

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-4-43-62>

УДК 551.501.86

Автоматизированная технология диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды для Европейской территории России по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat MSG

Е.В. Волкова, А.В. Кухарский

*Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии
«Планета», Москва, Россия
quantocosa@bk.ru*

Представлено описание технологии, разработанной и внедренной в оперативную практику в ФГБУ «НИЦ «Планета», в основе которой лежат оригинальные авторские методы автоматизированного порогового попиксельного дешифрирования и классификации спутниковой информации по косвенным признакам. Отличительной чертой являются высокие оперативность (поступление результатов дешифрирования в базу данных менее чем через 0,5 мин) и периодичность (15 мин), а также возможность комплексного анализа синоптической ситуации на большой площади. Изложены результаты испытаний, на основании которых ЦМКП Росгидромета рекомендовала внедрить автоматизированную технологию диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды для Европейской территории России по данным радиометра SEVIRI/Meteosat в оперативную работу.

Ключевые слова: диагноз, параметры облачного покрова, осадки, опасные явления погоды, европейская территория России, радиометр SEVIRI/Meteosat

The automated technology for retrieving cloud cover properties, precipitation and weather hazards based on SEVIRI/Meteosat (MSG) data for the European part of Russia

E.V. Volkova, A.V. Kukharsky

*State Research Center of Space Hydrometeorology "Planeta", Moscow, Russia
quantocosa@bk.ru*

The technology developed and introduced to the operational practice at Planeta Research Center of Space Hydrometeorology is described. It is based on the original author's approaches to the automatic threshold pixel-by-pixel detection and classification of satellite information by indirect features. A distinctive feature of the derived products is their high operational efficiency (the detection results are recorded to the database in less than 0.5 minutes) and periodicity (15 minutes), as well as the possibility of the complex analysis of synoptic conditions over a vast territory. The results of the testing based on which the Roshydromet Central Methodological Committee

for Hydrometeorological and Heliogeophysical Forecasts recommended to implement the technology for retrieving cloud cover properties, precipitation, and weather hazards using SEVIRI/Meteosat data for the European part of Russia in the operational practice are discussed.

Keywords: diagnostic maps, cloud cover properties, precipitation, weather hazards, European part of Russia, SEVIRI/Meteosat

Введение

В ФГБУ «НИЦ «Планета» разработана и внедрена в оперативную практику автоматизированная технология диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды (ОЯП) для Европейской территории России (ЕТР) и Европы по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat MSG (точка стояния экватор 0° в. д.) [1]. Работа по созданию и валидации технологии выполнялась в рамках Плана научно-исследовательских и технологических работ Росгидромета «Развитие методов и технологий космического мониторинга и системы сбора данных с наблюдательной сети Росгидромета на базе Государственной территориально-распределенной системы приема, обработки, архивации и распространения информации с использованием существующих и перспективных космических аппаратов наблюдения Земли на полярных, геостационарных и высокоэллиптических орбитах» по заказу УГМАВ Росгидромета.

В основе технологии лежат оригинальные авторские методы автоматизированного порогового попиксельного дешифрирования и классификации спутниковой информации по косвенным признакам. В качестве предикторов используются значения радиационной температуры (круглосуточно) и альbedo (только в светлое время суток), в том числе их разности, в спектральных каналах 1, 2, 4–10 радиометра ($\lambda=0.6, 0.8, 3.9, 6.2, 7.3, 8.7, 9.7, 10.8$ и 12.0 мкм) SEVIRI/Meteosat, а также значения метеопараметров, полученных на предыдущих этапах классификации (из-за этого соблюдается строгий порядок поэтапной классификации). Помимо спутниковой информации, используются поля численного прогноза (NCEP GFS (США), пространственное разрешение $0,5^\circ$, сроки 0, 6, 12 и 18 ч ВСВ с заблаговременностью 0, 6 или 12 ч) вертикального распределения температуры в атмосфере (на стандартных изобарических уровнях и у поверхности Земли) и об атмосферном давлении на уровне моря, а также цифровая карта рельефа (gtop30). Пороговые значения предикторов представляют собой полученные эмпирическим путем функциональные зависимости от таких параметров, как географическая широта, угол спутникового визирования, высота места над уровнем моря, номер календарного дня от начала года, температура воздуха на уровне моря и другие.

Технология дешифрирует облачную маску, определяет макро- и микрофизические характеристики облачного покрова (температуру, барическую высоту и высоту над уровнем моря верхней границы облачности

(ВГО), высоту нижней границы облачности (НГО) над подстилающей поверхностью, максимальную и суммарную (водозапас) водность облачного слоя, толщину облачного слоя, фазовое состояние воды в облачных частицах вблизи ВГО, тип облачности, оптическая плотность и толщину облачного слоя, эффективный радиус облачных частиц, выделяет зоны осадков разной интенсивности и типа у поверхности Земли, рассчитывает суточные, месячные и годовые суммы осадков, детектирует зоны гроз, града и обледенения разной интенсивности и вероятности, а также высоту верхней (ВГ) и нижней границ (НГ) слоя обледенения каждой интенсивности (см. рис. 1). Значения температуры ВГО, высоты ВГО, барической высоты ВГО, толщины облачного слоя, высот ВГ и НГ слоев обледенения и сумм осадков рассчитываются по формулам в точных значениях, а для остальных метеопараметров – определяются в результате классификации пороговым методом в виде классов или градаций значений. Выделение классов/градаций осуществляется преимущественно «по нарастающей», т. е. от отсутствия явления к его максимальному значению. Значения метеопараметров являются средними или максимальными для площади пиксела (~30–100 км² и более в зависимости от угла спутникового визирования), поэтому фактически в пределах пиксела возможны участки облачности и с другими значениями (например, близкими классами или значениями, выше или ниже среднего, вплоть до полного отсутствия метеоявления).

На основе технологии создан и в 2017 г. внедрен в оперативную практику автоматизированный специализированный программный комплекс (АСПК) «SEVIRI-0-Europe» (ОИС № 2020662381). В процессе работы АСПК в автоматическом режиме обеспечивает:

- сбор необходимых для его работы данных (из соответствующих баз данных);
- предварительную подготовку спутниковой и прогностической информации;
- дешифрирование и классификацию параметров облачного покрова, осадков и ОЯП;
- расчет суточных, месячных и годовых сумм осадков;
- запись выходных продуктов в файлы и их передачу пользователям.

Результатом работы АСПК в режиме реального времени являются файлы-матрицы метеопараметров в точных значениях или кодах классов, а также растровые графические файлы (черно-белые или цветные обзорные (диагностические) карты) с исходным разрешением спутниковой информации для региона «Европа и ЕТР» (~15° з. д. – ~50° в. д. и ~45–69° с. ш.) и с высоким пространственным разрешением на регулярной сетке (с шагом 1,25' = 0,02° по широте и 1,5' = 0,025° по долготе) для региона «ЕТР и сопредельные страны» (42,0–63,0° с. ш. и 20,0–51,25° в. д.).

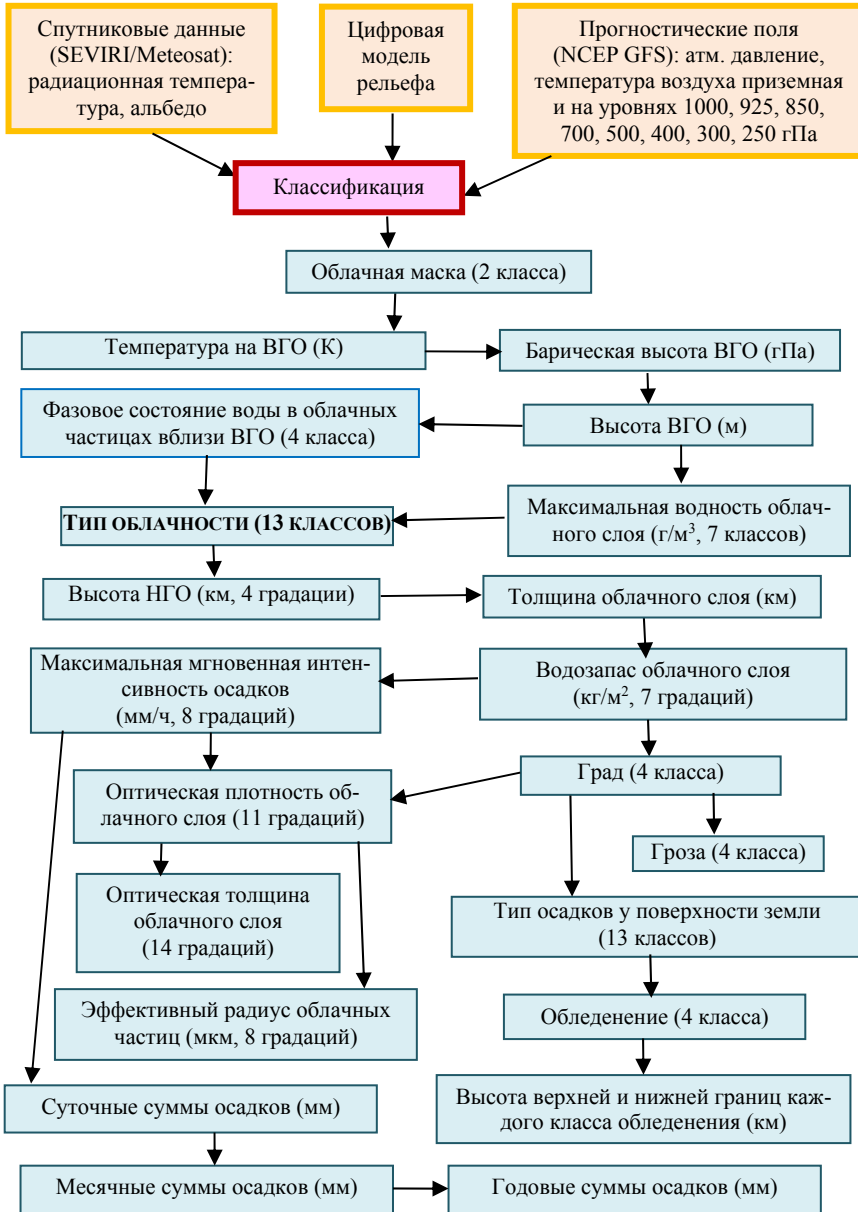


Рис. 1. Технологическая схема поэтапной классификации.

Fig. 1. The technological scheme of step-by-step classification.

Важным достоинством продуктов АСПК является высокая оперативность их получения. Работа АСПК стартует сразу после поступления в базы данных всей необходимой спутниковой и прогностической информации. Время компьютерной обработки одного срока спутникового наблюдения (включая предварительную подготовку спутниковой и прогностической информации, получение полного набора параметров облачности, осадков и ОЯП для двух регионов, а также запись результатов в файлы и передачу пользователям на ftp-адрес) не превышает 0,5 мин (в зависимости от параметров ПЭВМ). В результате, на карте отображена синоптическая ситуация, фактически существовавшая 6–8 мин назад. Отличительной особенностью АСПК также является высокая периодичность обновления карт (каждые 15 мин), а также возможность обзора большого количества метеопараметров для достаточно протяженной территории (Европа и ЕТР). На основе полученных диагностических карт за несколько сроков спутниковых наблюдений строится слайд-шоу, позволяющее дежурному синоптику анализировать динамику развития синоптической ситуации и атмосферных процессов за последние несколько часов и выдавать оперативный краткосрочный локальный и/или региональный прогноз их дальнейшего развития.

Результаты авторского испытания методики

При авторской валидации детектируемых АСПК метеопараметров использовались климатические данные (в том числе для различных типов облачности) и синхронные спутниковым данным наземных наблюдений на метеостанциях (МС) (балл общей облачности, погода в срок наблюдения, в последний час и между сроками, суточное количество осадков) и грозопеленгационной системы (ГПС) Московского региона (за 2017–2019 гг.). Ее результаты показали, что для региона «Европа и ЕТР» спутниковые оценки, в основном, хорошо согласуются с данными наземных метеонаблюдений и климатическими значениями с учетом ежегодных аномалий (по данным Всемирной метеорологической организации (ВМО) и Росгидромета). Подавляющее большинство параметров облачности, осадков и ОЯП детектируется в зависимости от метеопараметра, сезона, времени суток, региона и др. в 70–90 % случаев с точностью ± 1 класс/градация и в 80–99 % случаев ± 2 класса/градации. Грубых ошибок, т. е. когда ошибочно детектируются диаметрально противоположные классы/градации параметра, выявлено не было.

Наиболее точна методика для ЕТР и над большей частью континентальной Европы. Над Средиземным морем и Италией возможны ошибки (на ± 1 класс/градацию и обычно в сторону завышения) оценок многих детектируемых метеопараметров. Менее точна методика для оптически тонкой и многослойной облачности, при наличии температурной инверсии и в горах. При больших углах спутникового визирования возможна потеря небольших по площади и интенсивности метеоявлений из-за роста

площади пиксела. Качество классификации также зависит от точности используемой прогностической информации.

В табл. 1 представлены результаты авторской валидации, выполненной в автоматическом режиме, наземными наблюдениями на МС и ГПС, полученные в соответствии с руководящими документами [2, 3].

Таблица 1. Результаты авторской валидации спутниковых оценок данными наземных наблюдений на МС и ГПС в 2017-2019 гг.

Table 1. The results of the authors' validation satellite estimation by ground observations at meteorostations and thunderstorm bearing in 2017-2019

Валидируемый параметр	Характеристика	Класс	2017	2018	2019	Σ 2017-2019
Зоны осадков (МС)	POD, %	осадки	83,7	86,1	84,7	85,2
		без осадков	73,2	73,7	73,7	73,6
	POO, %	осадки	86,4	84,6	84,2	84,8
		без осадков	68,9	75,9	74,5	74,1
	HR, %		80,3	81,5	80,6	81,0
Интенсивность осадков (МС)	POD, %	слабые	70,4	77,5	76,2	75,9
		умеренные	72,7	76,3	73,3	74,7
		сильные	40,9	36,8	36,4	37,4
Тип осадков у Земли (МС)	POD, %	снег	41,9	62,6	62,2	57,3
		дождь	70,6	64,2	64,6	65,9
		смешанные и др.	16,3	17,1	16,4	16,7
	POO, %	снег	49,5	58,4	56,0	55,6
		дождь	79,3	77,1	76,0	77,4
		смешанные и др.	81,2	77,9	80,8	79,5
Зоны гроз (МС)	POD, %	грозы	64,2	64,8	66,8	65,2
	POD, %	без гроз	91,8	94,1	94,2	93,7
	HR, %		91,1	93,5	93,5	93,1
Зоны гроз (ГПС)	POD, %	гроза	-	86,5	76,4	79,8
Град в облаках (МС)	POD, %	град в обл.	71,9	73,1	73,0	72,9
	POD, %	без града	89,8	91,9	92,5	91,4
	HR, %		89,3	91,5	92,0	91,2
Град у Земли (МС)	POD, %	град	36,3	40,9	41,5	40,2
		без града	98,2	98,2	98,6	98,3
	POO, %	град	36,4	33,0	44,0	36,6
	HR, %		96,5	96,9	97,2	96,9

Примечание. Класс «смешанные и др.» включает в себя классы «снег с дождем», «дождь со снегом», «мокрый снег», «ледяной дождь», «замерзающий дождь», «снежная крупа», «град»).

Рассчитывались следующие характеристики точности спутниковых оценок:

- общая оправдываемость (Hit Rate, HR) спутникового диагноза облачного параметра или метеоявления, или класса, т.е. отношение случаев всех совпавших классов, метеоявлений или метеопараметров к общему количеству случаев всей выборки;

- оправдываемость (Probability of Occurrence, POO) спутникового диагноза наличия или отсутствия облачного параметра или метеоявления, или его класса, т. е. отношение количества случаев совпадения класса, метеоявления или метеопараметра к количеству случаев этого класса, метеоявления или метеопараметра по спутниковым данным;

- предупрежденность (Probability of Detection, POD) факта наличия или отсутствия облачного параметра или метеоявления, или его класса, т. е. отношение количества случаев совпадения класса, метеоявления или метеопараметра к количеству случаев этого класса, метеоявления или метеопараметра по контрольным (наземным) данным.

Для отдельных месяцев разных лет значения POD, POO и HR получаются выше (для месяцев с наибольшей вероятностью и/или повторяемостью события) или ниже (для месяцев с наименьшей вероятностью и/или повторяемостью события), чем приведенные суммарные оценки за год в табл. 1. Оценки точности классификации, приведенные в табл. 1, вычислены в автоматическом режиме и не учитывают проблемы сопоставления спутниковой (площадной) информации и наземных (точечных) наблюдений:

- субъективность наземных оценок в зависимости от квалификации наблюдателя (в т. ч. ошибки наблюдения и ошибки использования кодов погоды для описания метеоявлений);

- проблема пространственного совмещения разных видов наблюдений: в зависимости от угла спутникового визирования и высоты ВГО облако на карте диагноза может смещаться до 20–40 км относительно реального положения;

- проблема временного совмещения разных видов наблюдений: спутниковые и наземные наблюдения не одновременны, и за это время облако может существенно сместиться и измениться, а в случае с осадками – необходимо время на их долет до поверхности Земли, чтобы быть зарегистрированными на метеостанции;

- проблема совмещения точечных и площадных оценок очень важна для локальных и кратковременных метеоявлений (град, сильный ливень и др.).

Автоматическая валидация не может учесть эти проблемы, поэтому значения POD и POO получились невысокими, особенно для локальных и кратковременных явлений. Ручная независимая валидация, проводимая на метеостанциях в тестовом режиме с учетом проблем сравнения разных видов информации, показывает более высокую точность методики.

Результаты независимых испытаний методики

С целью более точного определения достоверности выходных продуктов методики с учетом существующих сложностей сопоставления спутниковых и наземных наблюдений были проведены независимые испытания карт спутникового диагноза некоторых из детектированных параметров облачности, осадков и ОЯП в Центральном-Черноземном УГМС и Вологодском ЦГМС в ручном режиме в соответствии с [2, 3] и методическими рекомендациями авторов методики на примере накопленного архива синхронных спутниковых и наземных наблюдений с июня 2019 г. по май 2020 г. В Вологодском ЦГМС испытания проводились «по пункту» (МС Вологда), а в Центральном-Черноземном УГМС – «по пункту» (шесть МС: Курск, Курчатов, Железнодорожск, Обоянь, Тим, Рыльск) и «по территории» (Курская область) с использованием карт высокого разрешения (регион «ЕТР и сопредельные страны») с нанесенными на них местоположениями МС с окрестностями. Испытания проводились для двух стандартных сроков метеонаблюдений: 0 и 12 ч ВСВ (им соответствуют спутниковые сроки 23:45 ч ВСВ (предыдущий день) и 11:45 ч ВСВ (текущий день)). Оценивалось качество детектирования: зон осадков (факт наличия осадков любой интенсивности и фазы), интенсивности осадков, типа осадков у поверхности Земли, типа облачности, грозы (факт наличия грозы над МС и в окрестностях) и града (факт наличия града в облаках и возможного выпадения на поверхность Земли).

Валидации подвергались абсолютно все классы параметра облачности или метеоявления, включая его отсутствие. Так как размеры пиксела спутникового изображения достаточно велики и получаемые спутниковые оценки соответствуют среднему или максимальному значению в его пределах, то в пределах площади пиксела возможны ситуации и с другими значениями детектируемого параметра облачности, осадков или ОЯП вплоть до его отсутствия. Поэтому расчет оправдываемости осуществляется в соответствии с [3, п. 7.1.11] (метеоявление, детектируемое по спутниковым данным, не распространено на весь пиксел в указанной градации/классе, т. е. наблюдается «местами» или «в отдельных районах»), а также [3, пп. 7.1.4, 7.1.7, 7.1.10, 7.1.12 и 7.1.14], что нашло отражение в методических рекомендациях авторов методики для дежурных синоптиков в виде подробных таблиц сопоставления разных классов/градаций, полученных спутниковой методикой, с реально наблюдавшимися на МС метеоявлениями. Для разных классов/градаций и различных параметров облачности и метеоявлений значения оправдываемости в зависимости от совпадения или несовпадения спутниковых и наземных наблюдений назначались равными 0, 50, 75 или 100 %. Несмотря на то, что гроза и град относятся к опасным метеоявлениям и оправдываемость штормовых предупреждений рассчитывается согласно [3, п. 8], в данном случае валидация гроз и града осуществляется по аналогии с неопасными явлениями, так как спутниковая методика детектирует не само ОЯП (на картах указаны классы в значениях интенсивности явления для облегчения работы

с ними), а вероятность события ОЯП (A) и наиболее вероятная интенсивность этого ОЯП: например, «без ОЯП» – это $A=0\%$, «слабое ОЯП» – это $A>0\%$ (при этом ОЯП скорее слабое, чем умеренное, и вряд ли сильное), «умеренное ОЯП» – это $A>70\%$ (при этом ОЯП скорее умеренной интенсивности, чем слабое или сильное), «сильное ОЯП» – это $A\sim 100\%$ (при этом ОЯП скорее сильное, чем умеренной интенсивности, и вряд ли слабое). Действительно, карты зон гроз и града являются не точными картами диагноза этих метеоявлений, а картами, обнаруживающими облачность, способную иметь или вызвать данное явление в срок наблюдения или в течение ближайших 5–15 мин с разной степенью вероятности, т. е. по сути являются картами классификации облачности на 4 класса вероятности и интенсивности ОЯП. Кроме того, карты зон града, помимо вероятности его выпадения у поверхности Земли, несут в себе информацию и о наличии «града в облаке» (классы: «облака без града», «град в облаках, вероятность выпадения больше 0 %, град слабый, вряд ли умеренный и никогда сильный», «град в облаках, максимальная вероятность выпадения в пределах пиксела не более 60–70 %, град скорее умеренный или слабый, чем сильный», «высокая вероятность выпадения града в пределах пиксела ($A>90\%$), град скорее умеренный или сильный, чем слабый»), которое часто сопровождает такие опасные метеоявления, как гроза и сильный ливень летом и сильная снежная крупа и сильный снегопад зимой, поэтому валидация «зон града» осуществлялась и в холодный период года. Таким образом, карты зон града – это карты типа облачности, связанной с опасными метеоявлениями в виде гроз и сильных осадков, карты зон гроз – частный случай карт града – типы облачности с грозовыми электрическими разрядами разной вероятности и интенсивности. Аналогично и с картами интенсивности и типа осадков. В первом случае это максимально возможная в пределах пиксела интенсивность осадков (в некоторых районах пиксела осадки могут иметь другую, более слабую интенсивность или даже отсутствовать), а во втором – это наиболее вероятный, наиболее опасный или преобладающий тип осадков в пределах пиксела.

В сводной ежедневной таблице дежурным синоптиком для каждой МС указывались дата, время срока наблюдения и оправдываемость спутниковых оценок по каждому валидируемому метеопараметру. В сводной ежемесячной таблице для каждого месяца и каждого метеопараметра рассчитывалась и заносилась успешность спутниковой методики «по пункту» (в Вологодском ЦГМС и Центрально-Черноземном УГМС) и «по территории» (в Центрально-Черноземном УГМС), а также указывалось количество дней и сроков совместных наблюдений за месяц. Итоговые результаты испытаний (сводные таблицы для каждого валидируемого метеопараметра «по пункту» и «по территории» за сезон и год) представлены в табл. 2 и 3.

На рис. 2–7 приведены графики годового хода оценок ежемесячной успешности методики: «по пункту» и «по территории», в т. ч. отдельно для дня и ночи и за сутки.

Таблица 2. Результаты сравнения выходных продуктов, детектированных спутниковой методикой, с наземными метеонаблюдениями «по пункту» (МС Вологда, Вологодское ЦГМС) за период с июня 2019г. по май 2020 г.

Table 2. The results of comparison satellite classified products with ground observations at meteostation Vologda from June 2019 till May 2020

Период времени		Количество		Успешность, %					
		дней	сроков	Зоны осадков	Тип осадков	Интенсивность осадков	Тип облачности	Гроза	Град
лето 2019	00 ч	92	88	93,5	93,5	90,4	85,5	98,6	99,4
	12 ч		87	94,3	94,3	93,1	88,2	95,4	98,0
	Σ		175	93,9	93,9	91,8	86,8	97,0	98,7
осень 2019	00 ч	87	84	91,1	90,6	85,7	75,2	100,0	100,0
	12 ч		82	90,9	90,7	85,9	79,9	100,0	100,0
	Σ		166	91,0	90,6	85,8	77,5	100,0	100,0
зима 2019/2020	00 ч	91	91	91,8	89,9	85,8	79,1	100,0	100,0
	12 ч		84	93,5	92,3	90,0	85,0	100,0	100,0
	Σ		175	92,6	91,1	87,9	82,1	100,0	100,0
весна 2020	00 ч	92	91	92,9	92,6	90,4	81,4	100,0	100,0
	12 ч		92	93,2	91,9	90,5	83,5	99,7	99,7
	Σ		183	93,0	92,2	90,5	82,4	99,9	99,9
12 мес 2019-2020	00 ч	362	354	92,3	91,6	88,1	80,3	99,7	99,9
	12 ч		345	93,0	92,3	89,9	84,1	98,8	99,4
	Σ		699	92,7	92,0	89,0	82,2	99,2	99,6

Таблица 3. Результаты сравнения выходных продуктов, детектированных спутниковой методикой, с наземными метеонаблюдениями «по пункту» и «по территории» (Центрально-Черноземное УГМС) за период июнь 2019 г. – май 2020 г.

Table 3. The results of comparison satellite classified products with ground observations territorial and terminal around Kursk region from June 2019 till May 2020

Период времени		Количество		Успешность, %						
		дней	сроков	Курск	Обоянь	Тим	Рыльск	Курчатов	Железногорск	по территории
Зоны осадков										
лето 2019	00	92	89	92,4	93,8	93,3	96,4	93,3	92,4	93,6
	12		88	93,2	92,9	94,0	90,9	91,8	92,9	92,6
	Σ		177	92,8	93,3	93,6	93,6	92,5	92,6	93,1
осень 2019	00	90	84	91,7	91,7	91,7	91,4	93,2	91,4	91,9
	12		81	91,4	90,1	90,1	89,8	89,8	90,1	90,2
	Σ		165	91,5	90,9	90,9	90,6	92,7	90,8	91,2

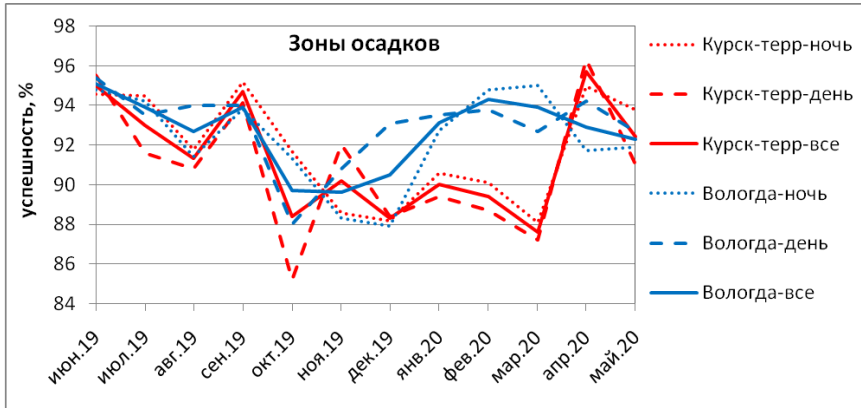
Период времени		Количество		Успешность, %						
		дней	сроков	Курск	Обоянь	Тим	Рыльск	Курчатов	Железно-горск	по территории
зима 2019/ 2020	00	91	91	89,8	91,5	89,0	87,9	91,5	87,9	89,6
	12		85	87,4	89,1	87,7	90,6	87,9	90,3	88,8
	Σ		176	88,6	90,3	88,4	89,2	89,8	89,1	89,2
весна 2020	00	92	91	91,2	92,6	93,4	91,2	92,6	92,9	92,6
	12		92	90,8	91,6	92,1	91,3	92,0	93,2	91,8
	Σ		183	91,0	92,1	92,7	91,2	92,3	93,1	92,1
12 мес 2019- 2020	00	365	355	91,3	92,7	91,8	91,7	92,6	91,1	91,9
	12		346	90,7	91,0	91,0	90,7	90,4	91,7	90,9
	Σ		701	91,0	91,9	91,8	91,2	91,5	91,4	91,5
Интенсивность осадков										
лето 2019	00	92	89	91,6	93,2	92,1	96,4	92,7	91,5	92,9
	12		88	91,8	92,6	94,0	91,2	91,8	93,1	92,4
	Σ		177	91,6	93,1	93,1	93,8	92,2	92,5	92,7
осень 2019	00	90	84	91,1	91,4	91,1	91,4	92,8	91,1	91,5
	12		81	91,1	88,9	90,8	89,5	89,5	88,9	89,8
	Σ		165	91,0	90,5	90,9	90,4	91,2	90,0	90,7
зима 2019/ 2020	00	91	91	91,2	91,5	88,7	87,4	91,2	87,4	89,6
	12		85	87,7	88,8	86,2	90,2	90,0	88,2	88,5
	Σ		176	89,5	90,2	87,5	88,5	90,0	87,4	88,9
весна 2020	00	92	91	91,2	92,6	93,1	90,9	92,0	90,9	91,8
	12		92	90,2	91,3	90,7	91,0	90,6	88,6	90,4
	Σ		183	90,7	91,9	91,9	91,0	91,3	89,7	91,1
12 мес 2019- 2020	00 ч	365	355	91,3	92,2	91,2	91,5	92,2	90,2	91,4
	12 ч		346	90,2	90,5	90,5	90,5	90,5	89,7	90,4
	Σ		701	90,8	91,4	90,9	91,0	91,4	90,0	90,9
Тип осадков у поверхности Земли										
лето 2019	00	92	89	91,6	93,8	92,4	96,1	93,3	92,4	93,3
	12		88	92,0	92,6	94,0	91,5	91,5	93,1	92,5
	Σ		177	91,8	94,4	93,2	93,8	92,4	92,8	93,1
осень 2019	00	90	84	91,7	91,7	91,4	91,4	93,1	91,7	91,8
	12		81	92,0	89,8	90,8	89,8	90,4	88,3	90,2
	Σ		165	91,8	90,8	89,3	90,6	91,8	90,0	90,7
зима 2019/ 2020	00	91	91	86,8	91,2	88,2	85,7	86,6	83,2	87,0
	12		85	80,3	85,3	83,8	85,9	84,4	81,2	83,5
	Σ		176	83,7	88,4	86,1	85,8	85,5	82,3	85,3
весна 2020	00	92	91	92,6	92,0	92,6	91,5	92,3	90,6	91,9
	12		92	88,8	91,3	89,9	90,5	90,8	86,8	89,7
	Σ		183	90,7	91,6	91,2	91,0	91,5	88,7	90,8

Период времени		Количество		Успешность, %						
		дней	сроков	Курск	Обоянь	Тим	Рыльск	Курчатов	Железно-горск	по территории
12 мес 2019- 2020	00	365	355	90,6	92,2	90,9	91,1	91,3	89,4	90,9
	12		346	88,3	90,4	89,7	89,5	89,3	87,4	89,1
	Σ		701	89,5	91,3	90,3	90,3	90,3	88,4	90,0
Зоны гроз										
лето 2019	00	92	89	95,5	96,6	95,5	96,3	94,9	95,2	95,7
	12		88	93,8	96,3	94,3	96,0	94,0	94,6	94,8
	Σ		177	94,7	96,5	94,8	96,2	94,5	95,4	95,4
осень 2019	00	90	84	100,0	100,0	100,0	99,7	100,0	100,0	99,95
	12		81	99,7	98,8	100,0	99,7	99,7	98,5	99,4
	Σ		165	99,8	99,4	100,0	99,7	99,8	99,2	99,7
зима 2019/ 2020	00	91	91	100,0	100,0	100,0	100,0	98,9	100,0	99,8
	12		85	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Σ		176	100,0	100,0	100,0	100,0	99,4	100,0	99,4
весна 2020	00	92	91	100,0	99,5	97,5	98,1	99,5	98,9	98,9
	12		92	96,6	99,5	94,5	97,3	99,5	95,0	97,1
	Σ		183	98,3	99,5	96,0	97,7	99,5	96,9	97,5
12 мес 2019- 2020	00	365	355	98,9	99,0	98,2	98,5	98,3	98,5	98,6
	12		346	97,4	98,6	97,1	98,2	98,3	97,5	97,9
	Σ		701	98,2	98,8	97,7	98,4	98,3	98,0	98,2

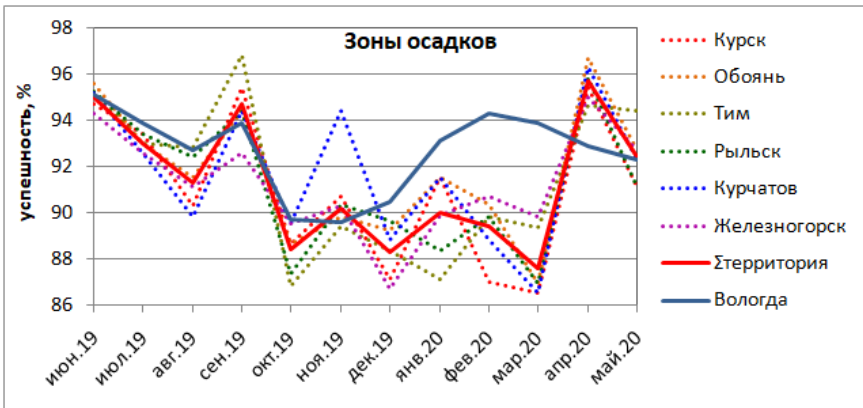
Анализ полученных результатов (см. табл. 2–3 и рис. 2–7) показал следующее.

1). *Зоны осадков.* Средняя за год успешность спутниковой методики по детектированию зон осадков составляет по оценкам Центрально-Черноземного УГМС «по территории» 91,5 % (для отдельных МС от 91,0 до 91,9 %), а Вологодского ЦГМС («по пункту») – 92,7 %. Чаще всего успешность немного выше ночью, чем днем. Зимой по МС Вологда успешность была заметно выше, чем по МС Центрально-Черноземного УГМС.

По оценкам Центрально-Черноземного УГМС успешность зависит от сезона – самая низкая (89,2 %) – зимой, самая высокая (93,2 %) – летом. Суточная изменчивость успешности «по территории» невысока, однако для отдельных МС амплитуда успешности детектирования от минимальной до максимальной в зависимости от времени суток и сезона может достигать 11,1–14,5 %. По большинству МС самая низкая успешность за месяц отмечалась в холодный период года днем. Максимальная успешность на большинстве МС отмечалась также днем, но в теплое время года.



а)



б)

Рис. 2. Годовой ход среднемесячных значений успешности детектирования зон осадков: отдельно для дня (12 ч ВСВ) и ночи (0 ч ВСВ) и суммарно за сутки «по территории» Курской области и «по пункту» МС Вологда (а); суммарно за сутки для отдельных МС Курской области и МС Вологда (б).

Fig. 2. Monthly averaged meanings of skill in diagnostic of precipitation zones: separately for day (12 h) and night (0 h) and total (day-and-night) territorial (Kursk region) and terminal (Vologda) (a); for certain meteostations (day-and-night) (б).

Такое распределение успешности по сезонам обусловлено завышением методикой вероятности выпадения осадков в холодный период из плотных слоистых облаков при достаточно сухом приземном слое, когда слабые осадки высыхают, не долетая до земли, или преувеличением возможности к осадкообразованию облаков, состоящих, в основном, из твердых фракций воды.

По оценкам Вологодского ЦГМС минимумы и максимумы успешности менее выражены и приходятся соответственно на холодный (октябрь-декабрь) и теплый (июнь-сентябрь) периоды года. По МС Вологда получено, что успешность детектирования зон без осадков немного выше (96%), чем зон с осадками (89,5%).

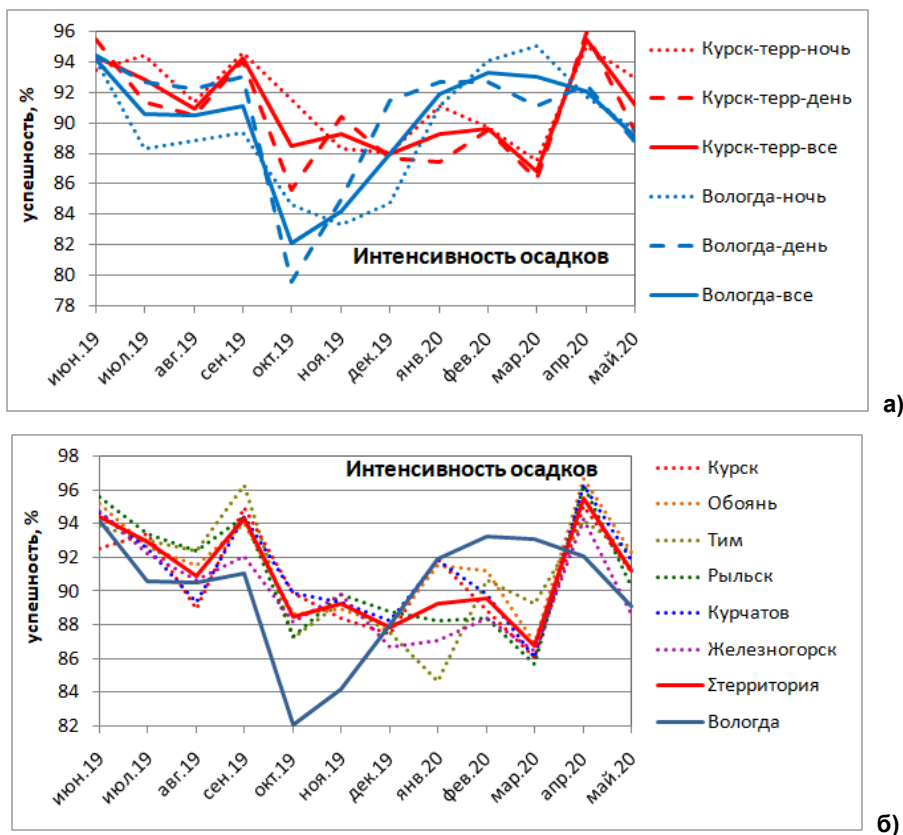
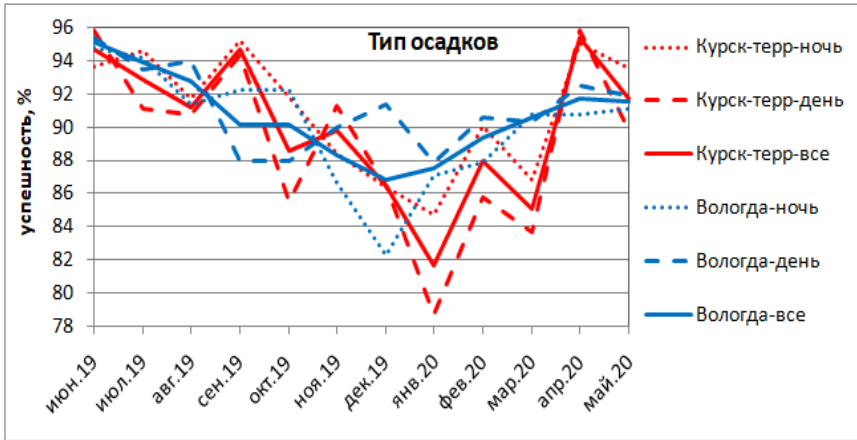


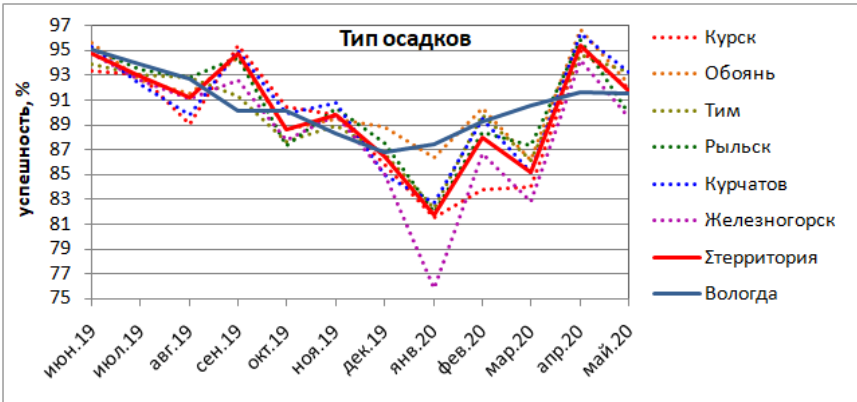
Рис. 3. Годовой ход среднемесячных значений успешности детектирования интенсивности осадков: отдельно для дня (12 ч ВСВ) и ночи (0 ч ВСВ) и суммарно за сутки «по территории» Курской области и «по пункту» МС Вологда (а); суммарно за сутки для отдельных МС Курской области и МС Вологда (б).
Fig. 3. Monthly averaged meanings of skill in diagnostic of precipitation rate: separately for day (12 h) and night (0 h) and total (day-and-night) territorial (Kursk region) and terminal (Vologda) (а); for certain meteorostations (day-and-night) (б).

Также успешность детектирования зон осадков немного выше для смешанных (99,2 %) и жидких (96,7 %) осадков, чем для твердых (91,9 %).

2). **Интенсивность осадков.** Средняя за год успешность спутниковой методики по детектированию интенсивности осадков составляет по оценкам Центрально-Черноземного УГМС «по территории» 90,9 % (для отдельных МС от 90,0 до 91,4 %), а Вологодского ЦГМС («по пункту») – 89,0 %. Зависимость успешности от времени суток выражена слабо и для разных МС различная, в т. ч. в зависимости от сезона. В течение большей части года (кроме зимы) успешность как «по территории», так и по отдельным МС Центрально-Черноземного УГМС была выше, чем по МС «Вологда». В среднем за лето по всем МС значения успешности получились выше, чем в остальные сезоны.



а)



б)

Рис. 4. Годовой ход среднемесячных значений успешности детектирования типа осадков у поверхности Земли: отдельно для дня (12 ч ВСВ) и ночи (0 ч ВСВ) и суммарно за сутки «по территории» Курской области и «по пункту» МС Вологда (а); суммарно за сутки для отдельных МС Курской области и МС Вологда (б).

Fig. 4. Monthly averaged meanings of skill in diagnostic of precipitation types: a) separately for day (12 h) and night (0 h) and total (day-and-night) territorial (Kursk region) and terminal (Vologda); b) for certain meteostations (day-and-night).

По оценкам Центрально-Черноземного УГМС чаще всего ошибка детектирования «по пункту» в конкретный срок связана с осадками небольшой интенсивности или их отсутствием, но встречаются и другие случаи. Детектирование интенсивности осадков для дождя показало несколько лучший результат, чем для снега или смешанных осадков.

По МС Вологда значение минимума успешности ниже (приходится на октябрь), чем для МС Центрально-Черноземного УГМС. По МС Вологда получено, что наибольшие значения успешности детектирования интенсивности осадков отмечаются при смешанных или слабых осадках, наименьшие – при твердых или сильных.

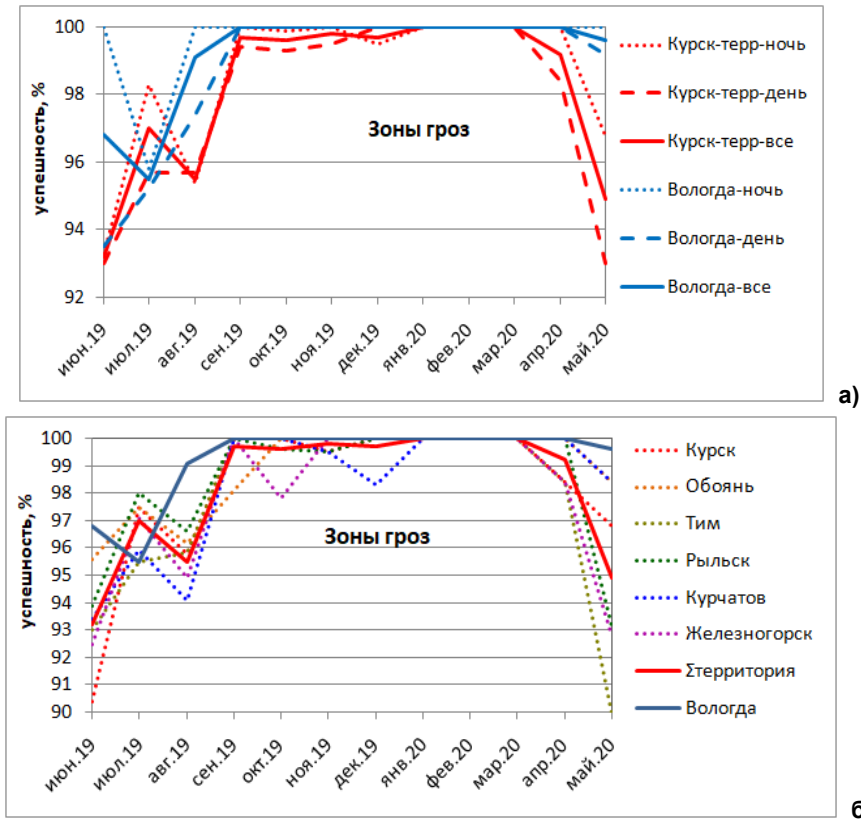


Рис. 5. Годовой ход среднемесячных значений успешности детектирования зон гроз: отдельно для дня (12 ч ВСВ) и ночи (0 ч ВСВ) и суммарно за сутки «по территории» Курской области и «по пункту» МС Вологда (а); суммарно за сутки для отдельных МС Курской области и МС Вологда (б).

Fig. 5. Monthly averaged meanings of skill in diagnostic of thunderstorms: a) separately for day (12 h) and night (0 h) and total (day-and-night) territorial (Kursk region) and terminal (Vologda) (а); for certain meteorostations (day-and-night) (б).

3). *Тип осадков у поверхности Земли.* Средняя за год успешность спутниковой методики по детектированию типа осадков у поверхности Земли составляет по оценкам Центрально-Черноземного УГМС «по территории» 90,0 % (для отдельных МС от 88,4 до 91,3 %), а Вологодского ЦГМС («по пункту») – 92,0 %. Зависимость успешности от времени суток выражена слабо. В течение большей части года (кроме зимы) успешность как «по территории», так и по отдельным МС Центрально-Черноземного УГМС была немного выше, чем по МС «Вологда». В среднем в теплый период года по всем МС значения успешности получились выше, чем в холодный период. По МС «Вологда» получено, что точнее распознавались смешанные осадки – 95,5%, успешность детектирования жидких осадков составила 93,3%, твердых – 92,7%, однако различия между этими группами статистически незначимы.

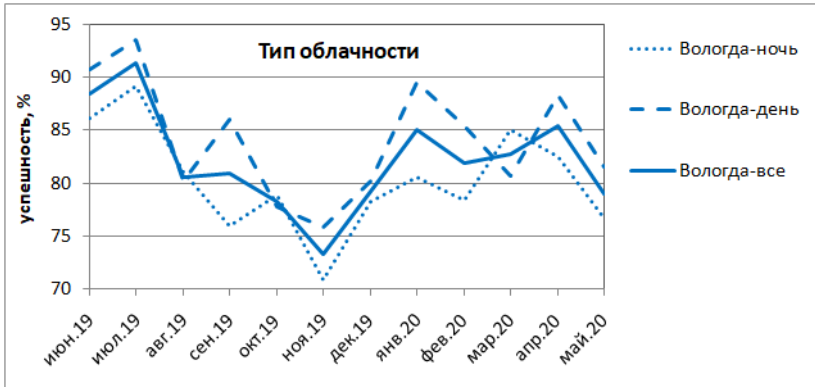


Рис. 6. Годовой ход среднемесячных значений успешности детектирования типа облачности «по пункту» отдельно для дня (12 ч ВСВ) и ночи (0 ч ВСВ) и суммарно за сутки (все) по МС Вологда

Fig.6. Monthly averaged meanings of skill in diagnostic of cloud types separately for day (12 h) and night (0 h) and total (day-and-night) for meteostation Vologda

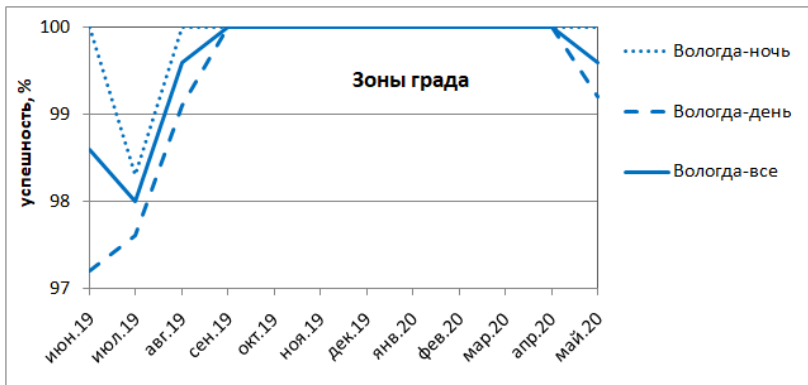


Рис. 7. Годовой ход среднемесячных значений успешности детектирования зон града в облаках и у Земли «по пункту» отдельно для дня (12 ч ВСВ) и ночи (0 ч ВСВ) и суммарно за сутки (все) по МС Вологда

Fig. 7. Monthly averaged meanings of skill in diagnostic of hail in clouds and at ground separately for day (12 h) and night (0 h) and total (day-and-night) for meteostation Vologda

4) *Зоны гроз.* Средняя за год успешность спутниковой методики по детектированию зон гроз составляет по оценкам Центрально-Черноземного УГМС «по территории» 98,2 % (для отдельных МС от 97,7 до 98,8 %), а Вологодского ЦГМС («по пункту») – 99,2 %. В ночное время успешность немного больше, чем в дневное. Для всех МС максимум успешности (100 %) приходится на зиму, т.е. отсутствует ложное детектирование зон гроз. По оценкам Вологодского ЦГМС значения успешности часто немного выше, чем по оценкам Центрально-Черноземного УГМС.

5) **Типы облачности.** Средняя за год успешность спутниковой методики по детектированию типа облачности по оценкам Вологодского ЦГМС («по пункту») составляет 82,6 %. В ночное время успешность немного ниже (80,5 %), чем в дневное (84,6 %). Минимум успешности приходится на осень, а максимум – на лето. Анализ успешности классифицирования различных типов облачности показал, что точнее распознаются классы однослойной кучевообразной облачности, а также класс отсутствия облачности. Самая низкая успешность получилась для классов многослойной облачности, видимо, из-за того, что при наблюдении на станции идентификация облачности верхнего и среднего ярусов может быть затруднена при наличии плотной облачности нижнего яруса (проблема сопоставления спутниковых и наземных наблюдений).

6) **Зоны града в облаках и у Земли.** Средняя за год успешность спутниковой методики по детектированию зон града в облаках и у Земли по оценкам Вологодского ЦГМС («по пункту») составляет 99,6 %. В ночное время успешность немного выше, чем в дневное. Максимум успешности (100 %) приходится на холодный период года (сентябрь–апрель), т. е. отсутствует ложное детектирование зон града.

Суммарная успешность методики по всем метеоявлениям. По оценкам «Центрально-Черноземного» УГМС, в целом, успешность спутниковой методики по всем детектируемым метеоявлениям (4 метеопараметра) за год составляет 92,7 % (ночью – 93,2 %, днем – 92,1 %). В летние и переходные месяцы она колеблется от 92,9 до 93,6 % (ночью 93,8–93,9 %, днем – 92,2–93,3 %), зимой составляет 90,7 % (91,5 % ночью и 90,2 % днем). Зима 2019–2020 гг. в Курской области была аномально теплой, снежный покров с декабря по февраль часто образовывался и вновь таял, что способствовало образованию туманов, а при их рассеивании у поверхности Земли – формированию плотных слоистых облаков. Возможно, этот фактор сыграл одну из решающих ролей в ошибках детектирования метеоявлений, характерных для описываемого холодного периода года.

По МС «Вологда» получено, что успешность прогноза спутниковой методики по всем детектируемым метеоявлениям (6 метеопараметров) за год составляет 92,4 %. В целом, успешность спутниковой методики существенно не зависит от времени суток во все сезоны, кроме зимы. В период с декабря по февраль успешность диагноза была значимо выше днем, чем ночью. Успешность диагноза для разных сезонов значимо отличается только между летом и осенью, в остальных случаях различия не существенны.

Таким образом, результаты испытаний показали, что средняя успешность валидируемой методики по детектированию зон осадков, в т. ч. интенсивности и типа осадков у поверхности Земли, составляет не менее 90 %; для зон гроз и града – около 99 %, а для типа облачности – она не менее 80 %. Суммарная за год успешность по всем метеопараметрам

составляет более 90 % независимо от региона. Различия между суточными и сезонными максимумами и минимумами, а также для разных МС обычно не превышают нескольких процентов.

Как Центрально-Черноземное УГМС, так и Вологодское ЦГМС в решениях Технического совета отмечают, что несмотря на выявленные недостатки спутниковой методики, в целом, использование карт спутникового детектирования для анализа текущей погоды показало хорошие и удовлетворительные результаты (для разных метеоявлений и МС, а также сезонов и времени суток) на протяжении всего года. Такие карты позволяют получить обзорное представление о наличии, типе и интенсивности осадков, типе облачности и развитии конвективных явлений над большой территорией в качестве дополнения к другим видам наблюдений за погодой для ЕТР. Возможность просмотра анимации карт позволяет оперативно отслеживать динамику атмосферных процессов, что представляет очевидную ценность для наукастинга и составления штормовых предупреждений.

Заключение

Учитывая удовлетворительные результаты испытаний спутниковой методики, ЦМКП рекомендует:

– внедрить автоматизированную технологию диагноза параметров облачного покрова, осадков и ОЯП для ЕТР по данным радиометра SEVIRI/Meteosat в оперативную работу ФГБУ «НИЦ «Планета»;

– внедрить выходную продукцию технологии в оперативную работу ОМП ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС» в качестве вспомогательного материала в теплый период года, и в качестве консультативного материала – в холодный период года;

– внедрить выходную продукцию технологии в оперативную работу ОМП филиала ФГБУ «Северное УГМС» «Вологодский ЦГМС» в качестве вспомогательного метода карты зон и типа осадков для всех сезонов года, карты интенсивности осадков, зон гроз и града для весенне-летнего периода, в качестве консультативного метода – карты интенсивности осадков для осенне-зимнего периода и карты типа облачности для всех сезонов года.

Список литературы

1. Волкова Е.В., Кухарский А.В. Специализированный программный комплекс получения оценок параметров облачности и осадков по данным радиометра SEVIRI с геостационарного метеоспутника Meteosat (0° в.д.) для Европейской территории России и Европы // Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли. RORSE 2018 (Электронный сборник статей 16-й конференции, 12-16 ноября 2018 г., Москва, Россия. С. 248-255. Doi 10.21046/rtorse 2018.248.

2. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиографических прогнозов. 151 с.

3. РД 52.27.724-2019. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. 66 с.

References

1. *Volkova E.V., Kukharsky A.V.* The Special Software Package for Retrieving Satellite Estimates of Cloud and Precipitation Properties Utilizing SEVIRI/Meteosat (0° E) Data for the European Territory of Russia and Europe. Information Technologies in Remote Sensing of the Earth - RORSE 2018. *Proceedings of the 16th Conference*, November 12-16, 2018, Moscow, Russia. DOI: 10.21046/rorse2018.248. [in Russ.].

2. RD 52.27.284-91. Metodicheskie ukazaniya. Provedenie proizvodstvennyh (operativnyh) ispytaniy novyh i usovershenstvovannyh metodov gidrometeorologicheskikh i geliograficheskikh prognozov. 151 p. [in Russ.].

3. RD 52.27.724-2019. Nastavlenie po kratkosrochnym prognozam pogody obshego naznacheniya. 66 p. [in Russ.].

*Поступила 24.11.2020; одобрена после рецензирования 04.12.2020,
принята в печать 11.12.2020.*

*Submitted 24.11.2020; approved after reviewing 04.12.2020;
accepted for publication 11.12.2020.*