

Определение контраста суша-море в значениях водозапаса облаков по многоугловым наземным микроволновым измерениям в области береговой линии

Косцов В. С.¹, Ионов Д. В.¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет
e-mail: v.kostsov@spbu.ru

Аннотация

Комбинированные многоугловые наземные измерения собственного микроволнового (МКВ) излучения современными радиометрами дают возможность изучать горизонтальные неоднородности поля влажности в тропосфере и пространственного распределения водозапаса облаков (ВО). Однако практическая реализация такого эксперимента сложна и требует тщательного анализа информативности измерений, оценки погрешностей алгоритма обработки данных и разработки процедур контроля качества. В данной работе анализируется применение разработанного нами алгоритма восстановления ВО, основанного на обращении уравнения переноса излучения, к задаче обнаружения горизонтальных неоднородностей ВО с помощью наземных микроволновых наблюдений в окрестности береговой линии. Исследование основано на данных, полученных с помощью МКВ радиометра RPG-HATPRO, расположенного в пригороде Санкт-Петербурга, Россия, на расстоянии 2,5 км от береговой линии Невской губы (Финский залив) и работающего в режиме углового сканирования в вертикальной плоскости. Анализируется возможность обнаружения горизонтальной неоднородности пространственного распределения водозапаса облаков, а именно контраста ВО суша-море, для различных геометрий измерений (углов места) и значений высоты нижней границы облаков. В результате обработки МКВ измерений на наблюдательной станции Санкт-Петербургского государственного университета получены среднесезонные значения разности ВО суша-море для летних месяцев за период 2013–2021 гг. Для 24 из 25 месяцев качественных наблюдений среднесезонная разность ВО суша-море положительна (большие значения над сушей и меньшие над водой) и может достигать $0,010\text{--}0,013 \text{ кг м}^{-2}$.

Ключевые слова: водозапас облаков, наземное микроволновое зондирование тропосферы, контраст суша-море

Введение

Измерения водозапаса облаков (ВО) с помощью спутниковых приборов SEVIRI и AVHRR продемонстрировали систематические различия между значениями ВО над сушей и над поверхностями Балтийского моря и озер Северной Европы [1, 2, 3]. В качестве причины этих различий в весеннее и летнее время был предложен следующий механизм [1]: приток холодной воды от таяния снега и льда охлаждает приповерхностный слой атмосферы над водоемами. В результате, в отличие от земной поверхности, этот слой над водоемами становится очень устойчивым, препятствуя образованию облаков. Этот механизм, однако, не объясняет существования разницы суша-море в значениях водозапаса облаков в холодное время года, когда и суша, и водная поверхность покрыты снегом и льдом. До настоящего времени исследованию контрастов в значениях ВО над сушей и морем в Северной Европе уделялось мало внимания.

В работе [4] была предпринята попытка обнаружить различия в значениях ВО над сушей и морем с помощью наземных микроволновых наблюдений, проведенных у береговой линии Финского залива в окрестностях Санкт-Петербурга, Россия. Для этого использовался радиометр RPG-HATPRO, расположенный в 2,5 км от береговой линии и работающий в режиме углового сканирования с ориентацией линии визирования в сторону береговой линии. Таким образом, радиометр зондирует воздушные участки над сушей (при угле места 90°) и над акваторией (при 7 углах места в диапазоне от $4,8^\circ$ до 30°). Метод линейной регрессии был применен к микроволновым измерениям в двух спектральных каналах $31,4 \text{ ГГц}$ и $22,24 \text{ ГГц}$. Контраст суша-море в значениях ВО определялся как разница между значениями ВО, полученными по наблюдениям в зенитном и незенитном направлениях. Результаты продемонстрировали существование разницы суша-море в значениях ВО во все сезоны, и эта разница положительна, как и в случае спутниковых измерений (большие значения ВО над сушей и меньшие над морем). В то же время

показано, что проблема обнаружения контраста ВО суша-море является сложной и требует дальнейших исследований с целью повышения точности метода восстановления водозапада.

В исследовании [5] были продемонстрированы существенные преимущества метода статистической регуляризации по сравнению с методом линейной регрессии при определении водозапада облаков наземным микроволновым методом. В настоящей работе описаны результаты применения этого более точного и надежного (в плане контроля качества данных) метода в задаче определения контраста суша-море в значениях ВО.

Описание метода

Функционирующий на физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета микроволновый радиометр НАТPRO предоставляет уникальную возможность исследования трех параметров атмосферы — температуры, содержания водяного пара, водозапада облаков. Радиометр расположен в пригороде Санкт-Петербурга, в городе Петродворце, в 2,5 км от береговой линии Финского залива. Радиометр имеет 14 каналов в спектральной области 22–60 ГГц, что позволяет определять вертикальные профили температуры и влажности в тропосфере одновременно с водозапасом облаков. Ледяная фаза облаков не определяется с помощью таких наблюдений. Наблюдения являются практически всегодными, за исключением периодов осадков. Угловое сканирование происходит в направлении Финского залива, поэтому комбинирование измерений в зенит и измерений при малых углах места позволяет одновременно определять атмосферные параметры над сушей и над водной поверхностью, см. рис. 1.

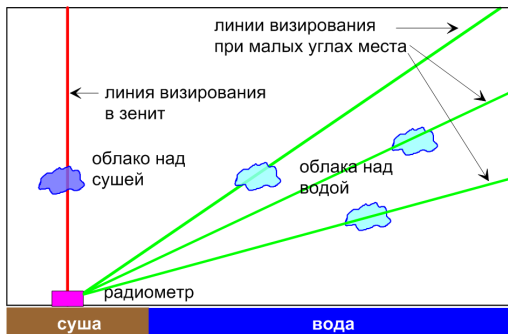


Рис. 1. Иллюстративная схема углового сканирования для измерений водозапада облаков над сушей и акваторией водного объекта.

Измерения проводятся с лета 2012 года по настоящее время. Решение обратной задачи по восстановлению значений атмосферных параметров из измерений яркостной температуры нисходящего микроволнового излучения в зенитном направлении осуществляется с помощью оригинального многопараметрического метода, учитывающего различные виды дополнительной информации о параметрах и связях между ними [6]. Метод был адаптирован для обработки измерений радиометра НАТPRO [7] и за прошедшие годы претерпел несколько модификаций. Специальная модификация для совместной обработки зенитных и внезенитных измерений позволяет определять значения атмосферных параметров на одной и той же высоте над сушей и водной поверхностью с одинаковой погрешностью, что важно при исследовании горизонтальных неоднородностей атмосферных параметров. При обработке измерений учитываются спектральная аппаратная функция прибора, его угловая апертура, а также эффект рефракции при малых углах места. Значение систематической погрешности определения ВО определяется на основе измерений в безоблачной атмосфере. Осуществляется контроль качества получаемых данных по нескольким критериям. Исследования показали, что оптимальными значениями угла места для измерений над водной поверхностью являются 14.4° и 11.4° (для конкретного расположения радиометра относительно береговой линии). Значения водозапада, полученные над водой вдоль

луча визирования для облаков на высотах от 1 до 4 км, приводятся к значениям, соответствующим интегрированию по вертикали в приближении локальной горизонтальной однородности облака.

Основные результаты и выводы

Результаты определения разности (контраста) ВО суша-море для летних месяцев за период 2013–2021 гг. представлены на рис. 2 в виде гистограмм. Были обработаны измерения в течение 27 летних месяцев. Для августа 2015 г. результаты не прошли контроль качества из-за случайной неточности в калибровке прибора, а в августе 2016 г. возникли проблемы с электропитанием, что привело к потере измерений. Таким образом, в нашем распоряжении были высококачественные данные за 25 месяцев.

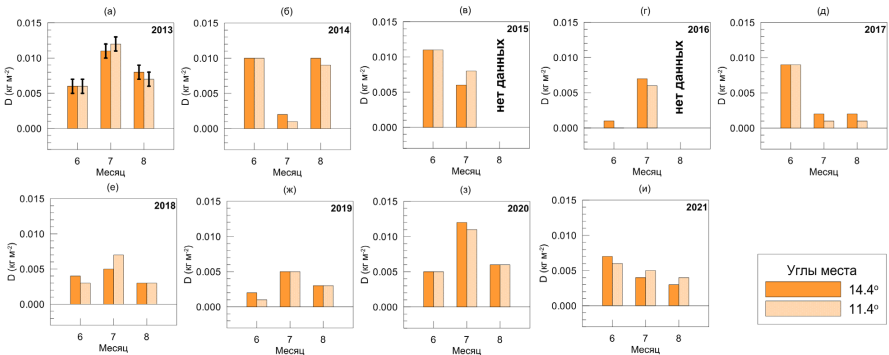


Рис. 2: Результаты восстановления контраста ВО суша-море для летних месяцев в период 2013–2021 гг. Неопределенности результатов показаны в виде отрезков погрешностей на панели (а).

Только для одного из двадцати пяти месяцев (июнь 2016 г.) разность ВО суша-море D для угла места 11.4° равна нулю. Для всех остальных 24-х из 25-и месяцев значения D разности ВО над суши и морем положительно независимо от угла места микроволновых измерений. Этот результат находится в хорошем качественном согласии со спутниковыми данными, демонстрирующими положительные отличия для теплого времени года, когда холодная вода охлаждает приповерхностный воздух и делает атмосферу над водоемом устойчивой, что предотвращает конвекцию и образование облаков. Отметим, что значения контраста ВО меняются из года в год и из месяца в месяц. Величина разности значительно варьирует: от $0,001\text{--}0,002 \text{ кг м}^{-2}$ до $0,011\text{--}0,012 \text{ кг м}^{-2}$. Необходимо подчеркнуть, что малые измеренные значения контраста ВО являются свидетельством сложности решаемой задачи, а также указывают на то, что результаты должны быть очень чувствительными к процедурам оценки систематической погрешности и контроля качества данных.

Для сравнения результатов, полученных двумя алгоритмами (линейная регрессия и статистическая регуляризация) были проведены два теста. В первом тесте регрессионный алгоритм применялся к измерениям НАТПРО, которые успешно прошли контроль качества, встроенный в регуляризационный алгоритм (сходимость итерационного процесса и проверка спектральной невязки). Во втором тесте регрессионный алгоритм применялся ко всем измерениям (без контроля качества). Результат оказался весьма показательным. В первом случае среднемесячные результаты, полученные с помощью двух алгоритмов, находились в хорошем качественном и количественном соответствии. Во втором тесте результаты, полученные двумя алгоритмами, имели существенные отличия. Эти тесты однозначно указывают на превосходство регуляризационного алгоритма и соответствующих процедур контроля качества данных над регрессионным алгоритмом в задаче оценки контраста суша-море в значениях водозапаса облаков.

Исследования проведены с использованием оборудования ресурсного центра «Геомодель» Научного парка СПбГУ.

Литература

1. Karlsson K.A. 10 Year Cloud Climatology Over Scandinavia Derived From NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer Imagery // *Int. J. Climatol.* 23. 1023–1044. <https://doi.org/10.1002/joc.916>, 2003.
2. Kostsov V.S., Kniffka A., and Ionov D. V. Cloud liquid water path in the sub-Arctic region of Europe as derived from ground-based and space-borne remote observations // *Atmos. Meas. Tech.*, 11 5439–5460. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5439-2018>. 2018.
3. Kostsov V.S., Kniffka A., Stengel M., and Ionov D. V. Cross-comparison of cloud liquid water path derived from observations by two space-borne and one ground-based instrument in northern Europe // *Atmos. Meas. Tech.* 12. 5927–5946. <https://doi.org/10.5194/amt-12-5927-2019>. 2019.
4. Kostsov V.S., Ionov D. V., and Kniffka A. Detection of the cloud liquid water path horizontal inhomogeneity in a coastline area by means of ground-based microwave observations: feasibility study // *Atmos. Meas. Tech.* 13. 4565–4587. <https://doi.org/10.5194/amt-13-4565-2020>. 2020.
5. Kostsov V.S., Ionov D. V., Biryukov E. Yu., and Zaitsev N. A. Cross-validation of two liquid water path retrieval algorithms applied to ground-based microwave radiation measurements by the RPG-HATPRO instrument // *Int. J. Remote Sensing.* 39(5). 1321–1342. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1404163>. 2018.
6. Kostsov V.S. General approach to the formulation and solution of the multi-parameter inverse problems of atmospheric remote sensing with measurements and constraints of different types // *Int. J. Remote Sens.* 36. 2973–3004. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1054961>. 2015.
7. Kostsov V.S. Retrieving Cloudy Atmosphere Parameters from RPG-HATPRO Radiometer Data // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 51. 156–166. <https://doi.org/10.1134/S0001433815020085>. 2015.

Derivation of the land-sea contrast of cloud liquid water path from multi-angle ground-based microwave measurements in a coastline area

Kostsov V.S.¹, Ionov D. V.¹

¹ St.Petersburg State University, Faculty of Physics
e-mail: v.kostsov@spbu.ru

Abstract

Combined multi-angle ground-based measurements of self-emitted microwave (MW) radiation by modern microwave radiometers provide an opportunity to study horizontal inhomogeneities of the humidity field in the troposphere and of the cloud liquid water path (LWP) spatial distribution. However, practical applications are difficult and require thorough analysis of the information content of measurements, assessment of errors of data processing algorithm and the development of the quality control procedures. In this study, we analyse the application of LWP retrieval algorithm based on the inversion of the radiative transfer equation to the problem of detection of the LWP horizontal inhomogeneities by means of ground-based microwave observations in the vicinity of a coastline. The study is based on data acquired by the MW radiometer RPG-HATPRO which is located in the suburbs of St.Petersburg, Russia, at 2.5 km distance from the coastline of the Neva Bay (the Gulf of Finland) and is operating in angular scanning mode in the vertical plane. The possibility to detect LWP horizontal inhomogeneity, namely the LWP land-sea contrast, for different measurement geometries (elevation angles) and values of cloud base height is analysed. As a result of processing the MW measurements at the observational site of St.Petersburg State University, the monthly-averaged values of the LWP land-sea difference have been obtained for summer months within the period 2013–2021. For 24 out of 25 months of high quality observations, the LWP land-sea monthly difference is positive (larger values over land and smaller values over water) and can reach 0.010–0.013 kg m⁻².

Keywords: cloud liquid water path, ground-based microwave remote sensing of the troposphere, land-sea contrast