

Эксперимент по дистанционному СВЧ радиометрическому зондированию Земли в L-диапазоне с малого космического аппарата, первые результаты

**М.Т. Смирнов¹, Д.М. Ермаков¹, С.М. Маклаков¹,
А.А. Халдин², А.Е. Максимов²**

¹ *ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия*

E-mail: smirnov@ire.rssi.ru

² *ФГУП СКБ ИРЭ РАН, г. Фрязино, Россия*

E-mail: ahaldin@sdbireras.ru

Новый эксперимент по СВЧ радиометрическому дистанционному зондированию Земли в L-диапазоне осуществляется при помощи специально разработанной научной аппаратуры, установленной на малом космическом аппарате МКА ФКИ №1. Анализ полученных данных показал, что они имеют высокое качество и пригодны для тематической обработки с целью решения задач научной программы. В работе приводится краткое описание научной аппаратуры и результаты анализа качества информации. В результате обработки информации получены первые оценки солености океанов и продемонстрирована возможность изучения типов морского льда по пассивным измерениям в дециметровом диапазоне радиоволн.

Ключевые слова: СВЧ радиометрические измерения, дистанционное зондирование Земли.

Введение

С целью развития и совершенствования методов наблюдения Земли из космоса СВЧ радиометрическими средствами в дециметровом диапазоне длин волн в СКБ ИРЭ РАН разработан научный прибор – панорамный СВЧ радиометр «Зонд-ПП», установленный на малоразмерный космический аппарат «МКА-ФКИ» № 1 разработки НПО им. С.А. Лавочкина.

Этот эксперимент стоит в ряду таких космических проектов с использованием аппаратуры, работающей в L-диапазоне, как SMOS (ESA) (Kerr et al., 2010) и Aquarius (NASA) (Lagerloef et al., 2008). Успешный запуск миссии SMOS был осуществлен в ноябре 2009 г., а Aquarius – в июне 2010 г. Проекты SMOS и Aquarius предназначены для определения как влажности земной поверхности, так и солености океанов. В феврале 2011 г. в рамках реализации космического эксперимента «СВЧ-радиометрия» на РС МКС был установлен СВЧ радиометрический комплекс «РК-21-8», предназначенный для измерения собственного излучения земных покровов и поверхности океана в L диапазоне длин волн (Смирнов, Халдин, 2012).

Запуск космического аппарата МКА-ФКИ №1 с научной аппаратурой успешно осуществлен 22 июля 2012 г. Планирование включений научной аппаратуры производится на основе данных прогноза траектории полета, поступающих из НПО им. С.А. Лавочкина. Области наблюдений определяются исходя из Научной программы экспериментов (Арманд и др., 2008).

Предварительная обработка данных производится в ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Комплекс программ предварительной обработки включает программы: географической привязки измерений, визуализации данных для анализа качества информации, фильтрации сбоев и формирования файлов для дальнейшей тематической обработки. Результаты предварительной обработки архивируются в ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Краткое описание научной аппаратуры

Основной полезной нагрузкой КА МКА ФКИ № 1 является СВЧ радиометрический комплекс «Зонд-ПП», который целиком расположен вне гермоотсека. Внешний вид прибора представлен на *рис. 1*. Он обеспечивает панорамные измерения путем одновременного измерения радиотеплового излучения с разных участков земной поверхности с помощью 2-лучевой антенны и 2-канального СВЧ радиометрического приемника L-диапазона. СВЧ радиометрический приемник расположен непосредственно на антенне. Основные технические характеристики прибора представлены в *табл. 1*. Геометрическая схема обзора пространства приведена на *рис. 2*.

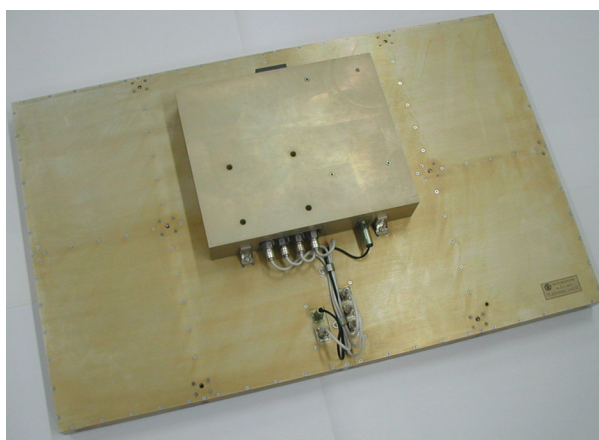


Рис. 1. Внешний вид лабораторного макета СВЧ радиометрического комплекса «Зонд-ПП» в сборе

КА МКА ФКИ № 1 накладывает ряд технических ограничений на возможности работы научной аппаратуры. Энергетические возможности его позволяют проводить измерения в течение примерно 100 минут в сутки. Кроме того, из-за отсутствия возможности вращения панелей солнечных батарей для эффективной работы энергетической установки КА предпочтительными являются измерения на теневой стороне Земли. Эти ограничения потребовали организации системы планирования измерений с целью обеспечения решения задач научной программы.

Таблица 1. Основные технические характеристики «Зонд-ПП»

Центральная частота, ГГц	1,415
Полоса приема, МГц	20
Чувствительность при постоянной времени 1 с, К	0,3
Диапазон измеряемых яркостных температур, К	5...400
Количество лучей	2
Высота полета, км	820
Полоса обзора, км	700
Размеры антенной системы (ФАР), мм ²	820 × 510
Потребляемая мощность, Вт	60

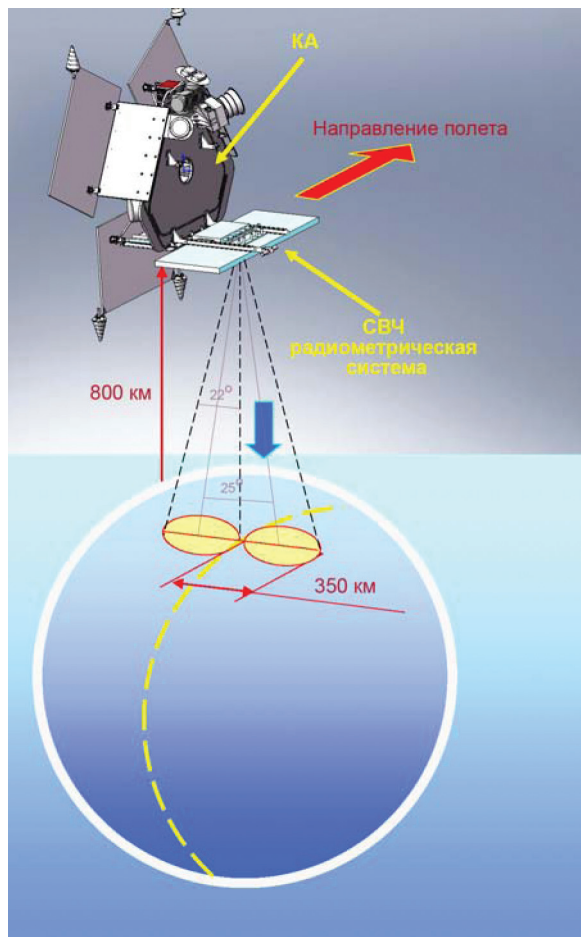


Рис. 2. Геометрическая схема обзора пространства прибора «Зонд-ПП»

В качестве дополнительной нагрузки на КА МКА ФКИ № 1 установлена много-спектральная камера (МСК). Поле зрения МСК совмещено с одним из лучей СВЧ радиометрического комплекса, и при этом технически обеспечена возможность их совместной работы.

Предварительный анализ качества получаемой информации

Управление работой КА и прием информации осуществляется в ЦУП-Л НПО им. С.А. Лавочкина. Вся научная информация, поступающая с «Зонд-ПП», дополняется траекторными данными и передается в ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

В ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН осуществляется географическая привязка СВЧ радиометрических измерений, анализ качества поступающей информации и дальнейшая обработка, включая калибровку и тематическую обработку в рамках задач научной программы.

Для экспресс-анализа данных нами разработана программа визуализации измерений, позволяющая просмотреть результаты измерений в виде как графиков, так и изображений выходных сигналов в псевдоцвете. Целью экспресс-анализа данных является экспертная оценка качества работы научной аппаратуры и географической привязки измерений, а также степень влияние различных внешних воздействий. На выходе программы формируются файлы просмотрных форм для дальнейшего анализа и поиска нужной информации.

Примеры просмотрных форм двух сеансов измерений представлены на рис. 3, 4.

Внешние помехи, обусловленные работой активных радиотехнических средств (радиолокаторов, систем связи и т.п.), вызывают необоснованно высокие значения выходных сигналов радиометра. На синтезированных изображениях в псевдоцвете эти области выделяются красным цветом (рис. 4). Источники помех расположены главным образом на суше. Следует отметить что, несмотря на присутствие таких помех, ограничивающих возможности пассивных измерений и решения части научных задач, большая часть Земли свободна от них.

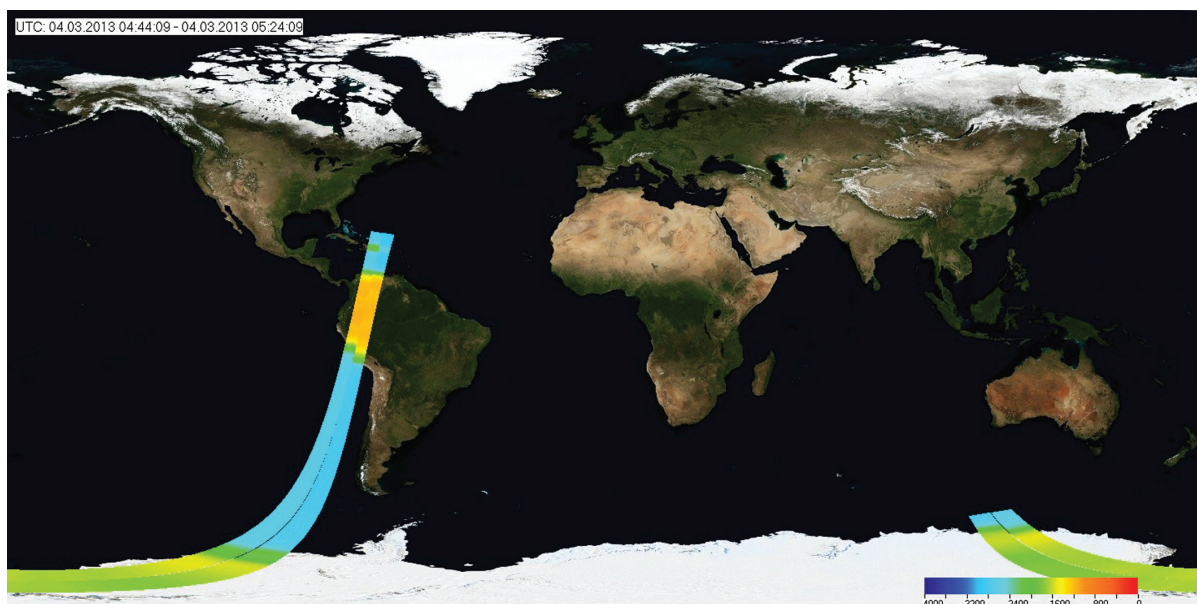


Рис. 3. Пример просмотрной формы по результатам измерений 4 марта 2013 г. при пролете над южной частью Земли (шкала псевдоцвета в условных единицах выходных сигналов)

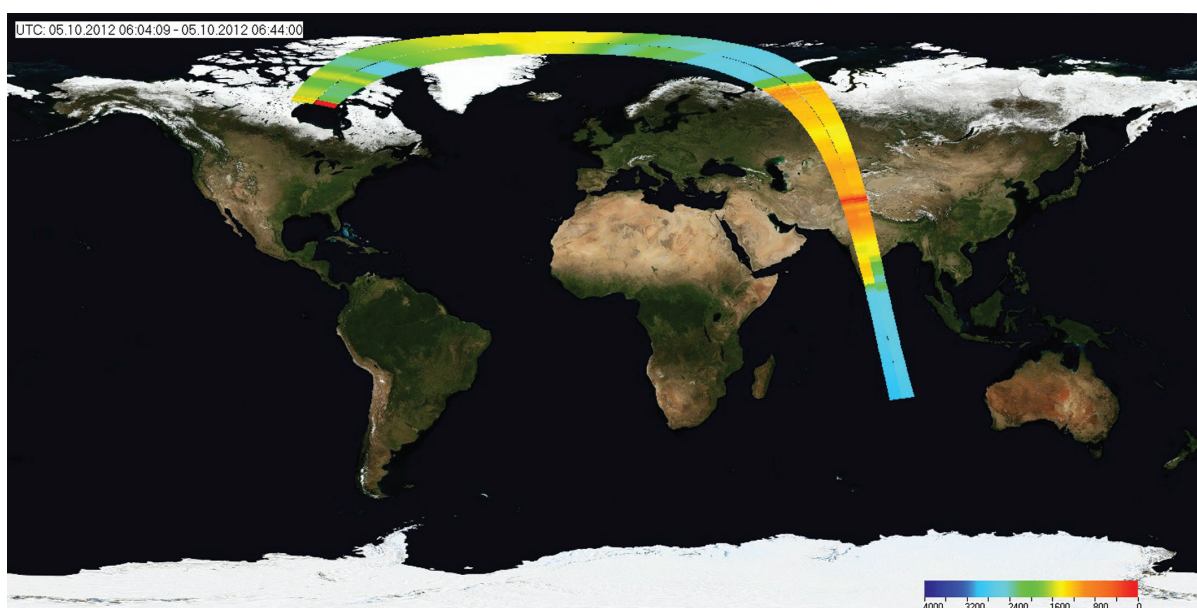


Рис. 4. Пример просмотрной формы по результатам измерений 5 октября 2012 г. при пролете над северной частью Земли (шкала псевдоцвета в условных единицах выходных сигналов)

Экспресс анализ полученных экспериментальных данных показал их высокое качество и пригодность для последующей тематической обработки.

Первые результаты измерений

Благодаря достаточно высокой стабильности работы СВЧ радиометра по сериям наблюдений удалось синтезировать интегральные изображения излучения Земли за различные интервалы времени. На *рис. 5* приведена синтезированная карта радиояркихостных

температур Земли по измерениям за март 2013 г. после предварительной калибровки. Калибровка данных осуществлялась по специально выбранным пространственно однородным областям поверхности Земли с известными характеристиками излучательной способности и другими параметрами, такими как температура поверхности, соленость воды, скорость приводного ветра и др. (Смирнов, Халдин, 2012).

На полученных СВЧ радиометрических изображениях хорошо видны характерные особенности излучения поверхности суши. В частности в Африке и Южной Америке выделяются границы пустынных и лесных зон.

Низкое пространственное разрешение радиометра не позволяет изучить детальную структуру параметров состояния объектов на суше. В этом случае важно изучение динамики изменений характеристик излучения, в том числе сезонных. Разработанная система планирования измерений позволяет наблюдать наиболее интересные с точки зрения научной программы области Земли с интервалом примерно в 1 месяц.

Для повышения точности и эффективности изучения объектов на суше планируется совместное использование СВЧ радиометрических данных Зонд-ПП и оптических измерений МСК.

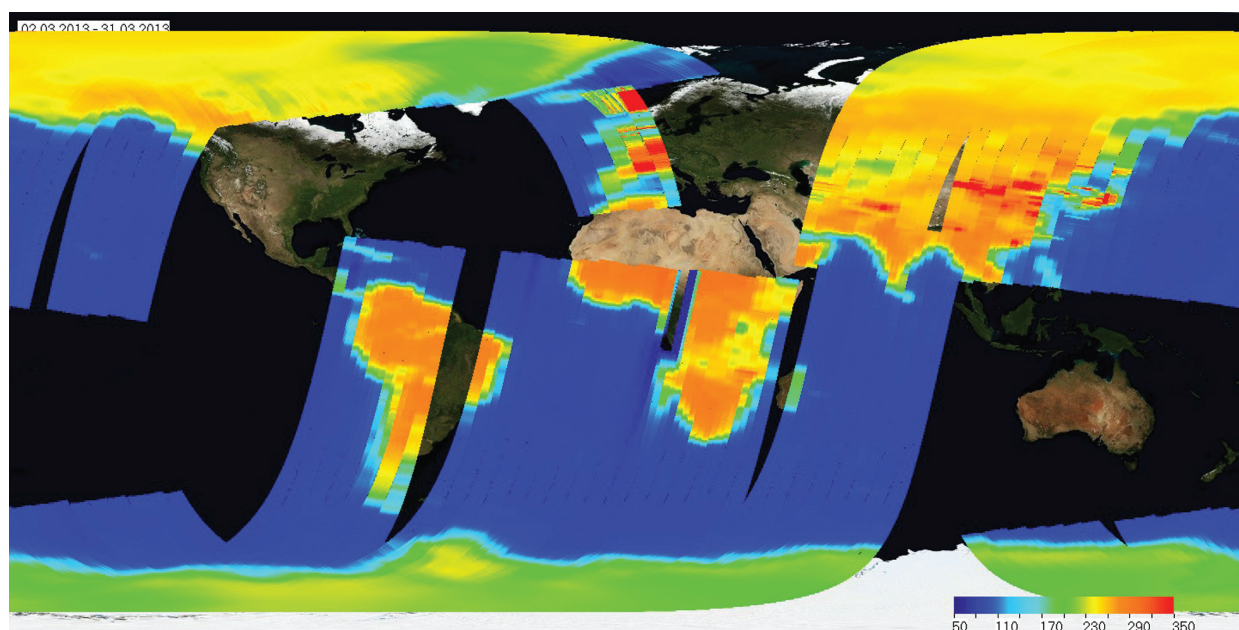
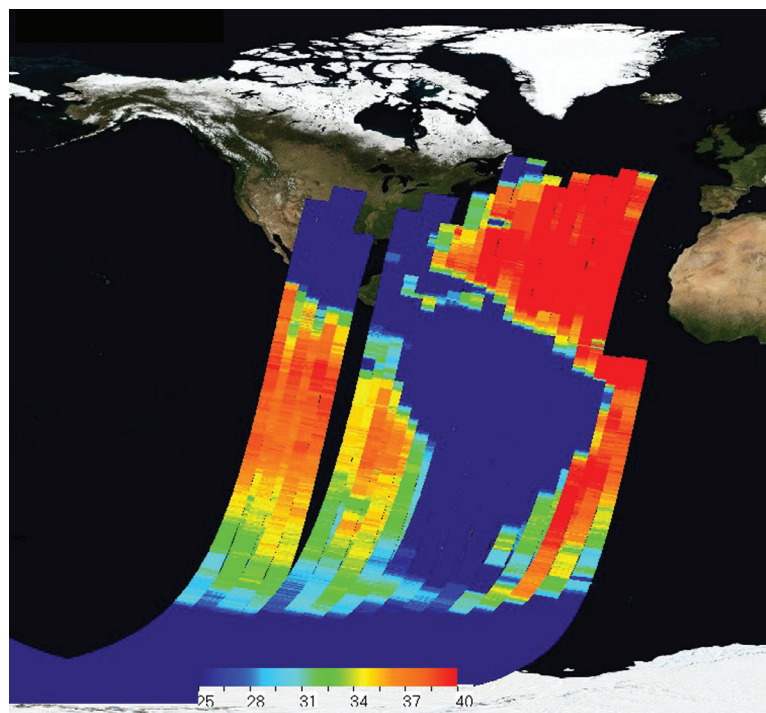


Рис. 5. Карта радиояркостных температур Земли по результатам всех измерений за март 2013 г. (шкала псевдоцветов в К)

Одной из основных задач космического эксперимента была проверка возможностей определения солености океанов и изучения ее динамики. Полученные результаты измерений позволили получить первые оценки солености поверхностного слоя воды. Предварительные оценки солености производились по регрессионному линейному алгоритму, связывающему измеренные радиояркостные температуры с соленостью океана аналогично (Zine et al., 2007).

На *рис. 6* приведены результаты предварительной оценки солености Атлантического и Тихого океанов вблизи Америки. Полученные результаты достаточно хорошо

согласуются с климатическими данными. В частности, наблюдаются более высокие значения солёности в показанных на рисунке областях Атлантического океана по сравнению с Тихим. Вместе с тем они имеют ряд существенных погрешностей, требующих дополнительного уточнения с учетом таких факторов, как текущее значение скорости приводного ветра, температуры поверхности и ряда других.



*Рис. 6. Предварительные оценки солёности океанов
(шкала псевдоцвета в промилле)*

В ходе измерений, направленных на определение солёности океанов, было экспериментально изучено влияние отраженного излучения Солнца на погрешности ее определения. При измерениях на освещенной стороне Земли оценки значений солёности океанов получились неправдоподобно большими, что говорит о необходимости учета этого фактора. В связи со сложностью расчетов текущих значений интенсивности солнечного излучения в месте измерений в дальнейшем использовались практически только измерения на теневой стороне Земли.

Другим интересным результатом следует считать демонстрацию возможности изучения морских льдов по пассивным измерениям в дециметровом диапазоне длин волн. На *рис. 7* представлена карта измеренного излучения Земли в районе Антарктиды. На ней хорошо видны области многолетних (зеленые тона) и однолетних (желтые тона) льдов. На *рис. 8* представлены карты сезонного максимального и минимального количества льдов вокруг Антарктиды в 2012 и 2013 г. по данным NASA. Сравнение их показывает достаточно хорошее совпадение границ однолетних льдов.

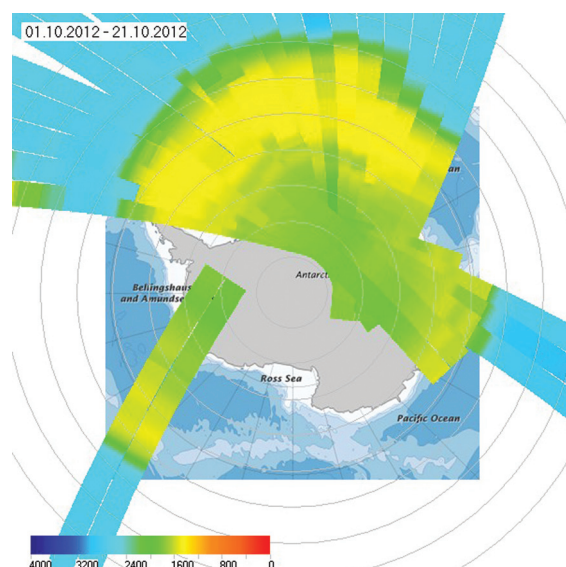


Рис. 7. Карта результатов измерений излучения Антарктиды за 01–21.10.2012 г. (условные относительные единицы)

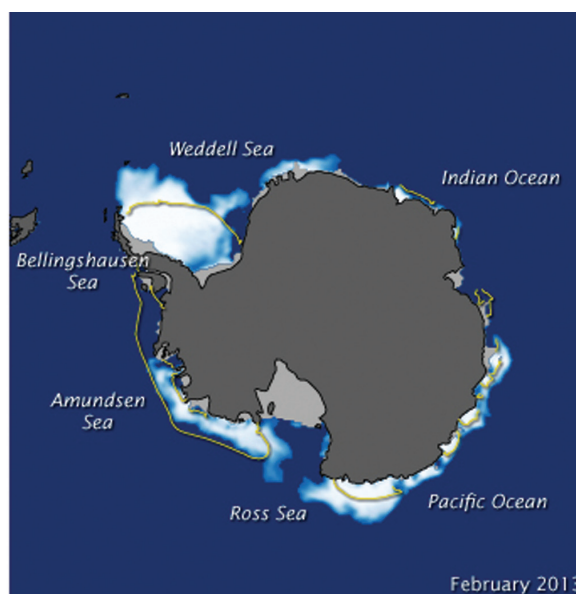
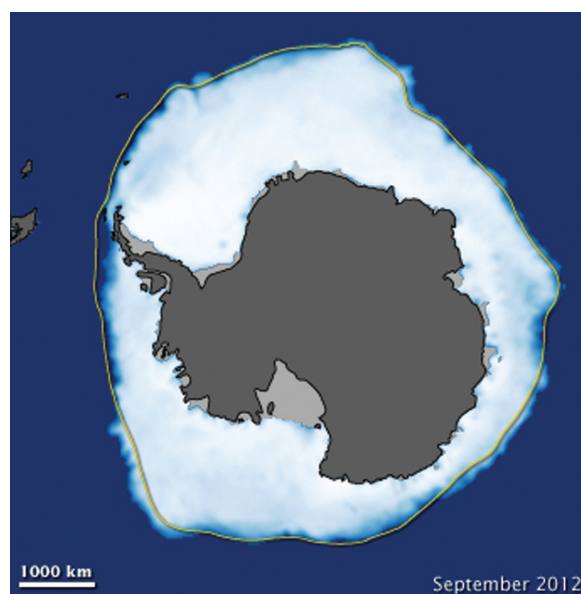


Рис. 8. Концентрация льдов Антарктиды в период максимума и минимума по данным NASA

Выводы

Анализ полученных данных показал, что они должны позволить решить основные задачи научной программы эксперимента. К настоящему времени получены следующие основные результаты:

- отработана методика съемки, позволяющая решать основные задачи научной программы;
- выполнен анализ помеховой обстановки, показавший, что большая часть Земли свободна от них;
- проведен анализ качества данных, стабильности аппаратуры;

- отработана методика и алгоритмы калибровки данных;
- получены предварительные оценки солености океанов;
- показана возможность определения типа льдов.

Литература

1. Арманд Н.А., Тищенко Ю.Г., Саворский В.П., Смирнов М.Т. О Научной программе космических экспериментов проекта «МКА-ФКИ» (ПН1) // Фундаментальные космические исследования, Новейшие разработки в области геоэкологического мониторинга Причерноморского региона и перспективы их реализации: Сб. статей. Болгария, Солнечный берег, 2008. С. 31–34.
2. Смирнов, М.Т., Халдин А.А. Предварительные результаты экспериментов с СВЧ радиометрическим комплексом L-диапазона на РС МКС // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 160–166.
3. Kerr Y.H., Waldteufel et al. The SMOS mission: new tool for monitoring key elements of the global water cycle // Proceedings of the IEEE . Vol. 98. No. 5. May 2010. P. 666–687.
4. Lagerloef G., Colomb F. R., Le Vine D., Wentz F., Yueh S., Ruf C., Lilly J., Gunn J., Yi C., De Charon A., Feldman G., and Swift C. The Aquarius/SAC-D mission.// Oceanography. 2008. Vol. 21. No. 1. P. 68–81.
5. Zine S., Boutin J., Reul N., Tenerelli J., Font J., Gabarró C., Talone M., Waldteufe P.I., Waldteufel P. SMOS sea surface salinity prototype processor: algorithm validation // IGARSS 2007. 2007. P. 3955–3958.

Experiment in passive microwave remote sensing of the Earth in L-band from a small satellite, the first results

**M.T. Smirnov¹, D.M. Ermakov¹, S.M. Maklakov¹,
A.A. Khaldin², A.E. Maksimov²**

¹ Fryazino Department of Institute of Radioengineering and Electronics RAS
Fryazino, Moscow region, Russia
E-mail: smirnov@ire.rssi.ru

² Special Design Bureau IRE RAS, Fryazino, Moscow region, Russia
E-mail: ahaldin@sdbireras.ru

A new experiment on the microwave radiometric remote sensing of the Earth in L band is carried out by means of specially developed scientific equipment installed on a small satellite MKA FKI No 1. Analysis of the data showed that they are of high quality and suitable for topical treatment to meet the challenges of the scientific program. This paper provides a brief description of scientific equipment and analyzes the quality of the information. The processing of information obtained first estimates the salinity of the oceans and demonstrate the possibility of studying the types of sea ice on passive measurements of radio waves in L band.

Keywords: microwave radiometry, remote sensing of the Earth.