

Натурные исследования угловых зависимостей третьего параметра Стокса излучения морской поверхности на частоте 37 ГГц

Д. С. Сазонов, И. Н. Садовский, А. В. Кузьмин, Е. В. Пашинов

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: sazonov_33m7@mail.ru*

Выполнен анализ новых экспериментальных измерений азимутальных вариаций микроволнового излучения взволнованной водной поверхности. Экспериментальные данные получены с помощью микроволновых радиометров с рабочей частотой ~37 ГГц (длина волны ~8 мм) на океанографической платформе Черноморского гидрофизического полигона РАН в период с 19 сентября по 6 октября 2023 г. Измерения азимутальных зависимостей (в диапазоне от 73 до 251°) выполнялись на углах: 10, 25, 40, 55, 65° от надира. Из всего набора экспериментальных данных были отобраны только те, которые соответствовали стабильному направлению ветра при скорости более 10 м/с. Третий параметр Стокса вычислялся как разница яркостной температуры, полученной на поляризации, повернутой на +45 и –45° относительно вертикальной. Предварительно выполнялась операция внешней калибровки по излучению абсолютно чёрного тела и излучению небосвода. Угол анизотропии вычислялся как разница между направлением ветра (измеряемым метеокомплексом) и направлением визирования. Полученные угловые зависимости сравнивались с моделью переноса излучения, используемой при анализе спутниковых измерений. Показано, что измеренные азимутальные зависимости третьего параметра Стокса описываются в рамках модельного приближения лишь частично. В качестве основной причины наблюдаемых расхождений следует указать существенные ограничения рассматриваемой модели в условиях неразвитого волнения. Результаты эксперимента пополняют банк данных, используемый для модернизации развиваемой в Институте космических исследований РАН двухмасштабной модели формирования излучения.

Ключевые слова: азимутальная анизотропия, эксперимент, дистанционное зондирование, радиояркостная температура, микроволновое излучение, моделирование, МТВЗА-ГЯ

Одобрена к печати: 18.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-309-319

Введение

В настоящее время многие научные и практические задачи метеорологии, климатологии, рационального природопользования и других направлений успешно решаются с помощью анализа измерений, получаемых дистанционно. Определение физико-химических параметров системы «подстилающая поверхность – атмосфера» с искусственных спутников Земли выполняется с помощью различных средств измерений, к которым относятся: радиометры, скаттерометры, спектрометры, фотографические системы и др. Полученные в результате измерений параметры (например: температура поверхности, паросодержание в атмосфере, скорость ветра и многие другие) используются в различных прогностических моделях, ретроспективном анализе, а также востребованы для фундаментальных исследований физических процессов, происходящих на нашей планете.

Один из мощных инструментов дистанционного зондирования Земли — микроволновая радиометрия. К важным достоинствам данного метода относятся: всепогодность, глобальный охват поверхности и возможность восстанавливать большое число физических параметров поверхности и атмосферы. Ещё одно неоспоримое преимущество микроволновой радиометрии — возможность оперативного мониторинга труднодоступных районов суши и Мирового океана, который и является объектом исследования данной работы.

В настоящее время существует много радиометрических приборов, данные которых используются для оценки скорости ветра. Это ATMS (*англ.* Advanced Technology Microwave

Sounder), MWRI-1 (*англ.* Micro-Wave Radiation Imager 1), SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager/Sounder), AMSR-2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) (Surussavadee, Staelin, 2010; Zabolotskikh, Chapron, 2015; Zhang et al., 2018). Среди отечественных есть серия приборов МТВЗА (Модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы), которые запускались на КА «Метеор-М» № 1 (2009), «Метеор-М» № 2 (2014), «Метеор-М» № 2-2 (2019), «Метеор-М» № 2-3 (2023) и «Метеор-М» № 2-4 (2024) (Барсуков и др., 2021). Большинство спутниковых радиометров проводят измерения только на вертикальной (*V*, *англ.* Vertical) и горизонтальной (*H*, *англ.* Horizontal) поляризации. При этом известно, что подобный подход даёт существенную неопределённость при попытке восстановить направление ветра. Среди всех спутниковых радиометров был запущен только один — WindSat (Gaiser et al., 2004), который выполняет измерения на поляризациях, повернутых на $\pm 45^\circ$ относительно вертикальной, что позволяет корректно решать обратную задачу восстановления вектора скорости приповерхностного ветра. На приборах серии МТВЗА тоже планируют устанавливать полностью поляриметрические радиометры. Однако у приборов МТВЗА угол встречи с Землёй составляет 65° (в отличие от большинства зарубежных аналогов, у которых это значение лежит в пределах $51\text{--}53^\circ$). Это значит, что большинство моделей, используемых для интерпретации радиометрических данных измерений приборов-аналогов, к МТВЗА применить нельзя и поэтому необходимо проводить дополнительные натурные исследования с геометрией, приближенной к схеме сканирования российского прибора.

В настоящее время точность определения модуля вектора скорости ветрового потока на основе радиометрических измерений составляет порядка $1\text{--}2$ м/с. Восстановление направления ветра — более сложная задача и на сегодняшний день может быть решена с точностью порядка 20° , что для ряда практических приложений недостаточно. Указанная погрешность связана с несовершенством моделей, которые используются при интерпретации радиометрических измерений собственного восходящего радиоизлучения взволнованной водной поверхности и атмосферы. Корректировка и дополнение моделей возможна только при наличии качественных данных, полученных в ходе натурных измерений при контролируемых метеословиях. Поэтому постановка натурных экспериментов и тщательный анализ полученных в нём данных являются критически важными для развития методов обработки данных дистанционного зондирования Земли из космоса.

Цель настоящей работы заключается в анализе данных экспериментальных измерений, полученных в ходе натурального эксперимента в сентябре 2023 г. на Черноморском гидрофизическом полигоне РАН (ЧГП РАН), направленного на исследование эффекта азимутальной анизотропии собственного восходящего радиоизлучения водной поверхности.

Азимутальная анизотропия

Собственное радиотепловое излучение взволнованной водной поверхности в значительной степени изотропно. Несмотря на это, существует небольшая добавка в виде анизотропного излучения. Эта добавка получила название «эффект азимутальной анизотропии». Впервые этот эффект был обнаружен в 70-х гг. XX в. в ходе проводившихся в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) экспериментов по радиотепловому зондированию морской поверхности с борта самолёта-лаборатории при помощи размещённых на нём различных радиометрических систем с антеннами, установленными в надир (Беспалова и др., 1982).

Эффект азимутальной анизотропии — это изменение радиоизлучения взволнованной водной поверхности в зависимости от угла между направлением ветра и направлением зондирования (*рис. 1*, см. с. 311). Величина вариации радиоизлучения зависит в первую очередь от скорости ветра и вертикального угла наблюдения. Например, при отсутствии ветра водная поверхность гладкая и азимутальная вариация радиоизлучения отсутствует. В случае наблюдения в надир азимутальная анизотропия превращается в поляризационную (частный случай). Величина анизотропии для настильных углов наблюдения больше, чем для надирных (Гречко и др., 1991). В меньшей степени анизотропия зависит от физико-химических свойств воды.

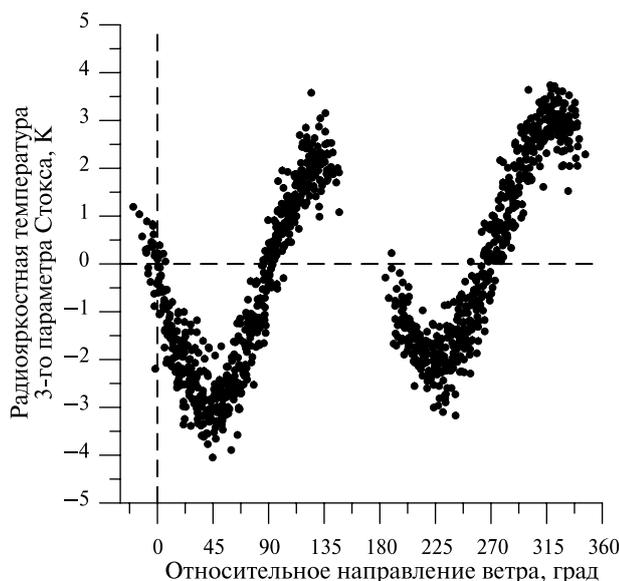


Рис. 1. Накопленные измерения азимутальной анизотропии третьего параметра Стокса на частоте 36,5 ГГц для угла 25° и скорости ветра 15 м/с. Данные получены в эксперименте 2019 г. на платформе ЧГП РАН (Sazonov et al., 2020)

Общепринято азимутальную анизотропию описывать гармоническими функциями: чётной для первого ($S1$) и второго ($S2$) (вертикальной и горизонтальной поляризации) и нечётной для третьего ($S3$) и четвёртого ($S4$) параметров Стокса:

$$T_{\text{Я}}(\varphi) = \begin{cases} a_0 + a_1 \cdot \cos(\varphi) + a_2 \cdot \cos(2\varphi); & \nu, h(S1, S2); \\ a_0 + a_1 \cdot \sin(\varphi) + a_2 \cdot \sin(2\varphi); & S3, S4, \end{cases} \quad (1)$$

где φ — направление ветра; $T_{\text{Я}}$ — радиояркость температура. Для исследования анизотропии анализируются только коэффициенты a_1 и a_2 , а коэффициент a_0 , связанный с постоянным уровнем, в данной задаче не рассматривается. В формуле (1) $T_{\text{Я}}$ зависит от угла наблюдения θ и от скорости ветра на высоте 10 м от поверхности U_{10} , так же как и коэффициенты a : $a_i = a_i(\theta, U_{10})$.

Существует несколько моделей азимутальной анизотропии для микроволновой частоты, используемых на спутниках дистанционного зондирования. Например, исследования в ИКИ РАН с самолёта-лаборатории Ан-12 (Ирисов и др., 1990; Irisov et al., 1991), в ETL-NOAA (англ. Environmental Technology Laboratory National Oceanic and Atmospheric Administration) — с дирижабля в эксперименте COPE (англ. Coastal Ocean Probing Experiment) (Trokhimovski et al., 2000), в JPL-NASA (англ. Jet Propulsion Laboratory National Aeronautics and Space Administration) — с самолётов-лабораторий DC-8 и P-3 (St. Germain et al., 2002; Yueh et al., 1999). Анализ спутниковых измерений анизотропии представлен в работах (Meissner, Wentz, 2012; Shannon et al., 2006; Tran et al., 2002). Подробнее обзор моделей приведён в публикациях (Сазонов, 2018; Сазонов и др., 2018). В настоящей работе качественное сравнение будет проводиться с моделью, представленной в статье (Meissner, Wentz, 2012).

Обзор эксперимента на ЧГП РАН

Начиная с 2005 г. на океанографической платформе ЧГП РАН проводятся комплексные исследования взаимодействия океана и атмосферы с помощью микроволновых радиометрических измерений. Океанографическая платформа расположена на южной оконечности п-ова Крым близ пос. Качивели, Крым, Россия (географические координаты: $44^\circ 23' 35''$ с. ш., $33^\circ 59' 04''$ в. д.). Платформа находится на удалении 600 м от берега, глубина моря в этом месте

порядка 30 м. Более подробную информацию об океанографической платформе и проводимых на ней экспериментах можно узнать в работе (Кузьмин и др., 2009). Экспериментальные исследования на океанографической платформе проводились в 2005, 2007, 2009, 2012, 2016, 2019 и 2023 гг.

Сканирование водной поверхности осуществлялось с помощью радиометрических приёмников, закреплённых на специальных поворотных платформах «Траверс» и «Траверс-2», разработанных в ИКИ РАН. В разные годы набор радиометрических приборов менялся, однако радиометры с частотой порядка 36 ГГц использовались в каждом эксперименте. Поворотно-сканирующая платформа размещалась на конце выноса высотой 4 м (с 2005 по 2012 г.) и 12 м (с 2016 по 2019 г.) над уровнем моря. Сканирование осуществлялось в вертикальном направлении от 10 до 180° и в горизонтальном — от 73 до 251° (относительно направления на север). Управление поворотной-сканирующей платформой и регистрация данных проводились с помощью персональных компьютеров. Наиболее подробно порядок сканирования водной поверхности и атмосферы для экспериментов 2005–2019 гг. описан в работах (Сазонов и др., 2018; Sazonov et al., 2020).

В эксперименте 2023 г. азимутальное сканирование выполнялось на углах: 10, 25, 40, 55, 65° от надира для водной поверхности и на углах 170, 155, 140, 125, 115° для атмосферы. Сканирование на углах обзора атмосферы позволяет оценить горизонтальную неоднородность её нисходящего излучения.

Измерения радиояркой температуры проводились посредством двух независимых радиометров Р08П-1 и Р08П-2 на вертикальной, горизонтальной поляризации, а также на повернутых на +45 и –45° поляризациях (Анискович и др., 2016). Оба радиометра являются приёмниками прямого усиления с центральной частотой 36,0 ГГц и полосой 2 ГГц. Изменение поляризации осуществляется вращателем с использованием эффекта Фарадея. Наиболее полную информацию о проблематике и методах настройки ячейки Фарадея для достижения точности настройки поляризации приборов на уровне $\pm 0,3^\circ$ можно найти в работе (Кузьмин, Стерлядкин, 2024).

Дополнительно к радиометрическим проводились измерения основных метеопараметров с помощью автономных метеокомплексов МК-15, а именно: скорости ветра U , направления ветра D , атмосферного давления P , относительной влажности H и температуры атмосферы T_A . Температура воды T_B и температура радиопоглощающего материала (чёрного тела) $T_{\text{ЧТ}}$ измерялась термодатчиками. Также производилась периодическая фотосъёмка состояния поверхности моря и атмосферы с помощью веб-камеры, установленной на поворотной-сканирующей платформе.

Экспериментальные измерения радиотеплового излучения взаимодействия морской поверхности и атмосферы были проведены с 19 сентября по 6 октября 2023 г. Температура воды за указанный период изменялась от 20 до 22,5 °С. Температура воздуха колебалась в пределах от 17 до 26 °С. Скорость ветра достигала 25 м/с.

На основе экспериментальных измерений третий параметр Стокса вычисляется как разность между измеренной радиояркой температурой на поляризациях $\pm 45^\circ$: $S_3 = T_{\text{я}}^{+45} - T_{\text{я}}^{-45}$. Угол анизотропии ϕ рассчитывается как разница между направлением наблюдения в эксперименте и направлением ветра (оба направления отсчитываются от направления на север). Для исследований эффекта азимутальной анизотропии третьего параметра Стокса изменения температуры воды и воздуха имеют меньшие значения, чем скорость и направление ветра. Также на основе имеющегося у авторов опыта для получения качественных зависимостей необходимо выбирать экспериментальные данные, полученные при больших скоростях ветра (более 7 м/с) и при стабильном направлении ветра (соответственно, при развитом (или приближенном к нему) волнении). На рис. 2 (см. с. 313) приведены метеоданные для скорости и направления ветра в месте эксперимента. Среди накопленных данных только на двух временных отрезках можно выделить условия с большой скоростью и стабильным направлением ветра. Это отрезки с 24 сентября 10:00 до 27 сентября 21:00 и с 1 октября 21:00 до 2 октября 10:00 2023 г. (время московское). Указанные отрезки времени обозначены на графике серым цветом.

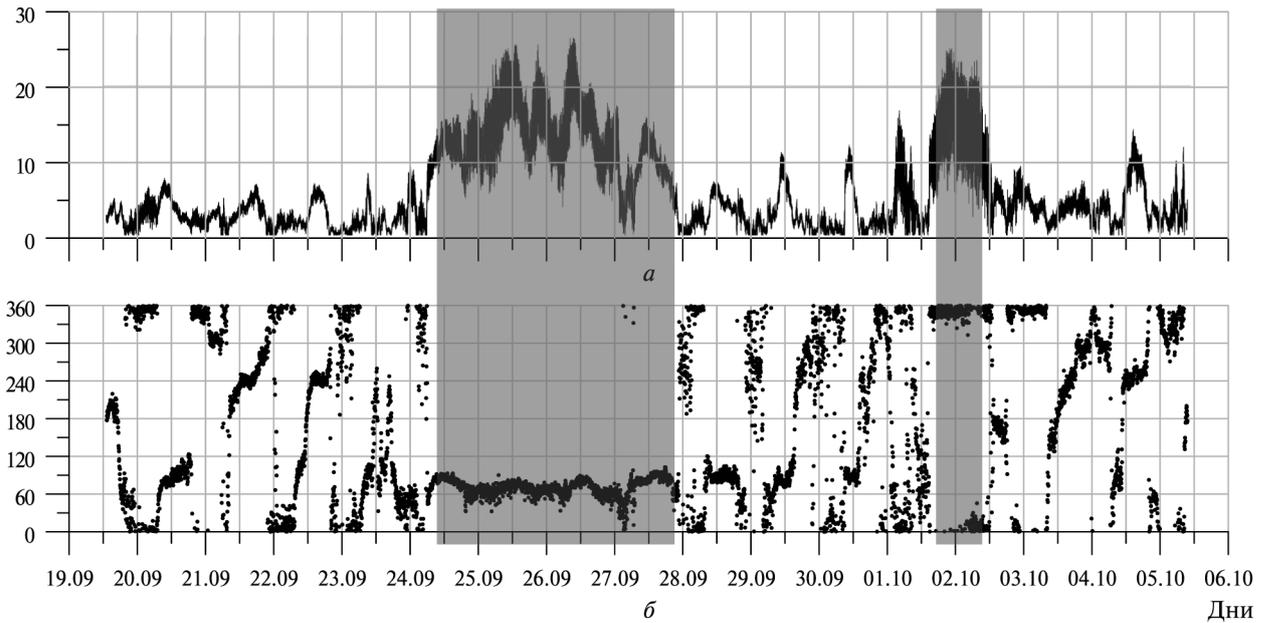


Рис. 2. Скорость (в м/с) (а) и направление (в град) (б) ветра, зарегистрированные в эксперименте 2023 г.

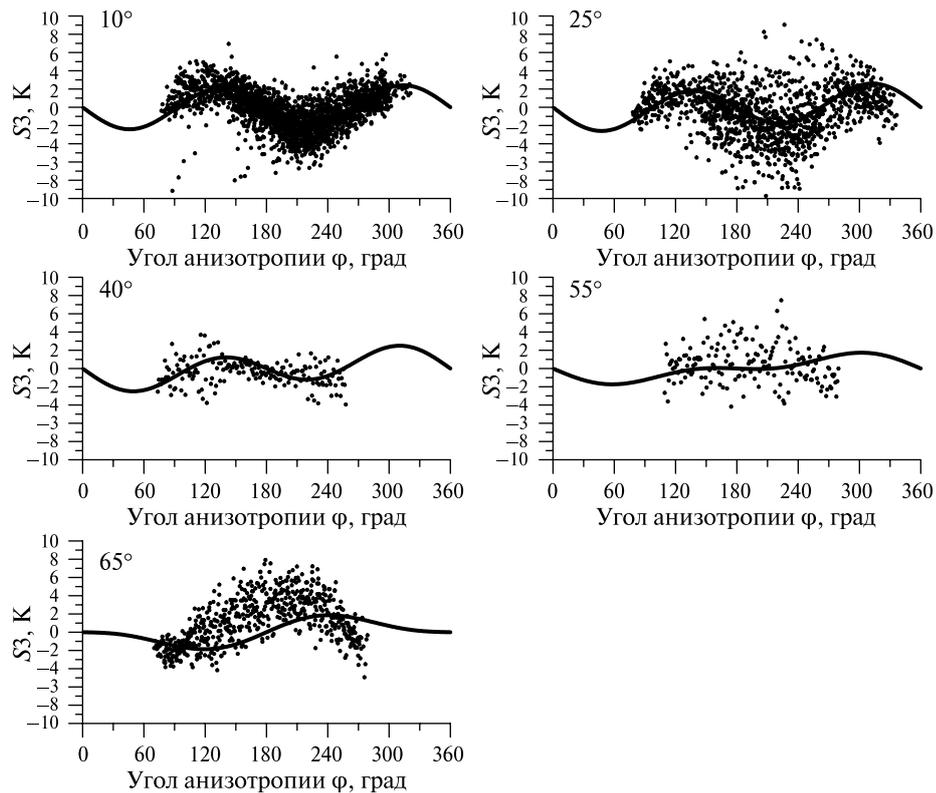


Рис. 3. Азимутальная анизотропия по данным радиометра P08П-1 для скорости ветра 10 м/с. Линиями представлены расчёты по модели (Meissner, Wentz, 2012)

Полученные в ходе эксперимента радиометрические измерения были откалиброваны для вычисления значений в терминах радиояркостной температуры. В ходе калибровки использовались модели абсолютно чёрных тел с известной термодинамической температурой (49,85 и 13,35 °С) и коэффициентами излучения (0,985), а также результаты измерений нисходящего излучения атмосферы на различных углах наблюдения. Включение этого набора данных

в процедуру итерационного поиска калибровочных коэффициентов позволило определять их абсолютные значения, а также величину интегрального поглощения атмосферы на рабочей частоте приёмника.

Для обоих радиометров Р08П-1 и Р08П-2 была получена радиояркостная температура (на поляризациях $\pm 45^\circ$) водной поверхности для всех сканов в азимутальной плоскости. Всего за время эксперимента получено 434 азимутальные зависимости, среди которых только для 128 были выполнены условия по скорости и стабильному направлению ветра. На *рис. 3* (см. с. 313) представлены данные об азимутальной анизотропии, полученные с помощью радиометра Р08П-1, для скорости ветра 10 м/с. Также на графике приводится азимутальная анизотропия в соответствии с моделью (Meissner, Wentz, 2012).

Результаты

Представленные на *рис. 3* графики наглядно демонстрируют наличие эффекта азимутальной анизотропии на всех выбранных вертикальных углах визирования. Аналогичная картина прослеживается и для данных, полученных с помощью второго радиометра (Р08П-2). Графики, аналогичные *рис. 3*, получены для скорости ветра в диапазоне от 10 до 18 м/с. Для меньшей скорости ветра данных очень мало или вообще нет. Большой разброс на графиках объясняется наличием на поверхности волновых компонент, длина которых соизмерима с размерами пятна диаграммы направленности радиометра (соответствующего геометрии сканирования). Подробнее расчёт геометрии области наблюдения описан в работе (Сазонов и др., 2016).

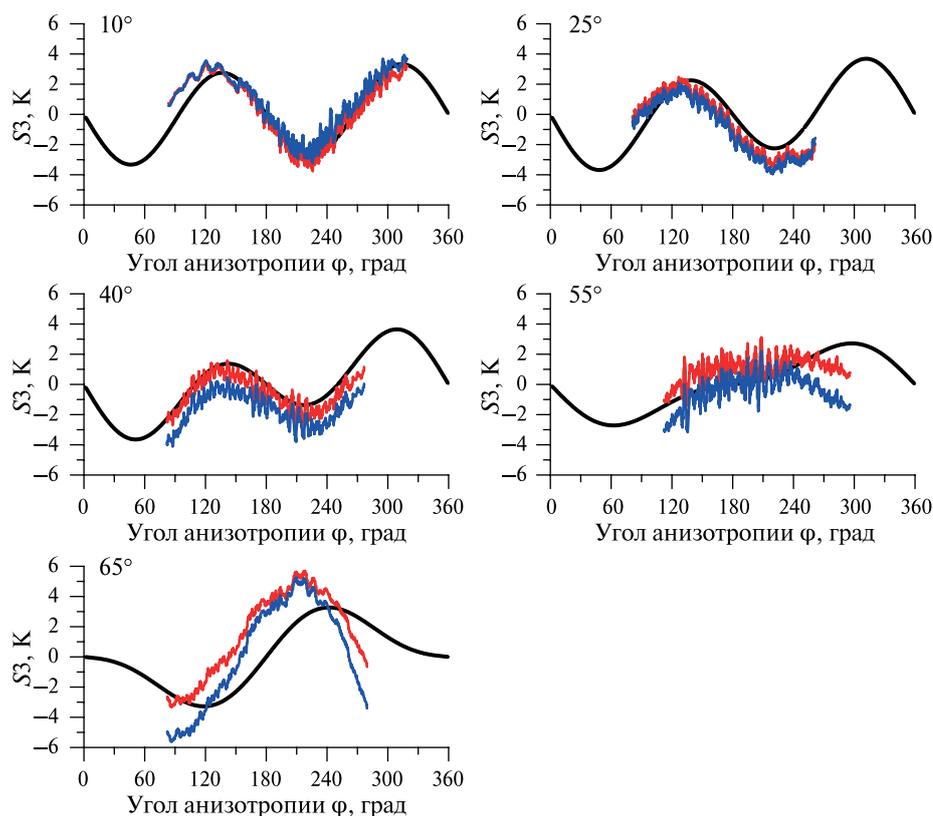


Рис. 4. Усреднённые значения азимутальной анизотропии по данным радиометров Р08П-1 (красные линии) и Р08П-2 (синие линии) для скорости ветра 15 м/с. Чёрными линиями представлены расчёты по модели (Meissner, Wentz, 2012)

Для устранения влияния модуляции длинными волнами было выполнено усреднение накопленных данных (*рис. 4*). На данном рисунке приводятся графики азимутальной зави-

симости для обоих радиометров, использованных в эксперименте. Представленные данные получены при средней скорости ветра 15 ± 1 м/с. Усреднение проводилось скользящим окном с шириной в 5° . Полученные зависимости для всех проанализированных величин скорости ветра адекватно (кроме угла в 65°) описываются привлекаемой моделью (чёрная линия). Отдельно стоит отметить, что на угле в 65° экспериментальные данные по форме сходятся между собой (для двух приборов), однако достаточно сильно расходятся с модельными представлениями (см. *рис. 3* и *4*). По мнению авторов настоящей работы, несмотря на имеющуюся возможность выполнения модельных расчётов на этом угле визирования, корректность работы используемой модели ставится под сомнение (в виду сильной ограниченности экспериментальных данных, привлекаемых для её создания).

Наблюдаемая разница в показаниях отдельных приборов (как видно из графика на *рис. 4*), растущая при увеличении вертикального угла наблюдения и проявляющаяся в изменении среднего уровня кривых, возникает (как показано в работе (Садовский, 2020)), когда плоскость поляризации настроена некорректно. Конкретно в данном эксперименте, такой эффект вызван не сбоем настройки поляризации, а точностью установки второго (P08П-2) радиометрического прибора на поворотной платформе. Его отклонение от вертикали составляло порядка 1° . Таким образом, в очередной раз подтверждена крайняя актуальность точного позиционирования приборов при выполнении поляризационных измерений.

Экспериментальные записи на *рис. 3* и *4* выполнены в диапазоне азимутальных углов визирования от 73 до 251° . С учётом стабильного направления ветра порядка 80° (см. *рис. 2*) углы анизотропии не охватывают все направления, в отличие от эксперимента 2019 г. (см. *рис. 1*), когда благодаря разному направлению ветра удалось накопить данные об анизотропии практически во всём диапазоне азимутальных углов ($0-360^\circ$). Таким образом, проведение экспериментальных исследований в короткие сроки не даёт возможности накопить достаточное количество данных при различной скорости и направлении ветра для полноценного анализа эффекта азимутальной анизотропии. Необходимо проводить длительные измерения, порядка нескольких месяцев, чтобы зафиксировать максимально возможное разнообразие метеоусловий (в первую очередь — скорости и направления ветрового потока). В идеальном случае измерения следует проводить непрерывно (круглогодично), с постоянным добавлением новых данных.

Также необходимо выполнить больше измерений на вертикальном угле наблюдения 65° . Их аккуратный анализ будет способствовать усовершенствованию существующих модельных представлений и последующего применения в обработке данных с новых полностью поляриметрических радиометров серии МТВЗА.

Заключение

В настоящей работе был проведён анализ новых экспериментальных измерений, полученных в ходе натурального эксперимента в сентябре 2023 г. на ЧГП РАН и направленных на изучение эффекта азимутальной анизотропии собственного уходящего излучения водной поверхности. Как и в прошлых экспериментах, выполненных в разные годы авторским коллективом, эффект азимутальной анизотропии отчётливо наблюдается в угловых зависимостях третьего параметра Стокса. Полученные в работе результаты подтверждают наличие сильной корреляции между радиополяриметрическими измерениями и вектором скорости приводного ветра.

Сравнение результатов измерений с моделью показало, что модельные предположения адекватно описывают экспериментальные данные на вертикальных углах меньше 55° . Для настильных углов наблюдения, в том числе рабочего угла встречи с Землёй инструментов серии МТВЗА (65°), требуется как уточнение аналитической связи параметров ветрового потока с интенсивностью излучения, так и проведение более глубоких исследований, включая такое промежуточное звено, как геометрия морской поверхности. Последнее приобретает особое значение при проведении экспериментов на ЧГП РАН в силу существенных отличий условий волнообразования от открытого моря. Авторы возлагают особые надежды

на результаты исследований, подобных описанным в работе (Стерлядкин, Куликовский, 2022), поскольку они могут предоставить информацию о реальной пространственно-временной структуре гравитационно-капиллярного волнения (в большей степени отвечающего за формирование излучения в микроволновом диапазоне) в точке проведения измерений. Без них, как показали результаты исследований, корректного совпадения модели и эксперимента следует ожидать лишь для ситуации, когда имеется длительное ветровое воздействие с высокой скоростью потока и стабильным направлением ветра.

Сравнение измерений, полученных двумя независимыми радиометрами, показало, что даже небольшое отклонение в установке плоскости поляризации $\pm 45^\circ$ может привести к сильным отклонениям в измерении третьего параметра Стокса и, как следствие, к неверной интерпретации получаемых данных. Последнее имеет особое значение при планировании будущих спутниковых экспериментов с применением новых инструментов серии МТВЗА-МП.

Общий анализ измерений 2023 г. показал, что проведение эксперимента длительностью несколько недель недостаточно для получения статистически обоснованных выборок данных, пригодных для развития моделей переноса излучения в системе «океан – атмосфера». Необходимо проводить измерения в течение длительного времени — нескольких месяцев, а в идеальном случае — круглогодично, для охвата не только всех возможных состояний водной среды и атмосферы над ней, но и ветровой обстановки, характерной для точки проведения измерений.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8).

Литература

1. Анискович В. М., Кузьмин А. В., Сазонов Д. С., Хайкин В. Б. Радиометр-поляриметр диапазона 0,8 см для натурных и лабораторных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 213–223. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-213-223.
2. Барсуков И. А., Болдырев В. В., Гаврилов М. И. и др. Спутниковая СВЧ-радиометрия для решения задач дистанционного зондирования Земли // Ракетно-косм. приборостроение и информ. системы. 2021. Т. 8. Вып. 1. С. 11–23. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2021.8.1.11.23.
3. Беспалова Е. А., Веселов В. М., Гершензон В. Е., Милицкий Ю. А., Мировский В. Г., Покровская И. В., Раев М. Д., Сёмин А. Г., Смирнов Н. К., Скачков В. А., Трохимовский Ю. Г., Хапин Ю. Б., Чистяков В. Н., Шарков Е. А., Эткин В. С. Об определении скорости приповерхностного ветра по измерениям поляризационной анизотропии собственного и рассеянного СВЧ-излучения // Исслед. Земли из космоса. 1982. № 1. С. 87–94.
4. Гречко С. И., Ирисов В. Г., Кузьмин А. В., Трохимовский Ю. Г., Эткин В. С. Характеристики собственного СВЧ-излучения морской поверхности на настильных углах наблюдения: Препринт Пр-1729. М.: ИКИ РАН, 1991. 41 с.
5. Ирисов В. Г., Кузьмин А. В., Трохимовский Ю. Г., Эткин В. С. Азимутальные зависимости собственного СВЧ-излучения поверхности океана на настильных углах наблюдения // Исслед. Земли из космоса. 1990. № 6. С. 79–86.
6. Кузьмин А. В., Стерлядкин В. В. Юстировка и измерение углов поляризаций в микроволновых радиометрах // Приборы и техника эксперимента. 2024 (в печати).
7. Кузьмин А. В., Горячкин Ю. А., Ермаков Д. М., Ермаков С. А., Комарова Н. Ю., Кузнецов А. С., Репина И. А., Садовский И. Н., Смирнов М. Т., Шарков Е. А., Чухарев А. М. Морская гидрографическая платформа «Кацивели» как подспутниковый полигон на Черном море // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 1. С. 31–44.
8. Садовский И. Н. Третий параметр Стокса собственного излучения взволнованной морской поверхности. Теория и эксперимент // Материалы 18-й Всероссийской открытой конф. с международ. участием «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2020. С. 243. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
9. Сазонов Д. С. Многопараметрическая модель радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности: анализ спутниковой информации и надводных измерений: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2018. 135 с.

10. Сазонов Д. С., Кузьмин А. В., Садовский И. Н. Экспериментальные исследования зависимости интенсивности радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности от скорости приводного ветра // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 25–34. DOI: 10.7868/S0205961416010127.
11. Сазонов Д. С., Кузьмин А. В., Садовский И. Н. Азимутальная зависимость микроволнового излучения водной поверхности на основе дистанционных измерений на Черном море // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 3. С. 29–40. DOI: 10.7868/S0205961418030028.
12. Стерлядкин В. В., Куликовский К. В. Измерение капиллярных волн лазерным волнографом // Russian Technological J. 2022. Т. 10. № 5. С. 100–110. DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-5-100-110.
13. Gaiser P. W., St. Germain K. M., Twarog E. M. et al. The WindSat space borne polarimetric microwave radiometer: sensor description and early orbit performance // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2004. V. 42. No. 11. P. 2347–2361. DOI: 10.1109/TGRS.2004.836867.
14. Irisov V. G., Kuzmin A. V., Pospelov M. N., Trokhimovski Yu. G., Etkin V. S. The dependence of sea brightness temperature on surface wind direction and speed. Theory and experiment // Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'91). 1991. P. 1297–1300.
15. Meissner T., Wentz F. J. The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and Earth incident angles // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2012. V. 50. No. 8. P. 3004–3026. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2179662.
16. Sazonov D. S., Sadovsky I. N., Kuzmin A. V. Studying the azimuthal dependence of the sea surface microwave emissions based on measurements at the Black Sea // 2020 16th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing for the Environment (MicroRad). 2020. P. 1–4. DOI: 10.1109/MicroRad49612.2020.9342620.
17. Shannon T. B., Ruf C. S., Lyzenga D. R. An emissivity-based wind vector retrieval algorithm for the Windsat polarimetric radiometer // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2006. V. 44. No. 3. P. 611–621. DOI: 10.1109/TGRS.2005.859351.
18. St. Germain K., Poe G. A., Gaiser P. W. Polarimetric emission model of the sea at microwave frequencies and comparison with measurements // Progress in Electromagnetics Research. 2002. V. 37. P. 1–30. DOI: 10.2528/PIER01100800.
19. Surussavadee C., Staelin D. H. NPOESS precipitation retrievals using the ATMS passive microwave spectrometer // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2010. V. 7. No. 3. P. 440–444. DOI: 10.1109/LGRS.2009.2038614.
20. Tran N., Vandemark D., Ruf C. S., Chapron B. The dependence of nadir ocean surface emissivity on wind-vector as measured with microwave radiometer // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2002. V. 40. No. 2. P. 515–523. DOI: 10.1109/36.992827.
21. Trokhimovski Y. G., Irisov V. G., Westwater E. R., Fedor L. S., Leuski V. E. Microwave polarimetric measurements of the sea surface brightness temperature from a blimp during the Coastal Ocean Probing Experiment (COPE) // J. Geophysical Research. 2000. V. 105. Iss. C3. P. 6501–6516. <https://doi.org/10.1029/1999JC900315>.
22. Yueh S. H., Wilson W. J., Dinardo S. J., Li F. K. Polarimetric microwave brightness signatures of ocean wind direction // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1999. V. 37. No. 2. P. 949–959. DOI: 10.1109/36.752213.
23. Zabolotskikh E., Chapron B. Validation of the new algorithm for rain rate retrieval from AMSR2 data using TMI rain rate product // Advances in Meteorology. 2015. No. 1. Article 492603. 12 p. DOI: 10.1155/2015/492603.
24. Zhang R., Wang Z., Hilburn K. A. Tropical cyclone rainfall estimates from FY-3B MWRI brightness temperatures using the WS algorithm // Remote Sensing. 2018. V. 10. Iss. 11. Article 1770. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/492603>.

Field studies of the third Stokes parameter angular dependences of sea surface radiation at a frequency of 37 GHz

D. S. Sazonov, I. N. Sadovsky, A. V. Kuzmin, E. V. Pashinov

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: sazonov_33m7@mail.ru

In this paper, we analyze new experimental measurements of azimuthal variations in microwave radiation from a rough water surface. The experimental data were obtained using microwave radiometers with operating frequency of ~37 GHz (wavelength ~8 mm) at the oceanographic platform in the Black Sea (Hydrophysical Polygon RAS) from September 19 to October 6, 2023. Measurements of azimuthal dependences (in the range from 73 to 251°) were carried out at angles of 10, 25, 40, 55, 65° from nadir. From the entire set of experimental data, only those that corresponded to a stable wind direction at speeds greater than 10 m/s were selected. The value of the third Stokes parameter was calculated as the difference in brightness temperatures obtained at polarizations rotated by +45 and -45° relative to the vertical. An external calibration operation was preliminarily performed for the radiation of the black body and the radiation of the sky. The anisotropy angle was calculated as the difference between the wind direction (measured by the meteorological complex) and the viewing direction. The obtained angular dependences were compared with the radiation transfer model used in the analysis of satellite measurements. It is shown that the measured azimuthal dependences of the third Stokes parameter are described within the framework of the model approximation only partially. As the main reason for the observed discrepancies one should indicate significant limitations of the specified model under conditions of undeveloped waves. The results of the experiment will enrich the database used to modernize the two-scale radiation formation model developed at the IKI RAS.

Keywords: azimuthal anisotropy, experiment, remote sensing, radio brightness temperature, microwave radiation, modeling, MTVZA-GYa

Accepted: 18.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-309-319

References

1. Aniskovich V. M., Kuzmin A. V., Sazonov D. S., Khaikin V. B., Radiometer-polarimeter at 0.8 cm for field and laboratory measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 213–223 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-213-223.
2. Barsukov I. A., Boldyrev V. V., Gavrilov M. I. et al., Satellite microwave radiometry for Earth remote sensing, *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2021, Vol. 8, Iss. 1, pp. 11–23 (in Russian), DOI: 10.30894/issn2409-0239.2021.8.1.11.23
3. Bespalova E. A., Veselov V. M., Gershenzon V. E., Militkii Yu. A., Mirovskii V. G., Pokrovskaya I. V., Raev M. D., Semin A. G., Smirnov N. K., Skachkov V. A., Trokhimovskii Yu. G., Khapin Yu. B., Chistyakov V. N., Sharkov E. A., Etkin V. S., On determination of wind velocity by measuring of polarization anisotropy of microwave emission and backscattering, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1982, No. 1, pp. 87–94 (in Russian).
4. Grechko S. I., Irisov V. G., Kuz'min A. V., Trokhimovskii Yu. G., Etkin V. S., *Kharakteristiki sobstvennogo SVCh-izlucheniya morskoi poverkhnosti na nastil'nykh uglakh nablyudeniya: Preprint Pr-1729* (Characteristics of the sea surface's microwave radiation at grazing angles: Preprint Pr-1729), Moscow: IKI RAS, 1991, 41 p. (in Russian).
5. Irisov V. G., Kuz'min A. V., Trokhimovskii Yu. G., Etkin V. S., Azimuthal dependence of microwave radiation of ocean surface at grazing angles, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1990, No. 6, pp. 79–86 (in Russian).
6. Kuz'min A. V., Sterlyadkin V. V., Adjustment and measurement of polarization angles in microwave radiometers, *Pribory i tekhnika ehksperimenta*, 2024 (in Russian) (in print).
7. Kuzmin A. V., Goryachkin Yu. A., Ermakov D. M., Ermakov S. A., Komarova N. Yu., Kuznetsov A. S., Repina I. A., Sadovskii I. N., Smirnov M. T., Sharkov E. A., Chuharev A. M., Marine hydrographic platform "Katsiveli" as a subsatellite test site in the Black Sea, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 1, pp. 31–44 (in Russian).
8. Sadovsky I. N., The third Stokes parameter of the own radiation of a rough sea surface. Theory and experiment, *Materialy 18-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya*

- Zemli iz kosmosa*” (Proc. 18th All-Russia Open Conf. “Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space”), Moscow: IKI RAS, 2020, p. 243 (in Russian), DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
9. Sazonov D. S., *Mnogoparametricheskaya model' radioteplovogo izlucheniya vzvolnovannoi morskoi poverkhnosti: analiz sputnikovoi informatsii i nadvodnykh izmerenii: Diss. kand. fiz.-mat. nauk* (Multiparameter model of rough sea surface radiothermal emission: analysis of satellite information and surface measurements, Cand. ph.-math. sci. thesis), Moscow, 2018, 135 p.
 10. Sazonov D. S., Kuz'min A. V., Sadovskii I. N., Experimental study of thermal radiation, depending on the water surface wind speed, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 1–2, pp. 25–34 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961416010127.
 11. Sazonov D. S., Kuz'min A. V., Sadovskii I. N., Azimuthally dependence of water surface microwave emission based on remote measurements on Black Sea, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 3, pp. 29–40 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961418030028.
 12. Sterlyadkin V. V., Kulikovskiy K. V., Measurement of capillary waves with a laser wave recorder, *Russian Technological J.*, 2022, Vol. 10, No. 5, pp. 100–110 (in Russian), DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-5-100-110.
 13. Gaiser P. W., Germain K. M., Twarog E. M. et al., The WindSat space borne polarimetric microwave radiometer: sensor description and early orbit performance, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2004, V. 42, No. 11, pp. 2347–2361, DOI: 10.1109/TGRS.2004.836867.
 14. Irisov V. G., Kuzmin A. V., Pospelov M. N., Trokhimovski Yu. G., Etkin V. S., The dependence of sea brightness temperature on surface wind direction and speed. Theory and experiment, *Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'91)*, 1991, pp. 1297–1300.
 15. Meissner T., Wentz F. J., The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and earth incident angles, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 8, pp. 3004–3026, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2179662.
 16. Sazonov D. S., Sadovsky I. N., Kuzmin A. V., Studying the azimuthal dependence of the sea surface microwave emissions based on measurements at the Black Sea, *2020 16th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing for the Environment (MicroRad)*, 2020, pp. 1–4, DOI: 10.1109/MicroRad49612.2020.9342620.
 17. Shannon T. B., Ruf C. S., Lyzenga D. R., An emissivity-based wind vector retrieval algorithm for the Windsat polarimetric radiometer, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2006, Vol. 44, No. 3, pp. 611–621, DOI: 10.1109/TGRS.2005.859351.
 18. St. Germain K. M., Poe G. A., Gaiser P. W., Polarimetric emission model of the sea at microwave frequencies and comparison with measurements, *Progress in Electromagnetics Research*, 2002, Vol. 37, pp. 1–30, DOI: 10.2528/PIER01100800.
 19. Surussavadee C., Staelin D. H., NPOESS precipitation retrievals using the ATMS passive microwave spectrometer, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 440–444, DOI: 10.1109/LGRS.2009.2038614.
 20. Tran N., Vandemark D., Ruf C. S., Chapron B., The dependence of nadir ocean surface emissivity on wind vector as measured with microwave radiometer, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2002, Vol. 40, No. 2, pp. 515–523, DOI: 10.1109/36.992827.
 21. Trokhimovski Y. G., Irisov V. G., Westwater E. R., Fedor L. S., Leuski V. E., Microwave polarimetric measurements of the sea surface brightness temperature from a blimp during the Coastal Ocean Probing Experiment (COPE), *J. Geophysical Research*, 2000, Vol. 105, Iss. C3, pp. 6501–6516, <https://doi.org/10.1029/1999JC900315>.
 22. Yueh S. H., Wilson W. J., Dinardo S. J., Li F. K., Polarimetric microwave brightness signatures of ocean wind direction, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1999, Vol. 37, No. 2, pp. 949–959, DOI: 10.1109/36.752213.
 23. Zabolotskikh E., Chapron B., Validation of the new algorithm for rain rate retrieval from AMSR2 data using TMI rain rate product, *Advances in Meteorology*, 2015, No. 1, Article 492603, 12 p., <http://dx.doi.org/10.1155/2015/492603>.
 24. Zhang R., Wang Z., Hilburn K. A., Tropical cyclone rainfall estimates from FY-3B MWRI brightness temperatures using the WS algorithm, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, Iss. 11, Article 1770, DOI: 10.3390/rs10111770.