

УДК 537.86:556+528.85

Микроволновые спутниковые системы для мониторинга гидрологических явлений*

И.В. Хвостов

Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия)

Microwave Satellite Systems for Hydrological Monitoring

I.V. Khvostov

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (Barnaul, Russia)

Рассматриваются действующие и перспективные системы спутниковой микроволновой радиометрии, позволяющие оценивать геофизические (гидрологические) параметры атмосферы, океана и суши. Дается сравнительная характеристика оперативно доступных для конечного пользователя наборов данных, приводятся примеры их интерпретации, обсуждаются алгоритмы и инструменты обработки и визуализации спутниковой информации. Приводится описание возможностей современных спутниковых систем для решения ряда конкретных задач дистанционного мониторинга на примере наблюдавшегося в 2014 г. алтайского паводка. Мониторинг значений влажности верхних слоев почвы в поймах рек в сочетании с метеорологическим прогнозом позволяет оценивать вероятность угрозы подтопления на отдельных участках по значениям предельной влагоемкости почв. Обсуждается обнаруженный при анализе динамики ежедневных спутниковых измерений яркостной температуры эффект изменения физических свойств льда при его разрушении, который может рассматриваться как предвестник изменения ледовой обстановки на крупных пресноводных водоемах. Приводится анализ сезонных вариаций яркостной температуры на примере о. Большое Медвежье (Канада).

Ключевые слова: мониторинг, микроволновый радиометр, спутниковые данные, гидрологические явления.

DOI 10.14258/izvasu(2020)1-07

Введение

Приоритетным направлением современных гидрологических и климатических исследований является развитие методов получения и обработки регулярных данных о полях геофизических параметров атмосферы, океана и материковых вод. Особое внимание уделяется оперативному мониторингу опасных гидрологических явлений (наводнения, ураганы,

This paper considers existing and promising satellite microwave radiometry systems suitable for the evaluation of geophysical (hydrological) parameters of atmosphere, ocean, and land. A comparative analysis is provided for data sets available for end-users. Algorithms and tools for processing and visualization of satellite data are discussed. The capabilities of modern satellite systems to perform specific tasks of remote sensing are described using the example of a river flood in the Altai region in 2014. Monitoring soil moisture of upper layers of soil on floodplains combined with meteorological forecasts allows assessment of the probability of river flooding at certain areas using values of maximum soil moisture capacity. The effect of changes in the physical properties of ice during its destruction is discussed. This effect has been discovered by analyzing the dynamics of daily satellite measurements of brightness temperatures. It can be considered as a harbinger of ice condition changes of large freshwater bodies. The analysis of brightness temperature seasonal variations is presented using the example of Lake Big Bear (Canada).

Key words: monitoring, radiometer, satellite data, hydrological phenomena.

шторма, сходы снежных лавин, отделения полярных айсбергов) [1].

Наряду с наземными станциями метеорологического мониторинга действуют системы спутникового наблюдения за полями и профилями физических характеристик атмосферы и земной поверхности. Орбитальные наблюдения ведутся в различных областях электромагнитного спектра с учетом погло-

*Работа выполнена в рамках государственного проекта и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-05-00753.

щающих свойств атмосферы: в окнах прозрачности атмосферы и вблизи полос поглощения атмосферными газами. Для радиометрических наблюдений характерны независимость от времени суток и погодных условий, глобальность и регулярность обзора, многоканальность, возможность восстанавливать количественные значения сразу нескольких геофизических параметров, низкое пространственное разрешение [2].

Методы микроволновой радиометрии основаны на измерении собственного радиотеплового излучения сред и объектов и последующей интерпретации этих измерений. Собственное тепловое излучение, обусловленное преобразованием внутренней тепловой энергии в энергию электромагнитного поля, имеет сплошной спектр, максимум энергии которого для большинства объектов окружающей среды приходится на инфракрасный (ИК) диапазон. В микроволновом (СВЧ) диапазоне электромагнитного спектра собственное радиотепловое излучение обладает существенно меньшей энергией, поэтому методы СВЧ радиометрии получили распространение лишь после появления высокочувствительных приемных устройств — радиометров.

Интенсивность и поляризация собственного радиотеплового излучения зависят не только от термодинамической температуры излучающих сред, но и от их строения, состава, объемных неоднородностей плотности, шероховатости поверхностей и других физических параметров, что является ключевым обстоятельством в методах радиометрии. Интерпретация измеренных радиометром величин и переход от них к геофизическим параметрам сред осуществляется с использованием радиационно-физических моделей зондируемых сред [3].

По данным спутниковых микроволновых радиометров, традиционно восстанавливают следующие геофизические параметры: для земной поверхности — толщину и водозапас снежного покрова, влажность поверхностного слоя почвы; для поверхности океана — соленость верхнего слоя, температуру поверхности, скорость приводного ветра, границу, сплоченность и тип ледяного покрова; для атмосферы — содержание водяного пара, содержание капельной влаги в облаках, интенсивность осадков, профили температуры и влажности.

Вопрос о том, как именно эти параметры влияют на вероятность возникновения конкретных чрезвычайных ситуаций, остается открытым, что обуславливает актуальность исследований в этом направлении. Цель работы состоит в разработке алгоритмов, позволяющих на основе оперативно доступных наборов спутниковых данных обнаруживать предвестники возникновения опасных гидрологических явлений.

1. Системы спутникового микроволнового мониторинга Земли, инструменты обработки и визуализации спутниковых данных

Спутниковые СВЧ радиометры регистрируют микроволновое излучение, восходящее из системы «атмосфера — подстилающая поверхность», поэтому на этапе интерпретации приходится учитывать также радиационные и абсорбционные свойства атмосферы. Данные радиометров космического базирования позволяют оценивать свойства подстилающей поверхности в окнах прозрачности атмосферы и восстанавливать свойства самой атмосферы в ее полосах поглощения. Принято считать, что для изучения земных поверхностей пригодна часть микроволновой области спектра $\lambda \geq 30$ мм, а область $\lambda \leq 16$ мм отводится для зондирования атмосферы.

Общая схема радиометрического спутникового зондирования выглядит следующим образом. В процессе движения спутника по орбите производится непрерывная череда измерений антенной температуры, каждое из которых ассоциируется с излучением, принимаемым из определенного углового сектора пространства или от определенного участка земной поверхности. В результате формируется упорядоченный массив значений измеряемой антенной температуры. Затем на этапе первичной обработки осуществляется переход к калиброванному распределению яркостной температуры восходящего из системы «атмосфера — подстилающая поверхность» радиотеплового излучения. В завершение по принятым радиационно-геофизическим моделям происходит переход к искомому распределению искомых геофизических параметров. Итоговой формой представления информации является, как правило, одномерное, двумерное или трехмерное распределение набора геофизических параметров в глобальной системе «атмосфера — подстилающая поверхность» или в некоторой ее локальной области. На качество получаемого в итоге научно-информационного продукта оказывает непосредственное или косвенное влияние множество самых разных факторов, включая выбор способа обзора пространства, параметры антенно-фидерной системы, радиотехнические и информационные возможности всего аппаратно-измерительного комплекса, применяемые методики измерения, калибровки и обработки, форма представления данных зондирования и т.д. [4].

В настоящее время на орбитах функционируют следующие космические аппараты, оснащенные СВЧ радиометрами: GCOM-W1 (сенсор AMSR2), серия метеорологических спутников DMSP (сенсоры SSM/I и SSMIS), Coriolis (сенсор WindSat), GPM (сенсор GMI), Метеор-М № 2 (сенсор МТВ3А-ГЯ), SAC-D (сенсоры Aquarius), SMOS (сенсор MIRAS) и др. Оперативные данные этих систем находятся в открытом или условно-открытом доступе. Для ана-

лиза также доступны многолетние архивы измерений выведенных из эксплуатации аппаратов.

Большинство радиометров космического базирования являются представителями однолучевых радиометрических систем с механическим пространственным сканированием луча в режиме конического вращения [5–9]. Сканирование ведется с помощью вращающегося параболического рефлектора, вблизи фокуса которого расположен набор рупорных облучателей, отвечающих за прием сигнала в нескольких частотных каналах отдельно на горизонтальной и вертикальной поляризациях. В отдельных системах реализована схема измерения полного поляризационного набора показателей потока излучения [7–10]. Сканирование выполняется под некоторым фиксированным углом к надиру, обеспечивая постоянный угол визирования поверхности (угол встречи луча с поверхностью), обычно из диапазона от 50° до 65° по отношению к местному зениту. Расхождение антенных лучей на разных каналах, обусловленное взаимным расположением рупорных облучателей (их разнесением в пространстве), составляет не более $0,5^\circ$. По мере движения спутника по орбите вращающийся луч ДНА описывает на подстилающей поверхности циклоидальную траекторию, формируя полосу обзора шириной от 500 до 2000 км. За единицу пространственного разрешения выбирается значение, близкое к величине смещения вдоль траектории проекции следа спутника на подстилающую поверхность за период сканирования (полного оборота луча), которое составляет от 3 до 15 км для различных систем.

Особое место среди радиометров космического базирования занимает 2D-интерферометр Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis (MIRAS), выведенный на орбиту в рамках проекта Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) Европейского космического агентства (ESA) в 2009 г. [10]. Сенсор MIRAS состоит из трех разнесенных на угол 120° компланарных плечей с набором из 69 равномерно распределенных (со смещением на $0,875 \lambda$) элементарных антенн L-диапазона, регистрирующих восходящее микроволновое излучение, определяя полный набор параметров Стокса. Длина плеча составляет около 3,6 м, что с учетом центрального концентратора дает общую длину цепочки около 4,1 м. Каждая из 69 элементарных антенн построена по технологии LICEF (Lightweight Cost-Effective Front-end) и является сложно-интегрированной patch-ячейкой, содержащей 2-поляризационную 4-входовую антенну, систему коммутации и поляризационной развязки, частотные фильтры (полоса 1404–1423 МГц), цепи приемника и аналого-цифровые преобразователи. Каждый LICEF модуль имеет довольно широкую диаграмму направленности: ширина главного лепестка по уровню половинной мощности составляет около

70° , коэффициент направленного действия (КНД) — около 8 db. Единовременно каждый модуль может работать только с одной поляризацией H или V, обеспечивая высокую поляризационную селективность (коэффициент кросс-поляризации составляет около 25 db). Измерения на отдельных поляризациях чередуются.

В соответствии с общепринятой концепцией интерферометрического Фурье-синтеза итоговые изображения строятся на основе корреляций между каждой парой элементарных практически независимых антенн. В отличие от сканирующих систем инструментальная запись всей сцены делается практически одновременно. Для сигналов со всех пар приемников вычисляются коэффициенты кросс-корреляции, а изображение строится посредством применения двумерного преобразования Фурье к полю коэффициентов корреляции. Расчет коэффициентов кросс-корреляции для каждой поляризации выполняется в течение периода 0,3 с. Дальнейшая обработка данных выполняется в режиме Full polarimetric mode: измерения на горизонтальной и вертикальной поляризациях чередуются с измерениями на кросс-поляризациях. В результате каждые 1,2 секунды формируется набор из четырех изображений. Сформированные изображения передаются с орбиты на Землю для дальнейшей обработки.

Поле яркостной температуры восстанавливается с пространственным разрешением, соответствующим расстоянию между самыми удаленными друг от друга приемниками. Величина синтезированной апертуры радиометра MIRAS обеспечивает пространственное разрешение 35 км в середине зоны обзора, называемой также Field of View (FOV). Угол визирования для разных точек сцены колеблется от 0 до 60° по отношению к местному зениту.

С высоты орбиты в диаграмму направленности приемников попадают участки земной поверхности размером до 3000 км. Однако с учетом принципов интерферометрии и благодаря Y-образной конфигурации размещения приемников зона обзора радиометра ограничивается областью около 900 км в поперечнике и по форме близка к неправильному шестиугольнику. Наблюдения в границах этой области свободны от фазовой неоднозначности (так называемая «alias-free» зона) [11]. Зона обзора формируется совокупностью взаимно перекрывающихся зон обзора элементарных приемников, каждая из которых представляет собой область шестиугольной формы с изогнутыми сторонами. Все элементарные зоны обзора имеют различные площади и углы наблюдения. Как следствие и радиометрическое разрешение не остается постоянным, составляя в среднем около 5 К в диапазоне измеренных значений яркостной температуры выше 200 К. В результате движения спутника по орбите каждая конкретная точка земной поверхности,

попадающая в поле зрения приемников, наблюдается с разных углов обзора.

Наиболее интересным с практической точки зрения представляется продукт L1C, который содержит измеренные на различных углах визирования значения радиоярких температур. Данные имеют географическую привязку к дискретной геодезической сетке ISEA 4N9 [12]. Продукт представлен в виде двух отдельных наборов данных: для поверхности суши (L1CL) и для поверхности океана (L1CS). Продукты L1C доступны в формате Earth Explorer и NetCDF. Для каждого файла продукта L1C формируется также соответствующая обзорная версия, содержащая значения ярких температур, интерполированных для угла наблюдения $42,5^\circ$. Продукты всех уровней обработки доступны для конечных пользователей с 2010 г. на ресурсах ESA.

2. Примеры использования спутниковых данных микроволнового диапазона для оценки предвестников опасных гидрологических явлений

На основе ежедневных данных радиометра MIRAS в 2014 г. удалось отследить движение паводковых волн на участке р. Обь протяженностью более 400 км [13]. Для анализа динамики развития паводка использовались данные радиометра MIRAS (продукт L1CL). Термодинамическая температура почвы оценивалась по данным MODIS/Terra (продукт MOD11A1). Для интерпретации данных SMOS значения ярких температур пересчитывались в значения относительной объемной влажности почвы W с использованием экспериментальных зависимостей, построенных по результатам лабораторных измерений диэлектрических характеристик почв (пойма, предгорные районы). Динамика паводка оценивалась на основе временных трендов относительной объемной влажности почвы на трех тестовых участках. Анализ динамики восстановленных полей влажности показал, что до начала ливневых осадков поверхностный слой почвы характеризовался обычными для этого времени года

значениями относительной объемной влажности 0.12–0.20. К началу паводка наблюдалось резкое возрастание относительной объемной влажности почвы вдоль всей поймы до значений 0.30–0.35, соответствующих значениям предельной влагоемкости для местных почв. Таким образом, непрерывные дистанционные наблюдения за динамикой влажности почвы в поймах рек в предшествующий весеннему паводку период позволяют оценить их «сорбционный потенциал» — способность поглотить и распределить приносимую извне влагу. Приближение значений влажности верхних слоев почвы к границе предельной влагоемкости свидетельствует о возникновении угрозы подтопления. За последующий период с 2015 по 2019 г. подобных высоких значений относительной объемной влажности на выбранных участках, по данным SMOS, не наблюдалось, как и наводнений подобного масштаба.

Другим примером применения спутниковых данных L-диапазона для оценки предвестников опасных гидрологических явлений может послужить особенность в радиоизлучении ледяного покрова пресноводных водоемов, возникающая на начальных стадиях его разрушения, которая была впервые обнаружена на о. Байкал и Ладожское [14]. По данным радиометра MIRAS (продукт L1CL), установлено, что в сезонной динамике радиоярких температур системы «вода — лед» на частоте 1,4 ГГц на горизонтальной (H) и вертикальной (V) поляризациях присутствуют характерные области. Полученные автором новые результаты для центральной части пресноводного о. Большое Медвежье (DGG_ID 74453: 65.973 С.Ш. 120.553 З.Д.) за последние два года представлены на рисунке. Для обеспечения максимальной достоверности исходных данных из анализа исключались измерения, отягощенные влиянием радиочастотных помех, измерения с радиометрической точностью хуже 5 К, а также измерения со значениями коэффициента поляризации (T_{BH} / T_{BV}) менее 0,01 или более 0,99.

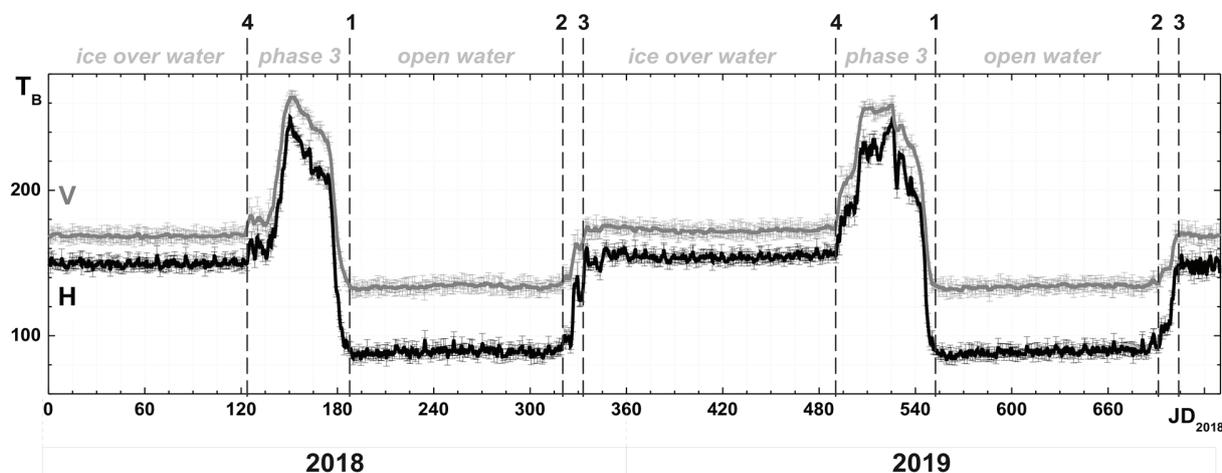


Рис. Сезонные вариации яркостной температуры поверхности пресноводного о. Большое Медвежье (Канада). Угол зондирования $42,5^\circ$. Цифрами над графиком обозначены границы характерных областей

В период открытой воды (область 1-2) характерные значения яркостной температуры составляют 84–92 К на горизонтальной поляризации и 130–138 К на вертикальной поляризации, вариации определяются термодинамической температурой водной поверхности и волнением. Резкое возрастание значений яркостной температуры до значений 148–160 К на горизонтальной поляризации и 166–178 К на вертикальной поляризации связано с появлением ледового покрова (область 2-3). В период установившегося ледяного покрова (область 3-4) осцилляции яркостной температуры объясняются интерференционной картиной, возникающей при отражении излучения от верхней и нижней границы ледяного покрова [3]. Лед в этот период практически свободен от трещин и влаги и как следствие характеризуется низкими диэлектрическими потерями. Глубина формирования излучения с длиной волны 21 см значительно превосходит толщину льда, и ледяной покров выступает в качестве дополнительного излучающего слоя к излучению водной поверхности. Освобождению поверхности пресноводного водоема ото льда предшествует особый переходный период (область 4-1), сопровождающийся временным возрастанием яркостной температуры на 85–90 К (до значений, характерных для соленого морского льда). В этот период интенсивного таяния происходят кардинальные изменения в структуре ледяного покрова пресноводных водоемов. Появление большого количества трещин и последующее их насыщение жидкой водой изменяет диэлектрические свойства льда — значительно увеличивается поглощение электромагнитного излучения, что вызывает повышение яркостной темпера-

туры ледяного покрова и экранирование микроволнового излучения, идущего от водной поверхности. Возможность возникновения данного эффекта подтверждена модельными расчетами в адаптированной для пресноводных озер системе «вода — лед — снег — атмосфера» [15]. Обнаруженный эффект позволяет предсказывать весеннее изменение гидрологического режима крупных пресноводных озер по спутниковым данным L-диапазона.

Заключение

Подход к поиску предвестников опасных гидрологических явлений, связанный с анализом динамики восстановленных физических параметров природных сред, достаточно хорошо зарекомендовал себя. Однако большинство реальных сред представляет собой сложные мультикомпонентные структуры. Моделирование их излучения является непростой многопараметрической задачей, решение которой невозможно без априорных данных и представления о процессах, происходящих в этих средах. В таких случаях анализ первичных радиометрических характеристик сред может быть также продуктивен. Современные радиометрические комплексы развиваются в направлении многоканальности и поляризованности регистрирующей аппаратуры, сопровождаются бортовыми радиолокаторами. Новейшие многолучевые системы и системы с синтезированием апертуры обеспечивают регистрацию излучения сред сразу с нескольких углов визирования. Таким образом, объем первичной радиометрической информации существенно увеличивается, что открывает возможности для развития новых алгоритмов ее обработки и интерпретации.

Библиографический список

1. Stampoulis D., Andreadis K.M., Granger S.L., et al. Assessing hydro-ecological vulnerability using microwave radiometric measurements // *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 184. DOI:10.1016/j.rse.2016.06.007.
2. Lorenz C., Montzka C., Jagdhuber T., et al. Long-Term and High-Resolution Global Time Series of Brightness Temperature from Copula-Based Fusion of SMAP Enhanced and SMOS Data // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10 № 11. DOI: 10.3390/rs10111842.
3. Tikhonov V.V., Boyarskii D.A., Sharkov E.A., et al. Microwave Model of Radiation from the Multilayer “Ocean-atmosphere” System for Remote Sensing Studies of the Polar Regions // *Progress in Electromagnetics Research B*. 2014. Vol. 59. DOI: 10.2528/PIERB14021706.
4. Данилычев М.В., Кутуза Б.Г. Современные спутниковые радиометры микроволнового диапазона // VI Всероссийские Арmandовские чтения. Муром, 2016.
5. Митник Л.М., Митник М.Л., Заболотских Е.В. Спутник Японии GCOM-W1: моделирование, калибровка и первые результаты восстановления параметров океана и атмосферы // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10. № 3.
6. Maeda T., Kazumori M., Aonashi K., et al. Descriptions of GCOM-W1 AMSR2 Level 1R and Level 2 Algorithms. NDX-120015A // *Japan Aerospace Exploration Agency*. 2013.
7. Gaiser P.W., Germain P.W., Twarog E.M. et al. The WindSat Spaceborne Polarimetric Microwave Radiometer: Sensor Description and Early Orbit Performance // *IEEE TGRS*. 2004. Vol. 42. № 11. DOI:10.1109/TGRS.2004.836867.
8. Hilburn K.A., Meissner T., Wentz F.J., et al. Ocean Vector Winds From WindSat Two-Look Polarimetric Radiances // *IEEE TGRS*. 2016. Vol. 54. № 2. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2469633.

9. Zhang L., Yin X., Shi H., et al. Hurricane Wind Speed Estimation Using WindSat 6 and 10 GHz Brightness Temperatures // *Remote sensing*. Vol. 8. № 9. DOI: 10.3390/rs8090721.

10. Gutierrez, A., Castro, R., and Vieira P.: SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model, DEIMOS Engenharia, Lisboa, Portugal. 2014

11. Яценко А.С., Бобров П.П. Особенности обработки данных SMOS Level 1C в задачах дистанционного зондирования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 3. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-78-91

12. Sahr, K., White, D., and Kimerling, A. J. Geodesic Discrete Global Grid System // *Cartography and Geographic Information Science*. 2003. V. 30. № 2.

13. Romanov A.N., Khvostov I.V. Microwave Remote Monitoring of Altai Catastrophic Flood Dynamics Using SMOS Data // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2015. Vol. 12. № 10. DOI: 10.1109/LGRS.2015.2444592.

14. Хвостов И.В., Романов А.Н., Тихонов В.В. и др. Некоторые особенности микроволнового радиотеплового излучения пресноводных водоемов с ледовым покровом // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 4. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-149-154.

15. Tikhonov V., Khvostov I., Romanov A., et al. Theoretical study of ice cover phenology at large freshwater lakes based on SMOS MIRAS data // *The Cryosphere*. 2018. Vol. 12. DOI: 10.5194/tc-12-2727-2018.