

Анализ условий возникновения и моделирование случаев сильных шквалов, вызвавших катастрофические ветровалы в лесах Европейской России в XXI в

Шихов А.Н.¹, Быков А.В.², Чернокульский А.В.³ Костарев С.В.⁴

¹– Пермский государственный университет, кафедра метеорологии и охраны атмосферы

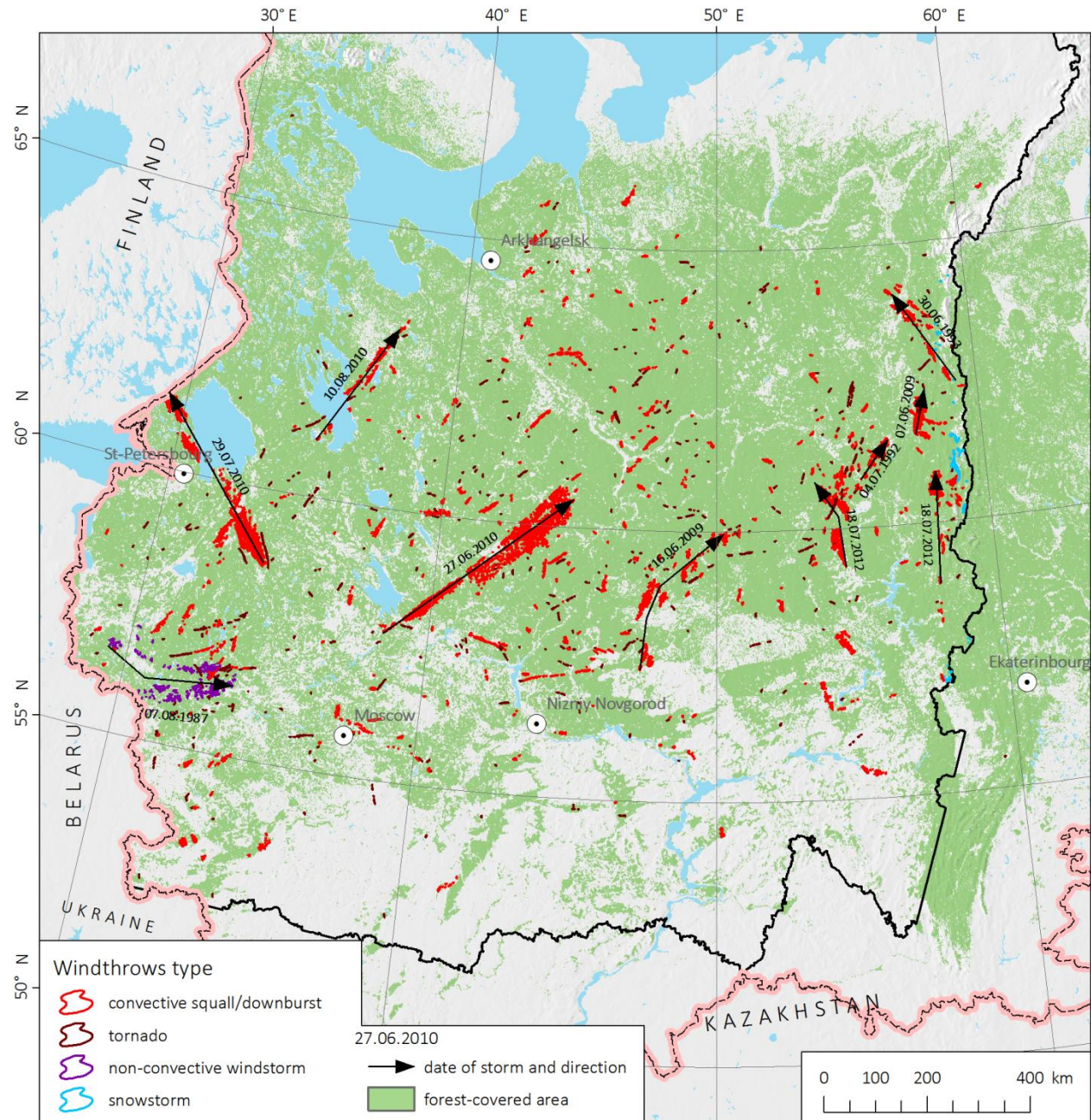
²– Пермский государственный университет, кафедра метеорологии и охраны атмосферы

³– Институт физики атмосферы им М.В. Обухова РАН

⁴– Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле

*Исследование выполнено при поддержке РФФ (проект № 18-77-10076)
и РФФИ (проект № 19-05-00046-а)*

- Пространственное распределение ветровалов в лесной зоне ЕТР за 1986-2017 гг.
- Выделены стрелками 10 крупнейших ветровалов, 9 из 10 случаев вызваны шквалами.
- На 4 случая (16.06.2009, 27.06.2010, 29.07.2010 и 18.07.2012) в сумме приходится почти 50% площади всех ветровалов на ЕТР за 1986-2017 гг.



Краткая характеристика рассматриваемых случаев

Дата	Тип явления	Число ветровалов	Общая площадь, га	Длина, км	Макс. ширина, км	Координаты начала трека	Координаты конца трека	Макс. зафиксированный порыв ветра
29.07.2010	шквал	4	63914	385	38.3	58°35' N 33°57' E	61°22' E 29°22' N	30 м/с (22891)
27.06.2010	шквал	2	50290	492	68.0	57°45' N 38°28' E	60°52' E 44°55' N	32 м/с (22974)
18.07.2012	шквал	25	21831	292	37.7	57°45' N 38°28' E	60°52' E 44°55' N	28 м/с (28105)
16.06.2009	шквал	11	13192	250	23.5	57°26' N 47°21' E	59°58' E 50°40' N	28 м/с (27097)

- Случай шквала 29.07.2010 г. рассмотрен в статье (Дмитриева, Песков, Метеорология и гидрология, 2013 г., №2)
- Случай шквала 18.07.2012 г. рассмотрен в статье (Калинин и др., Метеорология и гидрология, 2017, №1)
- Случаи 16.06.2009 и 27.06.2010 не анализировались в метеорологической литературе

Синоптическое положение и диагностические параметры по данным реанализа CFS

Дата	Время, ВСВ	t2m °/500 км	t850 °/500 км	V850, м/с	Td2m (max)
16.06.2009	14	9.7	8.3	18.3	20.5
27.06.2010	12	11.8	12	18	19.5
29.07.2010	21	7.8	9.9	16.9	19.2
18.07.2012	11	<u>16.6</u>	<u>12.9</u>	17.4	19.6
18.07.2012	14	13.2	11.7	<u>20.4</u>	<u>24.9</u>

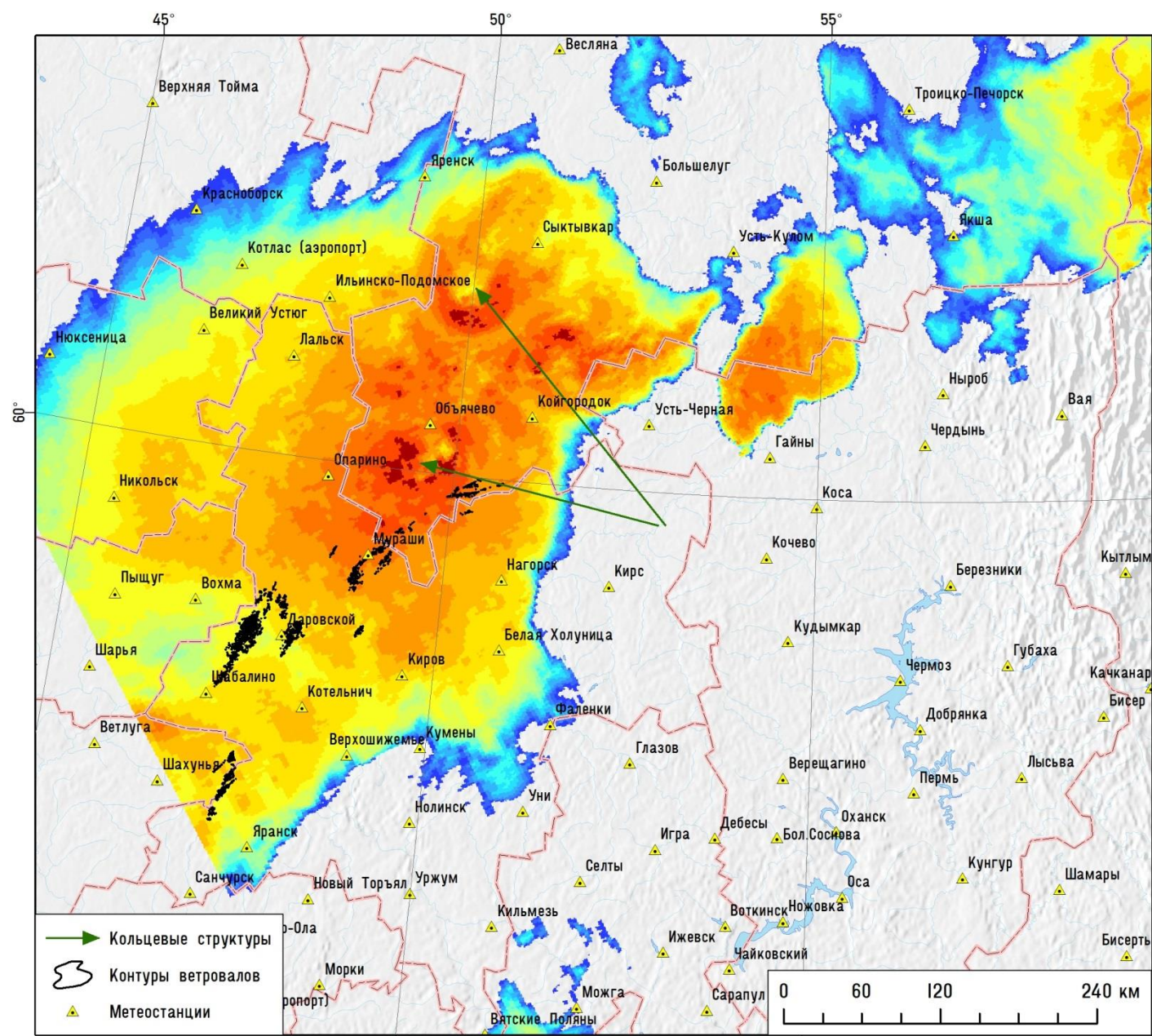
Дата	Время, BCB	Lat	Long	TT	K	CAPE	3D	SWEAT	DLS	MLS	LLS	WMAXSHEAR	EHI
16.06.2009	14	58.7	47.5	<u>58.3</u>	<u>42.6</u>	2151	18.7	<u>498</u>	26.7	26.7	15.3	1305	<u>4.16</u>
27.06.2010	12	58.5	40	50.2	35.1	1671	12.7	370	25.9	21.4	9.9	1232	1.47
29.07.2010	21	60.3	30.3	53.4	34	553	16.9	198	26.4	<u>28.8</u>	11.9	742	0.89
18.07.2012	11	59.3	54	53.9	<u>40.9</u>	1342	10.1	441	18	16.3	10.2	879	1.08
18.07.2012	14	59	58	52.8	<u>40.8</u>	<u>2621</u>	<u>22.7</u>	392	<u>29.4</u>	27	<u>15.6</u>	<u>1964</u>	3.31

Настройка мезомасштабной модели атмосферы WRF v.4

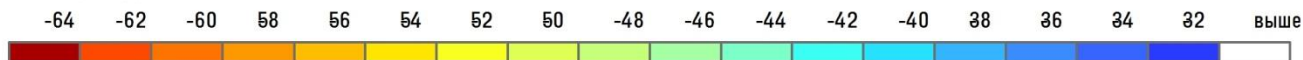
Характеристика модели	Значение (настройка)
Горизонтальный шаг сетки	3 км
Число узлов сетки	670×670
Число вертикальных уровней	38
Рельеф	U.S. Geological Survey (USGS) DEM (30s)
Продолжительность моделирования	27 ч, от 00 UTC
Временной шаг вывода данных	1 ч
Динамическое ядро	Advanced Research WRF (ARW), non-hydrostatic
Временной шаг интегрирования	48 или 18 с
Начальные и граничные условия	Реанализ CFS (0,5°) и реанализ ERA-5 (0.25°)
Микрофизика облачности	Схема Томпсона
Параметризация пограничного слоя	Yonsei University scheme
Параметризация процессов подстилающей поверхности	Модель Noah
Коротковолновая и длинноволновая радиация	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)
Приземный слой	Схема Монина-Обухова
Конвекция	Прямое моделирование (без параметризации)



Шквал 16.06.2009



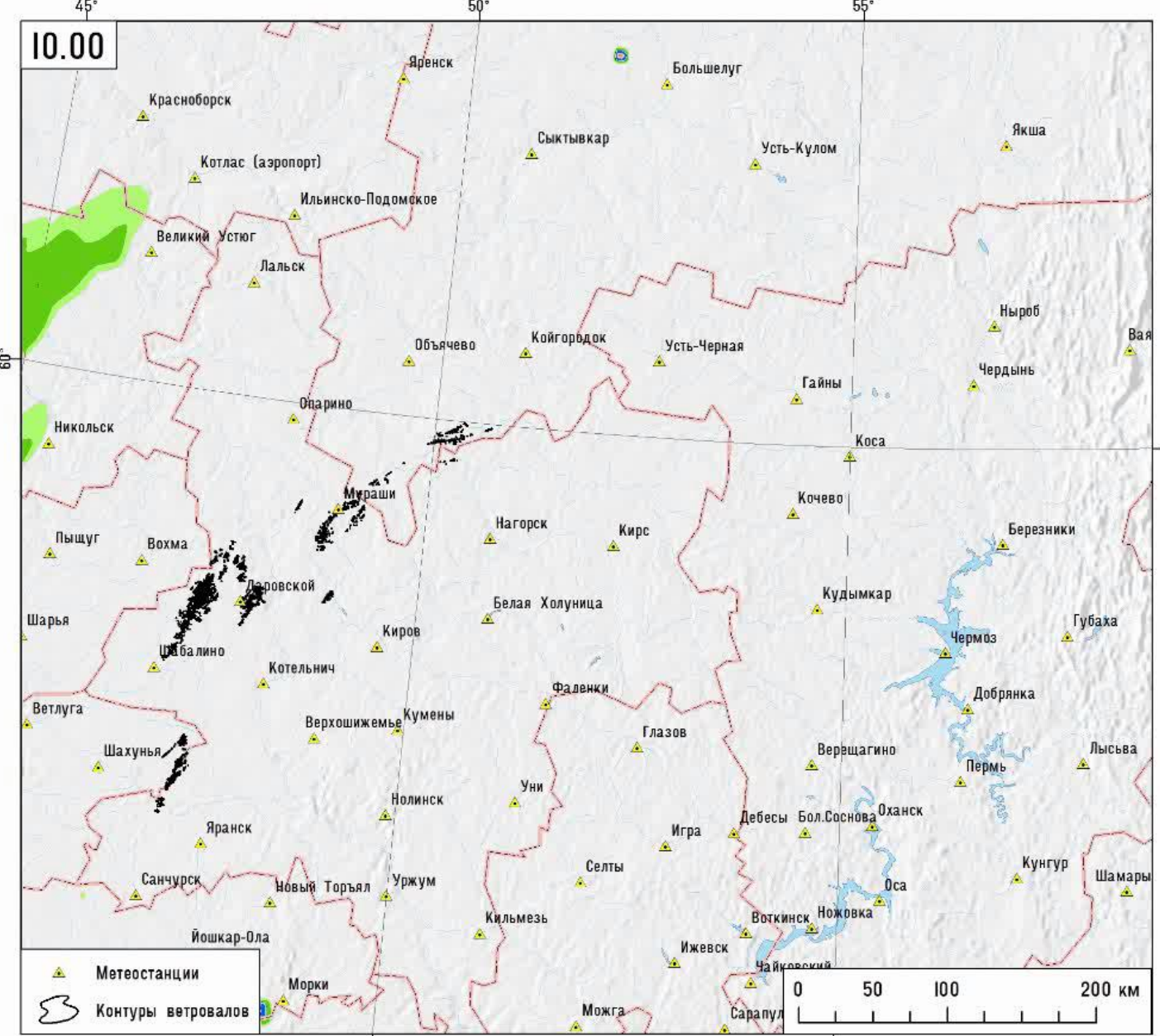
Температура ВГО, °С



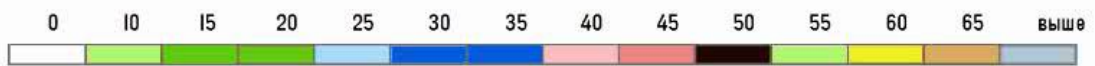
МКС, вызвавшая
 шквал 16.06.2009,
 на снимке Terra
 MODIS за 17.30 ВСВ

Хорошо выражены
 две кольцевые
 структуры в поле
 температуры ВГО

10.00

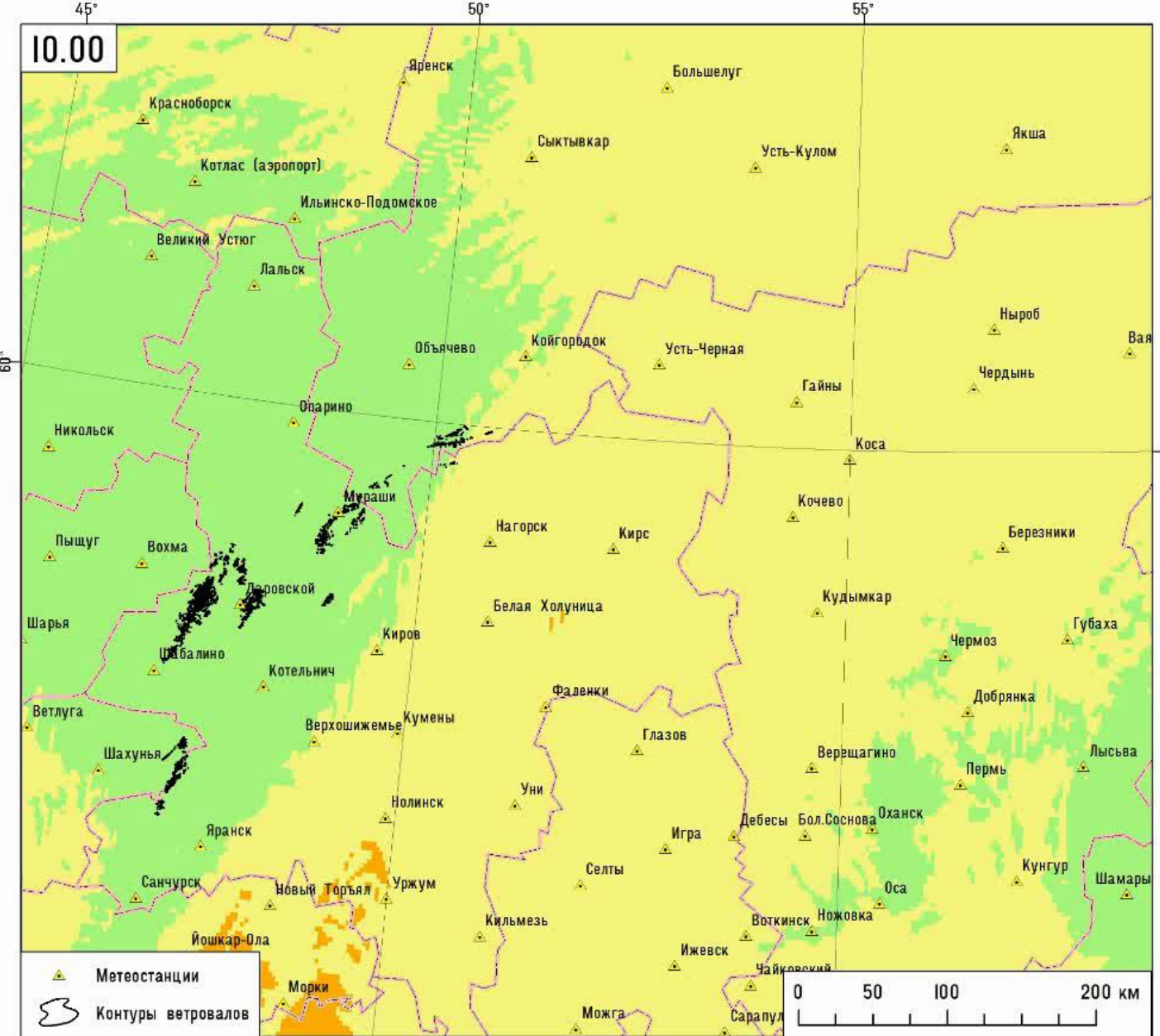


Максимальная отражаемость, dBZ



Шквал 16.06.2009,
расчетная
композитная
отражаемость по
модели WRF
(начальные
условия CFS)

10.00

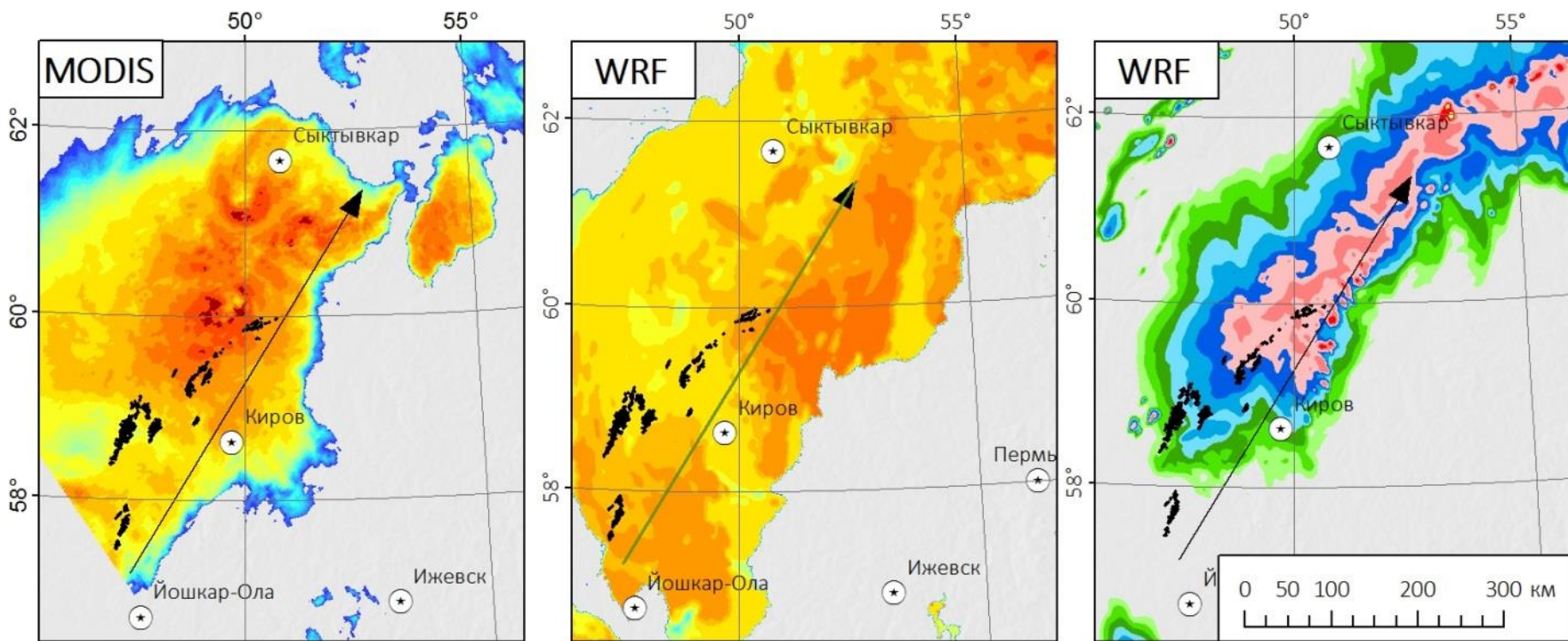


Порывы ветра, м/с

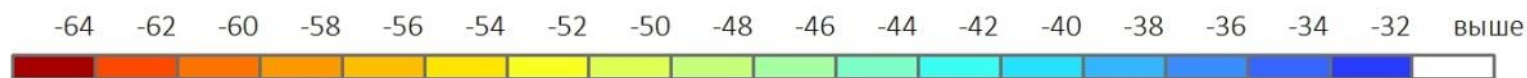


Шквал 16.06.2009,
расчетные
порывы ветра по
модели WRF
(начальные
условия CFS)

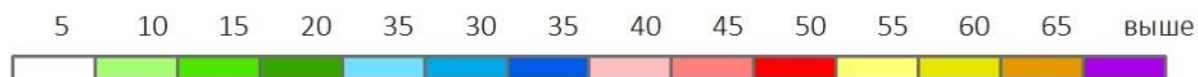
Оценка достоверности результатов моделирования МКС со шквалом на основе сравнения с данными MODIS/Terra за 17.30 ВСВ (модель WRF, начальные условия CFS)




Температура верхней границы облаков °С

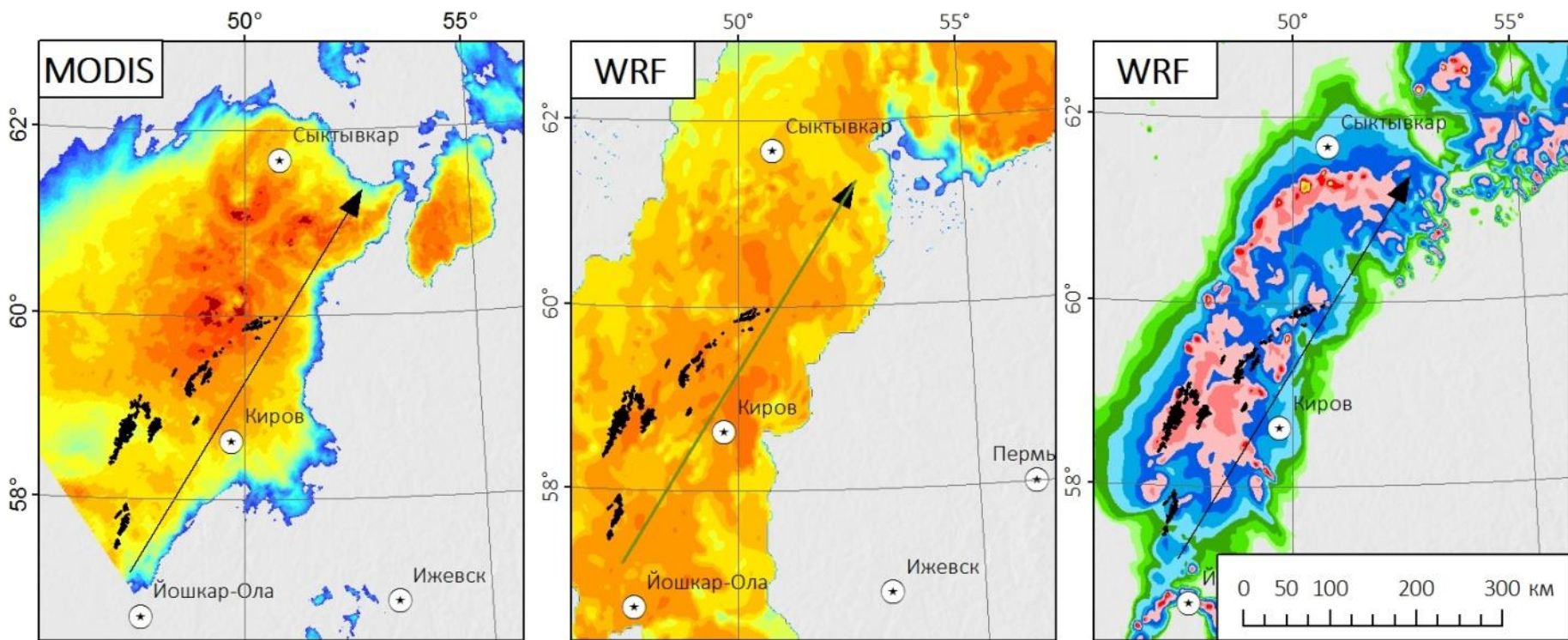


Максимальная отражаемость по модели, dBZ



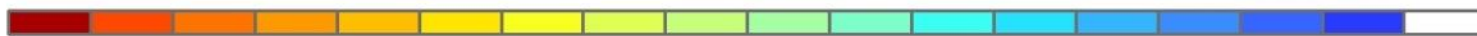
→ направление движения шторма
 контуры ветровалов

Оценка достоверности результатов моделирования МКС на основе сравнения с данными MODIS/Terra за 17.30 ВСВ (модель WRF, начальные условия ERA-5)



Температура верхней границы облаков °С


-64 -62 -60 -58 -56 -54 -52 -50 -48 -46 -44 -42 -40 -38 -36 -34 -32 выше



Максимальная отражаемость по модели, dBZ

5 10 15 20 35 30 35 40 45 50 55 60 65 выше



→ направление движения шторма
 контуры ветровалов

Результаты моделирования за 16.06.2009 (сравнение с данными метеостанций)

Метео-станция	Дата	Время (BCB)	Тип ОЯ	Шквал (CFS)/ время (BCB)	Шквал (GFS) расстояние, км	Шквал (ERA-5) время (BCB)	Шквал (ERA-5) расстояние, км	Осадки, факт	Осадки (CFS/ ERA-5)
Шабалино	16.06.2009	14.10 - 14.45	Шквал 30 м/с	25/14	55	21/16	30	Нет данных	17/36
Даровской	16.06.2009	14.50	Ливень 51 мм	22/14	15	22/15	25	51	40/18
Котельнич	16.06.2009	15	Шквал 22 м/с	27/14	45	25 /16	18	17	66/116
Мураши	16.06.2009	15.48 - 15.55	Шквал 28 м/с	29/16	55	24 /15	18	Нет данных	36/41

- Зеленым выделены значения, которые воспроизводятся наиболее успешно
- Красным – случаи, которые не воспроизвелись или имеют сильное смещение по пространству (более 50 км) или по времени (более 2 ч)

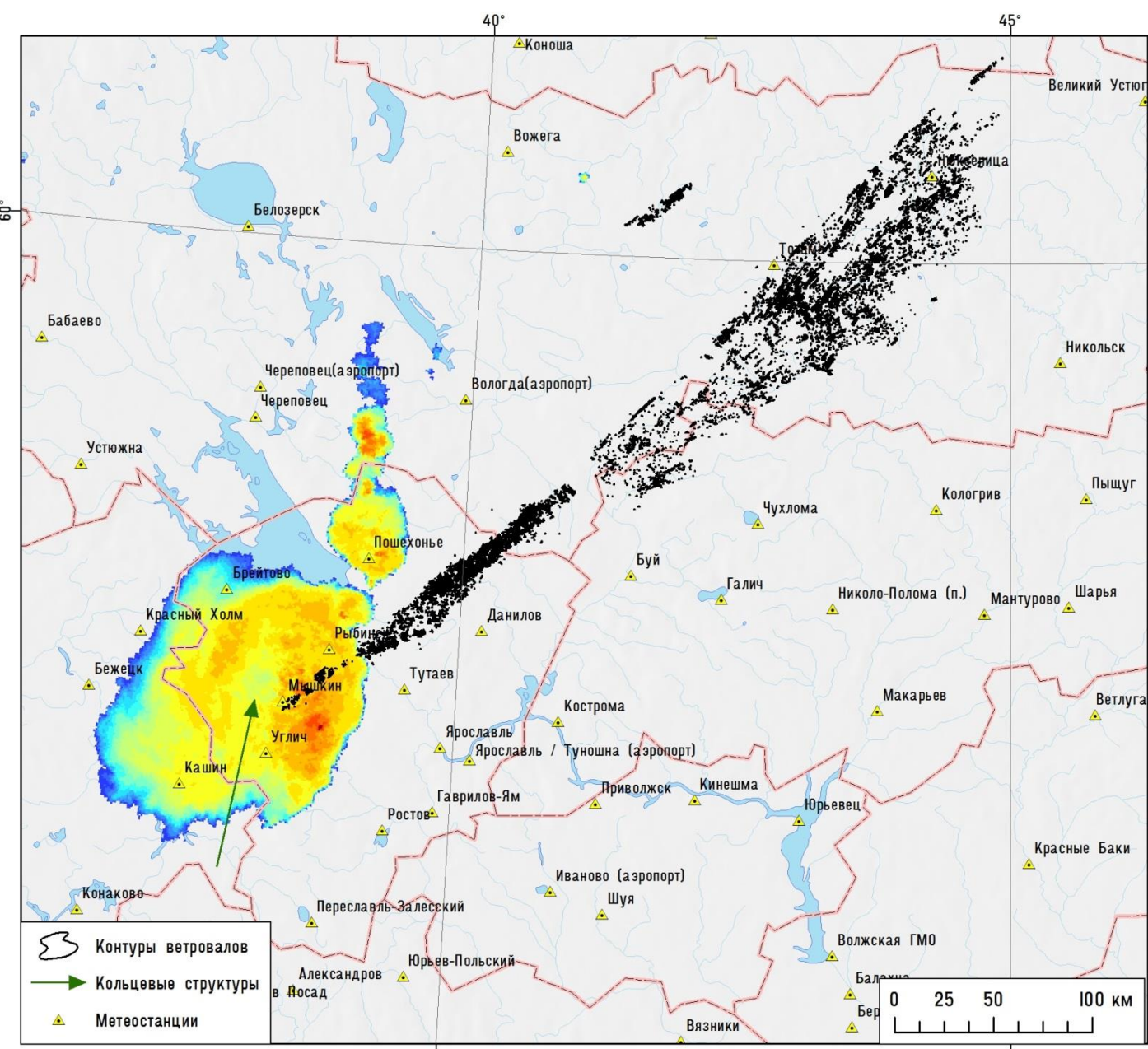
Результаты моделирования за 16.06.2009 (сравнение с ветровалами)

Номер в базе данных	Дата	Площадь, га	Шквал (CFS)/ время (BCB)	Шквал (CFS) расстояние, км	Шквал (ERA-5)/время (BCB)	Шквал (ERA-5) расстояние, км	Макс. интенсивность осадков (CFS/ERA-5), мм/ч
290	16.06.2009	1137	26/14	10	25/15	10	21/15
285	16.06.2009	7831	22/15	0	21/16	0	23/30
287	16.06.2009	1688	22/15	0	22/15	10	30/10
288	16.06.2009	1231	25/15	5	23/15	15	32/39
234	16.06.2009	676	24/13	0	25/14	0	26/9

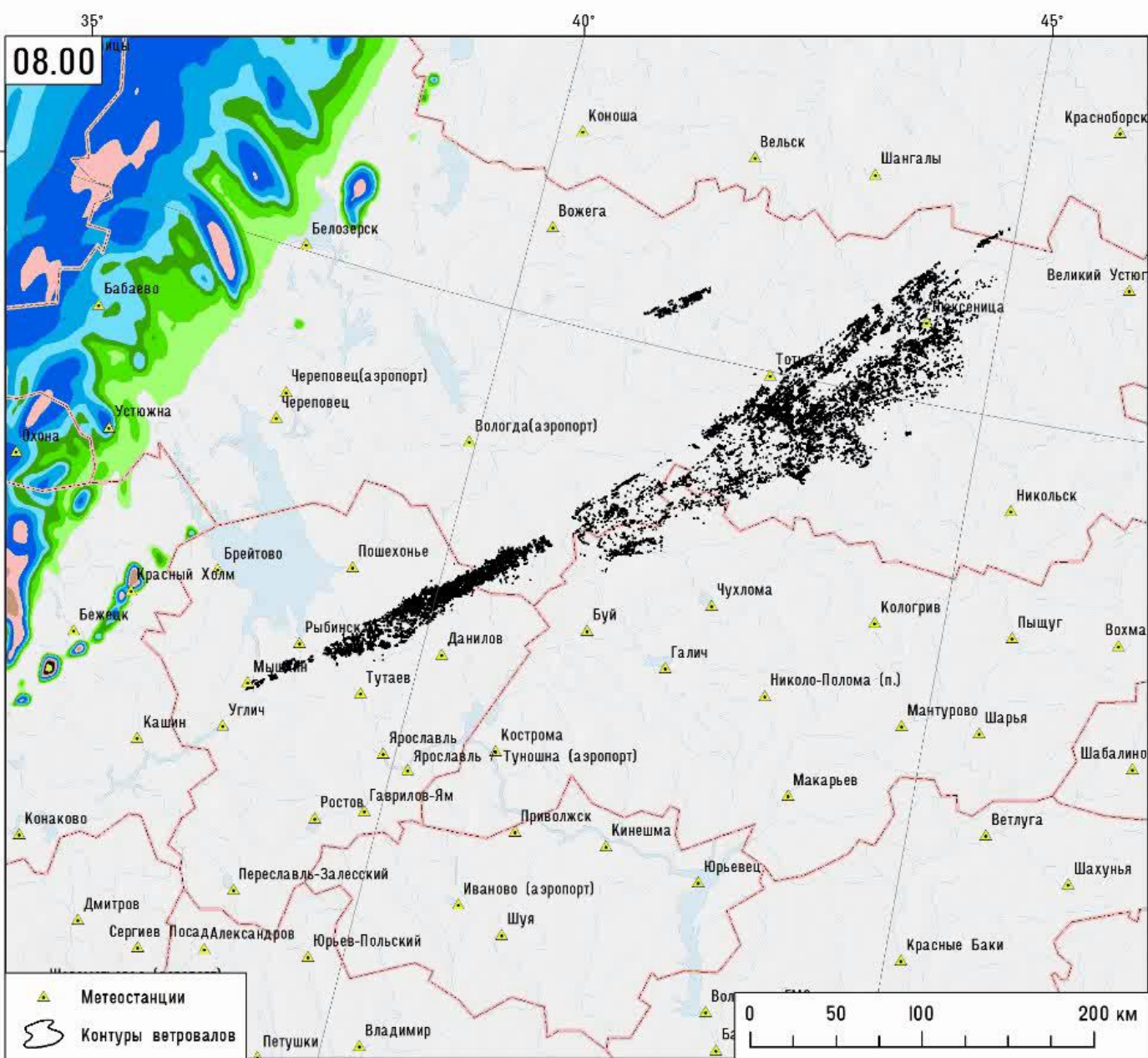
- Оценивалась максимальная скорость ветра и интенсивность осадков в пределах контура ветровала



Шквал 27.06.2010

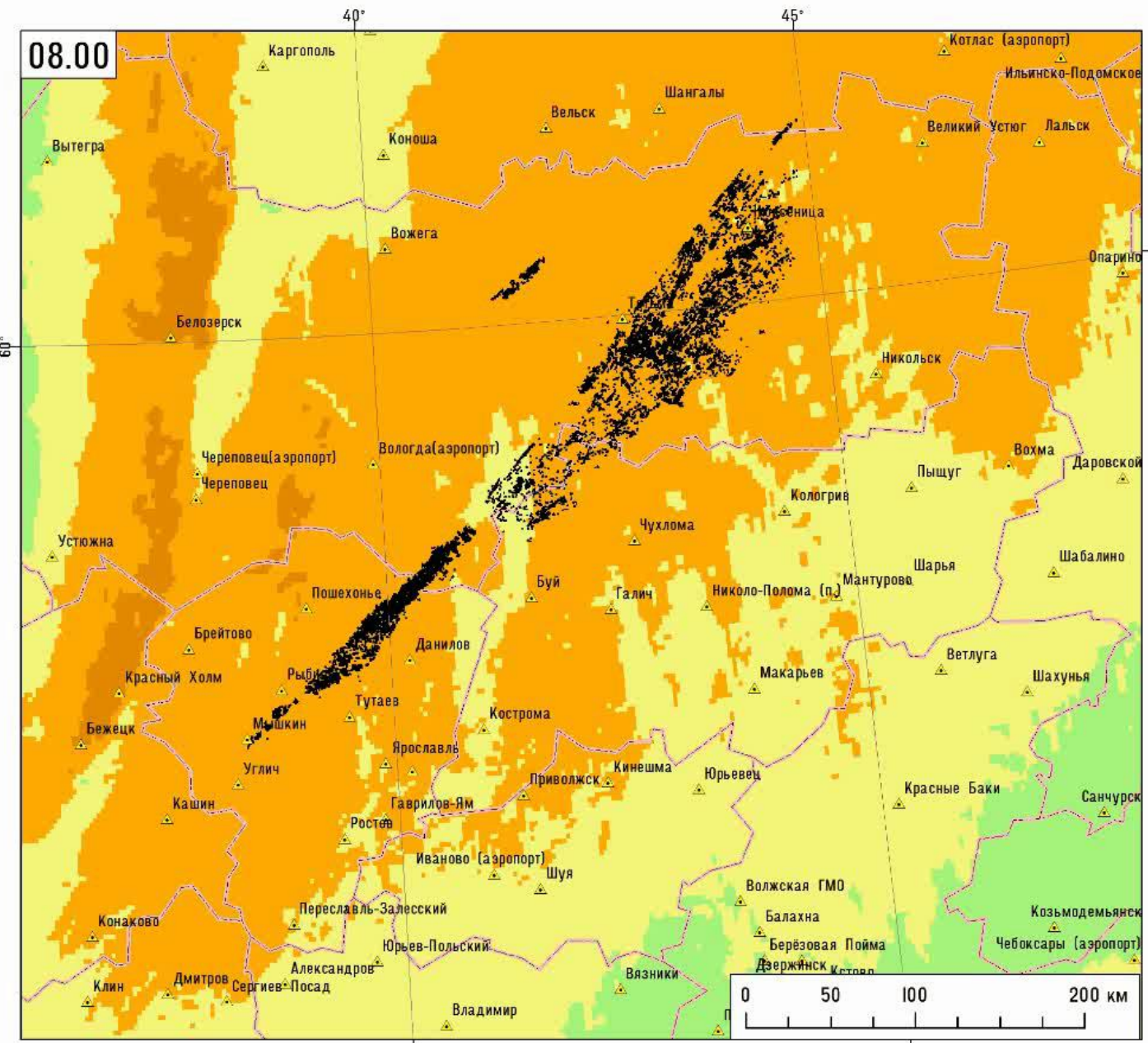


МКС, вызвавшая шквал 27.06.2010, на снимке Terra MODIS за 10.05 ВСВ
 Хорошо выражена одна кольцевая структура

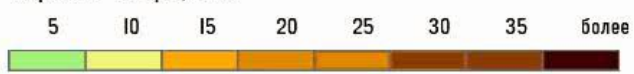


Шквал 27.06.2010,
 расчетная
 композитная
 отражаемость по
 модели WRF
 (начальные
 условия ERA-5)

08.00



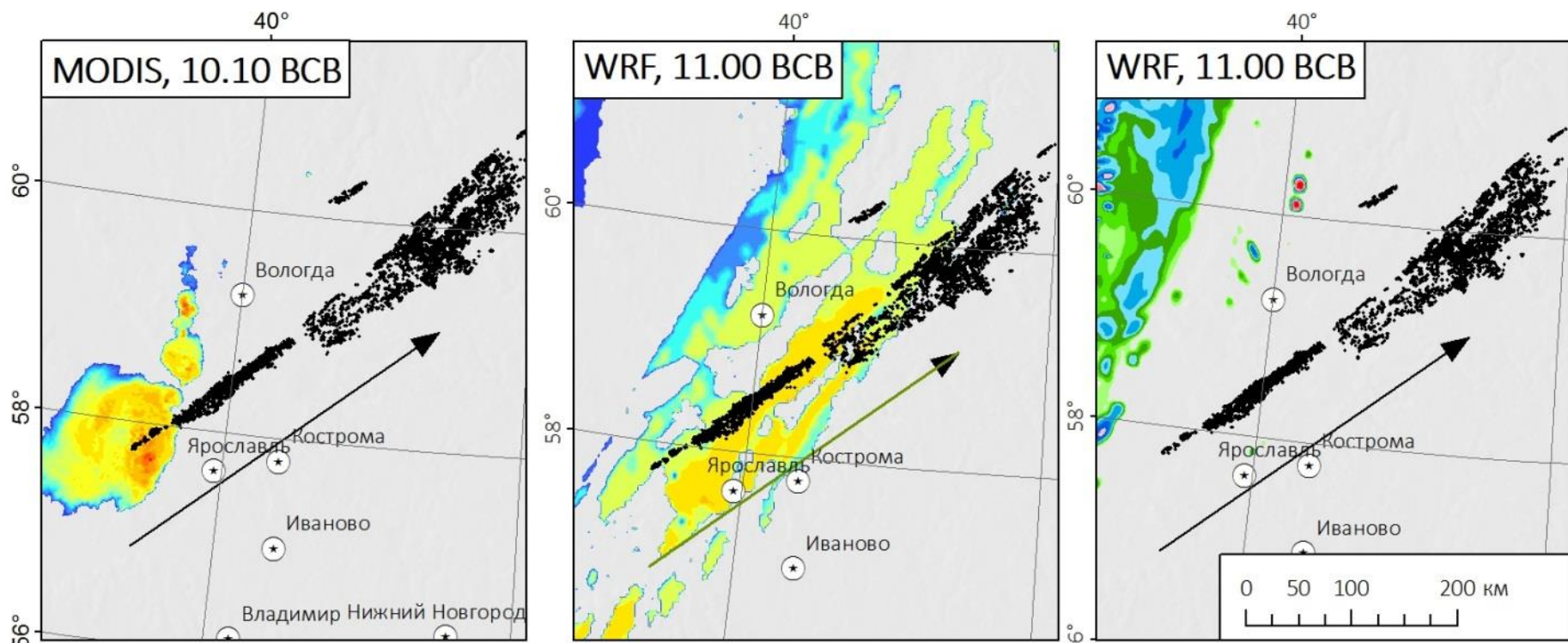
Порывы ветра, м/с



▲ Метеостанции
⊃ Контурсы ветровалов

Шквал 27.06.2010,
расчетные
порывы ветра по
модели WRF
(начальные
условия ERA-5)

Оценка достоверности результатов моделирования МКС со шквалом на основе сравнения с данными MODIS/Terra за 10.05 ВСВ 27.06.2010 (модель WRF, начальные условия CFS)



Температура верхней границы облаков °С

-64 -62 -60 -58 -56 -54 -52 -50 -48 -46 -44 -42 -40 -38 -36 -34 -32 выше

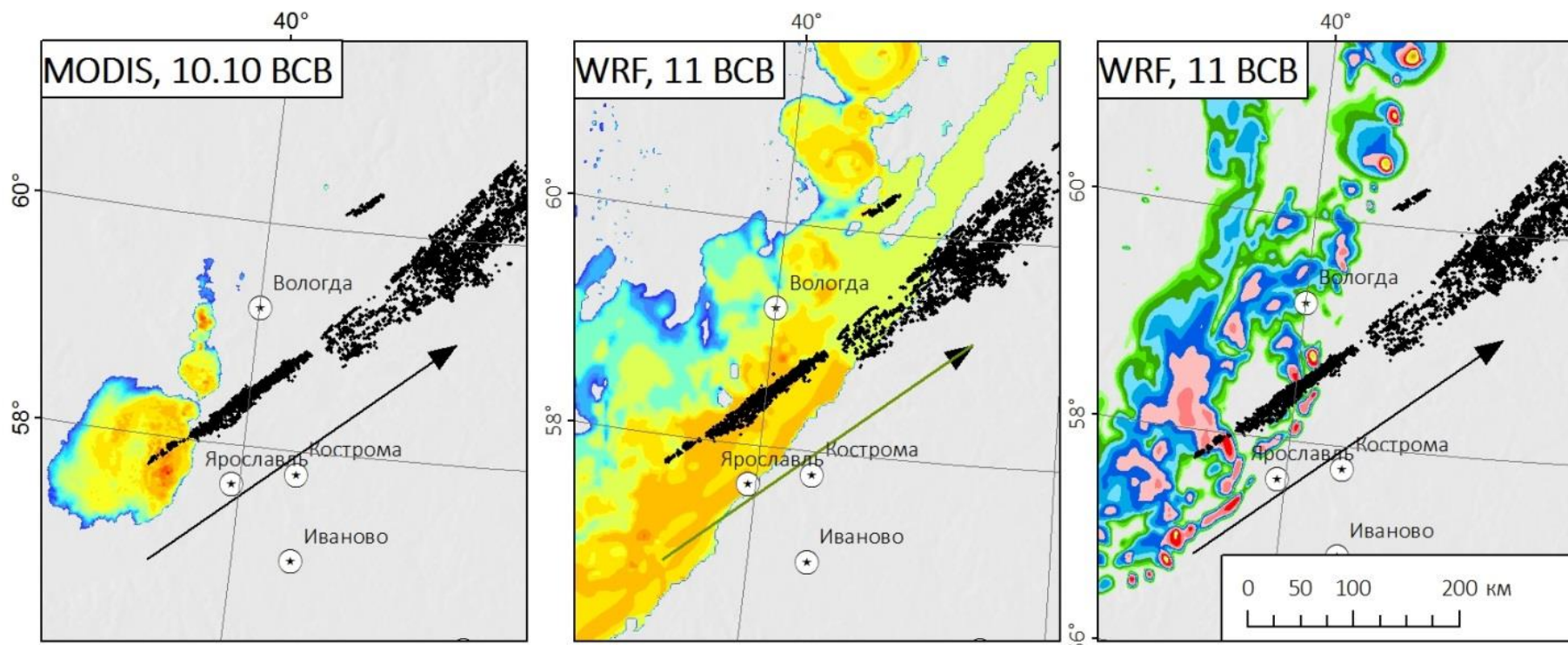
Максимальная отражаемость по модели, dBZ

5 10 15 20 35 30 35 40 45 50 55 60 65 выше

→ направление движения шторма

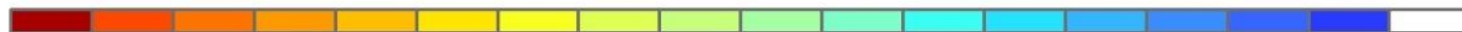
☁️ Контурсы ветровалов

Оценка достоверности результатов моделирования МКС на основе сравнения с данными MODIS/Terra за 10.05 ВСВ 27.06.2010 (модель WRF, начальные условия ERA-5)



Температура верхней границы облаков °С

-64 -62 -60 -58 -56 -54 -52 -50 -48 -46 -44 -42 -40 -38 -36 -34 -32 выше



Максимальная отражаемость по модели, dBZ

5 10 15 20 30 35 40 45 50 55 60 65 выше



→ направление движения шторма
☁️ Контуры ветровалов

Результаты моделирования за 27.06.2010 (сравнение с данными метеостанций)

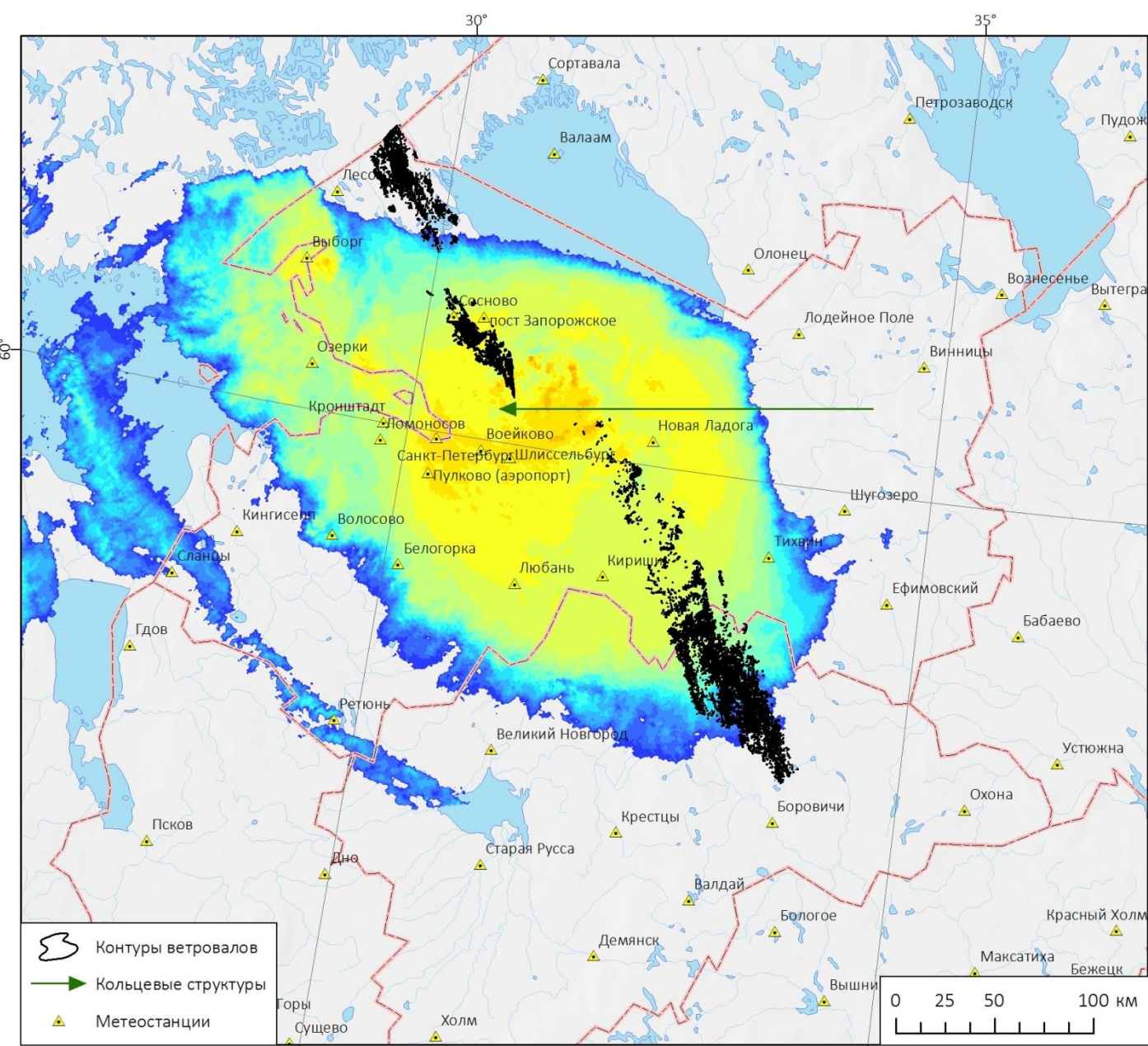
Метео-станция	Дата	Время (BCB)	Тип явления	Шквал (CFS)/ время (BCB)	Шквал (GFS) расстояние, км	Шквал (ERA-5) время (BCB)	Шквал (ERA-5) расстояние, км	Осадки, факт	Осадки (CFS/ ERA-5)
Кашин	27.06.2010	9	Шквал 25 м/с	-/-	-	22/10	15	26	2/16
Нюксеница	27.06.2010	12 - 15	Шквал 32 м/с	31/14	40	21/14	10	3	0/0
Вологда	27.06.2010	11	Шквал 16 м/с	21/13	50	22/11	40	16	1/9
Котлас	27.06.2010	16.10	Шквал 19 м/с	29/16	18	25/16	10	0.3	1/2

Результаты моделирования за 27.06.2010 (сравнение с ветровалами)

Номер в базе данных	Дата	Площадь, га	Шквал (GFS) время (BCB)	Шквал (GFS) расстояние, км	Шквал (ERA-5) время (BCB)	Шквал (ERA-5) расстояние, км	Макс. интенсивность осадков (CFS/ERA-5), мм/ч
346	27.06.2010	25618	21/12	50	25/12	40	0/12
347	27.06.2010	23327	31/14	0	26/12	10	16/13
345	27.06.2010	1216	22/13	20	28/11	30	11/6



Шквал 29.07.2010

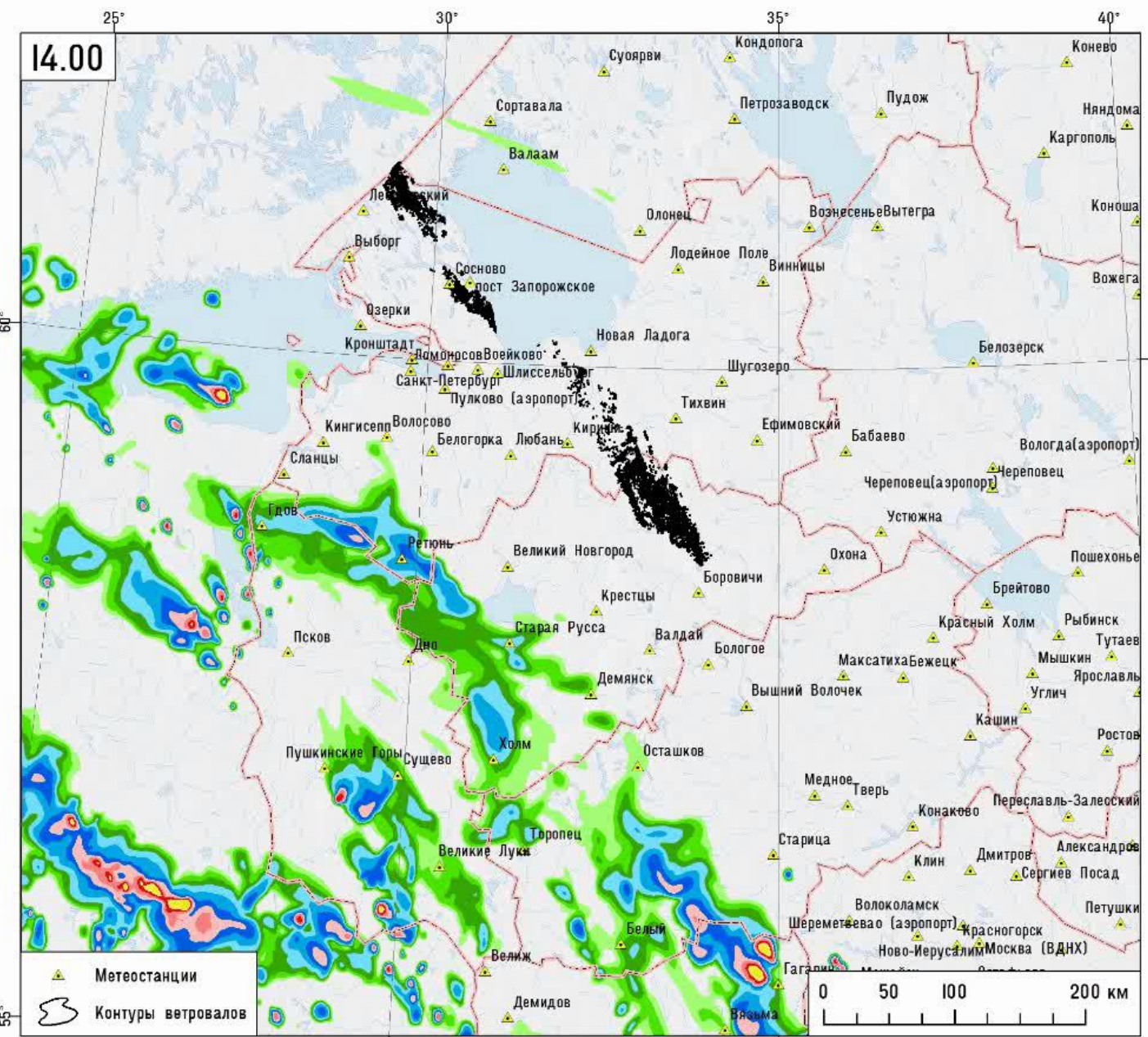


МКС, вызвавшая шквал 29.07.2010, на снимке Terra MODIS за 10.05 ВСВ

Температура ВГО, °С

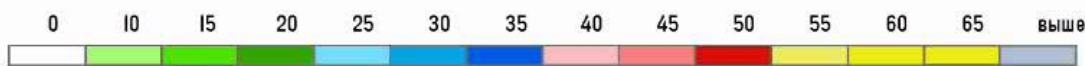


14.00

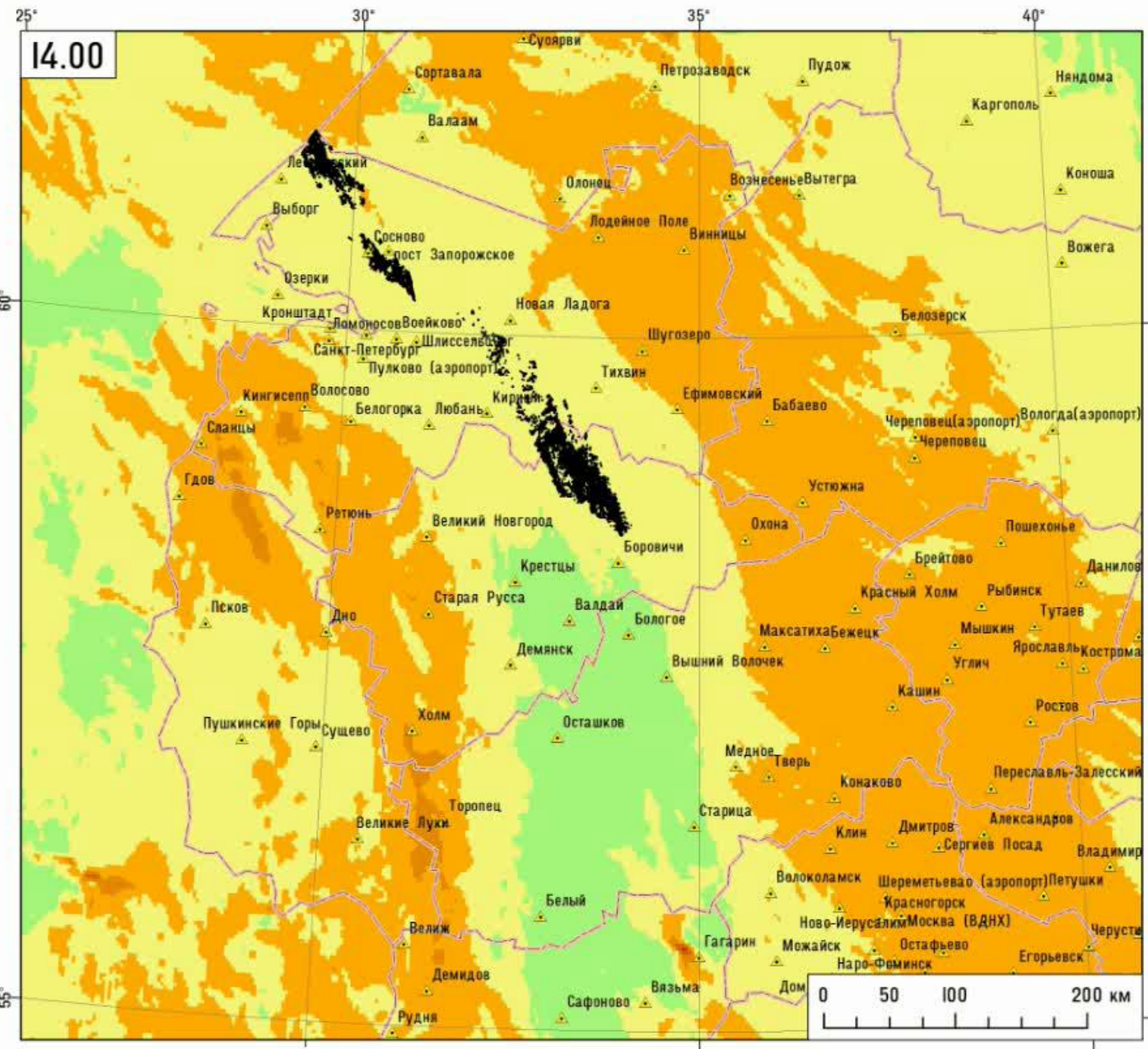


Шквал 29.07.2010,
расчетная
композитная
отражаемость, по
модели WRF
(начальные
условия CFS)

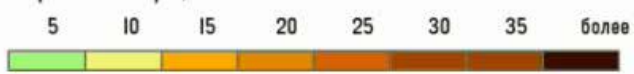
Максимальная отражаемость, dBZ



14.00



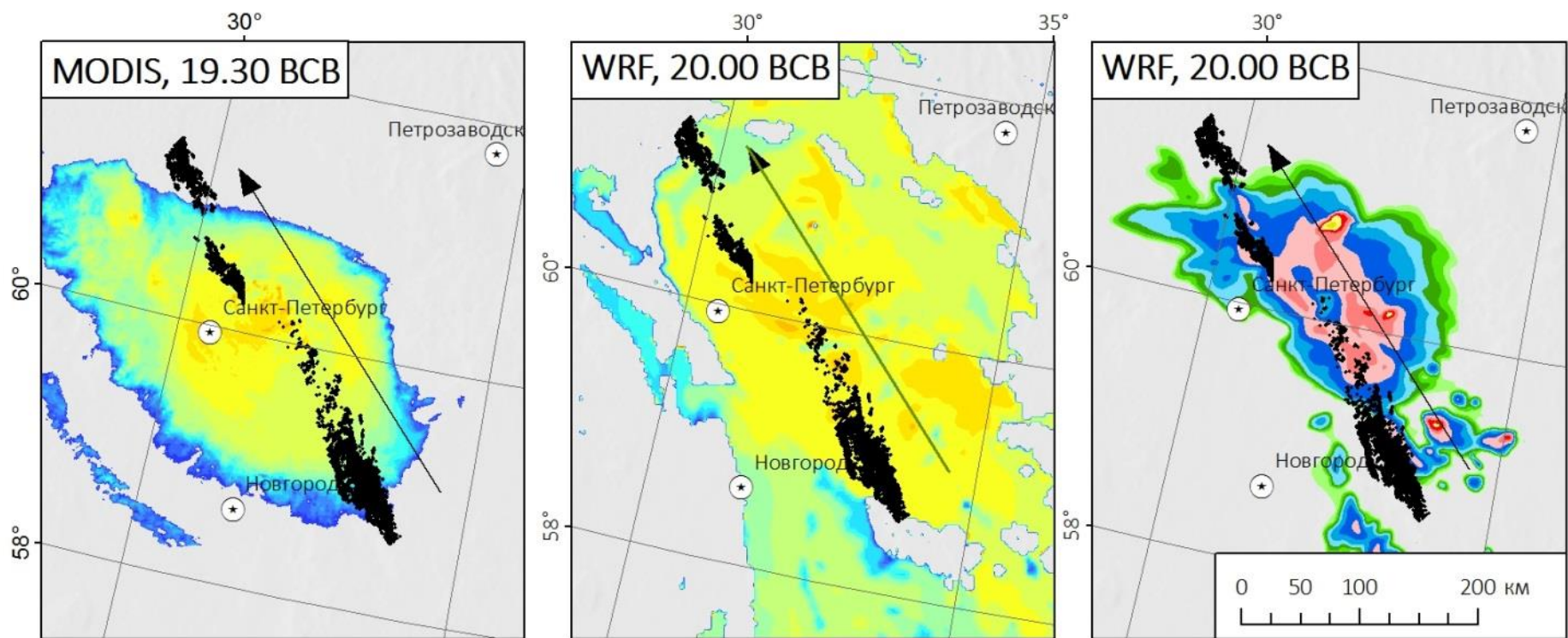
Порывы ветра, м/с



Метеостанции
Контурсы ветровалов

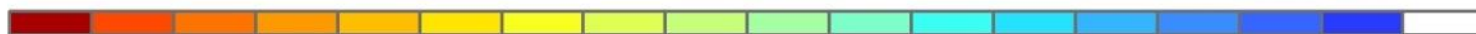
Шквал 29.07.2010,
расчетные
порывы ветра по
модели WRF
(начальные
условия CFS)

Оценка достоверности результатов моделирования МКС со шквалом на основе сравнения с данными MODIS/Terra за 19.30 ВСВ 29.07.2010 (модель WRF, начальные условия CFS)



Температура верхней границы облаков °С

-64 -62 -60 -58 -56 -54 -52 -50 -48 -46 -44 -42 -40 -38 -36 -34 -32 выше



Максимальная отражаемость по модели, dBZ

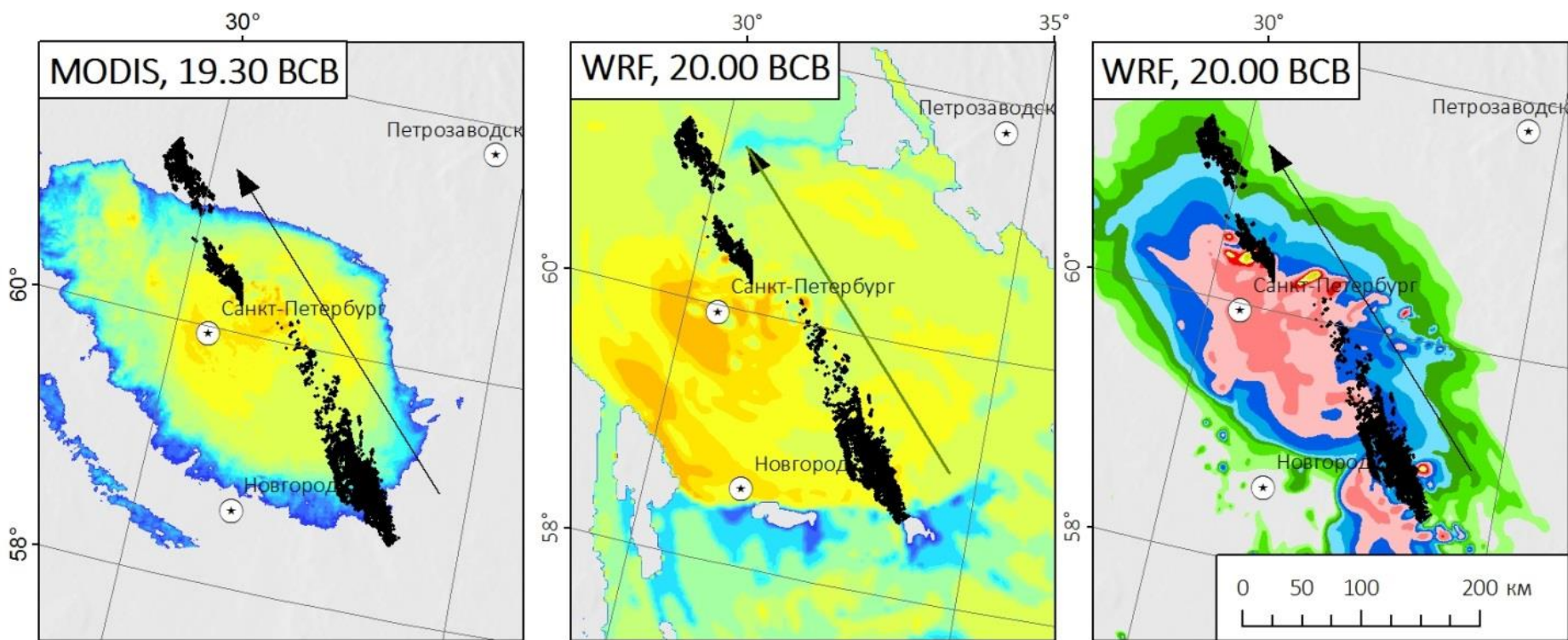
5 10 15 20 35 30 35 40 45 50 55 60 65 выше



→ направление движения шторма

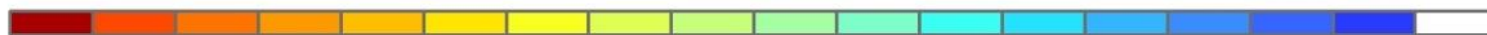
⊖ Контурсы ветровалов

Оценка достоверности результатов моделирования МКС на основе сравнения с данными MODIS/Terra за 19.30 ВСВ 29.07.2010 (модель WRF, начальные условия ERA-5)



Температура верхней границы облаков °С


-64 -62 -60 -58 -56 -54 -52 -50 -48 -46 -44 -42 -40 -38 -36 -34 -32 выше



Максимальная отражаемость по модели, dBZ

5 10 15 20 35 30 35 40 45 50 55 60 65 выше



→ направление движения шторма
 Контурсы ветровалов

Результаты моделирования за 29.07.2010 (сравнение с данными метеостанций)

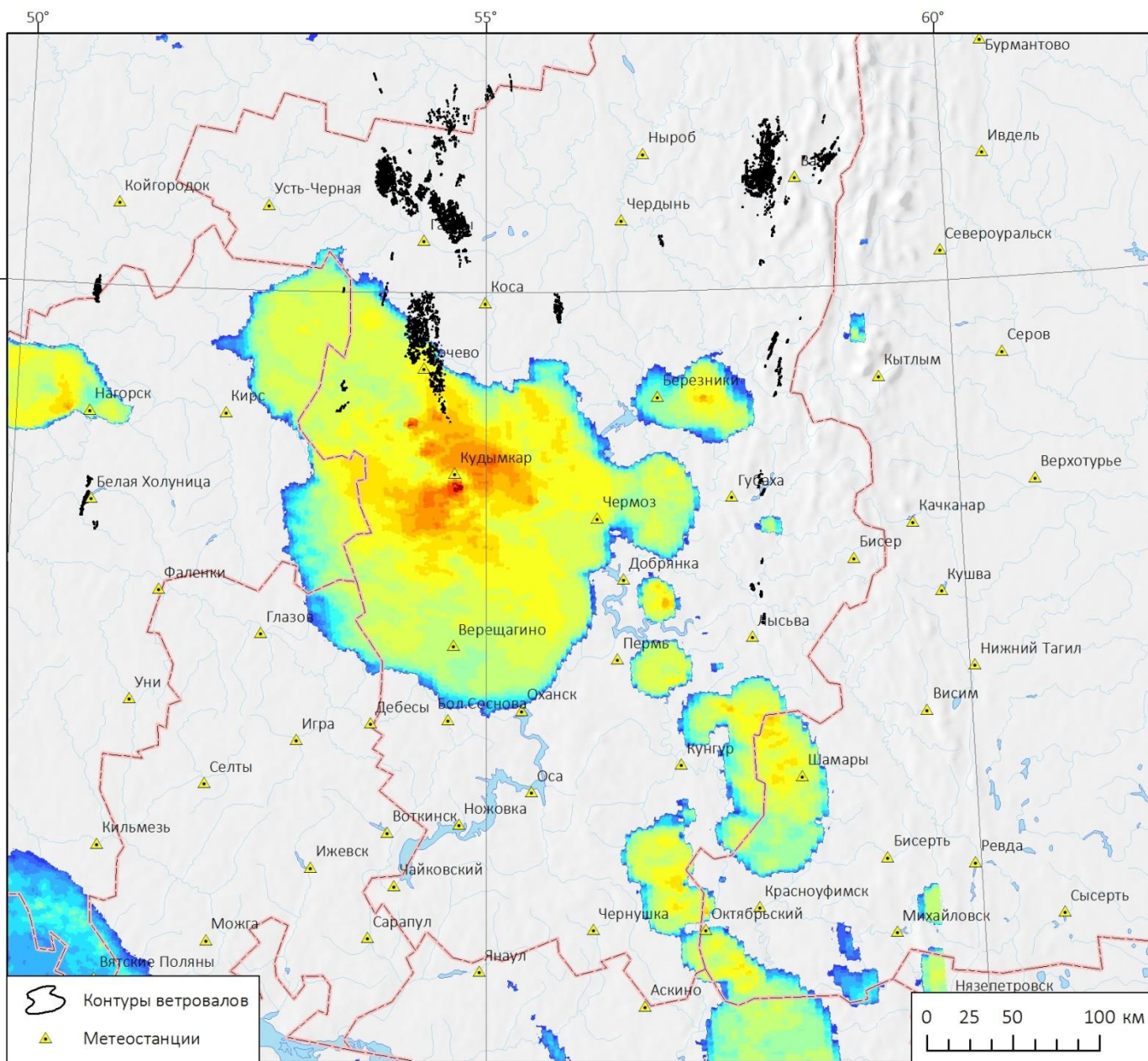
Метеостанция	Дата	время (BCB)	Тип ОЯ	Шквал (GFS)/ время (BCB)	Шквал (GFS) расстояние, км	Шквал (ERA-5) время (BCB)	Шквал (ERA-5) расстояние, км	Осадки (факт)	Осадки (CFS/ ERA-5)
Новая Ладога	29.07.2010	18.50	шквал 23 м/с	21/19	0	28/20	20	3	14/7
Сосново	29.07.2010	20.15 - 20.45	шквал 30 м/с	35/20	66	30/20	19	17	0/6
пост Запорожское	29.07.2010	19.10 -19.55	шквал 30 м/с	35/20	80	30/20	17	17	1/17

Результаты моделирования за 29.07.2010 (сравнение с ветровалами)

Номер в базе данных	Дата	Площадь, га	Шквал (GFS)/ время (BCB)	Шквал (GFS) расстояние, км	Шквал (ERA-5)/ время (BCB)	Шквал (ERA-5) расстояние, км	Макс. интенсивность осадков (CFS/ERA-5), мм/ч
552	29.07.2010	36272	21/18	10	28/18	15	40/35
553	29.07.2010	1770	21/19	10	28/20	0	12/18
554	29.07.2010	11593	35/20	60	30/20	0	2/20
555	29.07.2010	14277	36/21	60	24/21	0	0/17



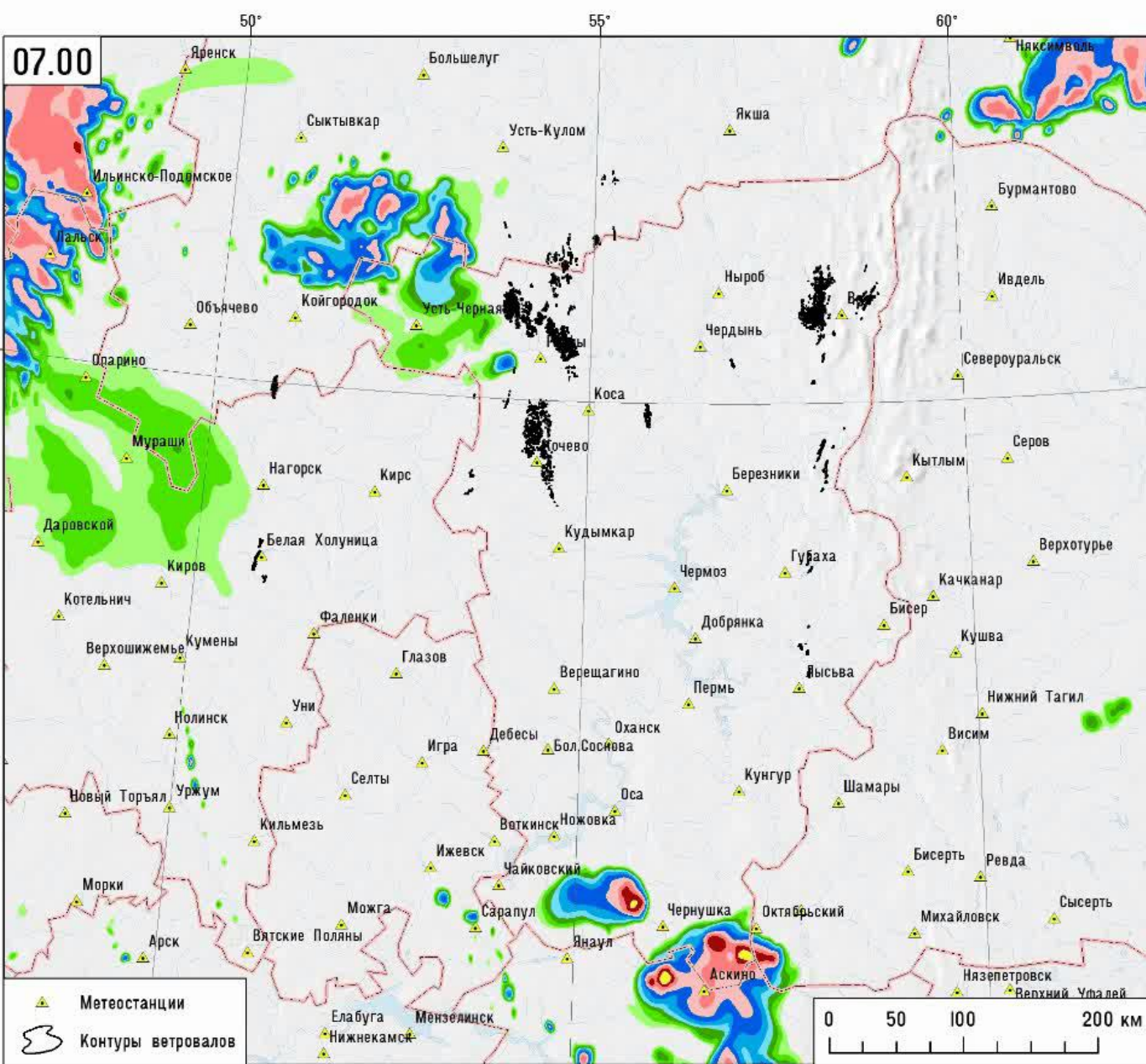
Шквалы 18.07.2012



Температура ВГО, °С

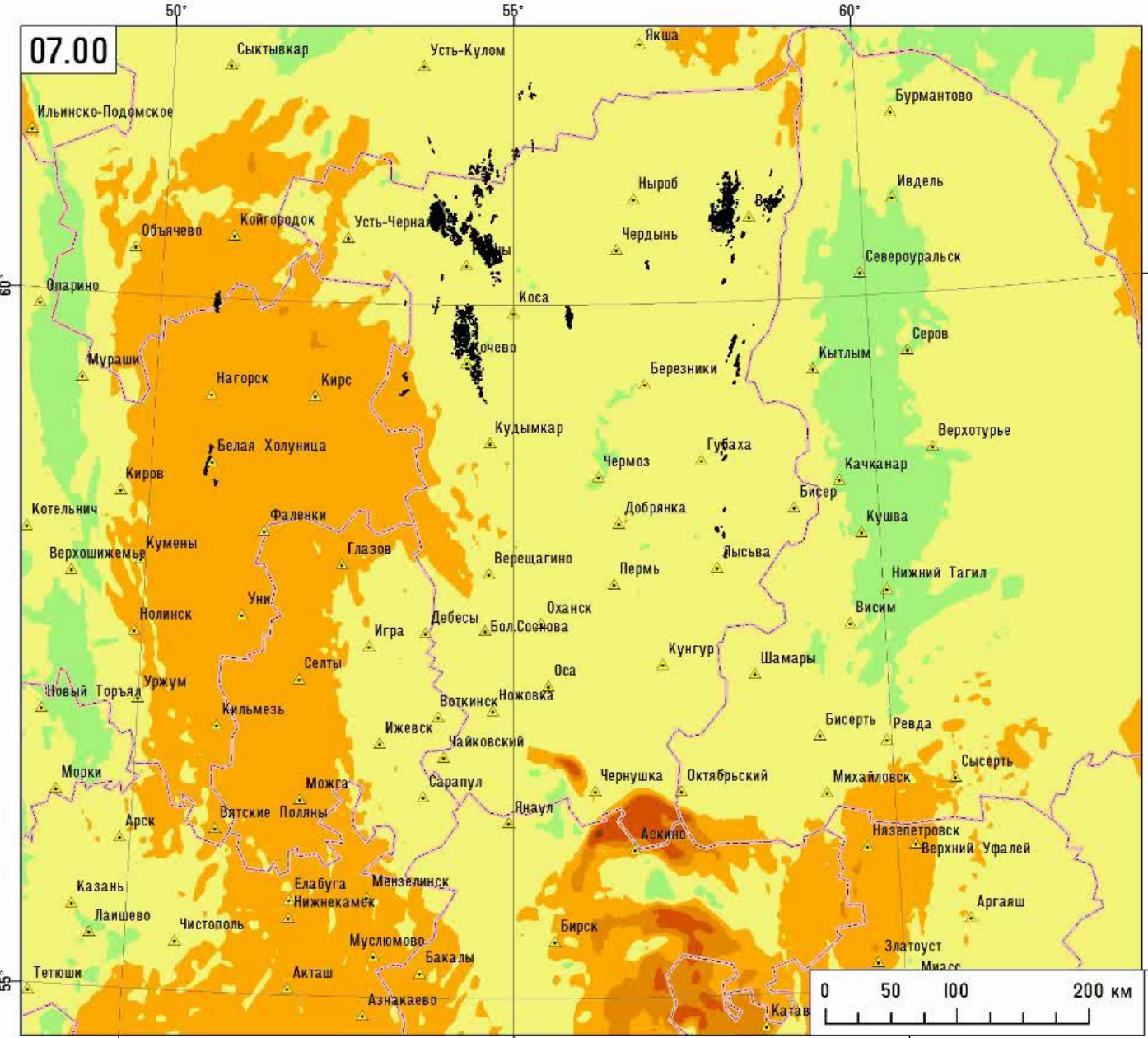


МКС, вызвавшая
шквал 18.07.2012,
на снимке Terra
MODIS за 10.10
BCB



Шквал 18.07.2012,
 расчетная
 композитная
 отражаемость по
 модели WRF
 (начальные
 условия CFS)

07.00



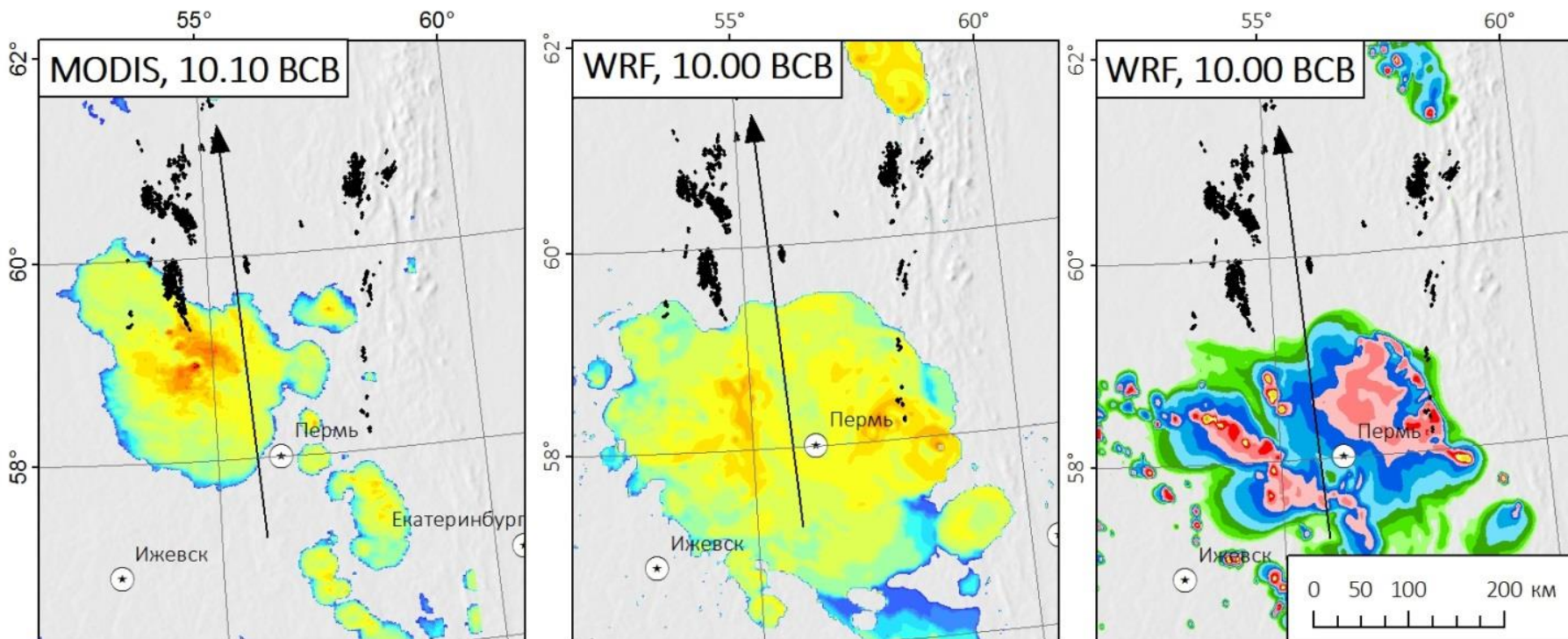
Порывы ветра, м/с



▲ Метеостанции
⊃ Контурь ветровалов

Шквал 18.07.2012,
расчетные
порывы ветра по
модели WRF
(начальные
условия CFS)

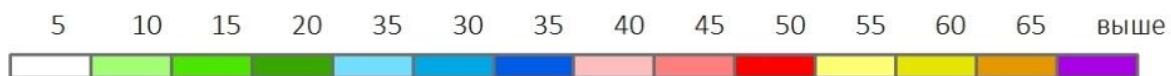
Оценка достоверности результатов моделирования МКС со шквалом на основе сравнения с данными MODIS/Terra за 10.10 ВСВ 18.07.2012 (модель WRF, начальные условия CFS)



Температура верхней границы облаков °С



Максимальная отражаемость по модели, dBZ



→ направление движения шторма
☁️ Контуры ветровалов

Результаты моделирования за 18.07.2012 (сравнение с данными метеостанций)

Метеостанция	Дата	время (BCB)	Тип ОЯ	Шквал (GFS)/ время (BCB)	Шквал (GFS) расстояние, км	Шквал (ERA-5)/ время (BCB)	Шквал (ERA-5) расстояние, км	Осадки, факт	Осадки (CFS/ ERA-5)
Оса	18.07.2012	8.00	шквал 28 м/с	30/8	30	28/12	25	9	3/10
Оханск	18.07.2012	9/00	шквал 23 м/с	26/9	35	28/12	20	6	1/10
Верещагино	18.07.2012	9.30	шквал 19 м/с	30/10	0	25/12	18	30	20/7
Кудымкар	18.07.2012	10.10	шквал 24 м/с	30/11	30	28/13	40	9	30/10
Коса	18.07.2012	11.00	шквал 20 м/с	27/12	0	26/15	10	5	9/6
Кочевое	18.07.2012	11.00	шквал 21 м/с	27/12	20	26/14	5	27	13/16
Гайны	18.07.2012	12.00	шквал 23 м/с	30/13	30	31/15	20	8	5/2
Чердынь	18.07.2012	12.00	шквал 24 м/с	27/12	25	31/14	10	37	1/23
Белая Холуница	18.07.2012	11.05 - 11.12	шквал 27 м/с	23/11	70	21/13	35	4	5/5
Глазов	18.07.2012	10.45 - 10.55	шквал 28 м/с	22/10	40	30/12	25	15	10/2

Результаты моделирования за 18.07.2012 (сравнение с ветровалами)

Номер в базе данных	Дата	Площадь, га	Шквал (CFS) / время (BCB)	Шквал (GFS) расстояние, км	Шквал (ERA-5) время (BCB)	Шквал (ERA-5) расстояние, км	Макс. интенсивность осадков (CFS/ERA-5), мм/ч
577	18.07.2012	3800	27/12	0	26/14	0	9/19
252	18.07.2012	2684	36/13	5	24/15	5	16/8
260	18.07.2012	433	26/12	10	26/15	10	2/12
253	18.07.2012	2723	30/13	10	32/15	10	6/6
259	18.07.2012	994	31/11	5	21/14	0	10/5
578	18.07.2012	7867	31/13	25	26/15	0	3/32
254	18.07.2012	1050	31/13	35	26/15	0	10/2
232	18.07.2012	442	31/12	35	32/14	40	17/2
231	18.07.2012	526	22/12	60	21/13	25	5/6

Выводы

- Все рассмотренные случаи сильных шквалов возникли в пределах контрастных фронтальных зон ($t_{850}/500$ км около 10°), при интенсивном затоке тропического воздуха ($t_{850} +18^\circ$ С и выше) перед фронтом с юга или юго-востока, сочетании сильной неустойчивости и умеренного/сильного сдвига ветра.
- Модель WRF воспроизводит сильные швалы (≥ 25 м/с) во всех рассмотренных случаях, а швалы ураганной силы (≥ 33 м/с) – только 29.07.2010 (вне зависимости от начальных условий) и 18.07.2012 г. (эксперимент по начальным данным CFS)
- Развитие МКС, вызвавшей швалы, лучше всего воспроизводится в случае 29.07.2010 г., в том числе модель воспроизводит сильные швалы (≥ 30 м/с) в ночное время (после 22 ч ВСВ) над территорией Карелии и Финляндии
- Не обнаруживается устойчивой зависимости качества воспроизведения швалов от выбора начальных условий (CFS или ERA-5) в модели. Максимальная скорость ветра при швале несколько выше при использовании начальных данных CFS (во всех 4-х случаях), а траектория МКС точнее воспроизводится по начальным данным ERA-5 (в трех из четырех случаев).

An aerial photograph of a dense green forest. In the foreground, several tall, thin trees with long, thin branches are visible, their leaves appearing lighter green and more sparse than the surrounding forest. The main body of the forest is a thick, dark green canopy. The text "Спасибо за внимание" is overlaid in the center of the image.

Спасибо за внимание

*Андрей Шихов, к.г.н,
Пермский государственный университет
e-mail: and3131@inbox.ru
URL: <http://accident.perm.ru/>*