

# ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛЕСОВ СПУТНИКОВЫМИ СВЧ-РАДИОМЕТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

А.Г. Гранков, А.А. Мильшин, А.А. Чухланцев, Н.К. Шелобанова

*Институт радиотехники и электроники РАН  
141190 г. Фрязино Московской обл., пл. Введенского, д.1.  
E-mail: : agrankov@ms.ire.rssi.ru, amilshin@ms.ire.rssi.ru,  
chukhlantsev@ms.ire.rssi.ru, nadezhda@ms.ire.rssi.ru*

В экологических и климатических направлениях исследований лесных экосистем основная роль принадлежит всепогодным спутниковым СВЧ - радиометрическим методам. Для решения этих задач в виду их глобальности в наибольшей степени подходят спутниковые сканирующие многоканальные радиометры миллиметрового и сантиметрового диапазонов, которыми оснащены спутники Nimbus-7, DMSP, ADEOS-II, EOS-Aqua, а также планируемый к запуску в 2006 г. L - радиометр в рамках миссии SMOS. В работе анализируются основные направления экспериментальных исследований леса: моделирование радиотеплового излучения лесов при спутниковых наблюдениях; классификация типов лесов с помощью спутниковых СВЧ - радиометрических методов; мониторинг температурно-влажностного режима (режима засухи и пожароопасности) бореальных лесов спутниковыми методами; сезонная и межгодовая динамика радиотеплового излучения бореальных лесов; особенности исследования тропических лесов СВЧ - радиометрическими методами; определение оптической толщины и биомассы леса.

## Введение

С момента становления спутниковой СВЧ - радиометрии лесные районы, в основном тропические леса, использовались как природный калибровочный репер, т.е. как природный аналог абсолютно черного тела. Но уже интерпретация первых измерений показала, что лес может быть объектом исследований. Так сопоставление измерений с первого спутника с СВЧ - радиометром Космос-243 и спутника Нимбус-5 над лесом в бассейне реки Ориноко в Центральной Америке позволили проследить за изменениями гидрологического режима на интервале в несколько лет [1]. Это были качественные оценки состояния гидрологического режима, но они продемонстрировали потенциальные возможности спутниковых СВЧ - радиометров с низким пространственным разрешением надежно регистрировать обширные регионы с повышенным влагосодержанием в разных районах Земного шара в условиях облачности и растительности.

За последние четверть века сохранилась тенденция применения многоволновых поляризационных радиометров, функционирующих в миллиметровом и сантиметровом диапазонах. Основными представителями этого класса радиометров являются радиометры SMMR, SSM/I, TIM, AMSR, AMSR-E и MTB3A [2].

## *Классификация типов лесов с помощью спутниковых СВЧ-радиометрических методов*

В основу классификации типа земной поверхности положены спектральные и поляризационные различия излучательных характеристик доминирующего типа поверхности в антенном пятне. Для анализа применяются статистические подходы.

Одной из первых публикаций, посвященной классификации лесов, была работа финских ученых [3]. Авторы использовали данные сканирующего радиометра SMMR спутника Nimbus-7 за осенние периоды 1978-1982 гг. над лесными областями Южной Финляндии. Анализ яркостных температур (ЯТ) на частотах 10.7 и 18 ГГц (10.7Н, 18Н) на горизонтальной поляризации (Н) позволил выделить семь типов ландшафта – лес с доминированием сосны, разреженный хвойный лес, густой хвойный лес, лиственный лес, сельскохозяйственные угодья, болотистая местность и вода.

Наиболее эффективной является классификации типов земной поверхности по данным радиометра SSM/I полярных спутников серии DMSP: F-08, F-10 ÷ F-16, которые функционируют с 1987 г. по настоящее время. SSM/I является четырехчастотным, семиканальным инструментом, измеряющим излучение на 19.35 (19V, 19H), 22.235 (22V), 37 (37V, 37H) и 85.5 ГГц (85V, 85H). Для идентификации тропических лесов используется следующий алгоритм [4]:

$$T_{22V}^{BT} - T_{19V}^{BT} \leq 4; (T_{19V}^{BT} + T_{37V}^{BT}) / 2 - (T_{19H}^{BT} + T_{37H}^{BT}) / 2 \leq 1.9;$$
$$T_{85V}^{BT} - T_{37V}^{BT} \geq 0; T_{85H}^{BT} - T_{37H}^{BT} < 4.5; T_{19V}^{BT} > 262$$

здесь представлены значения ЯТ в Кельвинах. Алгоритмы получены на основе обработки спутниковых экспериментальных данных над тропическими лесами в экваториальной зоне - в бассейне Амазонки и в Конго. Дальнейшие исследования показали, что данные радиометра SMM/I позволяют определять до семи разновидностей тропических лесов [5].

Помимо «чистых» СВЧ - методов для классификации лесов применяют комплексные подходы с привлечением средств оптического и СВЧ - диапазонов (радиолокация и радиометрия) [6,7].

### Мониторинг температурно-влажностного режима (засухи и пожароопасности) бореальных лесов спутниковыми методами

СВЧ - радиометрические методы позволяют определять или индицировать важные в пожароопасном отношении параметры и состояние лесного полога, такие как: температура полога, приземное влагосодержание атмосферы, осадки, потоки тепла и влаги, радиационный индекс сухости [8].

Наличие тесной корреляционной связи между интегральным влагосодержанием атмосферы и температурой приземного воздуха позволяет определять температуру воздуха в пологе леса по данным измерения радиотеплового излучения на волне 1.35 см - резонансной линии поглощения водяного пара. Для 4-х исследуемых лесных районов была построена регрессионная зависимость среднемесячных температуры воздуха в пологе леса и ЯТ на волне 1.35 см по данным радиометра SSM/I спутника DMSP F08 за апрель-сентябрь 1988-1989 гг. (см. рис.1). Уравнение регрессии имеет вид:

$$T^A = -295.72 - 1.16414T_{22V}^{BT}$$

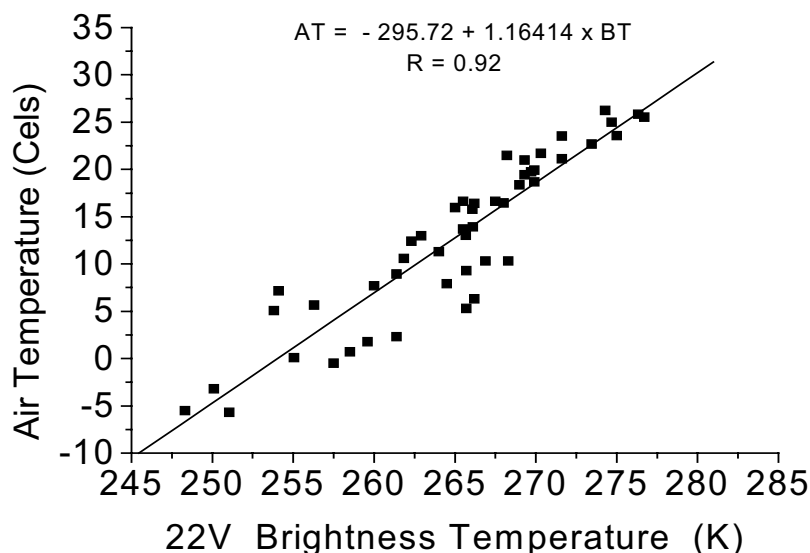


Рис. 1. Взаимосвязь среднемесячных температуры воздуха в пологе леса и ЯТ на волне 1.35 см по данным радиометра SSM/I за апрель-сентябрь 1988-1989 гг.

Более эффективными являются алгоритмы, основанные на многоканальных измерениях. В работе [9] получены два алгоритма восстановления температуры  $T^A$  в лесном пологе по данным радиометра SSM/I.

Первый алгоритм, основанный на линейной регрессии:

$$T^A = 0.2769T_{19V}^{BT} - 0.5101T_{19H}^{BT} + 0.09758T_{22V}^{BT} + 0.6959T_{37V}^{BT} - 0.4244T_{37H}^{BT} - 0.03812T_{85V}^{BT} - 0.02716T_{85H}^{BT} - 243.4$$

Второй эмпирический алгоритм основан на поляризационных различиях излучения леса на частоте 19.35 ГГц:

$$T^A = [2.275T_{19V}^{BT} - 1.275T_{19H}^{BT}] / 0.9432$$

В качестве критерия сезонной изменчивости пожарной опасности леса в работе [8] используется среднемесячное значение радиационного индекса сухости (РИС), определяемого как отношение радиационного баланса (РБ)  $R$  к количеству тепла  $LP$  ( $L$  - скрытая теплота парообразования), которое необходимо затратить на испарение выпавших осадков  $P$  за рассматриваемый промежуток времени. РБ является одним из климатообразующих факторов. Для пожароопасных сезонов приращение РИС достигает десятков и сотен процентов в зависимости от сезона и географической зоны. Нами была выявлена взаимосвязь широтного

хода спектров среднемесячных ЯТ и РИС для лесов различных географических зон в весенний период пожароопасного сезона по данным спутников DMSP F10, F11, F13, F14 за апрель-май 1997 г. Целесообразность использования спектра ЯТ для оценки РИС объясняется высокой степенью корреляции между ЯТ и РБ:

$$T^{BT} = 233.5 + 343R$$

с коэффициентом корреляции 0.98.

Для обнаружения зон осадков и оценки их интенсивности по данным радиометра SMM/I используются различные подходы, в частности частотная методика, которая считается лучшей для средних широт [10]. Интенсивность осадков определялась по разности ЯТ на вертикальной поляризации в каналах 85 и 37 ГГц (см. рис.2).

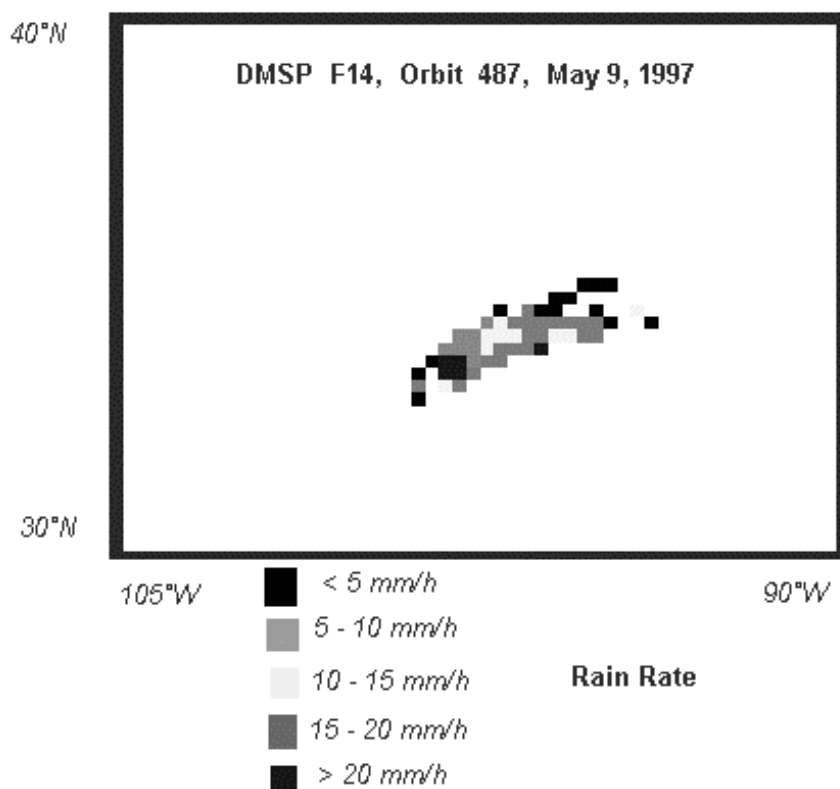


Рис. 2. Пример определения зоны выпадения и интенсивности осадков в штате Оклахома по данным СВЧ-измерений со спутника DMSP F14 (виток 487)

### Сезонная и межгодовая динамика радиотеплового излучения бореальных лесов

Исследование сезонной и межгодовой динамики спектров ЯТ представляет интерес для изучения глобальных изменений, влияния погодных и климатических факторов на характеристики излучения зондируемых природных объектов.

В работе [11] выполнены экспериментальные исследования сезонной динамики среднемесячных значений ЯТ системы поверхность-лес-атмосфера (СПЛА) в различных географических зонах Северного полушария с апреля по сентябрь 1988, 1989, 1990 и 1997 годов. Обработывались архивные данные радиометра SSM/I спутников DMSP F-08, F-10, F-13, F-14. Исследования показали, что сезонный ход ЯТ СПЛА для различных физико-географических зонах обусловлен текущими погодными условиями и прежде всего особенностями температурно-влажностного режима в интерфейсном слое лес-атмосфера (пример на рис.3).

Для оценки межгодовой и сезонной изменчивости ЯТ в работе [12] используется коэффициент вариаций:

$$\delta = \sigma^{ЯТ} / \overline{T^{ЯТ}},$$

где  $\sigma^{ЯТ}$  - среднеквадратичное и  $\overline{T^{ЯТ}}$  - средние за месяц значения ЯТ. При короткопериодных изменениях климата мерой изменчивости обычно служат среднемесячные значения дисперсии исследуемого параметра, а не средние значения. Результаты обработки среднемесячных значений коэффициента вариаций ЯТ СПЛА по Аляске, Кеть-Чулым, Московской области (см. рис.4) и Оклахоме представлены в ра-

боте [12]. Анализ экспериментальных значений коэффициента вариаций ЯТ в разных лесных зонах выявил ряд отличий, связанных с влиянием местных природных и климатических условий. Эти отличия проявляются в сезонном ходе, спектральных особенностях, диапазоне изменения сезонных и межгодовых величин, зональном характере минимума коэффициента вариаций. Выявлена взаимосвязь сезонной и межгодовой динамики коэффициента с уровнем пожароопасности лесов на месячных временных масштабах.

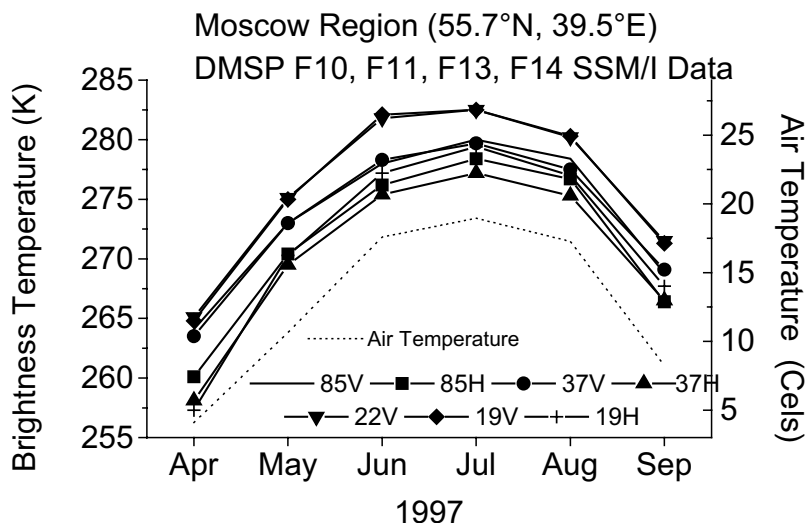


Рис. 3. Сезонная динамика среднеемесячных ЯТ и температуры воздуха в лесном пологом в Московской области в 1997 г. по данным радиометра SSM/I.

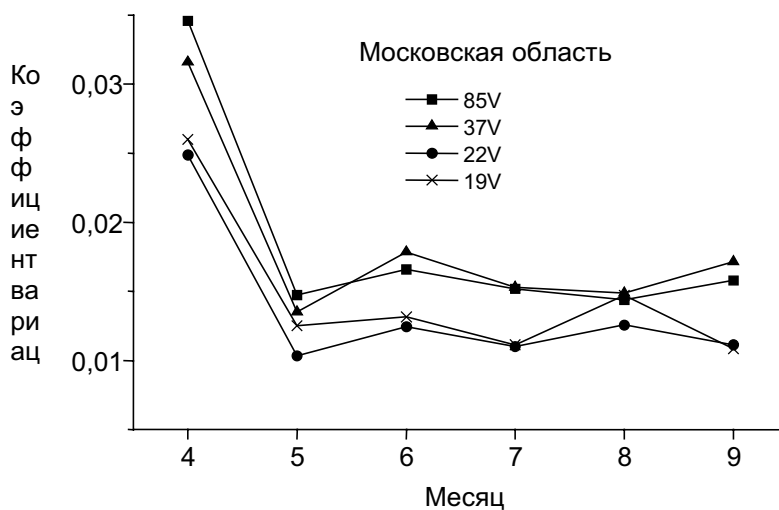


Рис. 4. Сезонная динамика средних многолетних значений коэффициента вариаций ЯТ лесного района Московской области по данным радиометра SSM/I.

### Особенности исследования тропических лесов СВЧ-радиометрическими методами

Особенностью архитектуры тропического леса является отсутствие доминирующего типа растительности, на участке в 1 га может совместно произрастать до 100 типов различных видов деревьев. Тропические леса развиваются в условиях равномерного увлажнения и равномерной температуры в течении года. Наблюдается выраженная вертикальная стратификация температуры полога и влажности воздуха. Тропические леса характеризуются самым высоким среди растительных сообществ уровнем биомассы, достигающим 40-60 кг/м<sup>2</sup>. При интерпретации экспериментальных данных лес моделируется непрерывной средой со случайными пространственными флуктуациями диэлектрической проницаемости. В [13] данные радиометра SMMR использовались для определения температуры в нижней и верхней частях полога, а в [14] – для температуры и влажности. В работе [5] были получены оценки вариаций ЯТ при среднем значении равным 280 К для шести типов тропических лесов на четырех длинах волн (см. таб.1). Эти данные легли в основу классификационной процедуры, описанной выше. В работе [15] были получены среднеемесячные, осредненные для всех тропических лесов значения радиоярких темпе-

ратур СПЛА. Измерения выполнены с помощью радиометра SMMR спутника Nimbus-7 в 1982 г. Пространственное осреднение осуществлялось по ячейкам  $4^{\circ} \times 5^{\circ}$  по широте и долготе. Сезонная динамика радиотеплового излучения лесов на волне 4.5 см на вертикальной и горизонтальной поляризациях характеризуется следующими значениями: май - 259.3V, 253.9H; июнь - 259.5V, 249.3H; июль - 258.9V, 252.6H; август - 261.2V, 255.9H; сентябрь - 263.1V, 255.5H. Сезонную динамику среднемесячных значений поляризационного индекса на волне 4.5 см иллюстрирует рис. 5.

Таблица 1. Вариации ЯТ различных типов тропических лесов в бассейне Амазонки по данным радиометра SSM/I.

Разновидность леса	19H	19V	22V	37H	37V	85H	85V
Предельно влажный дождевой лес	7.6	8.5	7.0	3.8	4.2	6.1	6.5
Очень влажный дождевой лес	7.8	9.0	7.0	4.0	4.8	6.1	6.4
Влажный вечнозеленный лес	8.1	9.3	8.0	4.5	5.4	7.2	7.6
Влажный предгорный лес	4.7	7.0	5.4	1.5	2.9	4.4	5.1
Деградирующий лес	1.3	2.2	2.8	1.8	1.0	2.6	3.8
Тропический вечнозеленный долинный лес	9.0	11.0	8.7	5.8	7.1	7.1	7.8

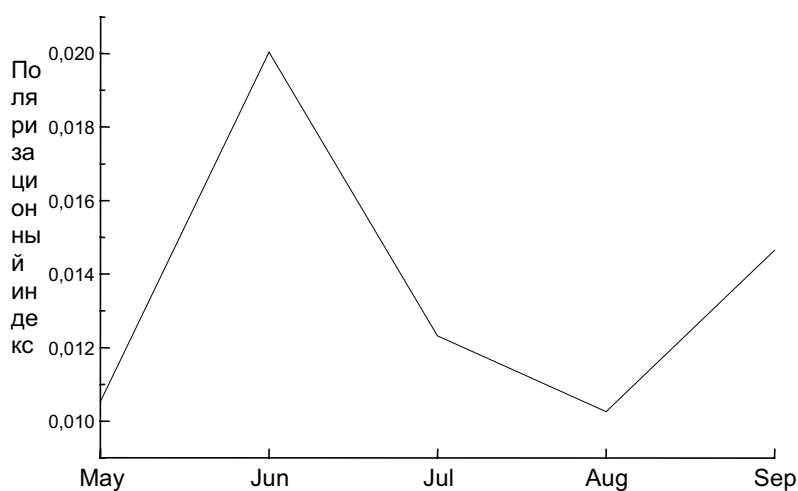


Рис. 5. Сезонная динамика среднемесячных значений поляризационного индекса тропических лесов на волне 4.5 см по данным радиометра SMMR.

### Определение оптической толщины и биомассы леса

Определение характеристик ослабления радиоволн и биометрических показателей леса является приоритетной задачей спутниковой СВЧ – радиометрии. В [16] приводится ссылка о наличии корреляционной связи между данными SMM/I и запасом стволовой древесины для лесов Финляндии в зимний период. В [17] разработан и применен на данных SMMR алгоритм определения оптической толщины растительности  $\tau_c$ , использующий связь  $\tau_c$  с поляризационным индексом:

$$MPDI = (T_V^{BT} - T_H^{BT}) / (T_V^{BT} + T_H^{BT})$$

в виде:

$$\tau_c = C_1 \ln(C_2 MPDI + C_3),$$

где коэффициенты определяются диэлектрическими свойствами почв. Сезонный ход поляризационного  $PI$  и частотного  $FI$  индексов по данным радиометра SMM/I [16] на частотах 19 и 37 ГГц указывает на взаимосвязь индексов с биомассой листвы лесов.

В заключении отметим, что несмотря на низкое пространственное разрешение радиометров SMMR и SMM/I и тот факт, что они изначально планировались для решения других, далеких от лесных проблем, задач накопленный за последние четверть века опыт позволяет решать широкий круг задач в дистанционном зондировании лесных регионов.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ, грант № 2059.

## Литература

1. *Wilheit T.T.* Coinparison of «Cosmos-243» Microwave Radiometer Data with «NIMBUS-5» Electrically Scanned Microwave Radiometer (ESMR) Data. Rep. at 1974 Meeting of Joint US/USSR Work. Gr., Nat. Envir. Greenbelt, 1974.
2. *Гранков А.Г., Мильшин А.А.* Современное состояние спутниковых СВЧ-радиометрических средств для исследования климатоформирующих процессов // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 1999, №12, С.17-34.
3. *Hallikainen M.T., Jolma P.A., Huuра J.M.* Satellite Microwave Radiometry of forest and surface types in Finland // IEEE Trans. on Geos. and Rem. Sens., vol.26, NO. 5, 1988, P.622-628
4. *Neale C.M.U., McFarland M.J., and Chang K.* Land-Surface-Type Classification Using Microwave Brightness Temperatures from the Spatial Sensor Microwave/Imager // IEEE Trans. and Geosc. and Rem. Sensing, vol.28, No.5, 1990, P.829-838.
5. *Long D.G., Daum D.R., and Hardin P.J.* Spatial Resolution Enhancement of SSM/I Data: Vegetation Studies of the Amazon Basin // Proceedings of IEEE IGARSS'96, Burham Yates Conference Center, Lincoln, Nebraska, USA, 27-31 May 1996, P.1606-1608.
6. *Бельчанский Г.И., Мордвицев И.Н., Овчинников Г.К., Петросян В.Г., Дуглас Д., Пэнк Л.* Обработка данных КА "Океан" для классификации растительности бореальных лесов // Исслед. Земли из космоса, №2, 1993, С.25-34.
7. *Бельчанский Г.И., Овчинников Г.К.* Некоторые вопросы повышения эффективности классификации растительности бореальных лесов с использованием данных КА "Океан" // Исслед. Земли из космоса, №6, 1993, С.40-48.
8. *Мильшин А.А., Гранков А.Г.* Применение спутниковой СВЧ-радиометрии для оценки пожарной опасности лесов // Экология, мониторинг и рациональное природопользование. Науч. труды. Вып. 314 (ФЦП "Интеграция"). М.:2001. С.73-83.
9. *Pullainen J., Grandell J. and Hallikainen M.* SSM/I-Based Surface Temperature Retrieval Methods for Boreal Forest Zone // Proceedings of IEEE IGARSS'96, Burham Yates Conference Center, Lincoln, Nebraska, USA, 27-31 May 1996, P.2110-2112
10. *Barrett E.C. and Kniveton D.* Overland precipitation // ESA/NASA International Workshop. VSP, 1994, B.J.Choudhury, J.H.Kerr, E.G.Njoku and P.Pampaloni, P.571-598.
11. *Мильшин А.А., Гранков А.Г., Шелобанова Н. К.* Исследование сезонной динамики характеристик излучения системы поверхность-лес-атмосфера в СВЧ-диапазоне // Препринт № 3 (624), ИРЭ РАН, М.-1998.-62с.
12. *Гранков А.Г., Кузнецов О.О., Мильшин А.А., Шелобанова Н.К.* Сезонная и межго-дичная динамика радиотеплового излучения леса с разным уровнем пожароопасности по данным радиометра SSM/I // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 1999, №10, С.2-14.
13. *Noilhan J. and Calvet J.-C.* Mesoscale land-atmosphere models and usefulness of microwave remote-sensing data // ESA/NASA International Workshop. VSP, 1994, B.J. Choudhury, J.H. Kerr, E.G. Njoku and P. Pampaloni, P.17-54.
14. *Calvet J.-C., Wigneron J.-P., Kerr Y.H. and Brito J.L.S.* Use of passive microwaves over The Amazon forest // IGARSS'92, Houston, 2, 1992, P.1673-1675.
15. *Мильшин А.А., Гранков А.Г., Шелобанова Н.К., Кузнецов О.О.* Крупномасштабная пространственно-временная динамика радиотеплового излучения земной поверхности по данным радиометра SMMR // LV научная сессия РНТОРЭС им. А.С.Попова, 17-19 мая 2000г., Москва, 2000 г., С.101-102.
16. *Pampaloni P.* Microwave radiometry of forests // Waves in Random Media. 2004. 14. P.275-298.
17. *Owe M., R.de Jeu, and Walker J.* A Methodology for Surface Soil Moisture and Vegetation Optical Depth Retrieval Using the Microwave Polarization Difference Index // IEEE Trans. On Geosc. And Remote Sensing, Vol.39, No. 8, 2001, P.1643-1654.