

Влияние эффекта «облачной радуги» в измерениях спутникового прибора SEVIRI на результаты определения суточного хода контраста водозапаса облаков «суша—море» на севере Европы

В.С. Косцов[✉], Д.В. Ионов, А.Б. Андриюкова, Е.П. Рябушко*

*Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет
198504, г. С.-Петербург-Петродворец, ул. Ульяновская, 1*

Поступила в редакцию 12.03.2024;
после доработки 21.05.2024;
принята к печати 19.06.2024

Информация о водозапасе облаков (ВО) необходима для решения многих задач физики атмосферы, включая глобальное и региональное моделирование климата, прогноз погоды, а также моделирование гидрологического цикла. Представлены результаты определения контраста ВО «суша—море» из спутниковых измерений прибором SEVIRI над сушей и водными объектами на севере Европы в регионе, охватывающем Рижский и Финский заливы Балтийского моря, а также озера: Ладожское, Онежское, Псковское, Чудское, Ильмень и Сайма. При исследовании суточного хода контраста ВО над некоторыми водными объектами были обнаружены два максимума, наблюдающиеся почти симметрично относительно полудня по шкале времени UTC. В подавляющем большинстве случаев они фиксировались в точках измерений в Рижском и Финском заливах Балтийского моря. Предположительно, данные максимумы являются артефактом наблюдений, обусловленных эффектом «облачной радуги». Расчеты угла рассеяния для спутниковых измерений в рассмотренных точках подтверждают данный вывод. Обсуждается проблема отбраковки и анализа данных, которые получены в условиях, когда возможно появление мешающего сигнала из-за эффекта «облачной радуги». Предложенный подход к анализу данных и полученные результаты могут быть использованы для оценки качества измерений ВО прибором SEVIRI в различных районах земного шара.

Ключевые слова: водозапас облаков, тропосфера, неоднородности атмосферных параметров, суточный ход атмосферных параметров, дистанционное зондирование, метеорологические спутники, прибор SEVIRI; cloud liquid water path, troposphere, inhomogeneities of atmospheric parameters, diurnal cycle of atmospheric parameters, remote sensing, meteorological satellite, SEVIRI.

Введение

Спутниковые измерения параметров облачности прибором SEVIRI (Spinning Enhanced Visible Infra-Red Imager) позволяют изучать свойства облачности в глобальном масштабе с высоким пространственным и временным разрешением. Прибор представляет собой сканирующий 12-канальный радиометр, который работает в видимой и инфракрасной областях спектра. Он установлен на геостационарных метеорологических спутниках Meteosat

и сканирует большую площадь земной поверхности, для обозначения которой используется специальный термин «SEVIRI disk» [1]. Основное положение спутника на орбите находится над экватором около нулевой долготы и позволяет вести измерения над Европой, Африкой, Атлантическим океаном, частью Южной Америки и частью Индийского океана. Пространственное разрешение в подспутниковой точке составляет 3 км. Частота сканирования обеспечивает получение данных над какой-либо точкой поверхности один раз в 15 мин. Информационные продукты прибора SEVIRI — это параметры атмосферы и облачности, которые являются результатом применения сложного алгоритма, использующего так называемые «поисковые таблицы», формируемые с помощью предварительных расчетов для набора состояний атмосферы и параметров под-

* Владимир Станиславович Косцов (v.kostsov@spbu.ru), Дмитрий Викторович Ионов (d.ionov@spbu.ru), Арина Борисовна Андриюкова (andryukova03@bk.ru), Егор Павлович Рябушко (st095856@student.spbu.ru).

стилающей поверхности. Подробное описание алгоритма, используемых моделей переноса излучения и блок-схемы, иллюстрирующей алгоритм, можно найти в статье [2].

Водозапас облаков (ВО), показывающий полную массу жидкокапельной фракции облака в столбе единичного сечения, — одна из важнейших переменных в наборе параметров, характеризующих облачность; она используется для решения различных задач прогноза погоды и климатологии. Данные о ВО входят в перечень информационных продуктов, получаемых из измерений прибором SEVIRI. Подробный анализ статистических характеристик ВО для различных типов облачности, полученных из измерений прибором SEVIRI, можно найти, например, в [3]. В этой работе показано, что каждому типу облачности присуща своя функция случайного распределения ВО, которая постоянна во времени по всей области поверхности Земли, сканируемой прибором SEVIRI. Однако при подробном рассмотрении отдельных районов, например Центральной Европы, можно обнаружить и существенные вариации ВО. Исследование относительных суточных вариаций ВО показало, что они наиболее выражены для облачности нижнего и среднего ярусов. Также было отмечено, что среднее значение водозапаса облаков над сушей больше, чем над морем: для облачности нижнего яруса это различие составляет 15–27% по данным измерений 2009 г.

Специальное исследование, посвященное анализу различия водозапаса облаков над сушей и морем на севере Европы, где в качестве исходных данных использовались измерения SEVIRI, было проведено авторами настоящей работы [4]. В дальнейшем для обозначения этого различия мы будем использовать термин «контраст водозапаса облаков „суша–море“», который определим как разность между значениями ВО над сушей около какого-либо водного объекта (море, залив, озеро) и над этим водным объектом. При анализе статистических распределений контраста ВО и его внутрисезонных вариаций нами [4] был обнаружен ряд эффектов, которые были классифицированы как проявление погрешностей алгоритма обработки исходных данных прибора SEVIRI (измерений отраженного солнечного излучения). Среди этих эффектов — резкое и одновременное уменьшение контраста ВО в начале августа каждого года в различных точках измерения в Финском и Рижском заливах, а также полное отсутствие отрицательных значений контраста в статистических распределениях для ряда точек измерения.

Настоящая работа представляет собой продолжение исследований, начатых в статье [4], однако в качестве центрального объекта для изучения выбран суточный ход контраста ВО «суша–море». Цели работы — выявление закономерностей суточного хода и обнаружение возможных проявлений

артефактов измерений, подобных описанным в вышеупомянутой работе.

Исходные данные

В качестве исходных данных были использованы информационные продукты прибора SEVIRI, полученные по измерениям 2011–2017 гг., версия обработки — № 2 [5]. Размер исследуемого географического региона составлял $\approx 700 \times 700$ км, центр региона — г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. Горизонтальный размер наземного пиксела в измерениях SEVIRI для этой области земной поверхности составляет ~ 7 км. В набор исходных данных входили результаты определения водозапаса только для жидкокапельных облаков, данные для ледяных и смешанных облаков были отфильтрованы на начальном этапе. Важно отметить, что в набор данных были включены измерения как в условиях облачности, так и при ясном небе, поскольку в фокусе нашего исследования находятся не сами значения ВО, а их разность (контраст). Совершенно очевидно, что контраст наиболее выражен, когда в одной из точек облачность присутствует, а в другой точке небо ясное.

Также важно подчеркнуть, что мы рассматриваем не полный суточный ход контраста ВО, а лишь его дневную часть, поскольку измерения SEVIRI проводятся по отраженному солнечному излучению, т.е. в дневное время. При этом следует учесть, что данные, соответствующие зенитному углу Солнца более 72° , были отфильтрованы, поскольку погрешности этих данных максимальны. Такая отбраковка данных SEVIRI является стандартной [2, 6].

Анализ контраста ВО проводился не для всего региона, а для нескольких пар точек, расположенных над крупными водными объектами и сушей вблизи них. При этом мы постарались подобрать точки над сушей и водой таким образом, чтобы соединяющая их линия была ориентирована близко к направлению юг — север. Причиной этого было наше намерение избежать влияния переноса холодного воздуха западными ветрами с водоемов на сушу, поскольку в районе Финского залива преобладают западные и юго-западные ветры. В дальнейшем мы будем говорить о паре точек как об одной «точке измерения контраста». Эти точки измерений показаны на рис. 1, заимствованном из [4]. Отметим, что в настоящей работе оригинальные обозначения сохранены (ML — measurement location, далее следует номер точки). Обоснование выбора точек измерений, точные координаты и другую информацию можно найти в [4]. Самое большое количество точек было выбрано в Финском заливе, поскольку для этого водного объекта были обнаружены артефакты в результатах определения контраста ВО.

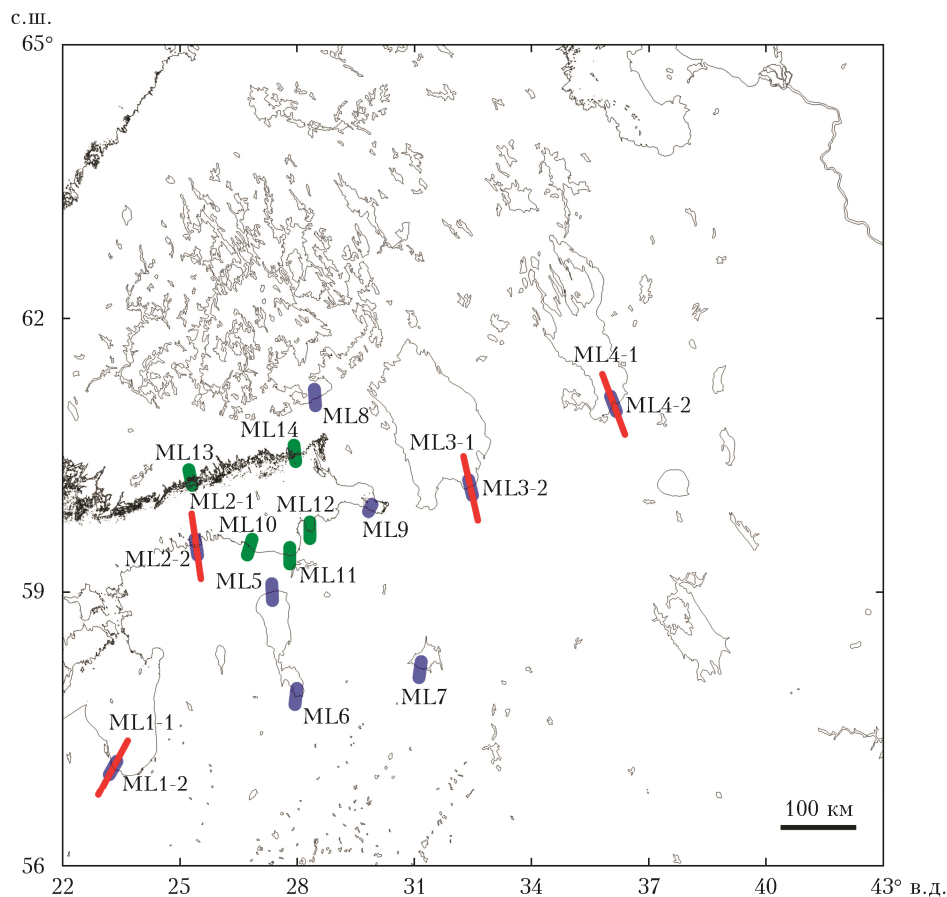


Рис. 1. Географический регион и конкретные точки, выбранные для исследования контраста ВО. Точки измерений ML1–ML14 (см. текст) показаны в виде линий, соединяющих наземные пиксели измерений SEVIRI над сушей и водной поверхностью: длинные тонкие линии (ML1-1, ML2-1, ML3-1, ML4-1) – контраст ВО на большом расстоянии (около 80 км), короткие полужирные линии (ML1-2, ML2-2, ML3-2, ML4-2) – контраст ВО на малых расстояниях (около 20 км); ML10–ML14 – «дополнительные» точки измерений в Финском заливе. Рисунок заимствован из работы [4] (см. цветные рисунки на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.09>)

Результаты

Суточный ход контраста водозапаса облаков «суша–море»

Суточную изменчивость контраста ВО «суша–море» мы описываем в терминах усредненных значений, каждое из которых относится к определенному моменту измерений SEVIRI (частота измерений – один раз в 15 мин). На первом этапе исследований усреднение проводилось за семь лет наблюдений. Из-за короткого периода солнечной освещенности в холодное время года мы выбрали для анализа только лето и изучили каждый месяц отдельно. В настоящей работе мы не рассматриваем данные за август, поскольку в нашей предыдущей статье [4] была обнаружена так называемая «августовская аномалия», характеризующаяся практически нулевыми контрастами ВО в этом месяце и являющаяся, предположительно, артефактом измерений.

На рис. 2 показаны характерные примеры усредненного суточного хода контраста ВО «суша–море» в двух точках измерений в Рижском и Фин-

ском заливах Балтийского моря в июне и июле, демонстрирующие два наиболее значительных локальных максимума, расположенных симметрично относительно полудня по шкале времени UTC (Universal Time Coordinated), около 11:00 и 16:00 по местному времени. Вертикальные отрезки на кривых – стандартная ошибка средних значений для каждого момента времени (стандартное отклонение выборки, деленное на корень квадратный из размера выборки). Видно, что эти отрезки относительно большие. Причиной этого являются высокая изменчивость значений контраста ВО и ограниченное количество данных для усреднения. Подчеркнем, что для одного усредненного значения количество исходных доступных измерений варьировалось от нескольких десятков до 100 и более. В результате на графиках иногда наблюдаются заметные осцилляции.

Как видно из рис. 2, локальные максимумы, обозначенные цифрами 1 и 2, являются существенными, заметно превышая стандартные ошибки средних значений, если за базовый уровень принять значения контраста за один час до времени максимума и через один час после него. Важно

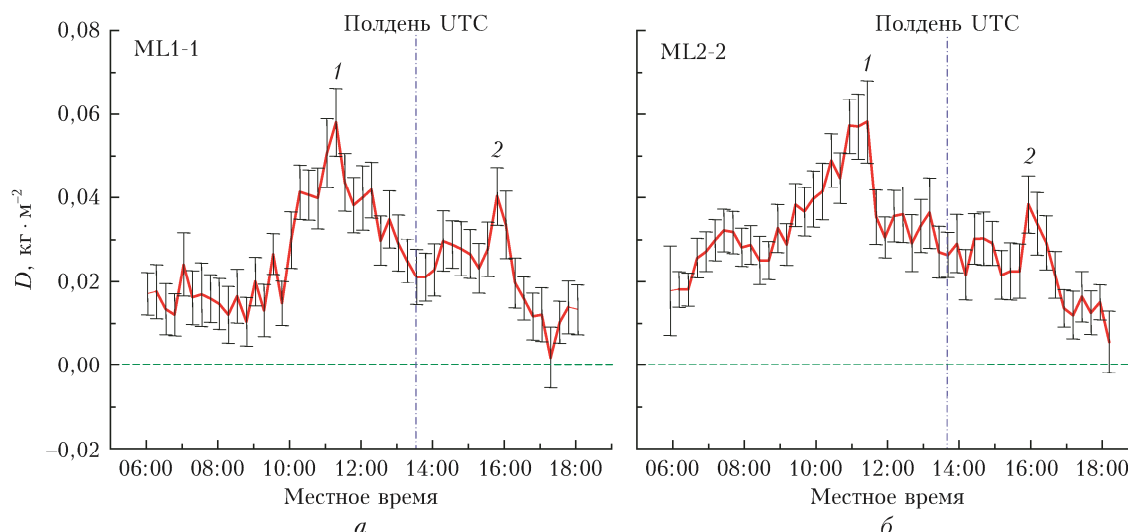


Рис. 2. Примеры усредненного за 7 лет (2011–2017 гг.) суточного хода контраста ВО «суша–море» D (сплошные линии) для двух точек измерений: в Рижском заливе в июне (а) и Финском заливе в июле (б). Цифрами 1 и 2 обозначены два локальных максимума, расположенные симметрично относительно полудня по шкале времени UTC; горизонтальная штриховая линия показывает нулевой контраст ВО; вертикальные отрезки на сплошных линиях – стандартная ошибка для средних значений ВО

подчеркнуть, что такие краткосрочные особенности суточного хода, наблюдающиеся в одно и то же время в различных географических точках, не могут объясняться ни случайным шумом измерений, ни физическими механизмами, относящимися к процессам облакообразования.

В таблице для всех точек измерений представлена полная информация о наличии/отсутствии первого и второго локальных максимумов в суточном ходе контраста ВО, аналогичных тем, которые показаны на рис. 2. При анализе данных статистическая значимость максимумов оценивалась путем расчета параметра:

$$A(t) = \frac{D_2 - ((D_1 + D_3)/2)}{\sigma_A}, \quad (1)$$

где t – время регистрации первого или второго локального максимума; D_i – средние значения контраста ВО за три последовательных равных промежутка времени Δt_i , при этом середина второго промежутка соответствует времени t . Погрешность значения A обозначена как σ_A и рассчитывается стандартным образом, исходя из погрешностей D_i . Физической основой использованного критерия являлось априорное предположение о том, что промежутки времени появления локальных максимумов

Наличие первого и второго локальных максимумов (около 11:00 и 16:00 по местному времени) в суточном ходе контраста ВО в основных выбранных точках измерений (0 – максимума нет, 1 – есть). Усреднение за период 2011–2017 гг.

Водный объект	Точка измерений	Наличие локальных максимумов в суточном ходе контраста ВО (A)	
		Июнь	Июль
1. Рижский залив	ML1-1	1 (3,0)/1 (2,4)	1 (3,7)/1 (3,3)
	ML1-2	1 (2,5)/1 (3,3)	1 (3,0)/1 (2,1)
2. Финский залив	ML2-1	0 (0,2)/1 (2,1)	1 (3,7)/0 (1,2)
	ML2-2	0 (1,8)/1 (2,7)	1 (3,0)/1 (2,5)
3. Ладожское озеро	ML3-1	0 (0,6)/1 (2,7)	0 (1,7)/0 (0,2)
	ML3-2	0 (0,8)/0 (1,0)	0 (0,4)/0 (0,1)
4. Онежское озеро	ML4-1	0 (1,9)/0 (1,3)	0 (0,2)/0 (0,2)
	ML4-2	0 (1,3)/0 (0,3)	0 (1,8)/0 (1,3)
5. Чудское озеро	ML5	0 (0,5)/0 (0,3)	1 (2,4)/0 (1,4)
6. Псковское озеро	ML6	0 (0,2)/0 (0,3)	0 (1,0)/0 (0,2)
7. Озеро Ильмень	ML7	0 (0,2)/0 (0,8)	0 (0,3)/0 (1,0)
8. Озеро Сайма	ML8	0 (1,0)/0 (0,8)	0 (1,2)/0 (1,7)
9. Невская губа	ML9	1 (3,1)/0 (0,1)	1 (3,6)/0 (0,9)
10. Финский залив, Калви	ML10	1 (3,0)/1 (2,2)	1 (2,9)/0 (1,8)
11. Нарвская губа	ML11	0 (1,5)/0 (0,7)	0 (1,5)/0 (1,6)
12. Лужская губа	ML12	1 (2,7)/0 (1,3)	1 (4,2)/0 (1,2)
13. Финский залив, Хельсинки	ML13	1 (2,9)/1 (2,9)	0 (1,6)/1 (2,2)
14. Финский залив, Торфяновка	ML14	1 (2,6)/0 (1,3)	1 (3,6)/0 (0,5)

нам известны и они достаточно короткие. Расчеты проводились для двух моментов времени $t_1 = 11,3$ ч и $t_2 = 16$ ч при значении $\Delta t_i = 1$ ч. Параметр A характеризует величину превышения средних значений контраста ВО в период возможного появления локального максимума над средними значениями до и после этого события. Очевидно, что локальный максимум можно признать статистически значимым, если $A(t) > 2$.

Легко заметить, что обсуждаемые локальные максимумы проявляются в среднем суточном ходе контраста во всех точках, расположенных в Балтийском море, за исключением точки ML-11, расположенной в Нарвской губе. Также стоит обратить внимание на то, что локальные максимумы отсутствуют для всех озер, за исключением Ладожского и Чудского, где проявляются, соответственно, второй максимум в июне и первый максимум в июле. Эти результаты свидетельствуют либо о том, что в Балтийском море происходят физические процессы, которые приводят к появлению краткосрочных максимумов контраста ВО в одинаковые моменты по местному астрономическому времени во всех точках измерений, либо мы имеем дело с артефактом измерений. В пользу второй гипотезы говорят два обстоятельства. Во-первых, максимумы всегда наблюдаются симметрично относительно полудня по шкале времени UTC. Таким образом, они, вероятнее всего, привязаны к геометрии измерений, определяемой положениями спутника и Солнца, и, следовательно, вряд ли могут быть обусловлены локальными физическими процессами. Во-вторых, в предшествующем исследовании [4] артефакты по данным SEVIRI были обнаружены как раз при анализе измерений в районе Балтийского моря.

Эффект «облачной радуги» в измерениях SEVIRI

Спутниковый прибор SEVIRI регистрирует отраженное солнечное излучение. Необходимо сделать небольшое пояснение к терминологии в настоящей статье. Когда рассматривается макромасштаб, т.е. система, куда входит Солнце, Земля с ее атмосферой как один «диск», образованный общим полем зрения прибора, и спутник, на котором этот прибор установлен, то для описания общей геометрии измерений удобно использовать термин «отражение» для описания переноса солнечного излучения. Если мы рассматриваем микромасштаб, т.е. элементарный объем, где происходит рассеяние солнечного излучения на ансамбле облачных капель, характеризующееся индикатрисой рассеяния, то корректнее использовать термин «рассеяние» и говорить об угле рассеяния.

Для рассматриваемого типа измерений возможны различные атмосферные оптические эффекты, приводящие к возникновению «мешающих» сигналов. Наиболее известным эффектом является так называемый sun glint — солнечный блик, который проявляется при зеркальном отражении солнечного излучения от подстилающей поверхности. Мешаю-

щий сигнал может появляться при углах рассеяния около 180° — этот эффект носит название «глория». При определенных углах рассеяния, которые существенно меньше 180° , может наблюдаться так называемый эффект «облачной радуги», обусловленный преломлением и отражением лучей в облачных каплях. Описание физики возникновения этих и других известных атмосферных эффектов и примеры их наблюдения можно найти в работе [7].

Специальное исследование условий возникновения эффектов «глории» и «облачной радуги» при измерениях отраженного солнечного излучения спутниковым прибором SEVIRI было проведено в [8]. В этой работе, как и в нашем исследовании, рассматривались только жидкокапельные облака. Модельные расчеты в [8] показали, что эффекты «облачной радуги» проявляются на индикатрисах рассеяния как локальные «пики» при углах рассеяния, близких к 140° (отклонения от 140° обусловлены вариациями характерных размеров облачных капель). Если эти особенности переноса солнечного излучения не учтены (или при их учете использована неадекватная исходная информация), то они могут определенным образом проявляться в конечных информационных продуктах спутниковых наблюдений.

Мы рассчитали суточный ход угла рассеяния Θ для выбранных нами точек измерения прибором SEVIRI, используя формулу [8]:

$$\Theta = \arccos(\sin\theta_0 \sin\theta \cos\Delta\varphi - \cos\theta_0 \cos\theta), \quad (2)$$

где θ_0 — зенитный угол Солнца; θ — зенитный угол направления на спутник;

$$\Delta\varphi = 180^\circ - |\varphi - \varphi_0| \quad (3)$$

— относительный азимутальный угол между направлениями на спутник и на Солнце.

На рис. 3 в качестве примера показан суточный ход угла рассеяния солнечного излучения при наблюдениях в точке ML1-1 (Рижский залив) 15.06.2014 г. и 15.07.2017 г. На графиках присутствует несколько кривых, каждая из которых соответствует одному из геостационарных спутников серии Meteosat, действующих в указанные моменты времени. Долгота подспутниковых точек для спутников Meteosat-8, 9, 10 для 15.06.2014 г. равна $3,48$; $9,31$ и $0,51^\circ$ соответственно (положительные значения — восточная долгота, отрицательные — западная). Долгота подспутниковых точек для спутников Meteosat-8, 9, 10, 11 для 15.07.2017 г. равна $41,62$; $9,39$; $-0,17$ и $-3,64^\circ$ соответственно. Данные об орбитах действующих в настоящее время спутников Meteosat, а также архивные данные об орбитах доступны по ссылке <https://user.eumetsat.int/resources/service-statuses/meteosat-orbital-para-meters>.

Как уже было отмечено во введении, основное положение спутника для измерений — над экватором около нулевого меридиана. Из рис. 3 видно, что одновременно вблизи этого положения могут находиться несколько спутников. Один из них является основным, остальные — резервными. Статус

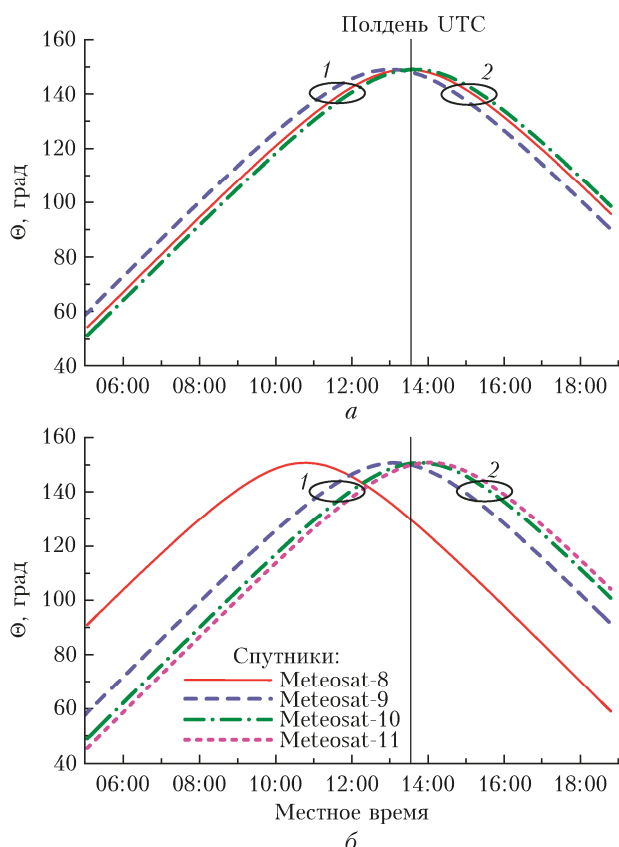


Рис. 3. Суточный ход (по шкале местного астрономического времени) угла рассеяния солнечного излучения для точки измерений ML1-1 в Рижском заливе Балтийского моря 15.06.2014 г. (а) и 15.07.2017 г. (б) для нескольких действующих спутников Meteosat (см. легенду). Овалами с номерами 1 и 2 обозначены области вероятного проявления эффекта «облачной радуги», когда угол рассеяния близок к 140°

спутника (основной/резервный), как и параметры орбит, в частности долгота подспутниковой точки, могут меняться со временем. Массивы данных измерений ВО, находящиеся в нашем распоряжении, не содержат информацию о конкретном спутнике и параметрах его орбиты в момент измерений. Следовательно, при оценке вероятности проявления эффекта «облачной радуги» мы можем ориентироваться лишь на разброс значений долготы подспутниковых точек активных спутников. Этот разброс указывает на проявление рассматриваемого эффекта в течение примерно 1 ч два раза в сутки симметрично относительно полудня по шкале времени UTC. Интервал между этими событиями составляет от 3,5 до 4 ч.

Отметим, что временной интервал между локальными максимумами контраста ВО на рис. 2 составляет $\sim 4,5$ ч. Если предположить, что эффект «облачной радуги» имеет место при угле $< 140^\circ$, например 136° , то, как видно из рис. 3, интервал между появлением этого эффекта будет составлять 4,5 ч. Отметим, что в работе [9] интервал углов рассеяния, где возможен эффект «облачной радуги», —

$135\text{--}140^\circ$. Симметричность относительно полудня по шкале UTC объясняется тем, что подспутниковая точка активного «измерительного» спутника близка к нулевому меридиану. Если бы, например, активным спутником 15.07.2017 г. был Meteosat-11, находящийся на 41° восточнее нулевого меридиана, то эффект наблюдался бы симметрично относительно полудня на долготе, где находится этот спутник (подчеркнем, что речь в настоящей работе идет о геостационарных спутниках).

Таким образом, наблюдаемые локальные максимумы контраста ВО с очень большой долей вероятности обусловлены проявлением эффекта «облачной радуги» при углах рассеяния, близких к 140° .

Проблема отбраковки ошибочных измерений и анализа суточного хода с ложными максимумами

Отбраковка ошибочных измерений, которые содержат неучтенную компоненту сигнала, обусловленную эффектом «облачной радуги», является непростой задачей в силу ряда причин. Главная из них — непредсказуемость проявления эффекта. Близость значения Θ к 140° необходимо, но не достаточное условием для проявления эффекта в измерениях. Подчеркнем, что речь идет именно о проявлении эффекта в информационных продуктах, поскольку локальный пик на индикатрисе рассеяния при $\Theta = 140^\circ$ присутствует всегда, а величина и форма пика определяются эффективными радиусом и шириной распределения облачных капель по размерам [8]. При этом не следует забывать, что существует неопределенность в расчетах угла рассеяния, если для каждого конкретного измерения отсутствует информация о долготе подспутниковой точки «активного» спутника, т.е. спутника, на котором установлен прибор, производящий измерения в это время. Как было показано выше на примерах, долгота может меняться в пределах до 10° , что приводит к неопределенности момента проявления эффекта «облачной радуги» около одного часа. Очевидно, что обязательное дополнительное условие проявления эффекта — наличие жидкокапельной облачности. При этом мешающий сигнал, обусловленный эффектом «облачной радуги», должен превышать вариации полезного сигнала, вызванные естественной изменчивостью параметров атмосферы и облачности в короткие промежутки времени.

Облачность обладает настолько большой пространственно-временной изменчивостью, что задача детектирования эффекта «облачной радуги» для измерений в конкретный день в конкретный момент времени на фоне естественных вариаций может считаться неразрешимой. Легко представить себе ситуацию, когда до и после момента приближения Θ к 140° облачность была намного мощней, чем в момент появления «радуги». В этом случае эффект не будет замечен и с большой долей вероятности вариация измеренного сигнала будет отнесена к естественной изменчивости параметров облачности.

Отсюда следует важный вывод: обнаружение эффекта возможно лишь при усреднении измерений при угле рассеяния, близком к 140° , проводимых в течение длительного периода времени, например в течение несколько лет, как в нашем случае. В качестве иллюстрации к этому выводу приведем рис. 4, на котором показан усредненный суточный ход контраста ВО в июне 2012 и 2016 гг. для точки измерений ML1-1.

Как можно видеть из рис. 4, в июне 2012 г. нет никаких отличительных признаков наличия эффекта «облачной радуги» около 11:00 и 16:00 по местному астрономическому времени. В течение дня присутствует около 10 примерно одинаковых локальных максимумов контраста ВО, которые, вероятнее всего, обусловлены вариациями параметров облачности. Второй пример (июнь 2016 г.) демонстрирует редкий случай, когда локальный макси-

мум контраста ВО (в данном случае первый) выделяется на фоне остальных локальных максимумов даже при усреднении за один месяц всего лишь одного года. При этом выделение второго локального максимума на фоне нескольких расположенных рядом других локальных максимумов не представляется возможным.

Необходимо сделать еще одно важное замечание по поводу проявления эффекта «облачной радуги» в информационных продуктах SEVIRI. Как указано в работе [8], в своей основе алгоритм обработки измерений рассеянного солнечного излучения учитывает эффект «облачной радуги», поскольку при расчетах поисковых таблиц используются индикатрисы рассеяния, описывающие этот эффект. Артефакт в результатах появляется, когда исходная информация о распределении облачных капель по размерам не соответствует реальной облачной ситуации во время измерений. Погрешность распространяется через весь алгоритм и проявляется в результатах. Поэтому прогнозировать, какой знак и какую величину будет иметь артефакт, не представляется возможным.

Поскольку обнаружение единичных измерений, в которых присутствует мешающая компонента, обусловленная эффектом «облачной радуги», невозможно, мы должны проанализировать результаты, содержащие эту компоненту. Как можно было видеть из представленных графиков суточного хода и результатов расчета угла рассеяния при измерениях, эффект «облачной радуги» проявляется в течение двух относительно коротких периодов времени, не превышающих одного часа. Следовательно, используя процедуру аппроксимации с целью сгладить исходную функцию, можно свести к минимуму искажающее влияние этого эффекта на суточный ход. Поскольку суточный ход определяется в существенной степени конвективными процессами за счет нагрева поверхности солнечным излучением, то мы с большей достоверностью можем считать его существенно более медленным процессом по сравнению с эффектом «солнечной радуги» в измерениях. Используя гладкую аппроксимацию, мы не только уменьшаем эффект «облачной радуги», но также устраняем осцилляции за счет случайных погрешностей измерений различного рода.

На рис. 5 представлены результаты аппроксимации среднемесячного суточного хода контраста ВО полиномом 7-й степени. Результаты получены при усреднении данных за все семь лет наблюдений. Аппроксимация проводилась как для полных массивов данных, так и для массивов, в которых были отбракованы все потенциально ошибочные наблюдения, т.е. все наблюдения в течение двух коротких (не более одного часа) периодов времени, когда возможно проявление эффекта «облачной радуги». Полином 7-й степени был выбран как обеспечивающий максимальный коэффициент детерминации и минимальное среднеквадратическое отклонение при отсутствии «ложных» локальных краткосрочных особенностей суточного хода. Коэффициент

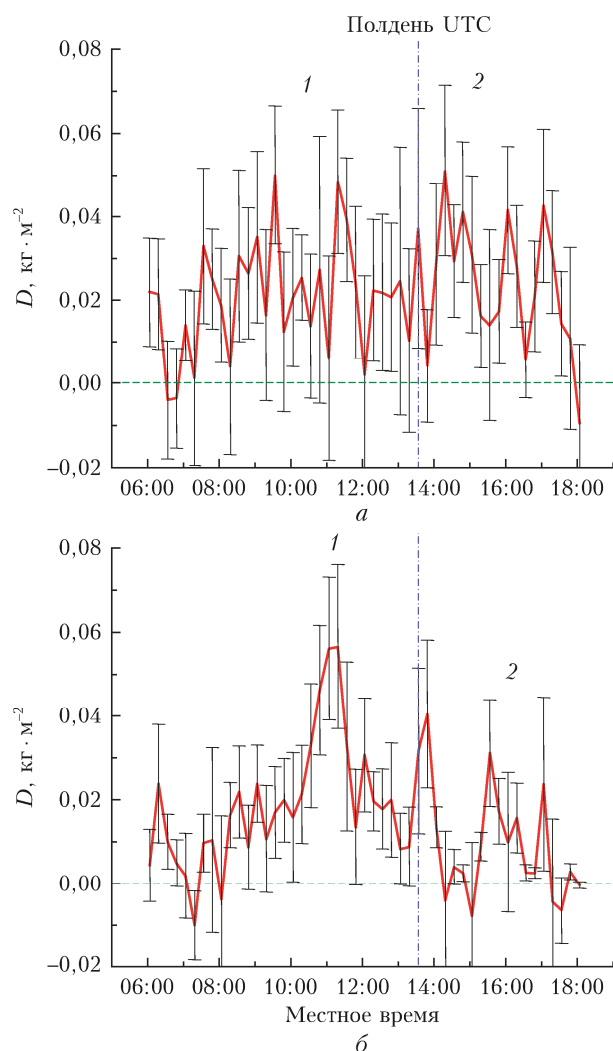


Рис. 4. Примеры усредненного суточного хода контраста ВО «суша–море» D (сплошные линии) для точки измерений в Рижском заливе ML1-1: июнь 2012 г. (а) и 2016 г. (б). Цифрами 1 и 2 обозначено время появления двух типичных локальных максимумов, обусловленных эффектом «облачной радуги». Описание см. на рис. 2

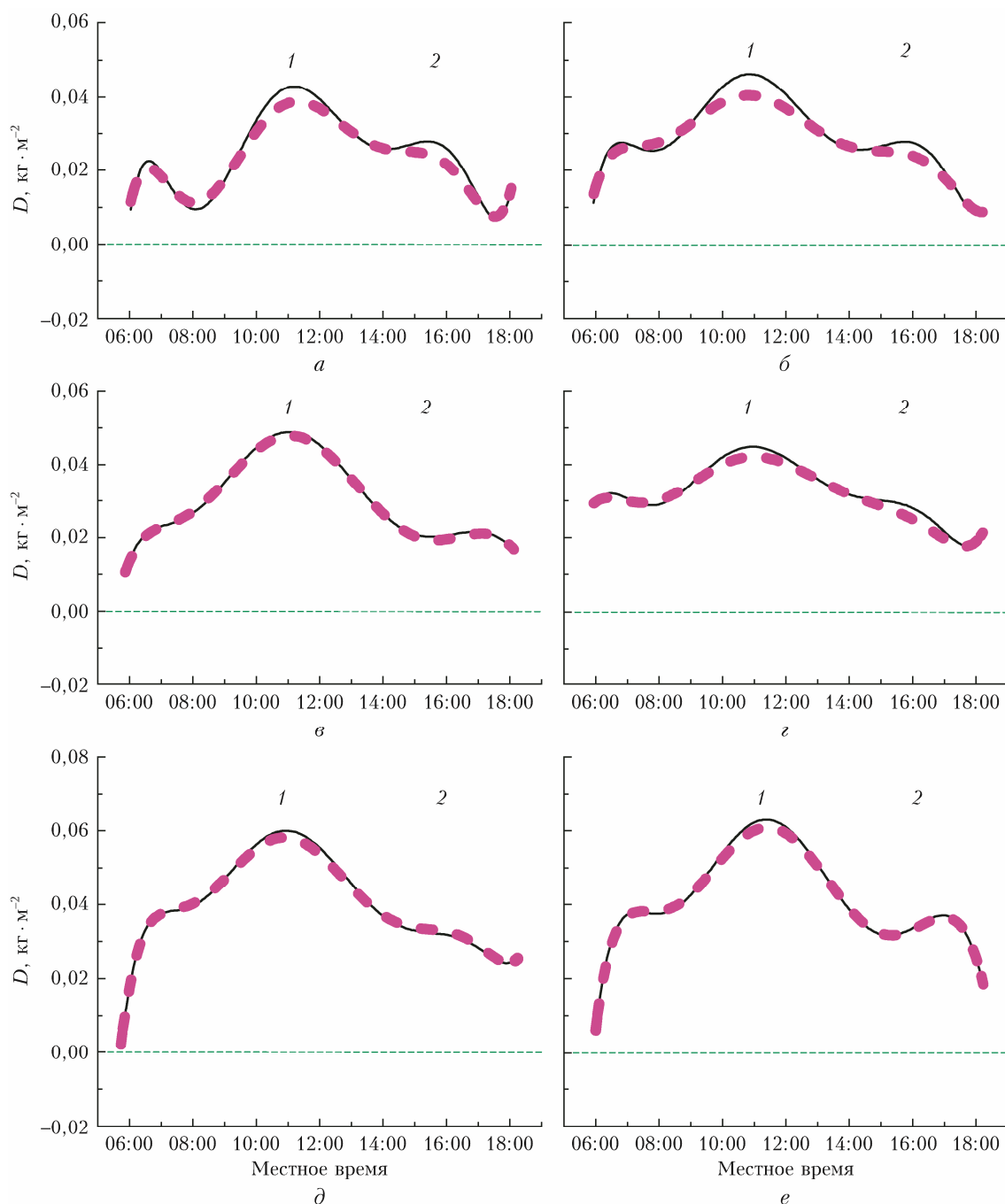


Рис. 5. Аппроксимация полиномами 7-й степени усредненного за 7 лет наблюдений (2011–2017 гг.) суточного хода контраста ВО «суша–море» для нескольких точек измерений в заливах Балтийского моря: *а* – ML1-1, июнь; *б* – ML2-2, июль; *в* – ML11, июнь; *г* – ML13, июль; *д* – ML9, июнь; *е* – ML9, июль. Сплошная линия – аппроксимация без отбраковки потенциально ошибочных данных в периоды проявления эффекта «облачной радуги», пунктир – с отбраковкой. Время проявления эффекта (11:00 и 16:00) обозначено цифрами 1 и 2. Горизонтальная пунктирная линия – нулевой контраст ВО

детерминации при аппроксимации полиномом 7-й степени для всех рассмотренных точек измерений находится в интервале 0,70–0,88. Среднеквадратические значения рассогласования между аппроксимацией и экспериментальными значениями лежат в интервале 0,005–0,006 кг·м⁻².

Основной вывод, который можно сделать из приведенных на рис. 5 результатов, заключается

в том, что для всех рассмотренных географических точек измерений гладкие аппроксимационные кривые, полученные для данных с отбраковкой и без, демонстрируют одинаковый суточный ход. Отметим, что даже в случае ярко выраженных проявлений эффекта «облачной радуги» (точки ML1-1, ML2-2, ML13) систематическое завышение контраста аппроксимационной кривой в периоды проявления

данного эффекта можно считать несущественным. Если эффект не выражен совсем (точка ML11) или не выражен один из локальных максимумов (точка ML9, второй максимум) (см. таблицу), то аппроксимационные кривые для данных с отбраковкой и без практически совпадают.

Из рис. 5 можно, таким образом, достаточно определенно оценить особенности суточного хода контраста ВО для Финского и Рижского заливов Балтийского моря в июне и июле: подъем значений с 06:00 до 07:00, стабилизация значений в течение одного часа, дальнейшее увеличение до 11:00, затем спад до 14:00–15:00, потом относительное постоянство значений до 16:00–17:00 и снова уменьшение.

Обсуждение результатов

Подробное исследование статистики ошибочных измерений при регистрации отраженного солнечного излучения с космических платформ и причин этих ошибочных измерений было выполнено в работе [9] для спутникового прибора MODIS. У приборов MODIS и SEVIRI одинаковый принцип измерений и схожие алгоритмы обработки результатов, основанные на предварительно рассчитанных таблицах поиска.

Причины ошибочных измерений многочисленны, перечислим только некоторые из них: неоднородность облачности на субпиксельных масштабах, оптические эффекты (солнечный блик, gloria, облачная радуга), перекрывание облачных слоев, неверная идентификация фазы облачных частиц, дождящие облака, морозящие облака, неверная оценка степени разорванности облачного покрова при наблюдении на больших углах (этот эффект значителен для точек измерений на краю общей области измерений — так называемого диска), 3D-эффекты при больших углах наблюдения в присутствии мощных облаков вертикального развития. Влияние эффекта «облачной радуги» на общую статистику измерений отраженного солнечного излучения спутниковыми приборами никак нельзя назвать пренебрежимо малым: например, как показано в [9], эффект «облачной радуги» — причина отбраковки 25% пикселей, когда в поле зрения прибора MODIS находились морские одноярусные жидкокапельные облака.

Важным выводом работы является тот факт, что влияние эффекта «облачной радуги» было обнаружено в июне и июле лишь для точек измерений в заливах Балтийского моря и не было выявлено в точках измерений у больших и малых озер. Поскольку в предыдущей работе [4] были зафиксированы артефакты в результатах измерений прибором SEVIRI именно в заливах Балтийского моря, с большой вероятностью можно заключить, что и в рассматриваемом случае мы имеем дело с неким артефактом. Предположительно, он обусловлен спецификой применения алгоритма обработки исходных измерений отраженного солнечного излучения в районе Балтийского моря. Список так называемых алгоритмических причин появления ошибоч-

ных измерений можно найти в работе [9]: ошибки программирования, методологические ошибки выбора параметров и пороговых значений различных критериев, использование неадекватной дополнительной информации. Исследование этих причин выходит за рамки нашей работы.

Заключение

В настоящей работе мы сфокусировали внимание на проявлении эффекта «облачной радуги» в результатах определения контраста ВО «суша—море» из спутниковых измерений ВО прибором SEVIRI над сушей и водными объектами на севере Европы. При исследовании суточного хода контраста ВО для некоторых водных объектов были обнаружены два максимума, наблюдающиеся почти симметрично относительно полудня по шкале времени UTC. В подавляющем большинстве случаев эти максимумы наблюдались в точках измерений в Рижском и Финском заливах Балтийского моря. В районах расположения малых и больших озер (Ладожское, Онежское, Чудское, Псковское, Ильмень, Сайма) эти локальные максимумы не обнаруживались. Как показали расчеты угла рассеяния солнечного излучения для измерений в этих точках, локальные максимумы совпадали с периодами, когда возможно появление эффекта «облачной радуги», т.е. при угле рассеяния 135–140°. Таким образом, данные максимумы с большой степенью вероятности являются артефактом наблюдений, который обусловлен этим эффектом.

Из-за существенной пространственно-временной изменчивости облачности идентифицировать и отбраковать отдельные единичные измерения прибором SEVIRI, в которых присутствует мешающая компонента, обусловленная эффектом «облачной радуги», не представляется возможным. Расчеты показали, что аппроксимация суточного хода полиномом 7-й степени позволяет уменьшить влияние мешающей компоненты и при этом отслеживать основные особенности суточного хода. При использовании аппроксимации можно предварительно полностью отбраковывать все измерения, соответствующие углам рассеяния 135–140°, однако даже в отсутствие такой отбраковки погрешность, возникающая при наличии ошибочных результатов, является пренебрежимо малой и составляет в рассмотренных нами случаях 0,001–0,006 кг·м⁻² (2–14% в относительном выражении). После аппроксимации суточного хода контраста ВО полиномом были обнаружены следующие особенности для Финского и Рижского заливов Балтийского моря в июне и июле: подъем значений с 06:00 до 07:00, стабилизация значений в течение одного часа, дальнейшее увеличение до 11:00, затем спад до 14:00–15:00, потом относительное постоянство значений до 16:00–17:00 и снова уменьшение.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке РНФ (грант № 24-27-00016, <https://rscf.ru/project/24-27-00016/>).

Список литературы

1. Schmetz J., Pili P., Tjemkes S., Just D., Kerkmann J., Rota S., Ratier A. An introduction to Meteosat second generation (MSG) // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2002. V. 83. P. 977–992. DOI: 10.1175/1520-0477(2002)083<0977:AITMSG>2.3.CO;2.
2. Roebeling R.A., Feijt A.J., Stammes P. Cloud property retrievals for climate monitoring: Implications of differences between Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) on METEOSAT-8 and Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) on NOAA-17 // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. 20210. DOI: 10.1029/2005JD006990.
3. Kniffka A., Stengel M., Lockhoff M., Benmartz R., Hollmann R. Characteristics of cloud liquid water path from SEVIRI onboard the Meteosat Second Generation 2 satellite for several cloud types // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7. P. 887–905. DOI: 10.5194/amt-7-887-2014.
4. Kostov V.S., Ionov D.V. Specific features of the land–sea contrast of cloud liquid water path in Northern Europe as obtained from the observations by the SEVIRI instrument: Artefacts or reality? // *Meteorology*. 2023. V. 2, N 4. P. 464–488. DOI: 10.3390/meteorology2040027.
5. Benas N., Finkensieper S., Stengel M., van Zadelhoff G.-J., Hanschmann T., Hollmann R., Meirink J.F. The MSG-SEVIRI-based cloud property data record CLAAS-2 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2017. V. 9. P. 415–434. DOI: 10.5194/essd-9-415-2017.
6. Kim M., Cermak J., Andersen H., Fuchs J., Stirnberg R.A. New satellite-based retrieval of low-cloud liquid-water path using machine learning and meteosat SEVIRI data // *Remote Sens.* 2020. V. 12. P. 3475. DOI: 10.3390/rs12213475.
7. Können G.P. Rainbows, halos, coronas and glories. Beautiful sources of information // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2017. V. 98. P. 485–494. DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0014.1.
8. Benas N., Meirink J.F., Stengel M., Stammes P. Sensitivity of liquid cloud optical thickness and effective radius retrievals to cloud bow and glory conditions using two SEVIRI imagers // *Atmos. Meas. Tech.* 2019. V. 12. P. 2863–2879. DOI: 10.5194/amt-12-2863-2019.
9. Cho H.-M., Zhang Z., Meyer K., Lebsock M., Plattnick S., Ackerman A.S., Girolamo L.Di, Labonnote L.C., Cornet C., Riedi J., Holz R.E. Frequency and causes of failed MODIS cloud property retrievals for liquid phase clouds over global oceans // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2015. V. 120. P. 4132–4154. DOI: 10.1002/2015JD023161.

V.S. Kostov, D.V. Ionov, A.B. Andryukova, E.P. Ryabushko. Influence of the “cloud bow” effect in SEVIRI satellite instrument measurements on characterisation of the diurnal cycle of the land–sea contrast of the cloud liquid water path in Northern Europe.

The information on the cloud liquid water path (LWP) is necessary for many applications including global and regional climate modelling, weather forecasting, and modelling of the hydrological cycle. The results of derivation of the land–sea LWP contrast from satellite measurements of LWP by the SEVIRI (Spinning Enhanced Visible Infra-Red Imager) instrument over land and water bodies in Northern Europe are presented. When studying the diurnal cycle of the LWP contrast for some water bodies, two separate maxima were discovered, which were observed nearly symmetrically relative to noon on the UTC time scale. In most cases, these maxima were present at measurement locations in the Gulf of Riga and in the Gulf of Finland in the Baltic Sea. Presumably, these maxima are an artefact of observations caused by the so-called “cloud bow effect”. Calculations of a scattering angle for the satellite measurements at these locations confirmed this conclusion. The problem of filtering out the data and the problem of analysing the data in case of possible manifestation of this confounding effect are discussed. The proposed approach to data analysis and the results can be used to assess the quality of LWP measurements by SEVIRI in various regions of the globe.