



# Обнаружение зон гроз по спутниковым данным

Е.В.Волкова

ФГБУ ЕЦ «НИЦ Космической Гидрометеорологии «Планета»,  
123242, Россия, Москва, Большой Предтеченский пер., д.7.  
E-mail: quantos@bk.ru

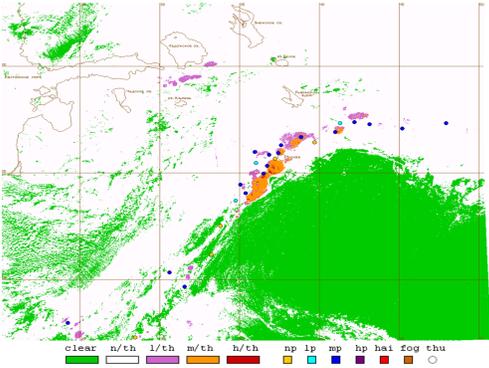


Рис. 1. Детектирование зон гроз по данным измерений AVHRR/NOAA (30.08.2016 г., 11:56 ВСВ). Сопоставление с наземными метеонаблюдениями за погодой в срок наблюдения и в последний час (30.08.2016 г., 12 ч ВСВ). *Примечание. Знаками показаны наблюдения за грозой на метеостанциях. Обозначения классов: clear – ясно, n/th – облачно без гроз (вероятность события грозы 0%), l/th – слабая гроза (вероятность события грозы > 0%), m/th – умеренная гроза (вероятность события грозы > 70%), h/th – сильная гроза (вероятность события грозы > 100%); np – без осадков, lp – слабые осадки, mp – умеренные осадки, hp – сильные осадки, hai – град, fog – туман, thu – гроза.*

Таблица 1.

| Версия КИМ (спутн. прибор, доп. данные, регион)                    | предикторные характеристики  | пороговые значения зависят от                                  |
|--|--|--|
| AVHRR/NOAA (анализ Exeter, UK) европ. тер. России                  | $W_{max}, SW, T_{IR0}, h_{IR0}, T_{108}, (T_{108}-T_{120})$  | $datd, h_{ref}, T_{37-39}, T_{300}, T_{300-250}, T_{250}$      |
| MSU-MP/Meteor (анализ Exeter, UK) европ. тер. России и Зап. Сибирь | $W_{max}, SW, T_{IR0}, h_{IR0}, h_{a1}, T_{108}, (T_{108}-T_{120})$  | $h_c, datd, h_{ref}, T_{37-39}, T_{300}, T_{300-250}, T_{250}$ |
| SEVIRI/Meteosat (прогноз NCEP GFS) Европа и Россия                 | $h_{a1}, W_{max}, SW, T_{IR0}, h_{IR0}, T_{108}, (T_{108}-T_{120}), (T_{120}-T_{137}), (T_{137}-T_{152})$          | $h_c, h_{ref}, data, T_{37-39}, T_{300}, T_{250}$              |
| SEVIRI/Meteosat (анализ Exeter, UK) полный круг обзора             | $W_{max}, SW, T_{IR0}, h_{IR0}, T_{108}, (T_{108}-T_{120}), (T_{120}-T_{137}), (T_{137}-T_{152}), (A_{06}-A_{16})$ | $h_c, \phi, h_{ref}, T_{37-39}, T_{300}, T_{300-250}, T_{250}$ |

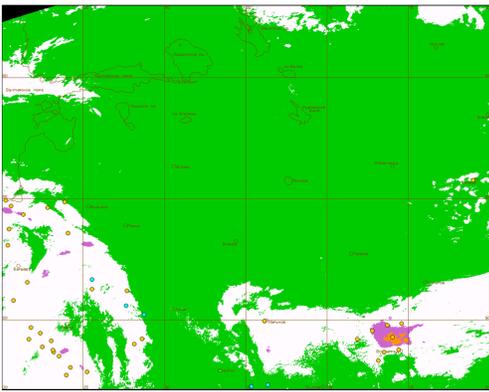


Рис. 2. Детектирование зон гроз по данным измерений MSU-MP/Meteor (25.05.2018 г., 17:54 ВСВ). Сопоставление с наземными метеонаблюдениями за погодой в срок наблюдения и в последний час (25.05.2018 г., 18 ч ВСВ). *Примечание. Знаками показаны наблюдения за грозой на метеостанциях (погода в срок наблюдения и в последний час): желтые кружочки – гроза с осадками или без, красные кружочки – гроза с градом, голубые кружочки – гроза со слабыми осадками. Обозначения классов: clear – ясно, n/th – облачно без гроз (вероятность события грозы 0%), l/th – слабая гроза (вероятность события грозы > 0%), m/th – умеренная гроза (вероятность события грозы > 70%), h/th – сильная гроза (вероятность события грозы > 100%)*

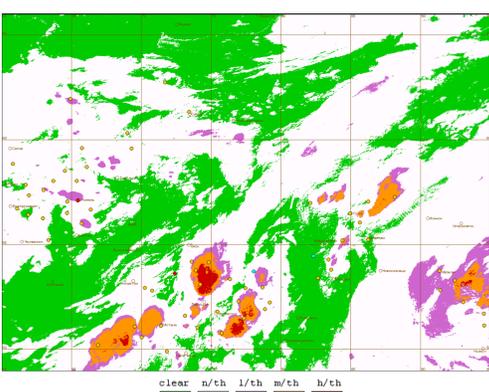


Рис. 3. Детектирование зон гроз по данным измерений MSU-MP/Meteor (30.06.2017 г., 15:02 ВСВ). Сопоставление с наземными метеонаблюдениями за погодой в срок наблюдения и в последний час (30.06.2017 г., 15 ч ВСВ). *Примечание. Знаками показаны наблюдения за грозой на метеостанциях (погода в срок наблюдения и в последний час): желтые кружочки – гроза с осадками или без, красные кружочки – гроза с градом, голубые кружочки – гроза со слабыми осадками. Обозначения классов: clear – ясно, n/th – облачно без гроз (вероятность события грозы 0%), l/th – слабая гроза (вероятность события грозы > 0%), m/th – умеренная гроза (вероятность события грозы > 70%), h/th – сильная гроза (вероятность события грозы > 100%)*

При сопоставлении спутниковых наблюдений за грозами с наблюдениями наземного грозопенелатора также существуют проблемы адекватного совмещения:

- для данных AVHRR/NOAA существует проблема географической привязки (люфт для отдельных дней и сроков может достигать 5-10 пикселей) (линейные размеры пиксела составляют 1-2 км в зависимости от виз);
- для данных AVHRR/NOAA и MSU-MP/Meteor существует проблема смещения (до 5-10 км) положения грозового облака относительно реального при больших виз и  $h_{IR0}$ ;
- для данных SEVIRI/Meteosat существует проблема смещения (до 20-40 км) положения грозового облака относительно реального при больших виз и  $h_{IR0}$ ;
- точность географической привязки данных грозопенелатора падает (до 10-20 км) по мере удаления от регистрирующего прибора.

С учётом вышеописанного оптимальным радиусом вырезаемого фрагмента вокруг сигнала грозопенелатора является ~10 км для полярно-орбитальных и ~20 км для геостационарных КА. Разница по времени между наблюдениями до ±15 мин.

Анализ результатов сопоставления разных видов наблюдений за грозами показал, что в среднем для тёплого периода года и рассматриваемого региона средняя достоверность оценок в зависимости от версии КИМ и года составляет ~70-85%. Для отдельных месяцев средние значения достоверности получаются существенно выше средних. В целом, значения достоверности получаются тем выше, чем сильнее грозовая активность в облаке (т.е. в нём больше регистрируется грозопенелатором грозовых разрядов) и тем меньше, чем слабее грозовая активность. Поэтому в апреле и сентябре-октябре значения достоверности обычно заметно меньше, чем для остальных месяцев тёплого периода (осеню и весной много гроз, когда грозопенелатор в течение 15 минут регистрирует всего 1-3 случая электрического разряда, и часто эти разряды наблюдаются только внутри облака, а не между облаками или облаками и землёй). Для спутниковой информации это ничтожно мало (очень слабая гроза) и такое облако может не считаться грозовым даже в перспективе.

Таким образом, валидация спутниковых наблюдений гроз наземными оценками показывает, что КИМ достаточно хорошо детектирует грозовые облака, в т.ч. «перспективные». Получаемые оценки вероятности и интенсивности гроз хорошо согласуются с синоптической ситуацией, климатическими данными и наземными наблюдениями. Точность спутникового детектирования зон гроз сильно зависит от дополнительной информации (пространственного и временного разрешения и точности данных численного анализа или прогноза). Качество классификации несколько убывает с уменьшением масштаба и интенсивности грозового явления, а также ростом виз. В холодный период года и в тёмное время суток возможно некоторое завышение размеров зон гроз слабой и иногда умеренной интенсивности (класс «слабая гроза» – это часто не гроза, а предупреждение о возможности перерождения облака в грозовое). Оценки вероятности и интенсивности гроз получаются средними для пиксела.

ФГБУ «НИЦ «Планета»  
Россия, 123242, Москва,  
Б. Предтеченский пер.,  
д.7.  
Тел: (499) 252-37-15  
Факс: (499) 252-66-10  
http://planet.itp.ru  
E-mail: asmus@planet.itp.ru

Гроза – это комплексное атмосферное явление, необходимой частью которого являются многократные электрические разряды между облаками или между облаками и землёй (молнии), сопровождающиеся звуковым явлением (громом) (Хромов, Мамонтова, 1974). Грозовое облако – это облако, с развитием которого связана гроза. Грозовыми облаками обычно являются очень мощные кучево-дождевые (Cb) облачные образования кристаллические на ВГО. Гроза часто сопровождается выпадением ливневых осадков, иногда с градом. Грозы считаются опасным явлением погоды, т.к. грозовые разряды могут вызывать пожары, в т.ч. лесные, повреждения линий электропередач и др., а сопровождающий грозы сильный ливень может приводить к подтоплениям низин, наводнениям, размывам дорог и др. Поэтому своевременная информация о вероятности и интенсивности гроз является очень полезной.

В ФГБУ «НИЦ Планета» разработана методика обнаружения зон гроз по спутниковым данным методом порогового дешифрирования. Разные версии методики позволяют детектировать зоны гроз и определять их вероятность и интенсивность по данным AVHRR KA серии NOAA, MSU-MP KA Meteor-M №2 и SEVIRI KA серии Meteosat MSG (0 и 41,5° в.д.). Все эти версии являются составной частью Комплексной пороговой методики (КИМ), разработанной с целью круглосуточного получения параметров облачности, осадков и опасных явлений погоды по спутниковым данным в автоматическом режиме (Волкова, 2017; Волкова, Гирчев, 2018; Волкова, Кухарский, 2018, 2019). Разные версии КИМ используют не только различную спутниковую, но и разную дополнительную информацию (различные виды численного анализа или прогноза метеопараметров), т.к. применяются не только для разных регионов, но и разных целей: например, для климатического мониторинга или для оперативного анализа и прогноза погоды.

Независимо от версии КИМ позволяет косвенно детектировать зоны гроз и определять их интенсивность и вероятность события. При этом выделяется 4 класса облачных пикселей: 1) отсутствие грозы (вероятность события 0 %); 2) существует вероятность грозы (вероятность события больше 0 %), гроза слабая, может быть умеренной, но вряд ли сильная; 3) вероятность грозы более 70 %, гроза преимущественно умеренной интенсивности, но может быть как слабой, так и сильной; 4) вероятность грозы 100 %, гроза скорее сильная или умеренная и вряд ли слабая.

В КИМ слабой грозой считается грозовая активность, в среднем, не более 5 грозовых разрядов в час или не более 3-5 разрядов при продолжительности грозы из данного облака менее 1 ч; умеренной грозой – грозовая активность со средней интенсивностью 1 грозовой разряд в 5-10 мин или суммарно не более 10 разрядов при продолжительности грозы из данного облака менее 1 ч; сильной грозой – сильная грозовая активность, когда интервалы между грозовыми разрядами, в среднем, менее 5 мин.

Анализу на возможность наличия гроз в КИМ подвергаются не все облачные пиксели, а только очень мощные кучево-дождевые облака (Cb), в т.ч. с перистыми (Ci) (облачные классы «Cb calv.» (стадия роста Cb, без Ci), «Cb cap.» (стадия роста и максимального развития Cb, с Ci), «Cb inc.» (стадия максимального развития и начала распада Cb, с Ci) и «Cb+Ci» (Cb под слоем Ci) (состояния максимальной влажности (W<sub>max</sub>) облачного слоя (SW) и водозапаса (SW) облачного слоя (т.е. с высокой верхней границей облачности (ВГО) и низкой нижней границей облачности (НГО), кристаллические на ВГО и очень низкой температурой ВГО (T<sub>IR0</sub>). В некоторых версиях КИМ также обязательно наличие «града в облаках» (hai), т.к. во всех грозовых облаках присутствует град, хотя и не всегда выпадает на поверхность земли (Шмелер, 1972). Помимо скорректированной на ослабление в атмосфере и толщину слоя перистых T<sub>IR0</sub> также обязательно используется измеренная T<sub>IR0</sub> (предиктор T<sub>108</sub>). Предиктор (T<sub>108</sub>-T<sub>120</sub>) используется для оценок толщины слоя высокослоистых облаков и Ci в составе многослойной облачности, т.е. для косвенных оценок мощности и водозапаса Cb. Так как гроза сопровождается образованием озона в атмосфере (при грозовых разрядах), то для данных SEVIRI/Meteosat используется «озоновый» предиктор (T<sub>37</sub>-T<sub>7</sub>) и некоторые другие (см. табл. 1). Здесь T<sub>108</sub>, T<sub>120</sub>, T<sub>37</sub>, T<sub>7</sub> и T<sub>62</sub> – значения измеренной радиационной температуры на λ=10,8, 12,0, 9,7, 8,7, 7,3 и 6,2 мкм, а A<sub>06</sub> и A<sub>16</sub> – значения альбедо на λ=0,6 и 1,6 мкм. Вероятность и интенсивность гроз, в целом, прямо пропорциональны h<sub>IR0</sub>, оптической плотности облака (т.е. низким значениям (T<sub>120</sub>-T<sub>62</sub>), W<sub>max</sub>, SW и (T<sub>120</sub>-T<sub>37</sub>), и обратно пропорциональны T<sub>IR0</sub>, (T<sub>37</sub>-T<sub>7</sub>) и T<sub>108</sub>.

Пороговые значения предикторных характеристик представляют собой полученные эмпирическим путём линейные функциональные зависимости от высоты места над уровнем моря (h<sub>ref</sub>), высоты солнца (h<sub>s</sub>), географической широты центра пиксела (φ), температуры воздуха, приведённой к уровню моря (T<sub>air,mora</sub>), номера календарного дня от начала года (datd) и температуры воздуха на стандартных барических (T<sub>air,ppn</sub>=400, 300 и 250 гПа) и промежуточных (T<sub>air,250</sub> – среднее арифметическое для двух уровней 300 и 250 гПа) уровнях (см. табл. 1).

Дешифрирование и классификация зон гроз в КИМ происходит в порядке нарастания интенсивности явления. Изначально все облачные пиксели считаются без гроз. Сперва облачные пиксели анализируются на возможность наличия грозы (класс «слабая гроза»), затем пиксели из этого класса проходят тест на возможность существования гроз умеренной интенсивности, и прошедшие этот тест облачные пиксели переходят на вероятность сильной грозы. На каждом этапе, чтобы бы причислить к следующему классу, облачный пиксел подвергается только одному тесту, но из нескольких условий (одновременно должны выполняться все условия). Наборы условий различны для разных версий КИМ и обычно не меняются в зависимости от детектируемого класса гроз, но пороговые значения становятся более «строгими» по мере усиления интенсивности гроз.

Анализ выходов продуктов по грозам разных версий КИМ показывает, что независимо от вида спутниковой информации наиболее вероятны грозы из облачного класса «Cb inc.» (в зависимости от сезона и региона до 100 % случаев этой облачности; грозы любой интенсивности) и «Cb cap.» (в зависимости от сезона и региона до 50 % случаев этой облачности; грозы любой интенсивности, но сильные грозы редки), а из классов «Cb calv.» и «Cb+Ci» грозы крайне редки (в зависимости от сезона и региона не более 0,5-1 % случаев этой облачности; только слабые грозы).

Исследования автора показывают, что вероятность и интенсивность гроз по спутниковым данным обратно пропорциональна |φ| и прямо пропорциональна T<sub>air,mora</sub>. Они существенно выше в дневное время и тёплый сезон по сравнению с ночью и холодным сезоном. Суточная амплитуда повторяемости грозовых облаков в холодный период года обычно не выражена, однако в тёплый период года грозовые облака встречаются в несколько раз чаще днём, чем ночью. Сильные грозы бывают только в тёплый период года и преимущественно днём, умеренной интенсивности – преимущественно в тёплый период года (ночью заметно реже, чем днём, т.к. связаны только фронтальной деятельностью), а слабые грозы возможны в любое время года (в холодный период года в несколько раз реже, чем в тёплый). В холодный период года грозовые облака к северу от ~50° с.ш. и к югу от ~60° ю.ш. практически не встречаются. Сильные грозы преимущественно (99-100 % случаев всех сильных гроз) связаны с облаками класса «Cb inc.» (в холодный период года только с ними, а в тёплый период грозы изредка возможны и из класса «Cb cap.»). Грозы умеренной интенсивности в холодный период года также преимущественно (~99 % случаев таких гроз) связаны с классом «Cb inc.», а также с классом «Cb cap.» (до 1 % случаев). Всё это находится в хорошем соответствии с климатологией гроз (Мазин, Хризан, 1989; Седунов и др., 1991).

Валидация точности детектирования гроз разными версиями КИМ проводилась наземными наблюдениями за погодой на метеостанциях (преимущественно для территории Европы и России) и наземным грозопенелатором (только для центра европейской территории России). Для каждого вида спутниковой информации рассчитывалась достоверность гроз (или вероятность правильного детектирования POD – Probability of Detection) – степень соответствия спутниковых наблюдений за грозами наземным наблюдениям, выраженная в процентах, т.е. количество «совпавших» наблюдений гроз относительно общего количества случаев наземных наблюдений.

При сопоставлении спутниковых наблюдений за грозами с наземными наблюдениями на метеостанциях возникает ряд проблем:

- разница по времени между спутниковыми и наземными наблюдениями (это особенно важно для небольших по размеру грозовых облаков: так как они дают кратковременные грозы, то может происходить «потеря» гроз по наземным или спутниковым наблюдениям);
- субъективность наземных оценок, например, некорректное использование кодов для характеристики погоды (ошибочное использование кодов «погода в срок» для характеристики ситуации «погода в последний час» – хорошо заметно при визуальном сопоставлении результатов классификации спутникового изображения и наземных наблюдений, когда наземные наблюдения сообщают о грозе, которая «ушла» на расстояние более 50 км или совсем ослабла);
- наземный наблюдатель может слышать грозу (и соответственно фиксировать её) на расстоянии до 20-30 км;
- по данным SEVIRI/Meteosat при больших углах спутникового визирования (viz) и большой h<sub>IR0</sub> отмечается существенное смещение облака (до 20-40 км) относительно реального.

С учётом этих проблем для количественной валидации из спутниковой информации вырезались фрагменты с центром в метеостанции и радиусом до 30 км. Разница по времени задерживалась ±30 мин. Совпадением считался случай, если для наземного наблюдения «гроза» в пределах спутникового фрагмента существовал хотя бы 1 пиксел с грозой любой интенсивности.

Количественное сопоставление спутниковых наблюдений за грозами с наземными на метеостанциях (использовались наблюдения за погодой «в срок наблюдения и в последний час», а также «между сроками») показало достоверность до 70-85% (в зависимости от региона, сезона и версии КИМ); обычно выше в тёплый сезон и светлое время суток, т.е. в периоды с наибольшей повторяемостью гроз. Визуальные оценки точности оценок КИМ (с учётом основных трудностей сопоставлений) дают более высокие значения достоверности.

В целом, КИМ заметно завышает зоны «гроз» по сравнению с наземными наблюдениями: значения FAR (False Alarm Ratio – «ложная тревога») достаточно высоки, особенно для класса «слабая гроза». Это объясняется (особенно для класса «слабые грозы») не только проблемами сопоставления спутниковой и наземной информации, но и тем, что КИМ детектирует как «грозовые» мощные Cb, способные образовываться в грозовые, хотя не все эти облака реально развиваются до гроз, т.е. класс «слабая гроза» по спутниковым оценкам – это предупреждение как о возможности наличия, так и развития грозы в этом облаке.

Визуальное сопоставление спутниковых и наземных наблюдений за грозами для разных версий КИМ и разных регионов и сезонов показывает, что в пределах зоны «слабая гроза» по спутниковым данным в ~40-60 % случаев в зависимости от региона, времени года и суток гроза реально (подтверждается наземными метеонаблюдениями) наблюдается в этот срок спутникового наблюдения, была или произойдёт в период времени ±0,5 ч от этого срока. В пределах зоны «умеренная гроза» вероятность наличия грозы в срок спутникового наблюдения (±0,5 ч) составляет не менее 75-80%, а в пределах зоны «сильная гроза» – в ~100 % случаев.

«Потери» КИМ зон гроз относительно данных наземных метеонаблюдений в подавляющем большинстве случаев (более 80 %) происходит либо в случаях слабых гроз (1-2 грозовых разряда за грозу) из относительно небольших по площади Cb, особенно при больших виз, или при некорректном использовании наземным наблюдателем кодов погоды «в срок наблюдения», «в последний час» и «между сроками».

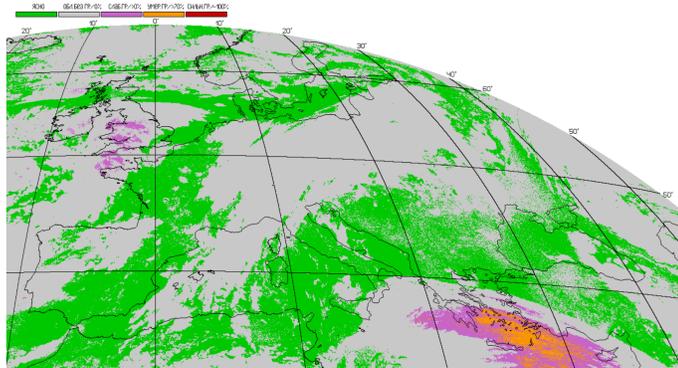


Рис. 4. Пример детектирования зон гроз по данным SEVIRI/Meteosat-11 (регион «Европа+ЕТР», 22 марта 2017 г., 00:00 ВСВ). *Примечание. Обозначения классов: обл. без гр./0% – облачно без гроз (вероятность события грозы 0%), слаб. гр./>0% – слабая гроза (вероятность события грозы > 0%), умер. гр./>70% – умеренная гроза (вероятность события грозы > 70%), сильн. гр./100% – сильная гроза (вероятность события грозы > 100%). Линии сетки проведены через 10° для 60, 50 и 40° с.ш. и 20, 10° з.д. и 0, 10, 20, 30, 40, 50° в.д.*

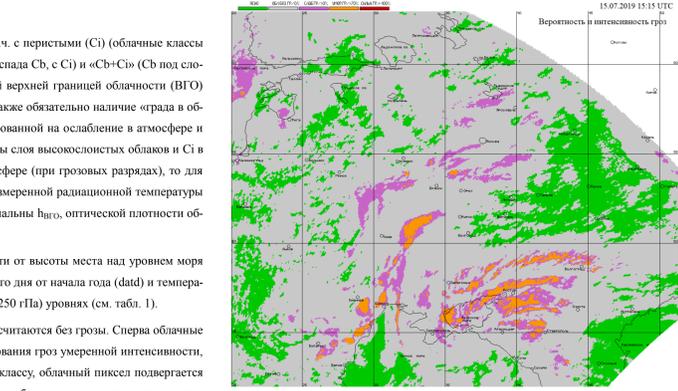


Рис. 5. Пример детектирования зон гроз по данным SEVIRI/Meteosat-11 (регион «ЕТР»). *Примечание. Обозначения классов: обл. без гр./0% – облачно без гроз (вероятность события грозы 0%), слаб. гр./>0% – слабая гроза (вероятность события грозы > 0%), умер. гр./>70% – умеренная гроза (вероятность события грозы > 70%), сильн. гр./100% – сильная гроза (вероятность события грозы > 100%). Линии сетки проведены через 5° для 60, 55, 50 и 45° с.ш. и 20, 25, 30, 35, 40, 45 и 50° в.д.*

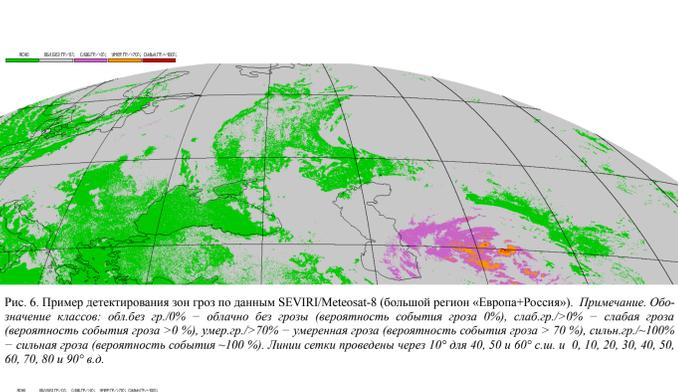


Рис. 6. Пример детектирования зон гроз по данным SEVIRI/Meteosat-8 (большой регион «Европа+Россия»). *Примечание. Обозначения классов: обл. без гр./0% – облачно без гроз (вероятность события грозы 0%), слаб. гр./>0% – слабая гроза (вероятность события грозы > 0%), умер. гр./>70% – умеренная гроза (вероятность события грозы > 70%), сильн. гр./100% – сильная гроза (вероятность события грозы > 100%). Линии сетки проведены через 10° для 40, 50 и 60° с.ш. и 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 и 90° в.д.*

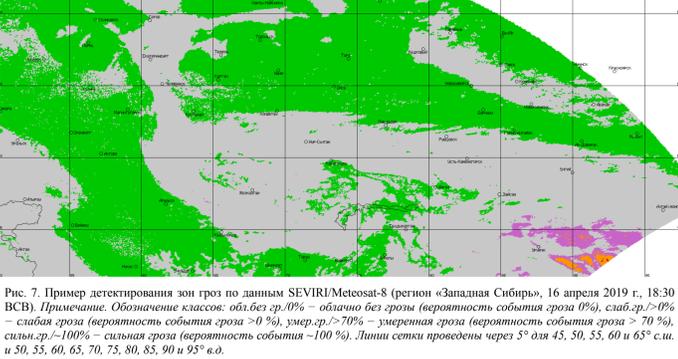


Рис. 7. Пример детектирования зон гроз по данным SEVIRI/Meteosat-8 (регион «Западная Сибирь», 16 апреля 2019 г., 18:30 ВСВ). *Примечание. Обозначения классов: обл. без гр./0% – облачно без гроз (вероятность события грозы 0%), слаб. гр./>0% – слабая гроза (вероятность события грозы > 0%), умер. гр./>70% – умеренная гроза (вероятность события грозы > 70%), сильн. гр./100% – сильная гроза (вероятность события грозы > 100%). Линии сетки проведены через 5° для 45, 50, 55, 60 и 65° с.ш. и 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90 и 95° в.д.*

## Литература

Волкова Е.В. Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным радиометра MSU-MP с полярно-орбитального метеоспутника «Метеор-М» №2 для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 300-320.

Волкова Е.В., Гирчев Д.В. Определение параметров облачного покрова и осадков по данным MSU-MP с полярно-орбитального метеоспутника «Метеор-М» №2 для территории Западной Сибири // Сборник тезисов Шестнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2018 г. С. 166. ISBN 978-5-00015-018-4. doi:10.21046/2070-16DZZconf-2018.

Волкова Е.В., Кухарский А.В. Специализированный программный комплекс получения и валидации спутниковых оценок параметров облачности, осадков, подстилающей поверхности и приземного слоя воздуха для Европейской территории России // Сборник тезисов Семнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 11-15 ноября 2019 г. С. 161. doi:10.21046/17DZZconf-2019.

Волкова Е.В., Кухарский А.В. Специализированный программный комплекс получения оценок параметров облачности и осадков по данным радиометра SEVIRI с геостационарного метеоспутника Meteosat-8 (точка стояния 41,5° в.д.) для Европейской территории России и Западной Сибири // Сборник тезисов Семнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 11-15 ноября 2019 г. С. 162. doi:10.21046/17DZZconf-2019.

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 // Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли – RORSE 2018 (Электронный сборник статей 16й конференции, 12-16 ноября 2018 г., Москва, Россия). С. 248-255. doi:10.21046/forse2018.248.

Мазин И.П., Хризан А.Х. Облака и облачная атмосфера. Справочник // Л.: Гидрометиздат, 1989. 647 с.

Седунов Ю.С., Авдошин С.И., Борисенков Е.П., Волковичай О.А., Петров И.И., Рейтенбах Р.Г., Смирнов В.И., Черников А.А. Атмосфера. Справочник // Л.: Гидрометиздат, 1991. 510 с.

Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь // Л.: Гидрометиздат, 1974. 568 с.

Шмелер С.М. Физика конвективных облаков // Л.: Гидрометиздат, 1972. 232 с.

