

Смерчи и шквалы на Урале в июне 2017 года: анализ по спутниковым данным

А. Н. Шихов, И. О. Ажигов, А. В. Быков

*Пермский государственный национальный исследовательский университет
Пермь, 614990, Россия
E-mail: gis@psu.ru*

Рассмотрены условия возникновения шквалов и смерчей в Уральском регионе 03.06.2017 и 18.06.2017. На основе анализа синоптического положения, а также параметров неустойчивости по данным глобальных моделей прогноза погоды GFS/NCEP и GEM/CMC установлены основные факторы, способствовавшие возникновению смерчей. Мезомасштабный анализ выполнен по данным с геостационарных спутников EUMETSAT и полярно-орбитальных спутников Terra/Aqua MODIS. По снимкам с метеорологических спутников выявлены области с минимальной температурой верхней границы облаков, которые в целом совпадают с районами возникновения смерчей и сильных шквалов. Для выявления не зафиксированных наблюдательной сетью случаев шквалов и смерчей проведён анализ вызванных ими ветровальных нарушений лесного покрова по разновременным снимкам со спутников Landsat-8 и Sentinel-2. Всего по спутниковым данным выявлено восемь участков ветровалов на общей площади более 1500 га в Свердловской, Курганской и Тюменской областях. Из них три случая вызваны шквалами и пять — смерчами. Для уточнения интенсивности смерча в районе пос. Висим Свердловской области проведено выборочное полевое обследование ветровала. Характер повреждения древостоя на обследованном участке соответствует интенсивности смерча F1 по шкале Фуджиты. Однако протяжённость и ширина ветровала указывают на интенсивность смерча F2 или более.

Ключевые слова: смерчи, шквалы, синоптический и мезомасштабный анализ, ветровальные нарушения лесного покрова, снимки Landsat

Одобрена к печати: 13.11.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-272-281

Введение

Июнь 2017 г. на Европейской территории России отличался необычными погодными условиями: температура воздуха была на 2–3° ниже климатической нормы, а количество осадков превышало норму в связи с влиянием глубокой и устойчивой тропосферной ложбины. В её системе происходила адвекция холодного воздуха в район Чёрного и Каспийского морей, что провоцировало активный циклогенез и выход южных циклонов на Урал (Бережная и др., 2017). В результате в Уральском регионе складывались благоприятные условия для развития опасных явлений погоды (ОЯП) конвективного характера. Наибольший интерес представляют случаи ОЯП, наблюдавшиеся 3 и 18 июня 2017 г., когда отмечались сильные шквалы, крупный град и смерчи, вызвавшие масштабные разрушения и массовые ветровалы в лесных массивах.

Во второй половине дня и вечером 03.06.2017 в Горнозаводской зоне Урала на территории протяжённостью более 800 км, от г. Карталы Челябинской области до г. Североуральска Свердловской области, прошли шквалы с порывами ветра 20–27 м/с, крупный град диаметром до 35 мм, в пос. Староуткинске наблюдался смерч. В результате опасных явлений погоды погиб один человек, пострадали 11; предварительный материальный ущерб составил: в г. Нижний Тагил — 166 млн руб., в пос. Староуткинск — 4,9 млн руб. (Бережная и др., 2017). Ущерб от сильного ветра и крупного града был отмечен более чем в 50 населённых пунктах Свердловской и Челябинской областей (Dotzek et al., 2009).

Во второй половине дня и вечером 18.06.2017 на востоке Курганской и на юге Тюменской областей отмечался комплекс ОЯП. В Курганской области на метеостанциях

Лебяжье и Памятное прошли шквалы (до 26 м/с), были повалены опоры линий электропередач, в большинстве населённых пунктов района нарушено электроснабжение. В пос. Центральный Лебяжьевского района наблюдался смерч (Dotzek et al., 2009). Также смерч прошёл через дер. Малое Песьяново Мокроусовского района, в результате чего четыре дома были полностью разрушены и 25 домов серьёзно повреждены (<https://oblast45.ru/publication/16698/>). На юге Тюменской области отмечались сильные дожди (24–58 мм), град, в Тюмени — шквал 24 м/с. Произошло отключение электроэнергии, частичное разрушение кровли на зданиях, повреждены автомобили. Падение деревьев на железнодорожные пути и ЛЭП привело к длительным задержкам поездов.

В настоящей статье рассмотрены условия возникновения шквалов и смерчей на Урале 03.06.2017 и 18.06.2017. Для синоптического анализа использованы фактические карты погоды и прогностические поля по численным моделям атмосферы GFS/NCEP и GEM/CMC (с шагом сетки 0,25 и 0,24° соответственно). Мезомасштабный анализ выполнен на основе архива снимков с геостационарных спутников EUMETSAT (<https://kachelmannwetter.com/de/sat>), которые осуществляют съёмку каждые 15 мин, а также по данным Terra/Aqua MODIS, полученным с веб-ресурса Национального аэрокосмического агентства США (NASA). Для выявления не зафиксированных наблюдательной сетью случаев сильных шквалов и смерчей проведён анализ вызванных ими ветровальных нарушений лесного покрова на основе разновременных снимков со спутников Landsat-8 и Sentinel-2.

Условия развития шквалов и смерчей 3 июня 2017 г.

Погодные условия на Урале 03.06.2017 определяла передняя часть обширного высотного циклона с центром над южными районами Архангельской области. В тыловой части циклона на Европейскую территорию России поступала арктическая воздушная масса с температурой на изобарической поверхности АТ850 –4...–6 °С. В то же время над Западной Сибирью господствовал высотный гребень. По его западной периферии распространялся тропический воздух с температурой на АТ850 до +18 °С. Уральский регион находился под влиянием меридионально ориентированной высотной фронтальной зоны, в пределах которой градиент температуры на АТ850 превышал 12 °С/500 км.

Днём 02.06.2017 к западу от Аральского моря на холодном фронте полярной системы сформировался южный циклон, который стал смещаться вдоль потока с юга на север. В связи с поступлением в тыловую часть холодного воздуха циклон начал интенсивно углубляться. К 12:00 Всемирного скоординированного времени (ВСВ) 3 июня давление в центре циклона, который сместился в район Магнитогорска, упало до 988 гПа. В ночь на 4 июня циклон достиг стадии максимального развития. Давление в его центре понизилось до 987 гПа. Центр циклона смещался меридионально вдоль Уральского хребта и к 03 ч ВСВ 4 июня располагался над юго-востоком Республики Коми.

Во второй половине дня 3 июня западная часть Свердловской и Челябинской областей оказались под влиянием полярного фронта с волнами. Вечером 3 июня полярный фронт как холодный начал смещаться на восток. Восточная часть Зауралья находилась в тёплом секторе южного циклона, где максимальная температура воздуха достигла +29...+31 °С. В то же время за холодным фронтом (на востоке Пермского края) было всего +16...+20 °С. Таким образом, температурный контраст на фронте превышал 10 °С.

По данным глобальных моделей атмосферы GFS/NCEP и GEM/CMC, в период с 09 по 15 ч ВСВ на Среднем Урале ожидалось подходящее для развития опасных явлений погоды условия. Прогнозировалось сочетание сильной конвективной неустойчивости (потенциальная энергия неустойчивости CAPE около 2000 Дж/кг) и сильной вертикальной завихренности. Прогнозируемое значение индекса смерчеопасности ЕНІ, который учитывает как неустойчивость, так и завихренность, по данным модели GFS, достигло 4,2. В то же время достаточным для развития сильных смерчей считается значение ЕНІ, превышающее 2,0 (Das et al., 2016). Максимальные значения параметров неустойчивости и завихренности по данным

на 12:00 ВСВ в радиусе 100 км от места формирования смерчей приведены в *табл. 1*. Более подробная информация об использовании этих параметров представлена в работе (Doswell, Shultz, 2006).

Таблица 1. Параметры неустойчивости атмосферы по данным моделей GFS/NCEP и GEM/CMC

Дата, время	CAPE, Дж/кг		Lifted Index, °C		Storm Relative Helicity (в слое 0–3 км), м ² /с ²		Energy Helicity Index		Supercell Composite Parameter	
	GFS/NCEP	GEM/CMC	GFS/NCEP	GEM/CMC	GFS/NCEP	GEM/CMC	GFS/NCEP	GEM/CMC	GFS/NCEP	GEM/CMC
03.06.2017, 12:00 ВСВ	2200	1800	–8	–4	480	360	4,2	2,5	0	0
18.06.2017, 12:00 ВСВ	4200	3000	–12	–8	450	560	3,4	5,0	3,5	3,4

Неустойчивость атмосферы реализовалась днём 3 июня при прохождении волновых возмущений на полярном фронте. В 07 ч по ВСВ был зафиксирован шквал (20 м/с) на метеостанции Карталы в Челябинской области. В последующие два часа шквалы наблюдались в ряде районов Челябинской области, на метеостанции Мирный выпал крупный град диаметром 35 мм. В 08:40 ВСВ, по спутниковым данным MODIS, над Челябинской областью наблюдалась линейная мезомасштабная конвективная система (МКС) протяжённостью около 300 км, с радиояркой температурой верхней границы облаков (ВГО) до –62 °C (*рис. 1а*).

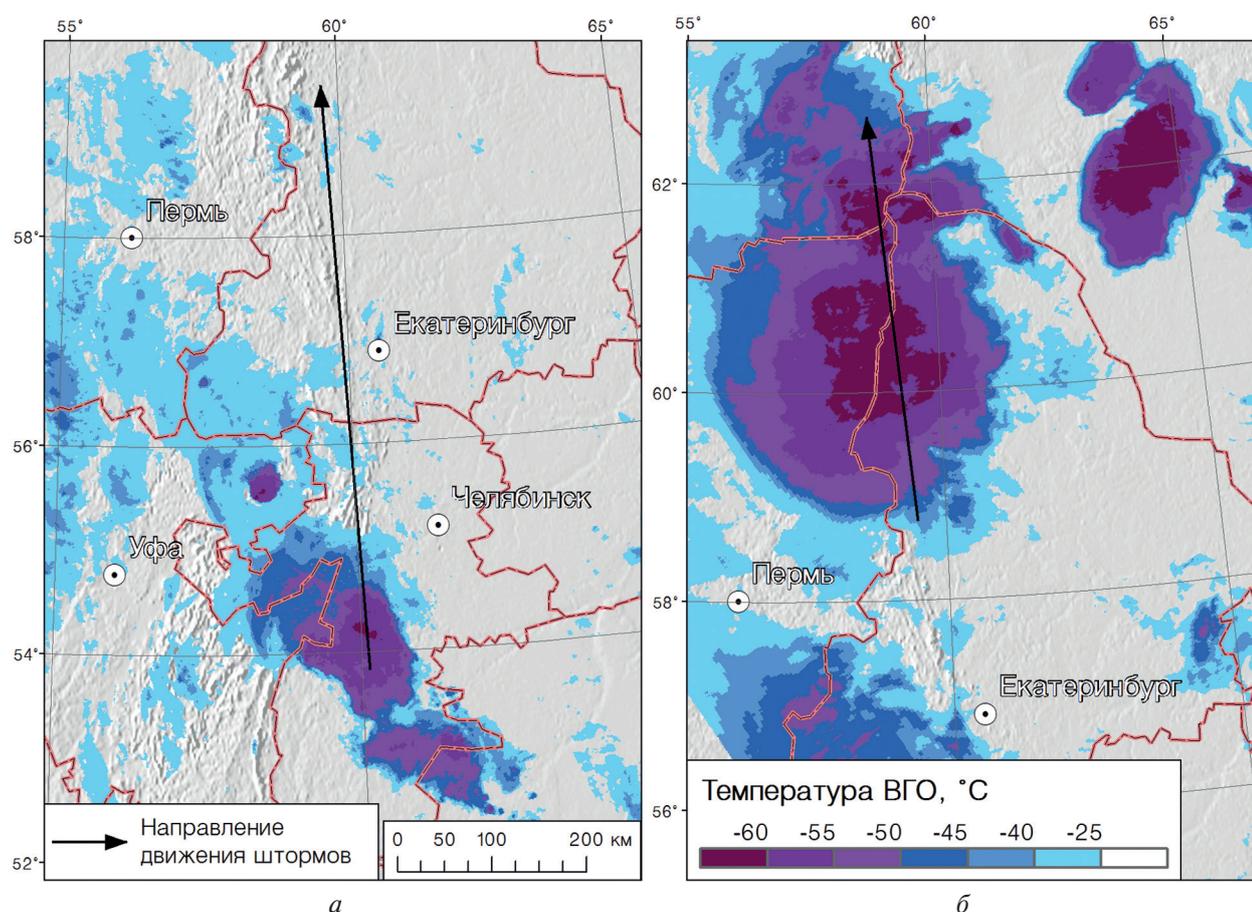


Рис. 1. Температура верхней границы облаков по снимкам Aqua MODIS за 3 июня 2017 г.: *а* — 08:40 ВСВ; *б* — 16:30 ВСВ

Над северо-востоком Башкортостана смешалась ещё одна конвективная ячейка диаметром 30 км с температурой ВГО до -61°C . Такие значения температуры ВГО указывают на высокую интенсивность конвекции и возможный пробой тропопаузы (*overshooting top*) (Bedka, 2011). Третья МКС сформировалась к 10:00 ВСВ вблизи границы Пермского края и Свердловской области южнее г. Качканар, температура ВГО в ней также была ниже -60°C . На метеостанции Бисер при прохождении МКС выпал град диаметром 32 мм.

Смещаясь далее на север, линейная МКС с Челябинской области вышла на Свердловскую область, где вызвала шквалы на обширной территории. Самые сильные шквалы отмечены на метеостанциях Липовское (27 м/с) и Нижний Тагил (26 м/с). Шквал в Нижнем Тагиле наблюдался около 13:00 ВСВ. В 14:30 ВСВ шквалы и крупный град диаметром до 30 мм отмечались в г. Качканар, г. Лесной и пос. Валериановск. В период с 15 по 16 ч ВСВ шквалы до 24 м/с прошли в северных районах Свердловской области. Последним пострадавшим населённым пунктом был посёлок городского типа Сосьва.

Конвективная ячейка с севера Башкортостана также сместилась на Свердловскую область и в 11:30 ВСВ достигла пос. Староуткино, где прошёл смерч, различные повреждения от которого получили около 20 домов. Мезоциклон, который вызвал смерч в пос. Староуткино, продолжил смещаться на север, и около 12:00 ВСВ его прохождение наблюдалось вблизи пос. Висим Нижнетагильского района. К 14:30 ВСВ все три МКС над западом Свердловской области объединились, сформировав обширный мезомасштабный конвективный комплекс (МКК) диаметром более 200 км с температурой ВГО до -65°C . К 16:30 ВСВ он находился над северными районами Пермского края и Свердловской области (см. *рис. 1б*).

Условия развития шквалов и смерчей 18 июня 2017 г.

Синоптическая ситуация 18 июня 2017 г. была во многом аналогична той, которая наблюдалась 3 июня. Восточная часть Уральского региона находилась под влиянием меридионально ориентированной высотной фронтальной зоны (ВФЗ) в передней части высотного циклона с центром над Поволжьем. Через восток Курганской и юг Тюменской областей пролегал меридионально-ориентированный полярный фронт с волнами.

В ночь на 18 июня на волне полярного холодного фронта над Северным Казахстаном возник южный циклон, который начал смещаться по потоку на север. В тёплом секторе циклона распространялась тропическая воздушная масса из Средней Азии с температурой на АТ850 $+20...+22^{\circ}\text{C}$. При этом градиент температуры на АТ850 на полярном фронте достигал $12-14^{\circ}\text{C}/500\text{ км}$. Смещаясь на север, затем на северо-запад вдоль ВФЗ, циклон начал резко углубляться. В 12 ч ВСВ его центр находился над востоком Курганской области, давление в центре составляло 993 гПа. Уже к 06:00 ВСВ 19 июня давление в центре циклона над Тюменской областью упало до 982 гПа, циклон достиг стадии максимального развития. Днём 19 июня он начал заполняться.

По данным глобальных моделей прогноза погоды GFS/NCEP и GEM/CMC, во второй половине дня 18 июня в тёплом секторе циклона вблизи точки окклюзии над восточными районами Курганской области прогнозировалось сочетание чрезвычайно сильной конвективной неустойчивости (CAPE более 3000 Дж/кг), сильного вертикального сдвига ветра и вертикальной завихренности. Высокое значение индекса смерчопасности ENI также указывало на значительную вероятность возникновения смерчей (см. *табл. 1*).

По данным геостационарного спутника EUMETSAT, около 09 ч ВСВ над территорией Северного Казахстана вблизи границы с Курганской областью возникли скопления кучево-дождевых облаков, которые вдоль потока смещались на север. Конвекция имела «взрывной» характер, температура ВГО уже к 09:45 ВСВ достигла -60°C . В 10:45 ВСВ центральная часть сформировавшейся обширной МКС сместилась на Лебяжьеvский район Курганской области, где были зафиксированы шквалы и смерч. В 11:45 ВСВ, по данным Meteosat, над западной частью Мокроусовского района наблюдался пробой тропопаузы с температурой верхней границы облаков -65°C , который, вероятнее всего, был связан с мезоциклоном (*рис. 2*, см. с. 276).

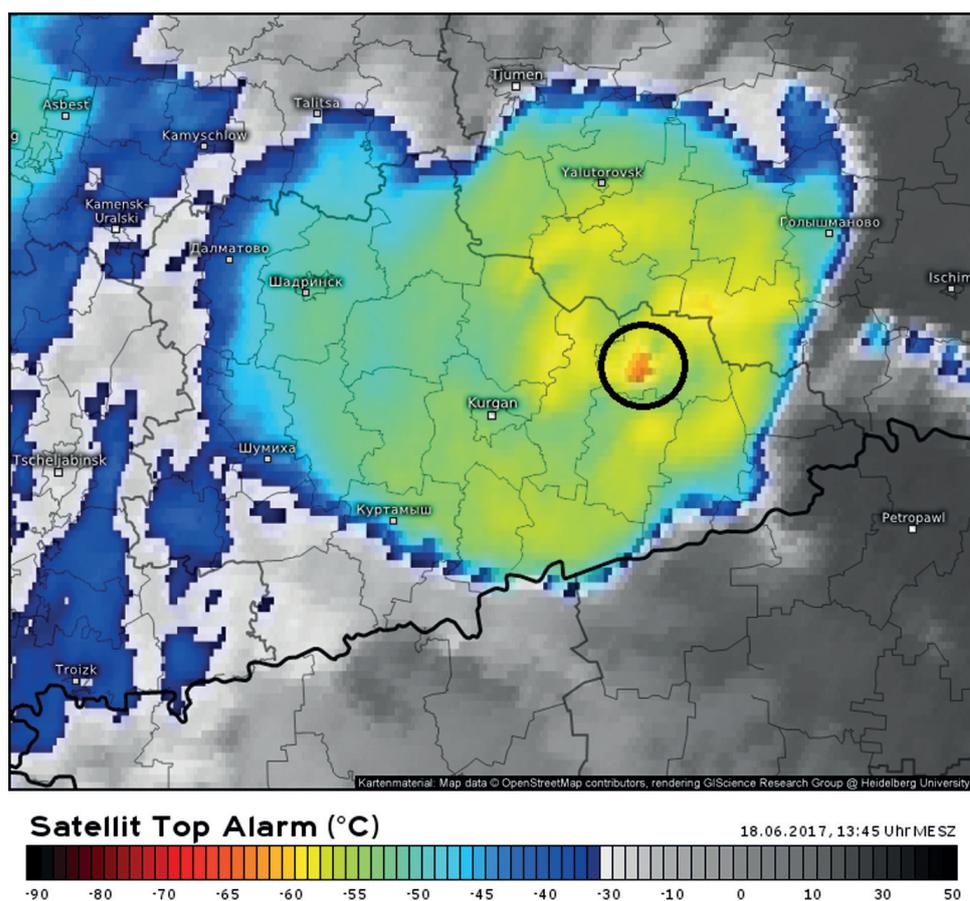


Рис. 2. Температура ВГО над Курганской областью по данным геостационарного спутника EUMETSAT на 13:45 ВСВ 18.06.2017. Чёрной окружностью выделен пробой тропопаузы над Мокроусовским районом с температурой ВГО до -65°C

Именно в это время наблюдался смерч на западе Мокроусовского района в дер. Малое Песьяново. К 12:30 ВСВ обширная МКС, диаметр которой превышал 400 км, сместилась на территорию Тюменской области. При этом температура верхней границы облаков в районе Тюмени и Заводоуковска достигала -65°C , что также указывало на высокую вероятность развития ОЯП.

Анализ ветровальных нарушений лесного покрова по спутниковым данным

В результате шквалов и смерчей в июне 2017 г. был нанесён значительный ущерб лесным ресурсам региона. Выявление ветровальных нарушений лесного покрова, вызванных шквалами и смерчами, проведено по разновременным снимкам со спутников Landsat-8 и Sentinel-2. Снимки за август 2016 г. и июль – август 2017 г. были получены с веб-сервиса LandViewer (<https://lv.eosda.com/#/>). Идентификация ветровалов производилась как визуально по изображениям, синтезированным из средних ИК-каналов разновременных снимков, так и автоматизированным путём на основе расчёта изменений вегетационного индекса SWVI в пределах маски леса (Крылов, Владимирова, 2011). Для поиска ветровалов использовались также сведения об ущербе от шквалов и смерчей в населённых пунктах. Всего было обнаружено шесть участков ветровала (на общей площади более 1150 га) в Свердловской области и два участка (на общей площади 370 га) в Курганской и Тюменской областях (рис. 3, см. с. 277, рис. 4, см. с. 278). Основные геометрические характеристики ветровалов приведены в табл. 2 (см. с. 278).

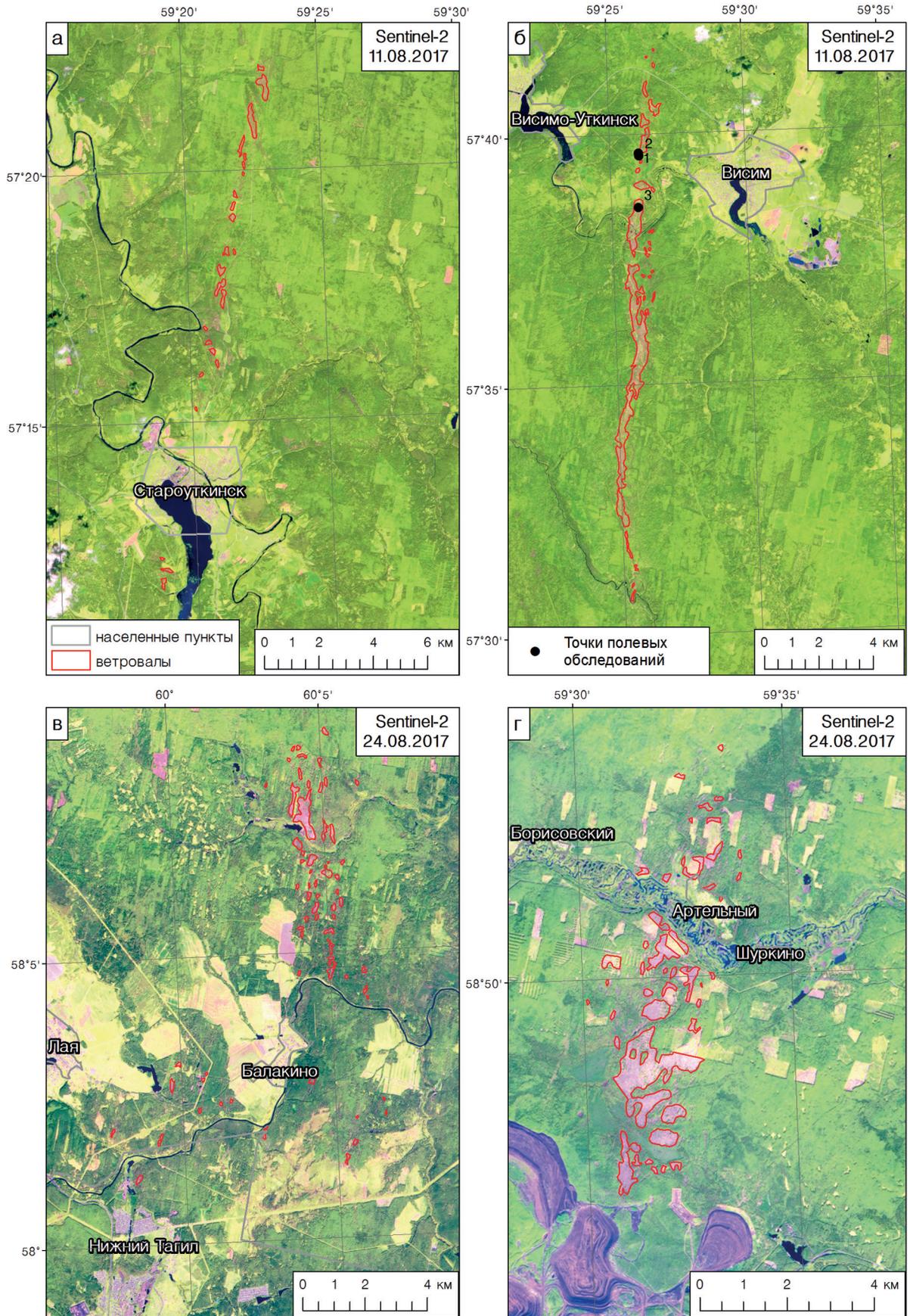


Рис. 3. Ветровалы, вызванные шквалами и смерчами 03.06.2017: а — смерчевый ветровал у пос. Староутки́нск; б — смерчевый ветровал у пос. Висим; в — шкваловый ветровал севернее г. Нижний Тагил; г — шкваловый ветровал в районе пос. Валериановск

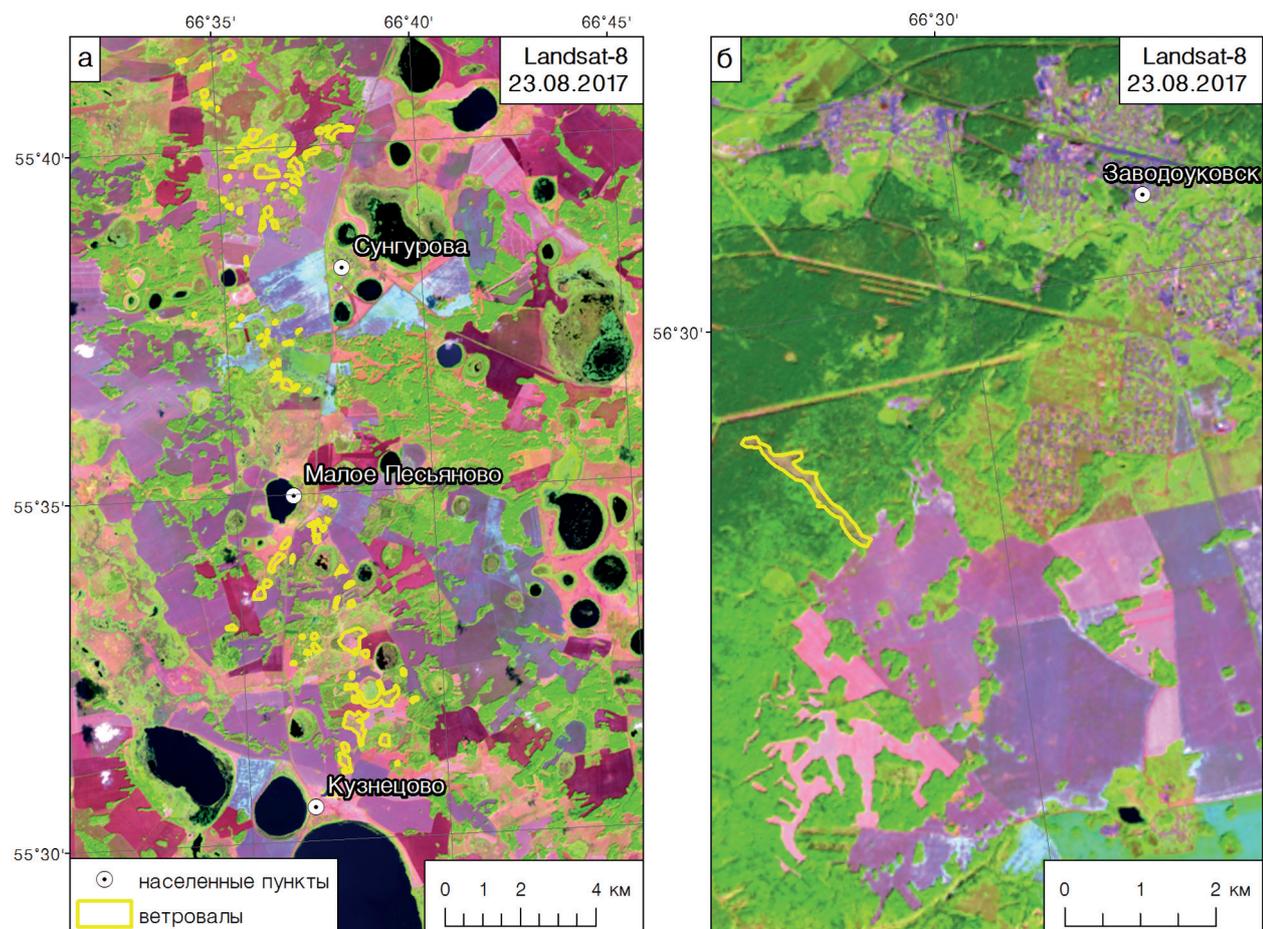


Рис. 4. Ветровальные нарушения лесного покрова, вызванные шквалами и смерчами 18.06.2017: а — ветровал от смерча вблизи дер. Малое Песьяново; б — ветровал от смерча юго-западнее г. Заводоуковск

Таблица 2. Основные геометрические характеристики ветровалов

Местоположение	Тип явления	Протяжённость, км	Средняя/ максимальная ширина, м	Площадь, га
<i>3 июня 2017 г. (Свердловская область)</i>				
Вблизи пос. Староуткинский	смерч	19,8	140/380	114
3 км к западу от пос. Висим	смерч	20,5	248/585	440
10 км к северо-востоку от г. Нижний Тагил	шквал	25	локальные повреждения	192
3 км севернее г. Красноуральск	смерч	3,0	70/140	11
Вблизи пос. Артельный	шквал	10,7	420/1650	382
12 км севернее пос. Артельный	шквал	8,8	локальные повреждения	34
<i>8 июня 2017 г. (Курганская, Тюменская области)</i>				
Вблизи дер. Малое Песьяново	смерч, шквал	28,4	245/1200	340
4 км юго-западнее г. Заводоуковск	смерч	2,2	126/300	30



Рис. 5. Ветровалы от смерча к западу от пос. Висим Свердловской области 03.06.2017

По геометрическим признакам, таким как соотношение протяжённости и ширины и характер повреждения древостоя, был определён тип ветровала (шкваловый или смерчевый). Методика определения типа ветровала описана в работах (Шихов, Тарасов, 2016; Shikhov, Chernokulsky, 2018). На основе анализа ветровальных нарушений лесного покрова подтверждены три случая смерчей, не зафиксированных очевидцами.

Полевое обследование ветровала в районе пос. Висим

В июле 2017 г. для уточнения интенсивности смерча в районе пос. Висим были проведены полевые обследования (точки наблюдений обозначены на рис. 3б). Обследовались доступные участки ветровала вблизи дорог к западу от пос. Висим. Для оценки интенсивности смерча по шкале Фуджита (Fujita, 1981) использованы рекомендации, приведённые в статье (Vech et al., 2009). Согласно приведённым в данной статье оценкам, смерч интенсивности F0 (скорость ветра менее 33 м/с) вызывает вывал деревьев небольшими группами (обычно вырывая их с корнем); смерч категории F1 (скорость ветра 33–49 м/с) валит или ломает большие группы деревьев, но отдельные деревья при таком смерче могут устоять. На ветровале от смерча F1 заметен поворот упавших деревьев влево относительно направления движения смерча. Смерч интенсивности F2 (скорость ветра 50–69 м/с) валит или ломает все деревья.

Характер ветровалов к западу от пос. Висим показывает, что интенсивность смерча в точках 1, 2 и 3 соответствовала категории F1, поскольку на всех участках ветровала сохранились отдельные устоявшие деревья, в основном берёзы (рис. 5). Ширина сплошного ветровала у точек 1 и 2 составляет около 150 м, а в точке 3 — 340 м. Однако к юго-западу от пос. Висим ширина сплошного ветровала превышает 500 м. Такая ширина и протяжённость ветровала (свыше 20 км) более характерна для смерча категории F2 или F3. По данным работы (Groenemeijer, Kuhne, 2014), в Европе средняя длина пути смерчей с интенсивностью F1 составляет всего 6,9 км, а средняя максимальная ширина — 111 м. Вероятно, в районе пос. Висим смерч уже начал ослабевать и окончательно разрушился в трёх километрах севернее места проведения обследования.

Заключение

Рассмотренные случаи сильных шквалов и смерчей в июне 2017 г. не являются уникальными событиями для Уральского региона. Аналогичные явления наблюдались в июне 2007, 2009 гг. и в июле 2012 г. (Шихов и др., 2017). На основе проведённого исследования можно сделать два важных вывода. Во-первых, оба случая возникновения смерчей могли быть успешно спрогнозированы по данным глобальных моделей прогноза погоды, учитывая экстремально

высокие значения индексов смерчопасности. Во-вторых, изучение ветровальных нарушений лесного покрова по спутниковым данным позволило получить важную дополнительную информацию о случаях опасных явлений погоды, не зафиксированных наблюдательной сетью и очевидцами. Из восьми выявленных ветровалов четыре были связаны с неизвестными ранее случаями смерчей и шквалов.

Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-05-00245-а, 16-45-590823 р-а).

Литература

1. *Бережная Т. В., Голубев А. Д., Паршина Н. В.* Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в июне 2017 г. // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 9. С. 128–139.
2. *Крылов А. М., Владимирова Н. А.* Дистанционный мониторинг состояния лесов по данным космической съемки // *Геоматика*. 2011. № 3. С. 53–58.
3. *Шихов А. Н., Перминов С. И., Киселева Е. С.* Оценка подверженности бореальных лесов Урала воздействию лесных пожаров и ветровалов по многолетним рядам спутниковых наблюдений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 3. С. 87–102.
4. *Шихов А. Н., Тарасов А. В.* Идентификация случаев возникновения смерчей в лесной зоне по многолетним рядам данных дистанционного зондирования Земли // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 3. С. 84–94.
5. *Bech J., Gayà M., Aran M., Figuerola F., Amaro J., Arús J.* Tornado damage analysis of a forest area using site survey observations, radar data and a simple analytical vortex model // *Atmospheric Research*. 2009. V. 93. P. 118–130.
6. *Bedka K. M.* Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI infrared brightness temperatures and their relationship to severe weather over Europe // *Atmospheric Research*. 2011. V. 99 (2). P. 175–189.
7. *Das M. K., Das S., Chowdhury M. A. M., Karmakar S.* Simulation of tornado over Brahmanbaria on 22 March 2013 using Doppler weather radar and WRF model // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2016. V. 7. Iss. 5. P. 1577–1599.
8. *Doswell C. A. III., Schultz D. M.* On the use of indices and parameters in forecasting severe storms // *Electronic J. Severe Storms Meteorology*. 2006. V. 1. P. 1–22.
9. *Dotzek N., Groenemeijer P., Feuerstein B., Holzer A. M.* Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD // *Atmospheric Research*. 2009. V. 93. P. 575–586.
10. *Fujita T. T.* Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales // *J. Atmospheric Sciences*. 1981. V. 38. P. 1511–1534.
11. *Groenemeijer P., Kuhne T.* A climatology of tornadoes in Europe: results from the European Severe Weather Database // *Monthly Weather Review*. 2014. V. 142. P. 4775–4790.
12. *Shikhov A. N., Chernokulsky A. V.* A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 204. P. 553–567.

A satellite-based analysis of squalls and tornadoes in the Urals region in June 2017

A. N. Shikhov, I. O. Azhigov, A. V. Bykov

Perm State University, Perm 614990, Russia

E-mail: gis@psu.ru

The article describes circumstances of two squalls and tornado events in the Urals region that occurred on 3 and 18 June, 2017. The main factors contributing to the tornado formation were identified on the basis of synoptic-scale analysis and instability indices which were calculated by GFS/NCEP

and GEM/CMC numerical weather prediction data. The mesoscale analysis is performed using the EUMETSAT geostationary satellites images and Terra/Aqua MODIS data. The overshooting tops (OTs) of mesoscale convective systems were identified by meteorological satellite data. The spatial position of OTs generally coincides with the area where the tornadoes and severe squalls occur. We used the forest damage analysis by Landsat-8 and Sentinel-2 satellite images to identify the squalls and tornadoes which were omitted by weather stations and eye-witnesses. We found five tornado tracks and three squall-induced windthrows, in which total area exceeded 1500 ha in Sverdlovsk, Kurgan and Tyumen Regions. To clarify the F-scale tornado intensity, a selective field survey was carried out in the tornado-damaged area near the Visim settlements (Sverdlovsk region). The features of forest stand damage correspond to F1 tornado intensity. However, the tornado path length and width indicate the F2 or F3 intensity.

Keywords: hazardous tornadoes, squalls, synoptic-scale and mesoscale analysis, windthrows, Landsat images

Accepted: 13.11.2017

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-272-281

References

1. Berezhnaya T. V., Golubev A. D., Parshina N. V., Anomal'nye gidrometeorologicheskie yavleniya na territorii Rossiiskoi Federatsii v iyune 2017 g. (Anomalous hydro-meteorological phenomena on the territory of the Russian Federation in June 2017), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2017, No. 9, pp. 128–139.
2. Krylov A. M., Vladimirova N. A., Distantionnyi monitoring sostoyaniya lesov po dannym kosmicheskoy s'emki (Remote monitoring of the forest stands health from space imagery data), *Geomatika*, 2011, No. 3, pp. 53–58.
3. Shikhov A. N., Perminov S. I., Kiseleva E. S., Otsenka podverzhennosti boreal'nykh lesov Urala vozdeistviyu lesnykh pozharov i vetrovalov po mnogoletnim ryadam sputnikovyykh nablyudenii (Assessment of boreal forests vulnerability to fire- and wind-induced disturbances from long-term series of satellite observations within the Urals region), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 87–102.
4. Shikhov A. N., Tarasov A. V., Identifikatsiya sluchaev vozniknoveniya smerchei v lesnoi zone po mnogoletnim ryadam dannyykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Identification of tornado cases in a forest region using long-term series of remote sensing data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 84–94.
5. Bech J., Gayà M., Aran M., Figuerola F., Amaro J., Arús J., Tornado damage analysis of a forest area using site survey observations, radar data and a simple analytical vortex model, *Atmospheric Research*, 2009, Vol. 93, pp. 118–130.
6. Bedka K. M., Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI infrared brightness temperatures and their relationship to severe weather over Europe, *Atmospheric Research*, 2011, Vol. 99 (2), pp. 175–189.
7. Das M. K., Das S., Chowdhury M. A. M., Karmakar S., Simulation of tornado over Brahmanbaria on 22 March 2013 using Doppler weather radar and WRF model, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2016, Vol. 7 (5), pp. 1577–1599.
8. Doswell C. A. III., Schultz D. M., On the use of indices and parameters in forecasting severe storms, *Electronic Journal of Severe Storms Meteorology*, 2006, Vol. 1, pp. 1–22.
9. Dotzek N., Groenemeijer P., Feuerstein B., Holzer A. M., Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD, *Atmospheric Research*, 2009, Vol. 93, pp. 575–586.
10. Fujita T. T., Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales, *Journal of Atmospheric Sciences*, 1981, Vol. 38, pp. 1511–1534.
11. Groenemeijer P., Kuhne T., A climatology of tornadoes in Europe: results from the European Severe Weather Database, *Monthly Weather Review*, 2014, Vol. 142, pp. 4775–4790.
12. Shikhov A. N., Chernokulsky A. V., A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 204, pp. 553–567.