

## Восстановление параметров приводного пограничного слоя в тропическом циклоне на основе совмещения данных падающих GPS-зондов и спутниковых радиолокационных изображений

О. С. Ермакова, Д. А. Сергеев, Г. Н. Баландина,  
Н. С. Русаков, Е. И. Поплавский, Ю. И. Троицкая

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия*  
*E-mail: yuliya@hydro.appl.sci-nnov.ru*

Работа посвящена исследованию зависимости характеристик рассеянного микроволнового сигнала со спутника Sentinel-1 на перекрёстной поляризации от параметров приводного слоя атмосферы на основе данных, полученных с падающих GPS-зондов NOAA при неблагоприятных погодных условиях в интересах разработки геофизической модельной функции. Были проанализированы натурные измерения и данные дистанционного зондирования для ураганов в Атлантическом бассейне. На основе анализа данных, измеренных GPS-зондами, были получены средние профили скорости ветра, при этом параметры ветрового пограничного слоя (параметр шероховатости и динамическая скорость (скорость трения ветра)) были восстановлены с использованием свойства автомодельности профилей скорости по измерениям в «следной» их части. Профили скорости ветра для ураганов Ирма (07.09.2017) и Мария (21.09.2017, 23.09.2017), измеренные во время, близкое к моменту получения спутниковых РСА-изображений, были использованы для их калибровки как по скорости приводного ветра, так и по динамической скорости (скорости трения). Это позволило получить зависимость удельной эффективной площади рассеяния сигнала на перекрёстной поляризации, отражённого от морской поверхности, от динамической скорости ветрового потока.

**Ключевые слова:** рассеяние радиоволн на морской поверхности, согласованная и ортогональная поляризация, шторм, ураган, микроволновое дистанционное зондирование, поляризация, пограничные слои атмосферы и океана, скорость ветра, касательное турбулентное напряжение ветра

Одобрена к печати: 06.09.2019  
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-51-59

### Введение

Активная микроволновая диагностика с помощью инструментов, размещённых на борту космических аппаратов, является важнейшим современным методом получения оперативной информации о геофизических параметрах океана и атмосферы. Основными инструментами активного микроволнового зондирования служат скаттерометры, используемые для измерения сигнала обратного рассеяния от морской поверхности (Fernandez et al., 2006; Horstmann et al., 2005; Reppucci et al., 2008; Shen et al., 2006; Stiles, Dunbar, 2010; Troitskaya et al., 2016; Williams, Long, 2008; Yueh et al., 2003) с целью восстановления скорости приводного ветра (Троицкая и др., 2016; Horstmann et al., 2005) и состояния морской поверхности. Их преимущества связаны с возможностью всепогодного, независящего от времени суток глобального мониторинга состояния атмосферы и океана. Особенно перспективным на данный момент является применение микроволновых методов для восстановления касательного турбулентного напряжения (Liu, Xie, 2014), которое связано с мелкомасштабной шероховатостью поверхности, ответственной за рассеяние микроволнового сигнала. Алгоритмы восстановления турбулентного напряжения, применяемые в настоящее время, используют эмпирические геофизические модельные функции (ГМФ), связывающие удельную эффективную площадь рассеяния (УЭПР) со скоростью ветра на высоте 10 м (Hersbach et al., 2007), и балк-формулы, связывающие скорость ветра  $U_{10}$  с величиной коэффициента аэродинамического сопротивления

поверхности  $C_D$ . Зависимость  $C_D(U_{10})$  испытывает насыщение при высоких значениях скорости ветра (Donelan et al., 2004; Foreman, Emeis, 2010) и характеризуется немонотонной зависимостью (Holthuijsen et al., 2012; Powell et al., 2003) от скорости ветра при его экстремальных значениях. В результате существующие алгоритмы восстановления параметров ветра не применимы при скоростях ветра, превышающих 20 м/с.

Ещё одна проблема восстановления турбулентного напряжения при сильных ветрах связана с явлением насыщения рассеянного СВЧ-сигнала на соосной поляризации при скоростях ветра, превышающих 20 м/с (Donnelly et al., 1999; Vachon, Wolfe, 2011; Zhang, Perrie, 2012). Предложен способ решения данной проблемы, который основан на приёме рассеянного СВЧ-сигнала на ортогональной поляризации. Анализ наземных данных о скорости приводного ветра и изображений поверхности воды в СВЧ-диапазоне, полученных спутниковым радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА-изображений), показал, что УЭПР сохраняет чувствительность к скорости ветра при его высоких скоростях (Vachon, Wolfe, 2011; van Zadelhoff et al., 2013; Zhang, Perrie, 2012). Аналогичных наземных измерений УЭПР и турбулентного поверхностного напряжения не существует. Настоящая работа — первая попытка восполнить этот пробел.

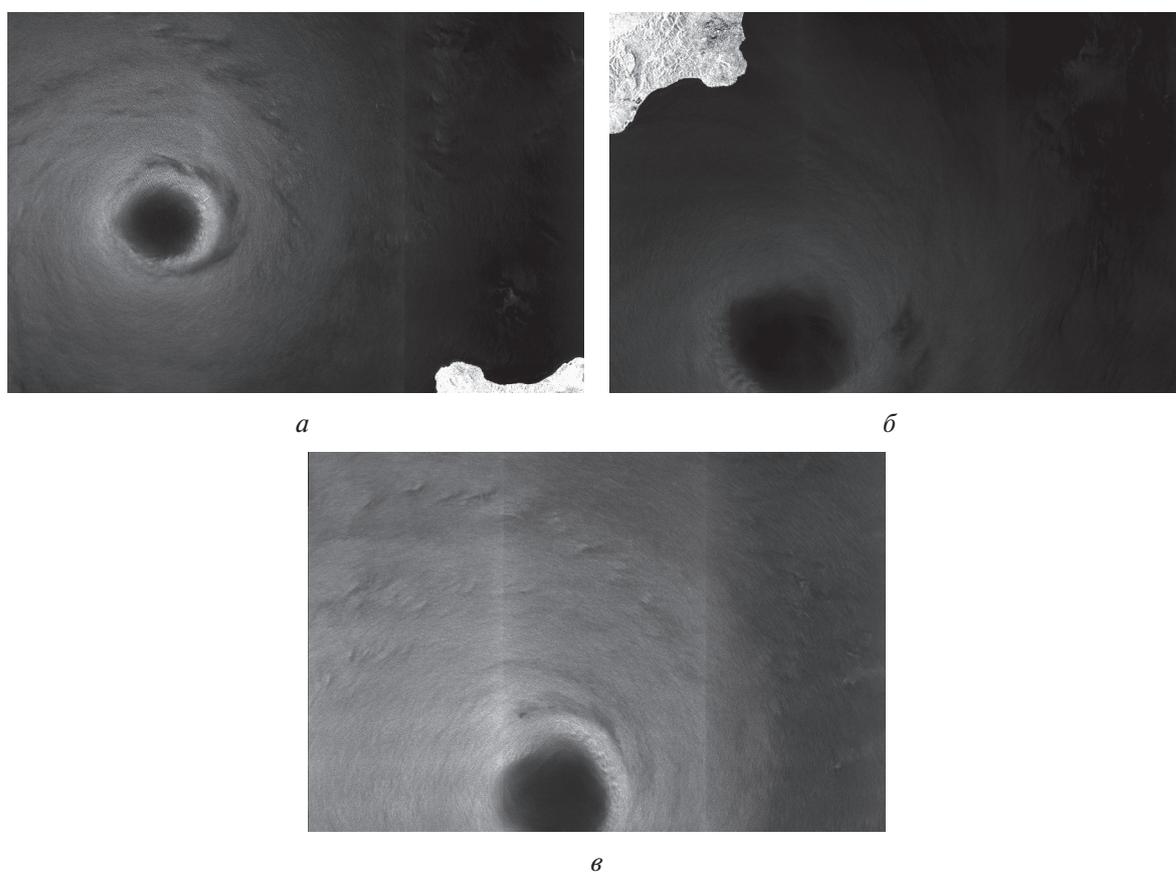
В данной статье представлены первые результаты исследований, посвящённых разработке ГМФ на основе совмещённых РСА-изображений со спутника Sentinel-1 и натуральных измерений профилей скорости ветра, полученных с падающих GPS-зондов NOAA в широком диапазоне погодных условий, включая экстремальные.

### Анализ данных дистанционного зондирования со спутника Sentinel-1

На первоначальном этапе были проанализированы натурные измерения с GPS-зондов в сезон ураганов 2016–2017 гг. в Атлантическом бассейне, алгоритм обработки данных представлен в работе (Ермакова и др., 2019). Параметры ветрового пограничного слоя (параметр шероховатости и динамическая скорость) были восстановлены с использованием свойства автомодельности (см. (Hinze, 1959)) по измерениям в «следной» части профилей скорости. Далее, полученные результаты были использованы для разработки геофизической модельной функции на основе подхода, включающего совмещение данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) со спутника Sentinel-1 и результатов натуральных измерений, полученных с GPS-зондов. В настоящем исследовании использованы данные с радиолокационной аппаратуры с синтезированной апертурой C-SAR спутника Sentinel-1 (Европейское космическое агентство) для круглосуточного получения снимков C-диапазона, работающего на частоте 5,405 ГГц. Был проанализирован широкозахватный интерферометрический режим съёмки (Interferometric Wide Swath — IWS) для снимков, сделанных над морской поверхностью на перекрёстной поляризации VH (ВГ — вертикально-горизонтальная), с углами визирования 29,1–46,0°, в сезон ураганов 2017 г. (с 1 июня по 30 ноября) в Атлантическом бассейне. В ходе анализа данных со спутника Sentinel-1 было установлено, что «глаз» урагана зарегистрирован для трёх ураганов этого сезона: Ирма (03.09.2017–10.09.2017, категория 5 (SSH5)), Мария (18.09.2017–27.09.2017, категория 5 (SSH5)), Хоце (09.09.2017–20.09.2017), категория 4 (SSH4)).

Необходимо отметить, что в отличие от урагана Эрл 2010 г., для которого проводились специальные подспутниковые измерения ([http://www.aoml.noaa.gov/hrd/Storm\\_pages/earl2010/sfmr.html](http://www.aoml.noaa.gov/hrd/Storm_pages/earl2010/sfmr.html)), для этих ураганов совмещённые измерения отсутствовали. В связи с этим был использован массив данных с GPS-зондов NOAA за сезон ураганов 2017 г. в Атлантическом бассейне с целью поиска возможности совмещения данных дистанционного зондирования и измерений с GPS-зондов. В результате было установлено, что совмещение данных может быть произведено лишь для ураганов Ирма (07.09.2017) и Мария (21.09.2017, 23.09.2017), поскольку снимок «глаза» урагана и измерения с GPS-зондов оказались наиболее близкими по времени и пространству.

Отобранные спутниковые изображения проходили предварительную обработку в специализированном программном приложении SNAP, в котором была произведена их калибровка (пример изображений показан на *рис. 1*).



*Рис. 1.* Снимки «глаза» урагана, полученные со спутника Sentinel-1 для ураганов Ирма 07.09.2017 (*а*) и Мария 21.09.2017 (*б*), 23.09.2017 (*в*)

Для каждого снимка анализировался массив совмещённых с ним по времени и пространству данных измерений с GPS-зондов. Необходимо отметить, однако, что запуск GPS-зондов осуществлялся в течение довольно продолжительного времени, при этом не всегда совпадающим точно со временем снимка. Поэтому было сделано предположение о том, что ураган имеет квазистационарную структуру, которая слабо меняется за время между снимком и моментом сброса зондов (это касается в основном центральной части урагана). Чтобы подтвердить это предположение, были проанализированы снимки в оптическом диапазоне с геостационарного спутника GOES-13. Видно (*рис. 2*, см. с. 54), что форма центральной части урагана в течение суток меняется слабо, а значит, может быть проведено корректное совмещение спутниковых данных и данных с GPS-зондов.

В связи с этим для анализа было отобран массив данных с GPS-зондов, запущенных за несколько суток до и после времени снимка, при этом сохранение формы урагана строго контролировалось. Собранные в такие массивы данные GPS-зондов были разделены на группы по пространству, располагающиеся примерно на одинаковом расстоянии от центра урагана. На первоначальном этапе группы были созданы для каждого дня отдельно, далее была сделана попытка объединить все зонды за несколько дней и разбить получившийся массив по группам. На обоих этапах внутри каждой из таких групп производилось осреднение профилей, измеренных GPS-зондами. По осреднённым профилям были получены значения скорости трения ветра и величины скорости ветра на высоте 10 м на основе процедуры, изложенной в работе (Ермакова и др., 2019).

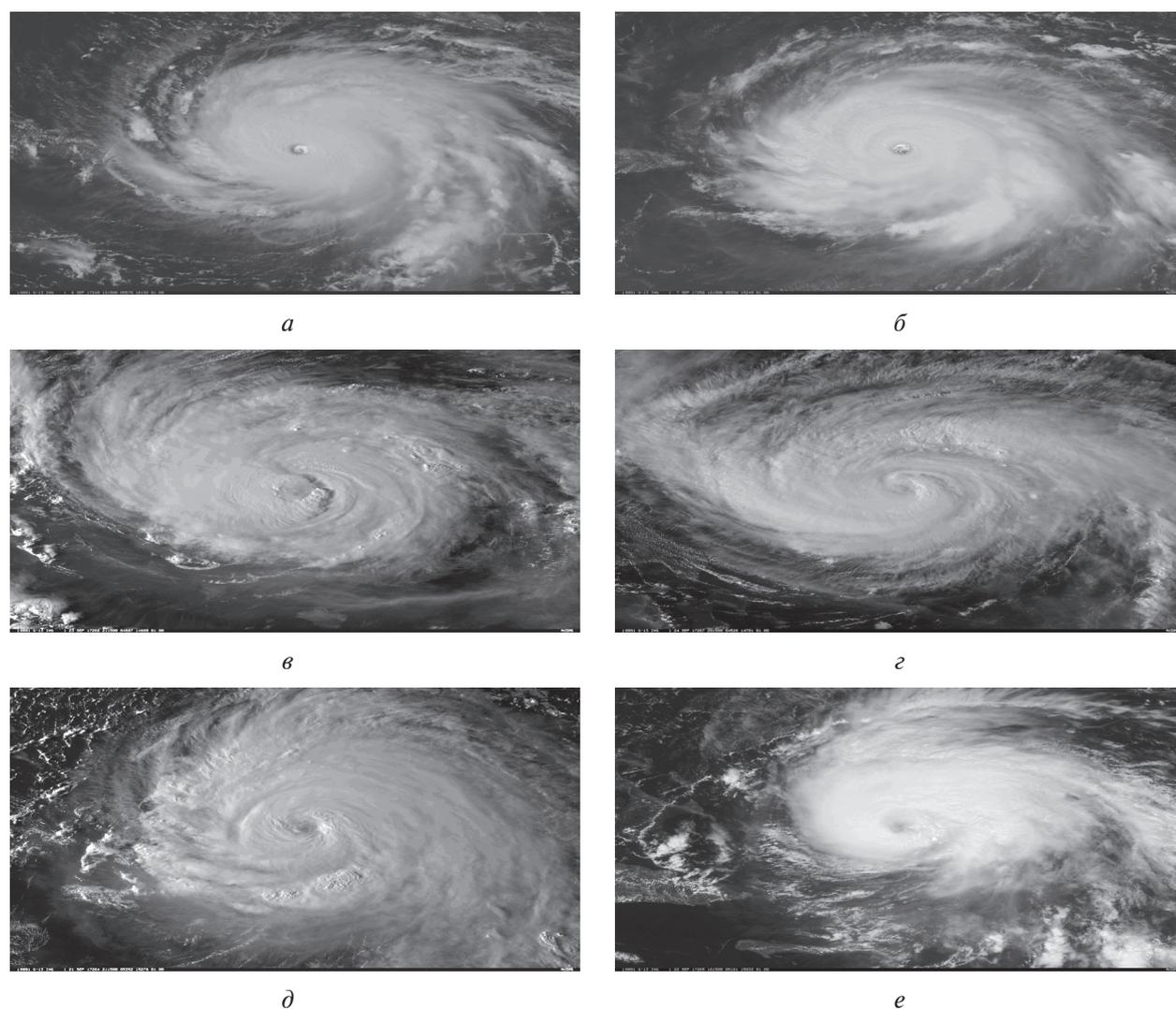


Рис. 2. Снимки ураганов, полученные с геостационарного спутника GOES-13: а — Ирма 06.09.2017 18:15 UTC; б — Ирма 07.09.2017 16:15 UTC; в — Мария 23.09.2017 21:15 UTC; г — Мария 24.09.2017 20:15 UTC; д — Мария 21.09.2017 21:15 UTC; е — Мария 22.09.2017 16:15 UTC

### Зависимость УЭПР от параметров приводного слоя атмосферы на основе сопоставления натуральных данных со спутниковой информацией

На основе анализа спутниковых данных и результатов натуральных измерений был предложен алгоритм восстановления параметров приводного атмосферного слоя в ураганных условиях, основанный на использовании зависимости УЭПР рассеянного сигнала от параметров пограничного слоя атмосферы, полученных по данным GPS-зондов.

Для построения требуемой зависимости были определены значения удельной эффективной площади рассеяния УЭПР по данным спутниковых снимков. Необходимо отметить, однако, что значения УЭПР на каждом снимке характеризовались значительными флуктуациями, связанными с присутствием поверхностных волн и шумов. В связи с этим значения УЭПР в точках с координатами, соответствующими координатам падающих GPS-зондов, были получены внутри ячеек размером  $2 \times 2$  км, и далее проводилось осреднение величины УЭПР внутри таких ячеек. Полученный ансамбль значений УЭПР также претерпел осреднение. В результате были получены значения УЭПР, осреднённые по группам, сконструированным из близко расположенных GPS-зондов (рис. 3, см. с. 55). При этом изначально в группы для осреднения выбирались данные за один день.

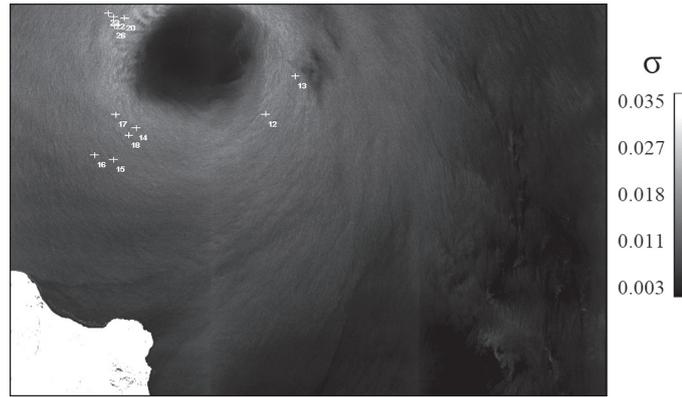


Рис. 3. Иллюстрация распределения GPS-зондов по группам на примере урагана Мария, анализ проводился в период 20.09.2017–22.09.2017

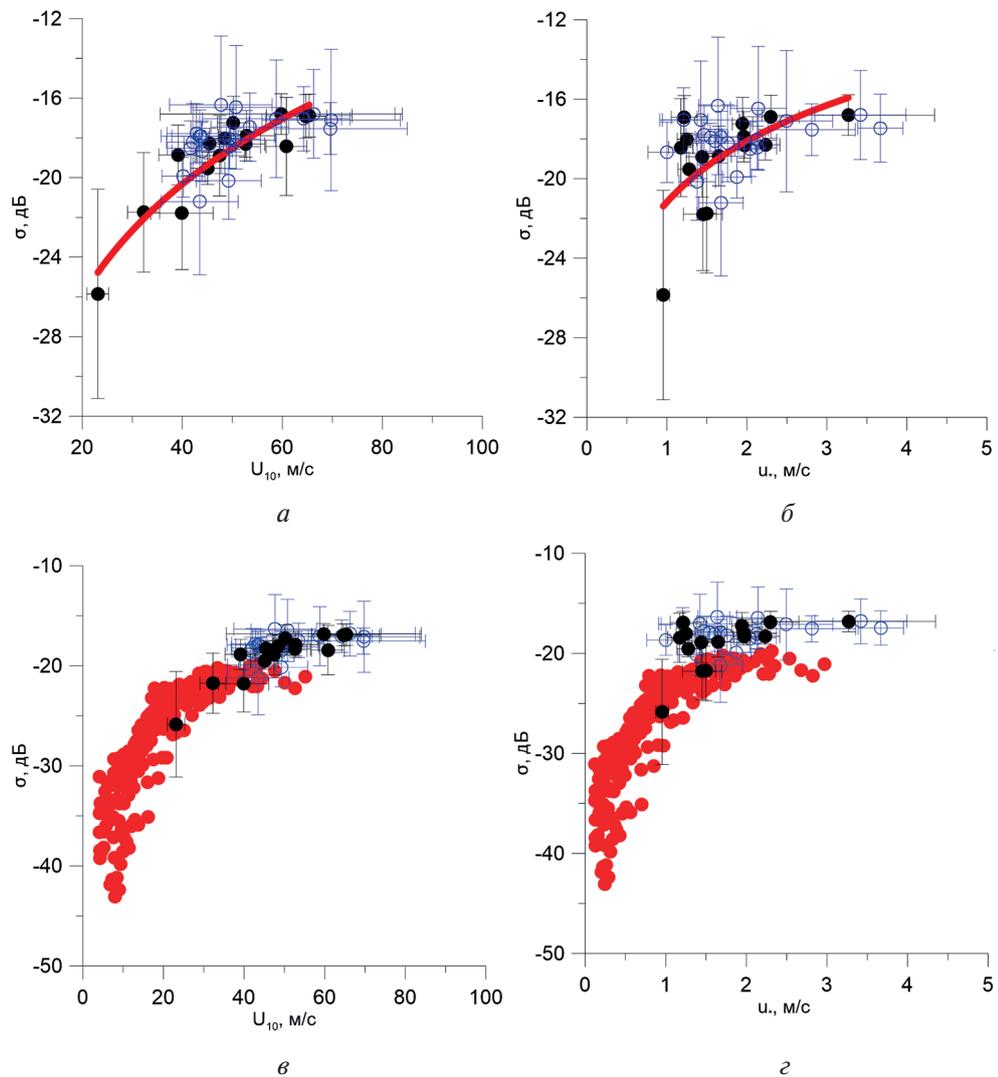


Рис. 4. Геофизическая модельная функция, полученная на основе анализа массива совмещённых спутниковых данных и результатов измерений с GPS-зондов NOAA, зависимость УЭПР от скорости ветра на высоте 10 м (а, в); зависимость УЭПР от скорости трения ветра (б, г). Чёрные символы — зависимости, полученные на базе осреднения по ансамблю, сконструированному из данных за разные дни, объединённых в группы; синие символы — зависимости, полученные на базе осреднения по ансамблям, сконструированным из данных за один день, объединённых в группы; красные символы — значения УЭПР, полученные по данным (Hwang et al., 2015); красная кривая — логарифмическая аппроксимация полученных в результате обработки зависимостей

Однако полученная таким образом зависимость УЭПР от параметров приводного атмосферного слоя продемонстрировала значительный разброс данных, что, по-видимому, может быть связано с недостаточной статистикой. В связи с этим было дополнительно проведено осреднение по группам, сконструированным из объединённых данных, полученных за несколько соседних дней. Такая процедура оказывается оправданной в связи с тем, что рассматриваемые ураганы продемонстрировали квазистационарное поведение в течение 1–2 сут до и после того, как был сделан спутниковый снимок. Зависимость величины УЭПР от скорости трения ветра, а также от величины скорости ветра на высоте 10 м (рис. 4, см. с. 55) может быть использована для разработки геофизической модельной функции, связывающей параметры рассеянного сигнала с параметрами приводного пограничного слоя атмосферы в урагане. Дополнительно было проведено сравнение полученных данных с измерениями, описанными в работе (Hwang et al., 2015). Анализируя рис. 4, можно сделать вывод, что результаты для зависимости УЭПР от скорости ветра на высоте 10 м хорошо согласуются с данными (Hwang et al., 2015), в то время как зависимость УЭПР от скорости трения ветра, полученная в настоящей работе, демонстрирует несколько завышенное значение, что подлежит дальнейшему исследованию.

## Заключение

В рамках настоящей работы был предложен подход для описания турбулентного пограничного слоя, сформированного в ураганных условиях, основанный на использовании свойств автомодельности дефекта скорости в пограничном слое, включающем слой постоянных потоков, переходящий в его «следную» часть. Преимуществом такого подхода является возможность использования измерений профиля скорости на удалении от поверхности (в «следной» части), при этом погрешности измерений оказываются меньше и улучшается статистика. Наряду с этим была предложена процедура выбора статистического ансамбля для осреднения данных с GPS-зондов, основанная на предположении о радиальной симметрии урагана. Были отобраны группы профилей скорости ветра, измеренные в сходных условиях. На основе предложенного подхода были восстановлены параметры слоя постоянных потоков для ураганов Атлантического бассейна в период с 2003–2017 гг.

Предложенный метод использовался для определения параметров ветрового пограничного слоя с целью восстановления геофизической модельной функции путём анализа совмещённых данных с GPS-зондов и спутника Sentinel-1. Были проведены исследования, позволившие осуществить отбор и корректное совмещение данных дистанционного зондирования с натурными измерениями, основанное на предположении о сохранении формы урагана во время натурных измерений. На основе анализа данных для ураганов 2017 г. Ирма и Мария была получена зависимость величины УЭПР отражённого микроволнового сигнала на перекрёстной поляризации от скорости ветра на высоте 10 м, а также от скорости трения ветра — величины, непосредственно используемой в моделях атмосферной циркуляции, что по сравнению с традиционными ГМФ является важным с точки зрения повышения точности задания граничных условий при усвоении спутниковых данных и улучшения качества прогноза интенсивности штормов и ураганов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-17-00209 (сбор и обработка данных дистанционного зондирования); государственного задания, проект 0030-2019-0020, и Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 19-05-00249, 19-05-00366, 18-35-20068 (сбор и обработка массива данных GPS-зондов, совмещение натурных данных и данных дистанционного зондирования).

## Литература

1. Ермакова О. С., Сергеев Д. А., Баландина Г. Н., Русаков Н. С., Поплавский Е. И., Троицкая Ю. И. Восстановление параметров приводного пограничного слоя в тропическом циклоне по данным падающих GPS-зондов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 301–309.
2. Троицкая Ю. И., Абрамов В. И., Ермошкин А. В., Зуйкова Э. М., Казаков В. И., Сергеев Д. А., Кандауров А. А., Ермакова О. С. О восстановлении турбулентного потока импульса в пограничном слое атмосферы при сильном и ураганном ветре по измерениям сечения рассеяния СВЧ радиоволн поверхностью моря на ортогональной поляризации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 63–74. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-63-74.
3. Donelan M. A., Haus B. K., Reul N., Plant W. J., Stiassnie M., Graber H. C., Brown O. B., Saltzman E. S. On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds // Geophysical Research Letters. 2004. V. 31. L18306. DOI: 10.1029/2004GL019460.
4. Donnelly W. J., Carswell J. R., McIntosh R. E., Chang P. S., Wilkerson J., Marks F., Black P. G. Revised Ocean Backscatter Models at C and Ku Band under High-Wind Conditions // J. Geophysical Research. 1999. V. 104. P. 11485–11497. DOI: 10.1029/1998JC900030.
5. Fernandez D., Carswell J. R., Frasier S., Chang P. S., Black P. G., Marks F. D. Dual-polarized C- and Ku-band ocean backscatter response to hurricane-force winds // J. Geophysical Research. 2006. V. 111. C08013. DOI: 10.1029/2005JC003048.
6. Foreman R. J., Emeis S. Revisiting the Definition of the Drag Coefficient in the Marine Atmospheric Boundary Layer // J. Physical Oceanography. 2010. V. 40. P. 2325–2332. DOI: 10.1175/2010JPO4420.1.
7. Hersbach H., Stoffelen A., de Haan S. An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5 // J. Geophysical Research. 2007. V. 112. C03006. DOI: 10.1029/2006JC003743.
8. Hinze J. O. Turbulence: An Introduction to its Mechanism and Theory. N. Y.: McGraw-Hill, 1959. 586 p. DOI: 10.1021/ed037pA556.
9. Holthuijsen L. H., Powell M. D., Pietrzak J. D. Wind and waves in extreme hurricanes // J. Geophysical Research: Oceans. 2012. V. 117. C09003. DOI: 10.1029/2012JC007983.
10. Horstmann J., Thompson D. R., Monaldo F., Iris S., Graber H. C. Can synthetic aperture radars be used to estimate hurricane force winds? // Geophysical Research Letters. 2005. V. 32. L22801. DOI: 10.1029/2005GL023992.
11. Liu W. T., Xie X. Sea surface wind/stress vector // Encyclopedia of Remote Sensing. N. Y.: Springer, 2014. P. 759–67. DOI: 10.1007/978-0-387-36699-9.
12. Powell M. D., Vickery P. J., Reinhold T. A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones // Nature. 2003. V. 422. P. 279–283. DOI: 10.1038/nature01481.
13. Reppucci A., Lehner S., Schulz-Stellenfleth J., Yang C. S. Extreme wind conditions observed by satellite synthetic aperture radar in the North West Pacific // Intern. J. Remote Sensing. 2008. V. 29. P. 6129–6144. DOI: 10.1080/01431160802175504.
14. Shen H., Perrie W., He Y. A new hurricane wind retrieval algorithm for SAR images // Geophysical Research Letters. 2006. V. 33. L21812. DOI: 10.1029/2006GL027087.
15. Stiles B. W., Dunbar R. S. A neural network technique for improving the accuracy of scatterometer winds in rainy conditions // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2010. V. 48. P. 3114–3122. DOI: 10.1109/TGRS.2010.2049362.
16. Troitskaya Y., Ermoshkin A., Zuikova E., Kazakov V., Sergeev D., Kandaurov A., Ermakova O., Abramov V. Laboratory study of cross-polarized radar return under gale-force wind conditions // Intern. J. Remote Sensing. 2016. V. 37. No. 9. P. 1981–1989. DOI: 10.1080/01431161.2016.1160301.
17. Vachon P. W., Wolfe J. C-band cross-polarization wind speed retrieval // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2011. V. 8. No. 3. P. 456–459. DOI: 10.1109/LGRS.2010.2085417.
18. van Zadelhoff G.-J., Stoffelen A., Vachon P. W., Wolfe J., Horstmann J., Rivas M. B. Scatterometer Hurricane Wind Speed Retrievals Using Cross Polarization // Atmospheric Measurement Techniques Discussions. 2013. V. 7. No. 2. P. 7945–7984. DOI: 10.5194/amtd-6-7945-2013.
19. Williams B. A., Long D. G. Estimation of hurricane winds from SeaWinds at ultrahigh resolution // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2008. V. 46. P. 2924–2935. DOI: 10.1109/TGRS.2008.924096.
20. Yueh S., Stiles B. W., Liu W. T. QuikSCAT wind retrievals for tropical cyclones // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2003. V. 41. P. 2616–2628. DOI: 10.1109/TGRS.2003.814913.
21. Zhang B., Perrie W. Cross-polarized synthetic aperture radar: A new potential measurement technique for hurricanes // Bull. American Meteorological Society. 2012. V. 93. No. 4. P. 531–541. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00001.1.

## Retrieval of the atmospheric boundary layer parameters in a tropical cyclone based on the collocated data from GPS-sondes and satellite radar images

O. S. Ermakova, D. A. Sergeev, G. N. Balandina,  
N. S. Rusakov, E. I. Poplavsky, Yu. I. Troitskaya

*Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia*  
*E-mail: yuliya@hydro.appl.sci-nnov.ru*

The paper is devoted to the study of the dependence of scattered microwave cross-polarized signal characteristics from Sentinel-1 satellite on the parameters of the atmospheric boundary layer based on data obtained from falling NOAA GPS sondes under adverse weather conditions in order to develop a geophysical model function (GMF). Field measurements and remote sensing data for hurricanes in the Atlantic basin were analyzed. For the data measured by GPS-sondes, average wind speed profiles were obtained, while the parameters of the wind boundary layer (roughness parameter and friction velocity) were restored using the self-similarity property from measurements in the “wake” part of the velocity profiles. Wind speed profiles for hurricanes Irma 07.09.2017, Maria 21.09.2017 and 23.09.2017, measured at a time close to the time of receiving satellite SAR images were used to calibrate both the wind speed and dynamic speed. This made it possible to obtain the dependence of the normalized radar cross-section (NRCS) of the cross-polarized signal scattered from the sea surface on the dynamic velocity of the wind flow.

**Keywords:** microwave scattering at the sea surface, cross-polarization, storm, hurricane, microwave remote sensing, polarization, boundary layers of the atmosphere and ocean, wind speed, turbulent wind stress

Accepted: 06.09.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-51-59

### References

1. Ermakova O. S., Sergeev D. A., Balandina G. N., Rusakov N. S., Poplavsky E. I., Troitskaya Yu. I., Vosstanovlenie parametrov privodnogo pogranichnogo sloya v tropicheskom tsiklone po dannym padayushchikh GPS-zondov (Retrieval of the atmospheric boundary layer parameters in a tropical cyclone based on the data from GPS-sondes), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 301–309.
2. Troitskaya Yu. I., Abramov V. I., Ermoshkin A. V., Zuikova E. M., Kazakov V. I., Sergeev D. A., Kandarov A. A., Ermakova O. S., O vosstanovlenii turbulentnogo potoka impul'sa v pogranichnom sloe atmosfery pri sil'nom i uragannom vetre po izmereniyam secheniya rasseyaniya SVCh radiovoln poverkhnost'yu morya na ortogonal'noi polarizatsii (On the restoration of the turbulent flow of momentum in the boundary layer of the atmosphere with a strong and hurricane wind by measuring the cross section for the scattering of microwave radio waves by the sea surface on orthogonal polarization), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 63–74, DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-63-74.
3. Donelan M. A., Haus B. K., Reul N., Plant W. J., Stiassnie M., Graber H. C., Brown O. B., Saltzman E. S., On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds, *Geophysical Research Letters*, 2004, Vol. 31, L18306, DOI: 10.1029/2004GL019460.
4. Donnelly W. J., Carswell J. R., McIntosh R. E., Chang P. S., Wilkerson J., Marks F., Black P. G., Revised Ocean Backscatter Models at C and Ku Band under High-Wind Conditions, *J. Geophysical Research*, 1999, Vol. 104(C5), pp. 11485–11497, DOI: 10.1029/1998JC900030.
5. Fernandez D., Carswell J. R., Frasier S., Chang P. S., Black P. G., Marks F. D., Dual-polarized C- and Ku-band ocean backscatter response to hurricane-force winds, *J. Geophysical Research*, 2006, Vol. 111, C08013, DOI: 10.1029/2005JC003048.
6. Foreman R. J., Emeis S., Revisiting the Definition of the Drag Coefficient in the Marine Atmospheric Boundary Layer, *J. Physical Oceanography*, 2010, Vol. 40, pp. 2325–2332, DOI: 10.1175/2010JPO4420.1.
7. Hersbach H., Stoffelen A., de Haan S., An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5, *J. Geophysical Research*, 2007, Vol. 112, C03006, DOI: 10.1029/2006JC003743.

8. Hinze J. O., *Turbulence: An Introduction to its Mechanism and Theory*, New York: McGraw-Hill, 1959, 586 p., DOI: 10.1021/ed037pA556.
9. Holthuijsen L. H., Powell M. D., Pietrzak J. D., Wind and waves in extreme hurricanes, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2012, Vol. 117, C09003, DOI: 10.1029/2012JC007983.
10. Horstmann J., Thompson D. R., Monaldo F., Iris S., Graber H. C., Can synthetic aperture radars be used to estimate hurricane force winds? *Geophysical Research Letters*, 2005, Vol. 32, L22801, DOI: 10.1029/2005GL023992.
11. Liu W. T., Xie X., Sea surface wind/stress vector, In: *Encyclopedia of Remote Sensing*, New York: Springer, 2014, pp. 759–67, DOI: 10.1007/978-0-387-36699-9.
12. Powell M. D., Vickery P. J., Reinhold T. A., Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones, *Nature*, 2003, Vol. 422, pp. 279–283, DOI: 10.1038/nature01481.
13. Reppucci A., Lehner S., Schulz-Stellenfleth J., Yang C. S., Extreme wind conditions observed by satellite synthetic aperture radar in the North West Pacific, *Intern. J. Remote Sensing*, 2008, Vol. 29, pp. 6129–6144, DOI: 10.1080/01431160802175504.
14. Shen H., Perrie W., He Y., A new hurricane wind retrieval algorithm for SAR images, *Geophysical Research Letters*, 2006, Vol. 33, L21812, DOI: 10.1029/2006GL027087.
15. Stiles B. W., Dunbar R. S., A neural network technique for improving the accuracy of scatterometer winds in rainy conditions, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2010, Vol. 48, pp. 3114–3122, DOI: 10.1109/TGRS.2010.2049362.
16. Troitskaya Y., Ermoshkin A., Zuikova E., Kazakov V., Sergeev D., Kandaurov A., Ermakova O., Abramov V., Laboratory study of cross-polarized radar return under gale-force wind conditions, *Intern. J. Remote Sensing*, 2016, Vol. 37, No. 9, pp. 1981–1989, DOI: 10.1080/01431161.2016.1160301.
17. Vachon P. W., Wolfe J., C-band cross-polarization wind speed retrieval, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 456–459, DOI: 10.1109/LGRS.2010.2085417.
18. van Zadelhoff G.-J., Stoffelen A., Vachon P. W., Wolfe J., Horstmann J., Rivas M. B., Scatterometer Hurricane Wind Speed Retrievals Using Cross Polarization, *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2013, Vol. 7, No. 2, pp. 7945–7984, DOI: 10.5194/amtd-6-7945-2013.
19. Williams B. A., Long D. G., Estimation of hurricane winds from SeaWinds at ultrahigh resolution, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, pp. 2924–2935, DOI: 10.1109/TGRS.2008.924096.
20. Yueh S., Stiles B. W., Liu W. T., QuikSCAT wind retrievals for tropical cyclones, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2003, Vol. 41, pp. 2616–2628, DOI: 10.1109/TGRS.2003.814913.
21. Zhang B., Perrie W., Cross-polarized synthetic aperture radar: A new potential measurement technique for hurricanes, *Bull. American Meteorological Society*, 2012, Vol. 93, No. 4, pp. 531–541, DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00001.1.