

**Оценки влияния эффекта Фарадея на радиотепловое излучение подстилающей поверхности в дециметровом диапазоне**

А.Г. Гранков, А.А. Мильшин.

*Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук*

*Пл. Ак. Введенского, д.1, г. Фрязино Московской области 141190, amilshin@list.ru*

*Получены оценки влияния эффекта Фарадея на контраст яркостной температуры гладкой морской поверхности, открытой почвы при различной степени увлажнения и лесной растительности при разных метеорологических и гелиофизических условиях в дециметровом диапазоне. Оценки выполнены на длинах волн 10, 15, 21, 30, 43, 50, 60, 75 и 100 см и углах зондирования 0, 10, 20, 40 и 60 градусов от надира. Паразитный контраст яркостной температуры достигает 6 К при углах зондирования 20 градусов и увеличивается на порядок при углах зондирования 60 градусов.*

*Estimates are obtained of the influence of the Faraday effect on the contrast of the brightness temperature of a flat sea surface, an open soil with varying degrees of moisture and forest vegetation under various meteorological and heliophysical conditions in the decimeter band. Estimates are made at wavelengths of 10, 15, 21, 30, 43, 50, 60, 75, and 100 cm and sounding angles of 0, 10, 20, 40, and 60 degrees from the nadir. The parasitic contrast of the brightness temperature reaches 6 K at sensing angles of 20 degrees and increases by an order of magnitude when sensing angles are 60 degrees.*

**Введение**

В конце 90-х и начале 2000-х в ИРЭ РАН разрабатывалась многослойная модель глобального крупномасштабного радиотеплового излучения Земли в дециметровом диапазоне радиоволн (10-100 см) [1-9]. Модель базируется на теоретических и экспериментальных исследованиях радиотеплового излучения водной поверхности, суши, растительного покрова, тропосферы, ионосферы и космического радиоизлучения, выполненных в ИРЭ РАН в течение последних 30-40 лет. Эти исследования осуществлялись на локальных пространственно-временных масштабах в диапазоне 2.25, 18-30 см, используя наземные и авиационные носители.

Глобальная модель позволяет исследовать механизм формирования радиотеплового излучения Земли в диапазоне длин волн 10-100 см и учитывает вклад в глобальное радиоизлучение Земли различных природных сред: водной поверхности, почв и растительных покровов различных типов, тропосферы, ионосферы и космического радиоизлучения. Данная модель позволяет оптимизировать выбор новых спектральных областей перспективных спутниковых радиометров L - и P - диапазонов, оценить потенциал их использования в климатологических задачах.

Практика показала, что переход от использования радиометров с длиной волны 18, 21 см на радиометры 27 и 30 см сразу давал выигрыш в качестве при зондировании сред с неоднородным профилем влажности, при наличии растительного покрова, для минерализованных акваторий, при определении уровня залегания грунтовых вод, мониторинга оросительных систем и утечек воды из оросительных каналов. При зондировании с борта авианосителя нет никаких фундаментальных ограничений по выбору длины волны. Ионосфера не участвует в формировании сигнала, а космическое радиоизлучение меняется достаточно медленно на локальных, пространственных

масштабах и оно является стационарным. При спутниковых измерениях сигнал от зондируемой поверхности проходит через ионосферу и вследствие эффекта Фарадея искажается. Используемая в настоящее время длина волны 21 см пришла из радиоастрономии. Она была выбрана для изучения распределения водорода в космосе.

Модели, учитывающие фарадеевское вращение плоскости поляризации, описаны в литературе, посвященной действующим проектам L-радиометрии, в частности, в работах [10-11]. Основным прибором европейского проекта SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity, 2009 г.) является сложный интерферометрический СВЧ - радиометр с синтезом апертуры MIRAS. В проекте Aquarius\_SAC-D Mission (2011 г.) НАСА разработало совмещенный пассивно-активный прибор. Проект SMAP (Soil Moisture Active and Passive, 2015 г.) предполагает совместное использование сканирующего СВЧ-радиометра L-диапазона с антенной диаметром 6 м и скаттерометра того же диапазона. Модели увязаны с параметрами орбиты космических аппаратов. В нашей модели отсутствует понятие орбита. В работе [9] на основании экспериментальных данных о глобальных полях полного электронного содержания в ионосфере были получены глобальные оценки суточной и сезонной динамики углов поворота плоскости поляризации. В настоящей работе мы попытаемся дать некоторые оценки, обусловленные эффектом Фарадея.

### Модель учета эффекта Фарадея

Рассмотрим конкретную реализацию радиационной модели. При спутниковых наблюдениях яркостная температура (ЯТ) системы «почва – растительность - атмосфера» (СПЛА) в дециметровом диапазоне может быть представлена в виде полуэмпирической модели [1]:

$$T_{\Sigma}^{BT} = T_S^{BT} + T_C^{BT} + T_{SKY}^{BT}, \quad (1)$$

где  $T_S^{BT}$  - радиоизлучение почвы, ослабленное растительным пологом и атмосферой:

$$T_S^{BT} = (1 - r_S) T_S \exp(-\tau_C - \tau_A) = T_{S0}^{BT} \exp(-\tau_C - \tau_A);$$

$T_{SKY}^{BT}$  - прямое восходящее  $T_A^{BT}$  излучение атмосферы и отраженное излучение атмосферы  $T_A^{BT}$  и космоса  $T_{COS}^{BT}$ , ослабленное растительностью и атмосферой:

$$T_{SKY}^{BT} = T_A^{BT} + r_S (T_A^{BT} + T_{COS}^{BT} \exp(-\tau_A)) \cdot \exp(-2\tau_C - \tau_A)$$

$T_C^{BT}$  - прямое и отраженное излучение растительности:

$$T_C^{BT} = T_C (1 - \omega_C) [1 - \exp(-\tau_C)] \cdot [1 + r_S \exp(-\tau_C)] \exp(-\tau_A)$$

с температурой полога  $T_C$  и почвы  $T_S$ ; интегральным ослаблением пологом  $\tau_C$  и атмосферой  $\tau_A$ ; коэффициентом отражения почвы  $r_S$  и альбедо растительной среды  $\omega_C$ .

Излучение почв моделируется трехслойной средой (воздух - слой почвы толщиной 10 см и полубесконечный слой почвы) с шероховатой границей верхнего слоя с ЯТ.

При моделировании использовались данные о среднемесячных значениях поверхностной температуры, влажности почв, температуре воздуха из архива NCEP/NCAR на горизонтах 0-10 и 10-100 см.

В отсутствие деполяризации ЯТ среды определяется согласно (1), а эффект Фарадея приводит к появлению второй составляющей сигнала и выражение для ЯТ будет иметь вид [12]:

$$T_h(\Omega_F) = [\chi_h \cos^2(\Omega_F) + \chi_v \sin^2(\Omega_F)] \cdot T_0$$

$$T_v(\Omega_F) = [\chi_v \cos^2(\Omega_F) + \chi_h \sin^2(\Omega_F)] \cdot T_0,$$

отсюда величина вариации ЯТ, обусловленная деполяризацией составит:

$$\Delta T_{h,v}(\Omega_F) = \pm[\chi_v - \chi_h] \sin^2(\Omega_F) T_0. \quad (2)$$

Здесь  $T_h, T_v, \chi_h, \chi_v$  - ЯТ и коэффициент излучения на горизонтальной и вертикальной поляризации,  $T_0$  - физическая температура излучающей среды,  $\Omega_F$  - угол поворота плоскости поляризации.

### Численные оценки

В СВЧ - радиометрии важно не сама величина угла поворота, а паразитный яркостный контраст, обусловленный эффектом Фарадея при отражении от поверхности (соотношение 2). Величина контраста зависит от поляризационных свойств среды и угла поворота. На рис.1 представлены результаты расчетов спектра коэффициента излучения гладкой морской поверхности при температуре 20°C и солености 36 г/л и углах зондирования 0, 10, 20, 40 и 60 градусов. На рисунке надписи 10H, 10V...100H, 100V означают длину волны в см, H, V – соответственно, горизонтальная и вертикальная поляризации.

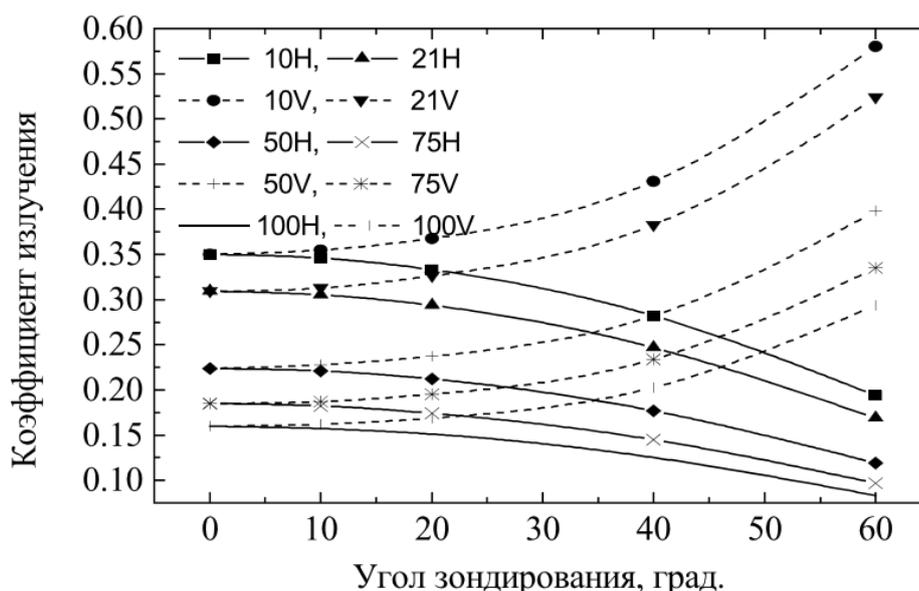
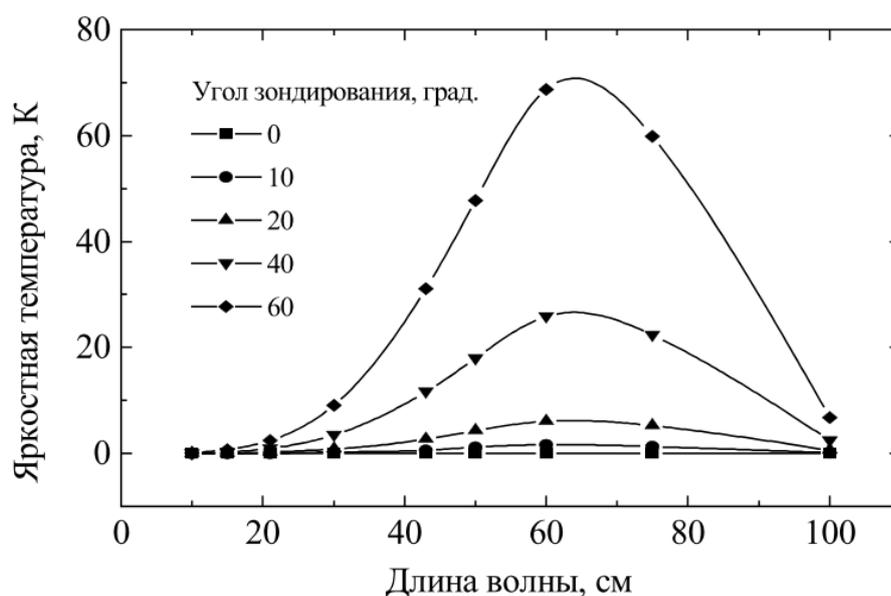


Рис. 1. Зависимость коэффициента излучения гладкой морской поверхности ( $t=20^\circ\text{C}$ ,  $S=36\text{‰}$ ) от угла зондирования на вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризациях на длинах волн 10, 21, 30, 43, 50, 60, 75 и 100 см

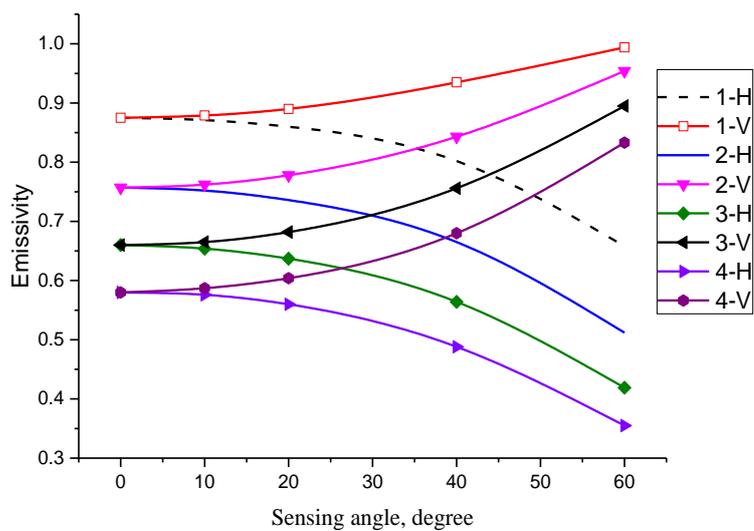
С помощью модели (2) была получена спектральная зависимость контраста ЯТ, обусловленная влиянием эффекта Фарадея для параметров морской поверхности, представленной на рис.1. Спектральный ход множителя  $[\chi_v - \chi_h]$  является монотонной спадающей функцией, на волне 10 см составляет 0.389 и на волне 100 см – 0.211. Максимум контраста на волнах 60-70 см обусловлен поведением функции  $\sin^2(\Omega_F)$ . Величина контраста растет с ростом угла зондирования и составляет 69 К на волне 60 см.

Рассмотрим влияние эффекта Фарадея на излучение открытой почвы с различной степенью увлажнения. Наибольший контраст будет наблюдаться для почв, близким к однородно увлажненным почвам.

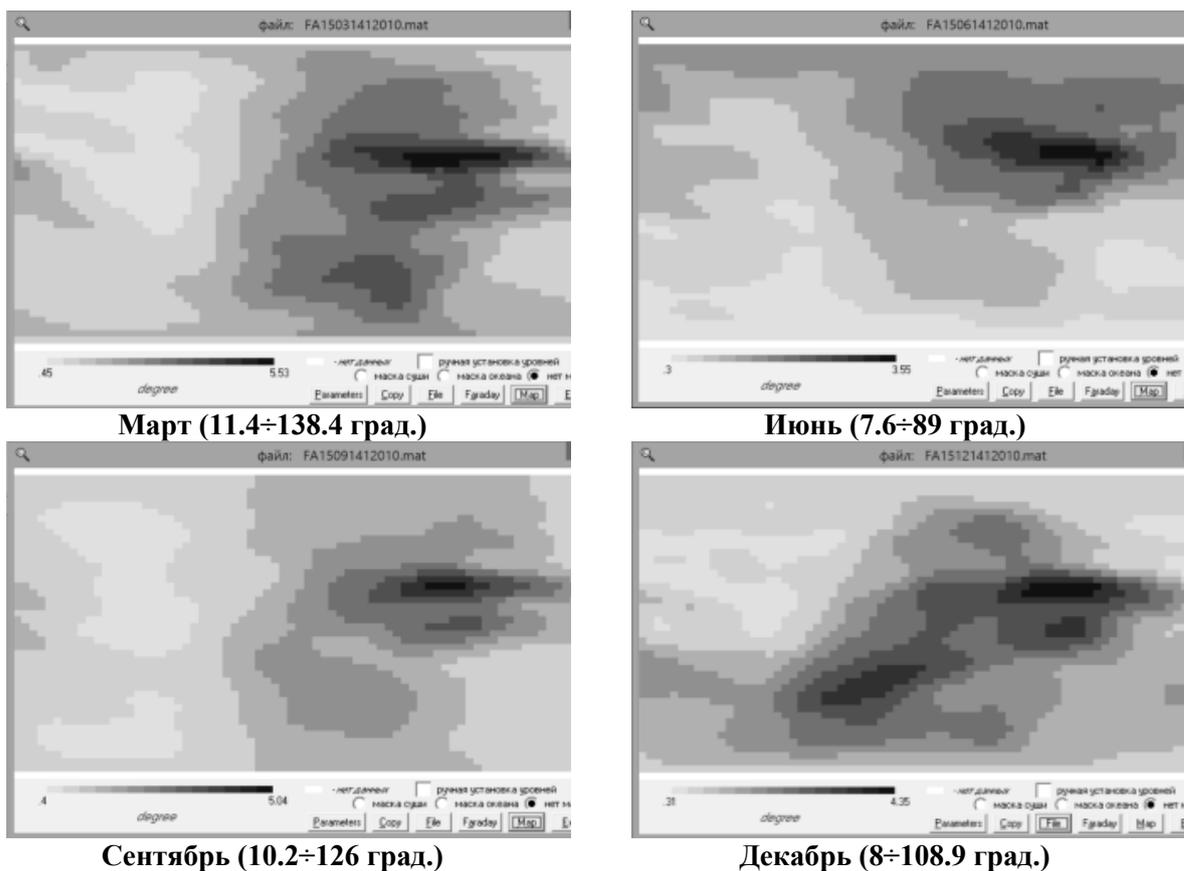


**Рис. 2.** Спектральная зависимость яркостного контраста гладкой морской поверхности, обусловленного эффектом Фарадея в точке с широтой  $0^\circ$  и долготой  $150^\circ$  в.д. при разных углах зондирования. Число Вольфа равно 100.

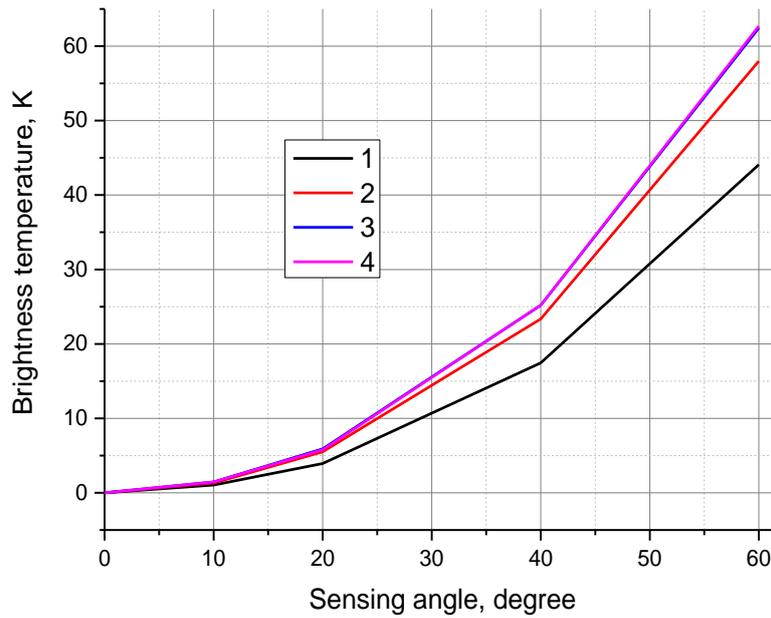
На рис.3 представлена зависимость коэффициента излучения на волне 50 см для почвы с влажностью в верхнем 10 см слое, равной 0.05, 0.15, 0.25 и 0.35 г/см<sup>3</sup>, влажность в нижнем слое 100 см принималась равной на величину 0.05 г/см<sup>3</sup> большей, чем в поверхностном слое. Расчеты выполнены для углов зондирования в диапазоне 0 – 60 градусов. Для выбора угла Фарадея мы воспользовались результатами работы [9], (см. рис.4). По экспериментальным глобальным вариациям угла вращения на волне 50 см мы выбрали наибольшее значение  $\Omega_F = 138^\circ$  из карты за март. Результаты расчетов по модели (2) приведены на рис.5. Максимальный контраст ЯТ наблюдается при угле зондирования 60 градусов составляет (53 – 62) К при изменении влажности в диапазоне от 0.05 до 0.25 г/см<sup>3</sup>.



**Рис.3. Зависимость коэффициента излучения от влажности почв и угла зондирования на волне 50 см, 1-0.05 г/см<sup>3</sup>, 2-0.15 г/см<sup>3</sup>, 3-0.25 г/см<sup>3</sup>, 4-0.35 г/см<sup>3</sup>**

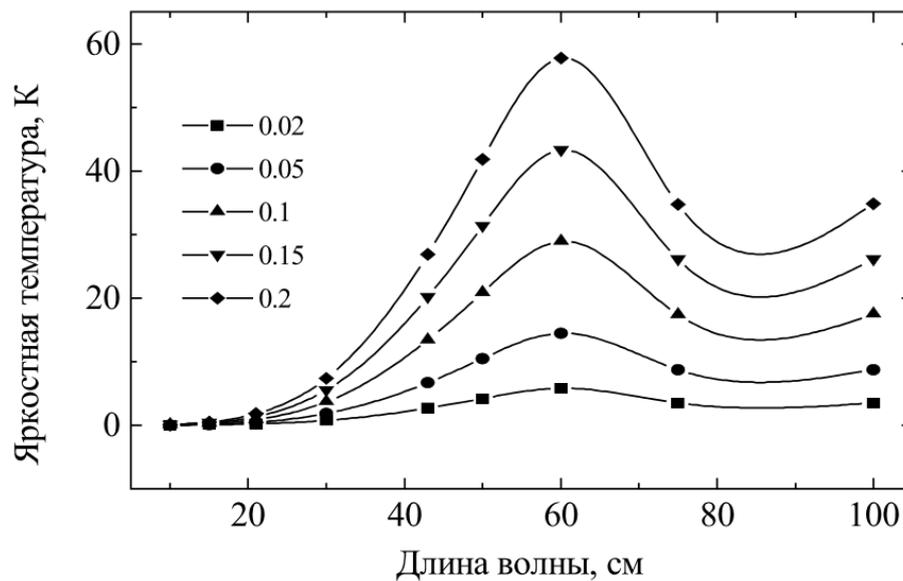


**Рис.4. Экспериментальные сезонные глобальные вариации Фарадеевского вращения на волне 50 см**



**Рис.5. Зависимость яркостного контраста, обусловленного эффектом Фарадея, на волне 50 см от угла зондирования и степени увлажненности открытых почв**

В заключение рассмотрим влияние слабо поляризованных сред (растительные и лесные сообщества) на контраст ЯТ, обусловленный эффектом Фарадея.



**Рис.6. Спектральная зависимость яркостного контраста, обусловленного эффектом Фарадея в точке с широтой 0° и долготой 150° в.д. для сред с разными поляризационными свойствами. Число Вольфа равно 100**

Влияние эффекта Фарадея определяется поляризационными свойствами среды (см. рис. 6). Для слабо поляризованных сред (леса, густая растительность, сухая почва)  $[\chi_v - \chi_h]=0.02-0.05$  контраст составляет 5-13К, для увлажненных почв  $[\chi_v - \chi_h]=0.1-0.2$  контраст достигает (26-53) К. Такой подход представляется менее затратным с точки зрения объема вычислений.

## **Заключение**

Получены оценки влияния эффекта Фарадея на контраст ЯТ гладкой морской поверхности, открытой почвы при различной степени увлажнения и лесной растительности при разных метеорологических и гелиофизических условиях в дециметровом диапазоне.

Характер пространственно-временного изменения ЯТ полей в первую очередь обусловлен состоянием глобальных полей ТЕС и пространственной структурой статического магнитного поля Земли.

Диапазон пространственных вариаций превышает порядок, т.е.  $\max/\min > 30$ .

Полученные данные будут использоваться для анализа влияния эффекта Фарадея на измеряемые радиотепловые поля в дециметровом диапазоне. Данные будут полезны при проведении региональных и локальных дистанционных измерений, а также при планировании экспериментов.

## **Литература**

1. Галкин Ю.С., Гранков А.Г., Мильшин А.А., Шмаленюк А.С. Моделирование ослабления радиоволн лесным пологом в глобальной модели радиоизлучения земной поверхности в L- и P- диапазонах // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. Вып.2 (51). -2007. -С.90-99.
2. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Чухланцев А.А. Моделирование характеристик радиотеплового излучения увлажненного осадками лесного полога в миллиметровом, сантиметровом и дециметровом диапазонах // Радиотехника и электроника. т.50, № 12, -2005. -С.1447-1450
3. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Чухланцев А.А. Моделирование радиотеплового излучения лесов при спутниковых наблюдениях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. -2005. Вып.2. Т.2. -С.256-261.
4. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Шелобанова Н.К. Спектральные особенности крупномасштабного радиотеплового излучения земной поверхности в дециметровом диапазоне при спутниковых наблюдениях // Материалы VII научно-технической конференции "Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли", Москва -2010 г.-С.332-335.
5. Мильшин А.А., Гранков А.Г., Шелобанова Н.К. Валидация модели глобального крупномасштабного радиоизлучения Земли в дециметровом диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. -2011. Т.8. №1. -С.246-254.
6. Мильшин А.А., Гранков А.Г., Шелобанова Н.К. Формирование радиоизлучения почвы в модели глобального крупномасштабного радиотеплового излучения земли в дециметровом диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. -2012. Т.9. №3. -С.43-49.
7. Гранков А.Г., Мильшин А.А. Влияние эффекта Фарадея при спутниковых СВЧ радиометрических измерениях в дециметровом диапазон // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). №4 (13). -2015. -С.143-147.
8. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Шелобанова Н.К. Радиоизлучение атмосферы в дециметровом диапазоне волн при спутниковых наблюдениях // Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред [Электронный ресурс]: сб. докладов Четвёртой Всероссийской научной школы и конференции. Муром, 30 июня – 3 июля 2009 г. – Муром: Изд. –полиграфический центр МИ ВлГУ. -2009. –433 с.: ил. –1 электрон. опт. диск (CD-ROM). –с.107-111.
9. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Шелобанова Н.К. Экспериментальные оценки глобальных вариаций угла поворота плоскости поляризации при спутниковых измерениях в дециметровом диапазоне // VIII Всероссийские Армандовские чтения

[Электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской научной конференции – Муром: Изд.- полиграфический центр МИ ВлГУ. -2018 .– 715с. ISSN2304-0297 (CD-ROM). С.281-287

10. Yueh S.H. Estimates of Faraday Rotation with Passive Microwave Polarimetry for Microwave Remote Sensing of Earth Surface // IEEE Trans. on Geos. and Rem. Sens., vol.38, N 5. -2000. -P.2434-2438.

11. Ribo S. and Martin-Neira M. Faraday Rotation Correction in the Polarimetric Mode of MIRAS // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 42, N 2. -2004. -P.1405-1410.

12. Le Vine D.M., Abraham S., and Peng J. Faraday Rotation Correction for the SMAP Radiometer // IEEE Trans. on Geos. and Rem. Sens., VOL. 54, N 4. -2016.- P.2070-2081