analysis of

the information offered on the basis of the relations mentioned allow us to make deeper insight into the geophysical factors and processes that affect the formation of self-radiation of the atmosphere.

**Key words:** models of waves scattering, fluctuations, meteorological radar, intensity of backscattering.

## REFERENCES

1. Borovikov A.M. Fizika oblakov//Trudy TSAO, 1969, Vyp. 90, s. 41-49.
2. Oblaka i oblachnaya atmosfera. / Spravochnik pod red. Mazina I.P. i Hrgiana A.H. L., Gidrometeoizdat, 1989, 647 s.
3. Kadygrov E.N., A.G.Gorelik, E.A. Miller, V.V.Nekrasov, A.V.Troitskiy, T.A. Tochilkina, A.N. SHa-poshnikov. Rezul'taty monitoringa termodinamicheskogo sostoyaniya troposfery mnogokanal'nym mik-rovolnovym radio-metricheskim kompleksom.//Optika atmosfery i okeana, 2013, T.26, № 6, s.459-465.
4. Kadygrov E.N., Gorelik A.G., Knyazev A.K., Miller E.A., Tochilkina T.A. Rezul'taty eksperimental'-nyh issledovaniy vodozapasa zimnih oblakov. // Tezisy XX Rabochey gruppy «Aerozoli Sibiri», Tomsk, noyabr' 2013, Izd. IOA SO RAN, 78 s.
5. Basharinov A.E., Gurvich A.S., Egorov S.T. Radioizluchenie Zemli kak planety. M., Nauka, 1974, 188 s.
6. ZHevakin S.A. O radioteplolokatsionnom opredelenii integral'noy vlazhnosti atmosfery i integral'-noy vodnosti, temperatury i vysoty kapel'noy fazy oblakov // Izv. vuzov. Radiofizika, 1978, T. XXI, № 8, s. 1122-1131.
7. Stepanenko V.D., SHCHukin G.G., Boblyov L.P., Matrosov S.YU.. Radioteplolokatsiya v meteorologii. L., Gidrometeoizdat, 1987, 283 s.
8. Kalashnikov V.V. Primenenie informatsionno-izmeritel'nyh SVCH sistem v meteorologii i gidrologii. M, Mashinostroenie, 2000, 231 s.
9. Karavaev D.M., SHCHukin G.G. Primeneniya metodov SVCH radiometrii dlya diagnostiki sodержaniya zhikokapel'noy vlagi v oblakah // Trudy NITSDZA, Prikladnaya meteorologiya, 2004, Vyp. 5 (553), s. 99-120.
10. Gorelik A.G., Kalashnikov V.V., Raykova L.S., Frolov YU.A. Radioteplovye izmereniya vlazhnosti atmosfery i integral'noy vodnosti oblakov.//Izvestiya AN SSSR, Fizika atmosfery i okeana, 1973, №5, s. 928-936.
11. Gorelik A.G., Frolov YU.A., SHCHukin G.G.. Kompleksnye SVCH- i IK- radiometricheskie issledovaniya oblachnosti.//Trudy GGO, L., Gidrometeoizdat, Vypusk 526, s.3-15.
12. Rassadovskiy V.A., Troitskiy A.V. Radiometricheskie issledovaniya vlagosoderzhaniya i zhidkokapel'-noy fraktsii oblachnoy atmosfery.//Trudy 5-go Vsesoyuznogo soveshchaniya po radiometeorologii. M., Gidrometeoizdat, 1981, s. 173-176.
13. Basharinov A.E., B.G. Kutuza. Issledovanie radioizlucheniya i pogloshcheniya oblachnoy atmosfery v millimetrovom i santimetrovom diapazonah voln//Trudy GGO, 1968, L., Gidrometeoizdat, vypusk 222, s.100-110.
14. Kadygrov E.N., A.V. Koldaev, M.N. Haykin. Rezul'taty izmereniya vodozapasa oblakov s pomoshch'yu radiometrov millimetrovogo diapazona//Izvestiya AN, Fizika atmosfery i okeana, 1994, T. 30, № 2, s. 230-232.
15. Koldaev A.V., G.G.SHCHukin. Issledovanie vodozapasov zimnih oblakov metodami mikrovolnovoy radiometrii// Trudy GGO im. A.I. Voeykova, 2009, Vyp.559, s. 210-236.
16. Kadygrov E.N., Gan'shin E.V., Gorelik A.G., Knyazev A.K., Miller E.V., Nekrasov V.V., Tochilkina T.A., SHaposhnikov A.N. Eksperimental'naya otsenka effektivnosti primeneniya mnogokanal'nogo radiometricheskogo kompleksa dlya monitoringa termodinamicheskogo sostoyaniya troposfery i issledovaniya mezo-strukturnykh parametrov oblakovy.//Tez.dokl. 21-y Rabochey gruppy «Aerozoli Sibiri». Tomsk: Izd-vo IOA im. V.E. Zueva SO RAN, 2014.s.71.
17. Westwater E.R. The accuracy of water vapor and cloud liquid determination by dual frequency ground-based radiometry//Radio Science, 1978, № 4, R. 667-685.
18. Peter R., Kampf N., Radiometric determination of water vapor and liquid water and its validation with other techniques. J. Geophys. Res., 1992, 97(D16), V.18, R.18.173-18.183.
19. Matzler C., Morland J. Advances in surface-based radiometry of atmospheric water. IAP Research Report, 2008, 2008-02-MW, University of Bern, Bern, Switzerland.

## Сведения об авторах

**Кадыгров Евгений Николаевич**, д.т.н. Главный научный сотрудник лаборатории дистанционного зондирования ФГБУ «ЦАО», конструктор комплексов «Микрорадком» и «МТР-5».

**Горелик Андрей Габриэлович**, 1931 г.р., доктор физико-математических наук, профессор, автор более 150 научных работ, область научных интересов – дистанционное зондирование атмосферы методами пассивной и активной радио- и оптической локации, обработка сложных сигналов.

*Е.Н. Кадыгров, А. Г. Горелик, Т.А. Точилкина.*

---

**Точилкина Татьяна Алексеевна**, 1951 г.р. научн. сотрудник лаборатории дистанционного зондирования ФГБУ «ЦАО», область научных интересов – дистанционное зондирование атмосферы методами пассивной локации.