

Зависимости между характеристиками конвективных штормов, вызывающих смерчи и шквалы в Северной Евразии, и значениями параметров неустойчивости атмосферы

Шихов А.Н.¹, Чернокульский А.В.^{2,3}, Ярынич Ю.И.^{2,4}, Спрыгин А.А.⁵

¹ Пермский государственный университет, Пермь, Россия

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³ Институт географии РАН, Москва, Россия

⁴ Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

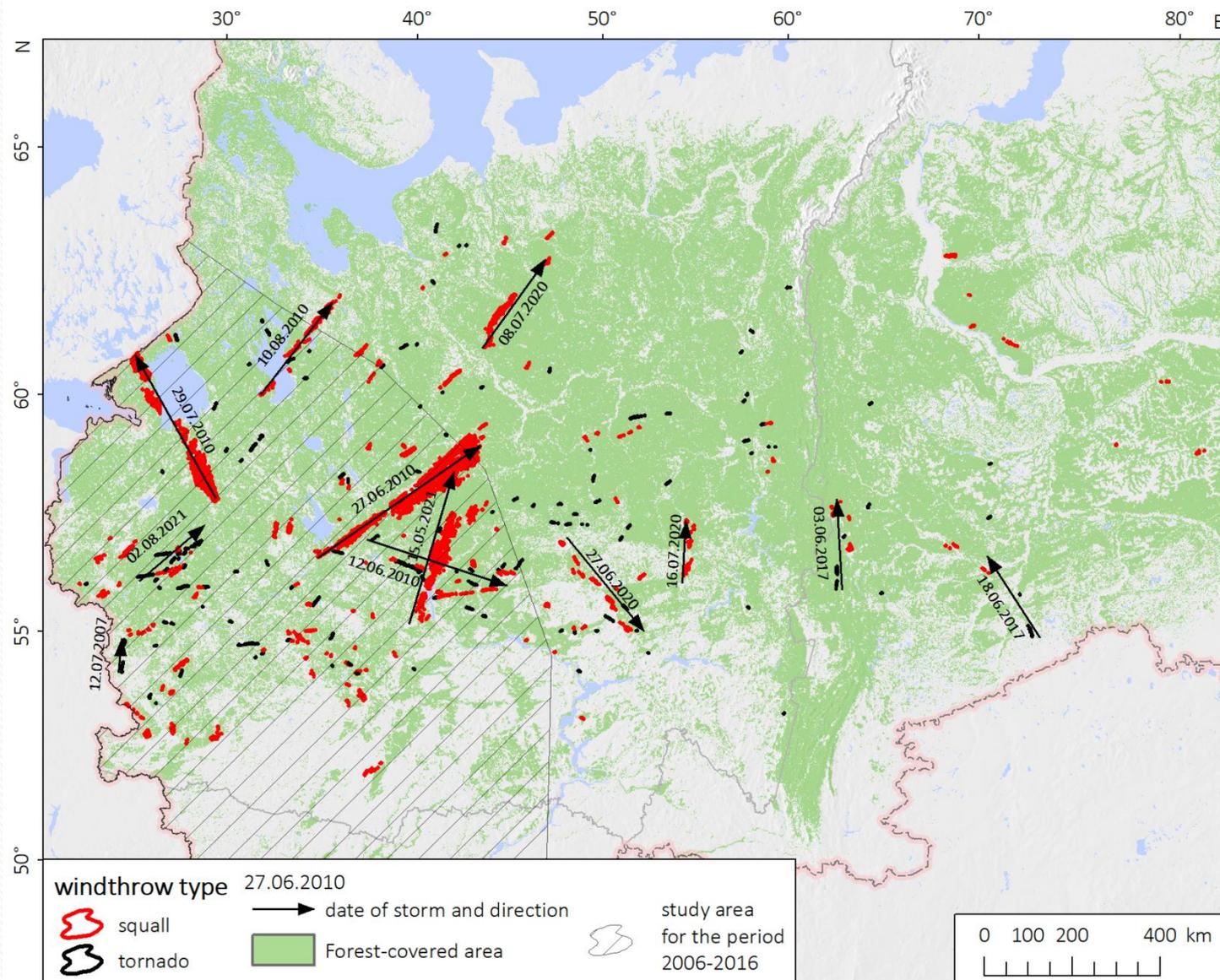
⁵ ФГБУ НПО «Тайфун», Обнинск, Россия

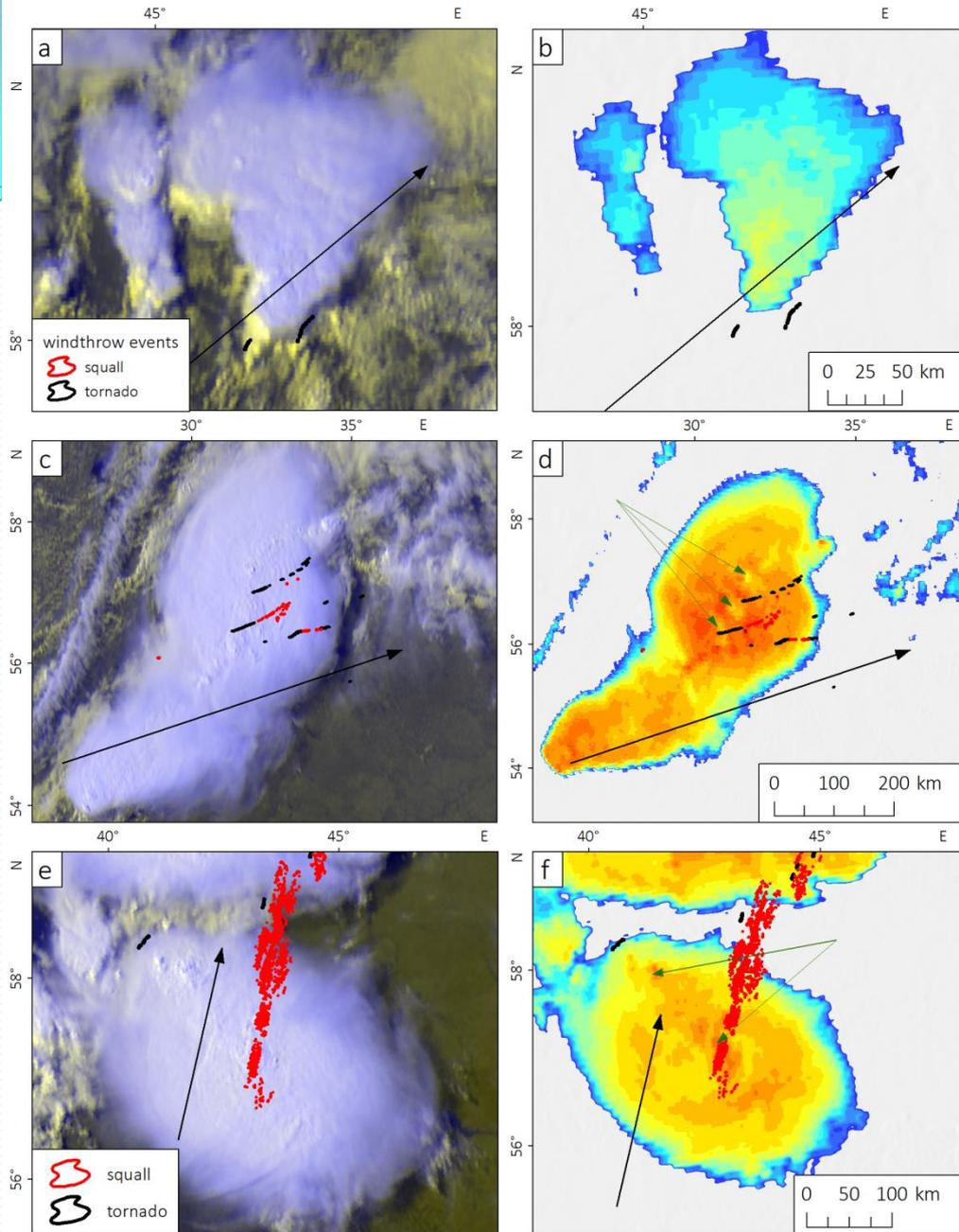
Исследование выполнено при поддержке РФФ, проект № 18-77-10076

Актуальность и цель исследования

- Особенности верхней границы облаков (ВГО) на спутниковых снимках анализируются для обнаружения случаев конвективных опасных явлений погоды с 1970-х гг.
- **Интенсивные восходящие потоки** формируют на верхней границы облаков хорошо различимые сигнатуры, такие как пробои тропопаузы (ОТ), холодные кольца (cold-ring), U- или V-образные структуры в поле температуры ВГО. Эти сигнатуры могут использоваться при идентификации сильных ливней, крупного града, шквалов и смерчей.
- **Цель исследования** состоит в выявлении особенностей конвективных штормов, генерирующих сильные шквалы и смерчи по спутниковым данным Meteosat, а также зависимостей между характеристиками штормов, сигнатурами на ВГО и значениями диагностических переменных (индексов неустойчивости) по данным реанализа ERA5.

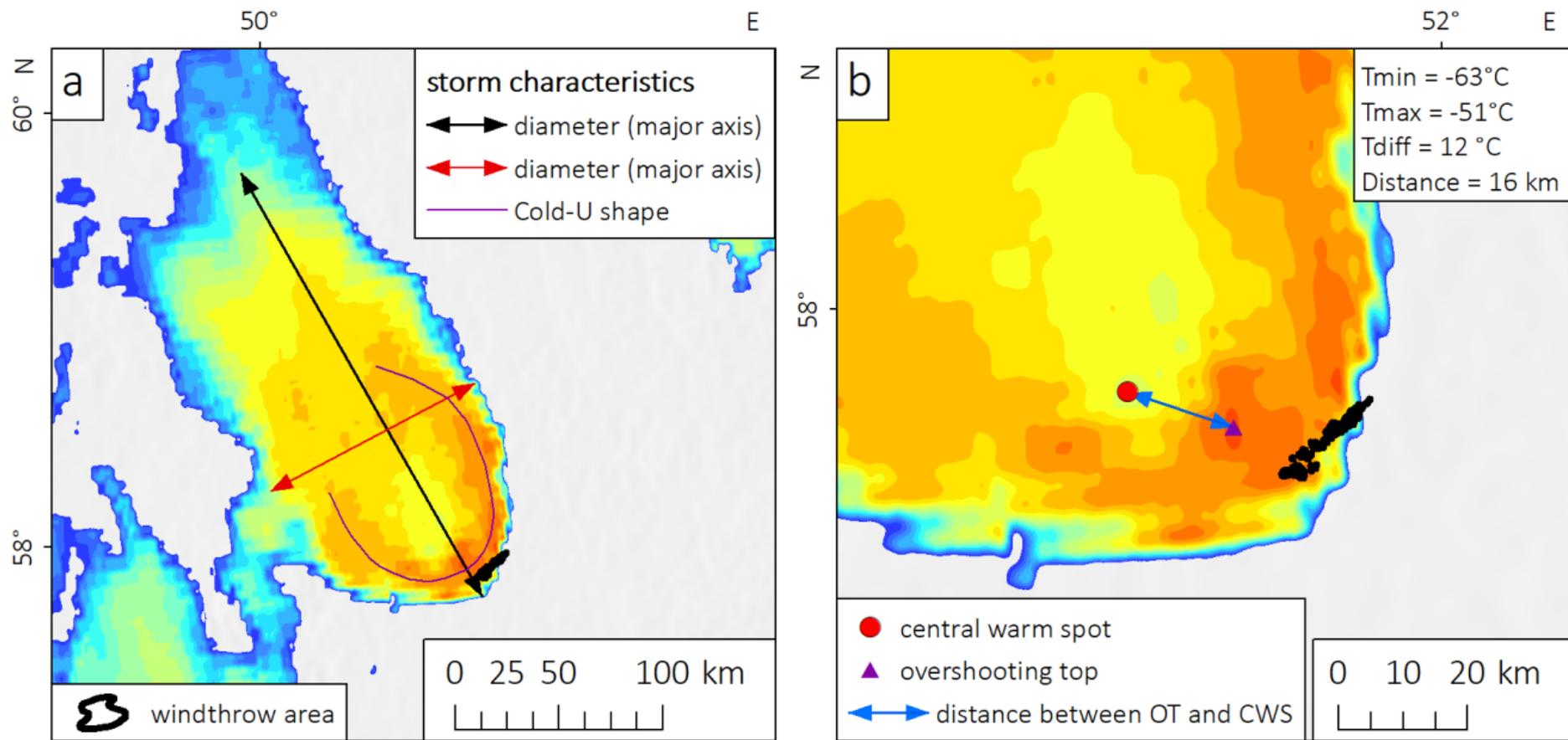
Регион исследования и выборка штормовых событий



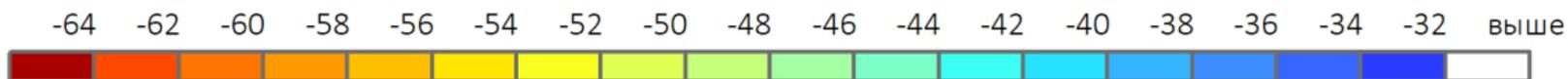


Примеры снимков MSG2 (левый столбец – комбинация каналов HRV и IR 10.8 мкм, правый столбец – температура ВГО по каналу IR10.8):
 (a, b) – суперячейка, вызвавшая два смерча 19.08.2019 в Нижегородской и Кировской областях
 (c, d) – квазилинейная система, вызвавшая шквалы и смерчи 02.08.2017 г. в Тверской области
 (e, f) – МКК, вызвавший разрушительный шквал 15.05.2021 в Ивановской и Костромской областях
 Черные стрелки показывают направление движения шторма, зеленые – сигнатуры на ВГО (d) – cold-ring, и (e) – ОТ.

Определение характеристик шторма (на примере случая 04.08.2021 в Кировской области)



Cloud top temperature, °C



Общая схема методики сбора и анализа данных

INITIAL DATA

METHODS

MSG2 data from Eumetsat EOportal

Databases of windthrow events for ER and Western Siberia, updated to 2021

Weather station reports

ESWD database

Database of environmental variables (indices) from ERA5 reanalyse

Data processing with MSG Data Retriever and ArcGIS

Cloud top temperature (IRW10.8 band)

HRV cloud images

Selection of windthrow events with known dates and time, covered by the MSG2/SEVIRI satellite images (419 events)

Identification of individual convective storms and their assignment for each windthrow events

Extraction of the values of 19 indices for each windthrow event

Determination of the characteristics of convective storms (storm type, longevity, diameter and minimum CTT) for each event

Identification of signatures on the cloud top (OTs, cold-ring and cold U/V)

120 convective storms for further analysis

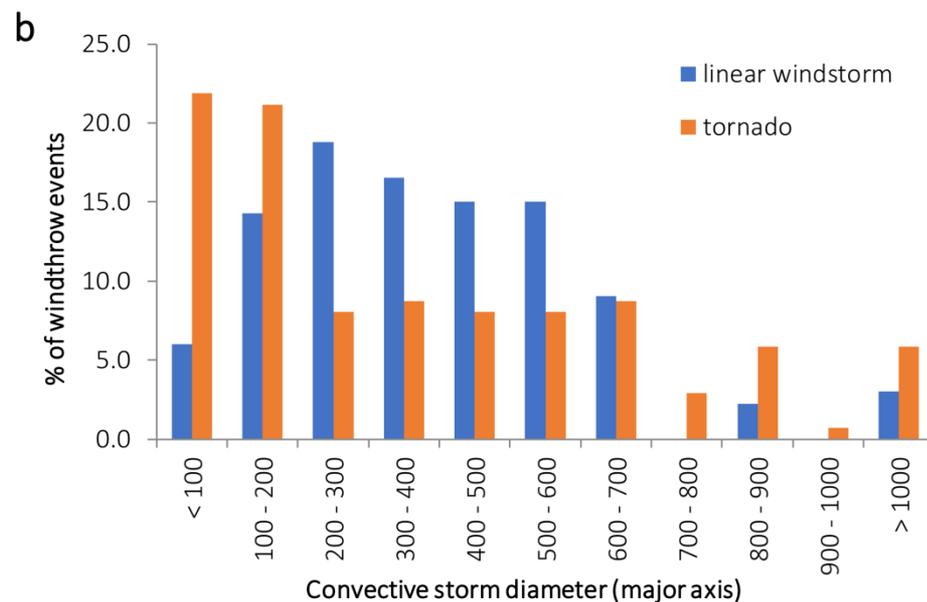
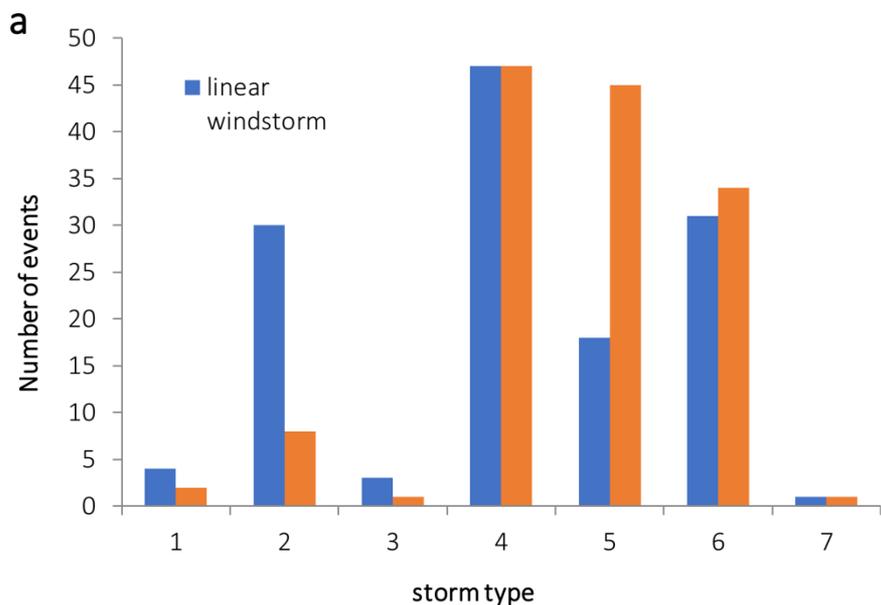
281 windthrow events (138 tornadoes and 143 linear windstorms) for further analysis

Determination of the characteristics of signatures on the cloud top (their types, diameter, lifetime, Tdiff, Tmin, Tmax)

Identification of statistically significant relationships among characteristics of convective storms, signatures on the cloud top and environmental parameters

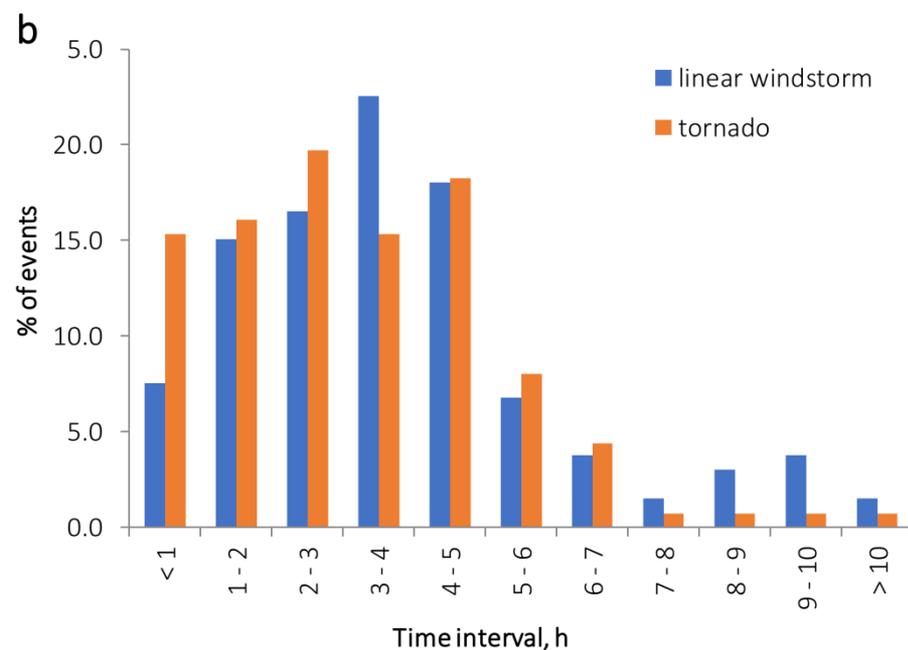
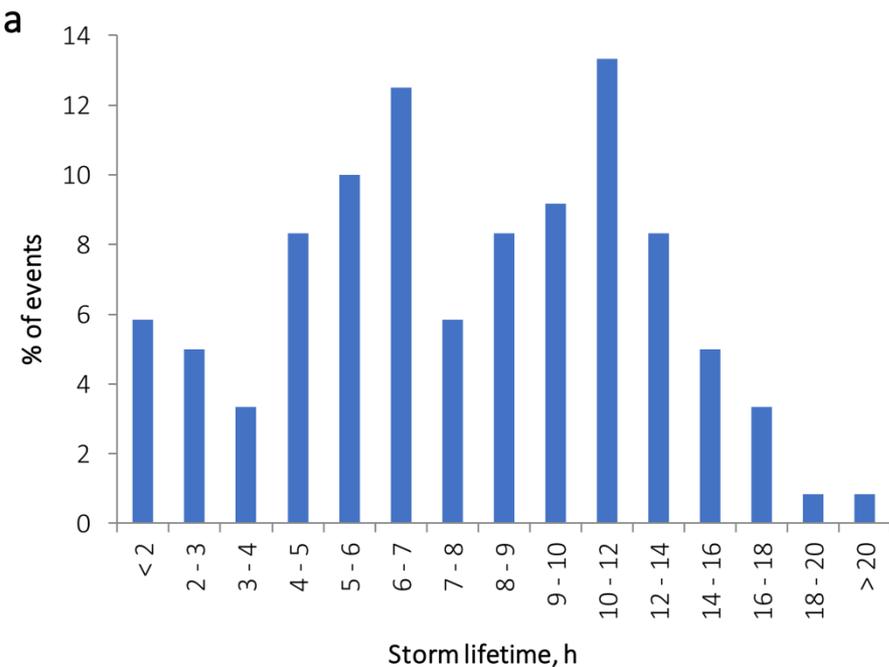
Assignment of the values of indices for each windthrow event and for each convective storm

Характеристики конвективных штормов



- (a) Число случаев ветровалов, вызванных различными типами штормов:
1 – неорганизованные кластеры, 2 – МКК, 3 – квазилинейная система (мезо- β), 4 – линия шквалов, 5 – суперячейка, 6 – суперячейка, трансформировавшаяся в МКК, 7 – суперячейка, трансформировавшаяся в квазилинейную систему
- (b) – Распределение случаев в зависимости от диаметра шторма (по большой оси)

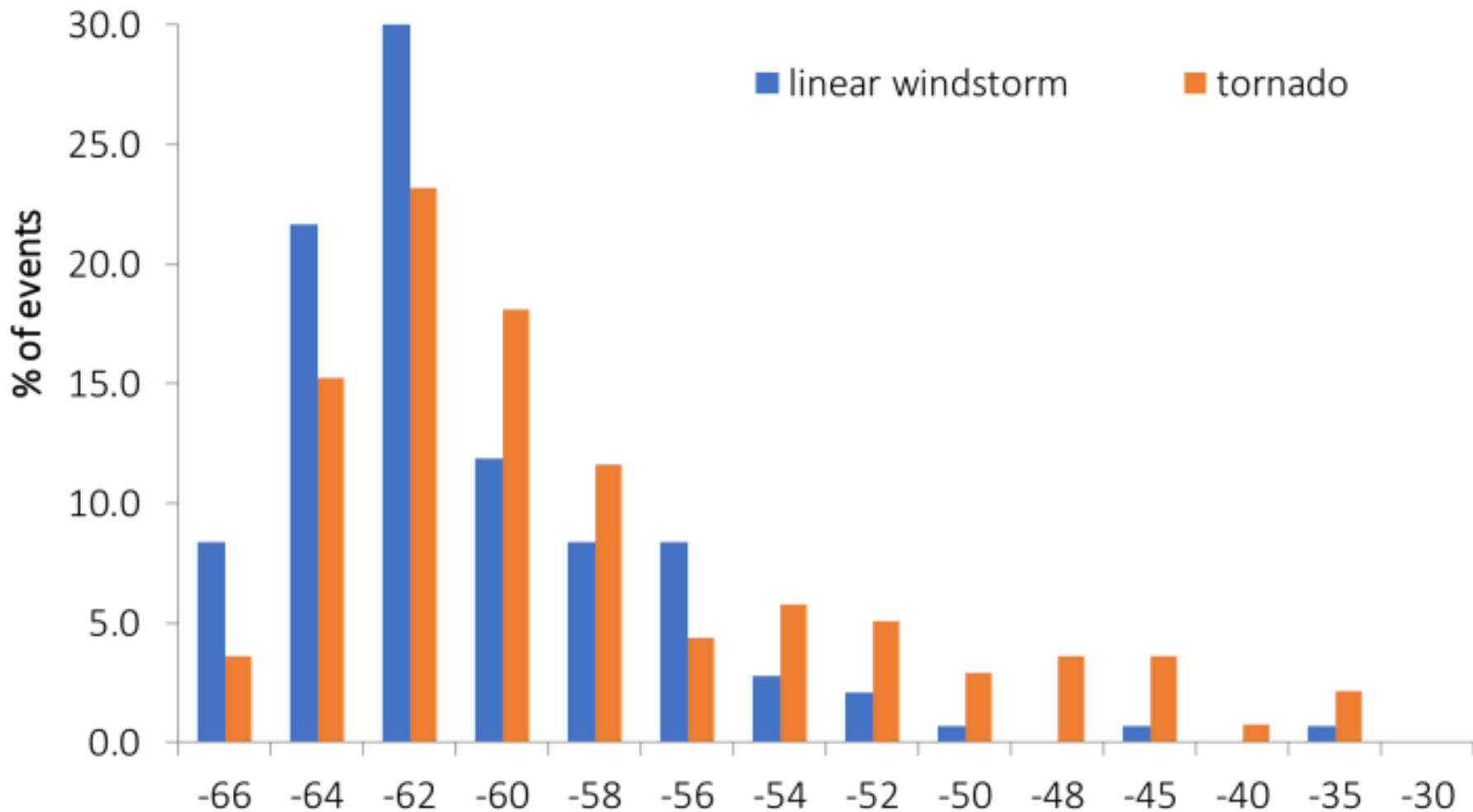
Характеристики конвективных штормов



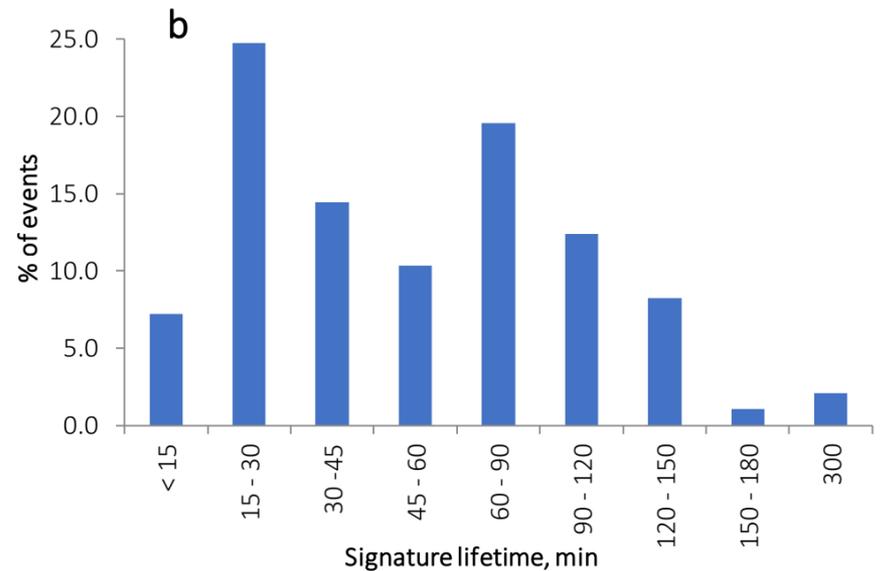
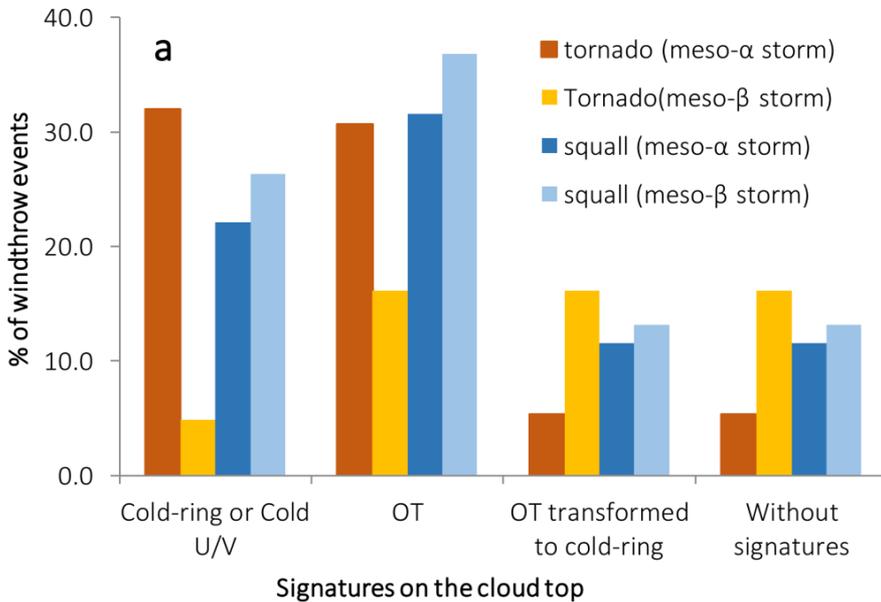
(a) – распределение конвективных штормов в зависимости от продолжительности их жизни

(b) – распределение случаев ветровалов в зависимости от интервала времени между возникновением шторма и возникновением шквала или смерча, вызвавшего ветровал

Распределение в зависимости от минимальной температуры ВГО



Характеристики сигнатур на ВГО



(a) Частота наблюдения различных типов сигнатур на ВГО, связанных с ветровалами (в зависимости от причины возникновения ветровала и масштаба шторма),

(b) – продолжительность жизни сигнатур

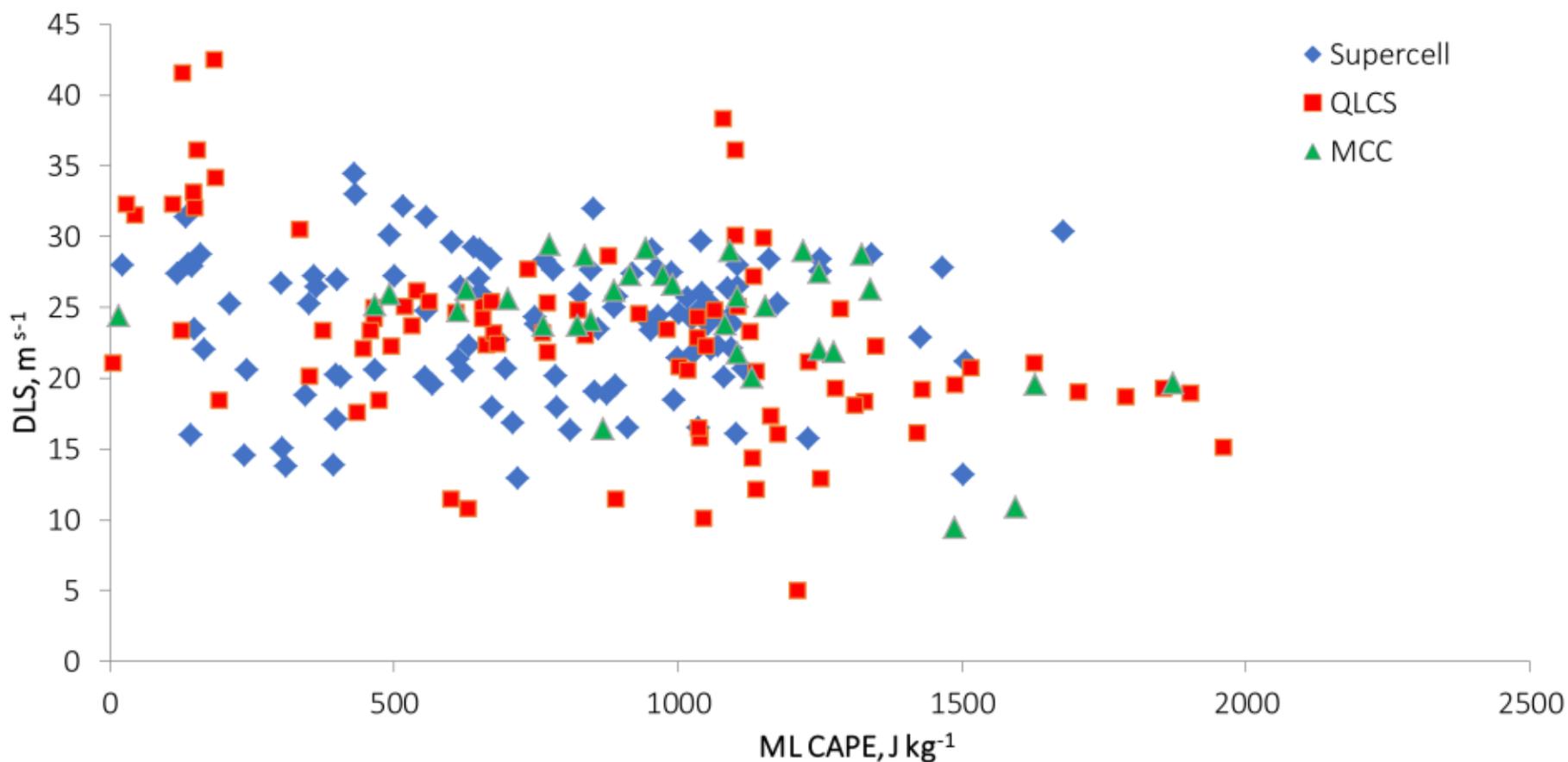
Медианные значения диагностических переменных (индексов), связанные с различными типами штормов

Выделены индексы, имеющие статистически значимые различия по тестам Краскела-Уоллиса и медианному тесту

Тип шторма	MLLCL, m	MLLFC, m	MLCAPE, J kg ⁻¹	MLCIN, J kg ⁻¹	PW, mm	DLS, m s ⁻¹	MLS, m s ⁻¹	LLS, m s ⁻¹	MLEHI _{0-3km}	MLWMS	SRH1, m ² s ⁻²	SRH3, m ² s ⁻²	SCP	SHIP	STP	SWEAT
Значения индексов для стартовой точки ветровала																
Супер ячейка	<u>1109</u>	<u>1721</u>	527	<u>-22</u>	<u>32.1</u>	<u>22.4</u>	<u>18.0</u>	<u>10.8</u>	0.53	700	101	163	2.26	0.30	<u>0.27</u>	319
КЛКС	<u>1210</u>	<u>1822</u>	704	<u>-22</u>	<u>36.6</u>	<u>19.6</u>	<u>16.7</u>	<u>12.6</u>	0.71	666	100	168	2.89	0.23	<u>0.28</u>	315
МКК	<u>1436</u>	<u>2293</u>	720	<u>-52</u>	<u>36.4</u>	<u>22.0</u>	<u>18.8</u>	<u>9.4</u>	0.66	776	71	149	3.21	0.42	<u>0.09</u>	325
Максимальные значения индексов в радиусе 100 км от стартовой точки ветровала																
Супер ячейка	<u>839</u>	<u>2328</u>	<u>785</u>	-	<u>33.5</u>	<u>24.8</u>	<u>19.7</u>	12.5	0.83	837	140	222	3.30	<u>0.45</u>	0.50	350
КЛКС	<u>890</u>	<u>2299</u>	<u>939</u>	-	<u>39.4</u>	<u>22.2</u>	<u>18.8</u>	14.2	1.03	803	154	205	4.51	<u>0.34</u>	0.50	370
МКК	<u>1193</u>	<u>3009</u>	<u>983</u>	-	<u>38.8</u>	<u>25.0</u>	<u>21.1</u>	12.0	0.93	922	110	234	5.76	<u>0.66</u>	0.31	388

Шквалы и смерчи, связанные с различными типами штормов, в пространстве признаков CAPE/DLS

Показаны максимальные значения CAPE и DLS в радиусе 100 км от стартовой точки ветровала



Ранговые коэффициенты корреляции Спирмена между характеристиками конвективных штормов и значениями индексов

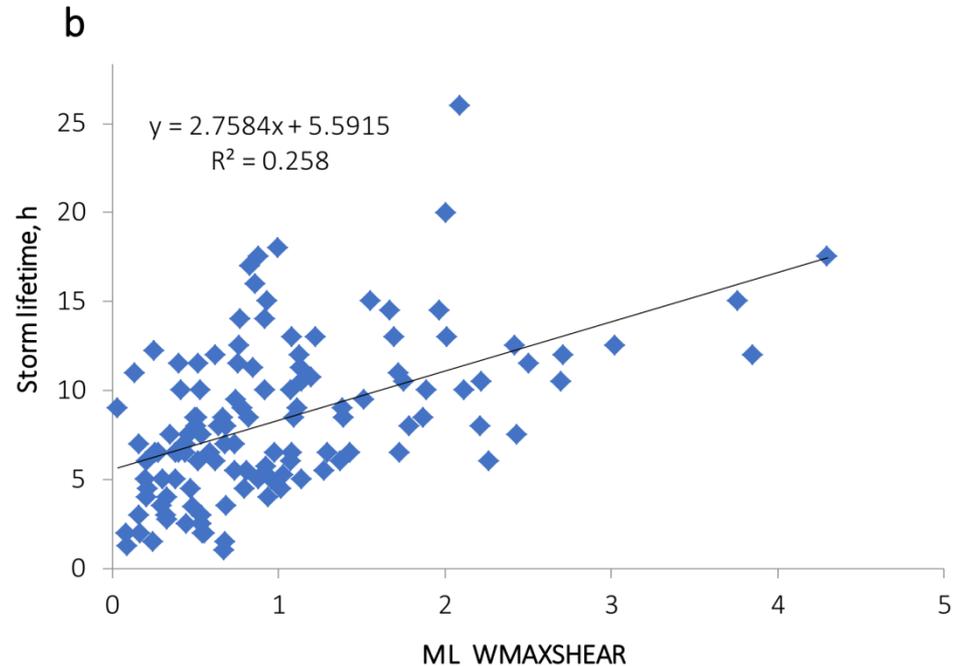
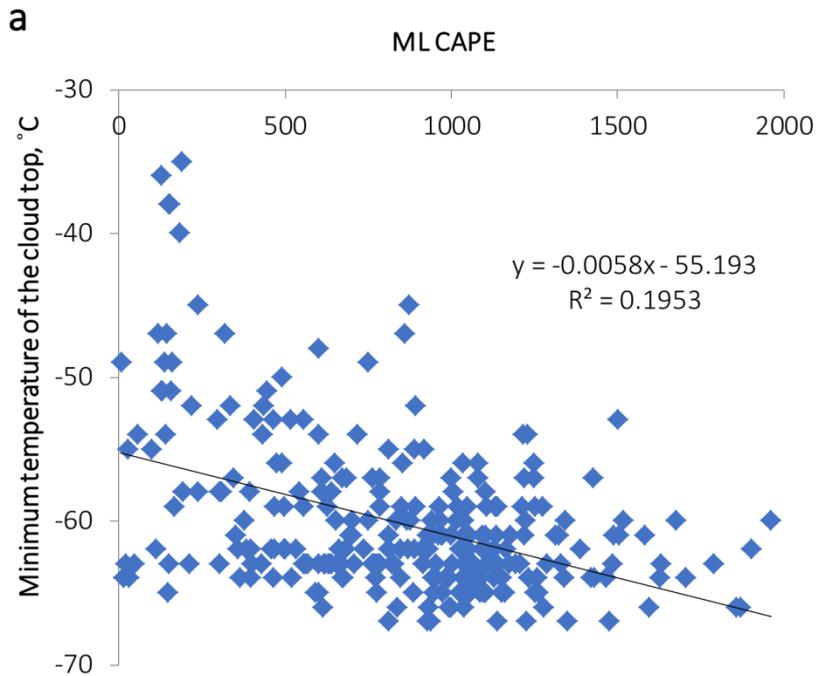
Выделены статистически значимые коэффициенты корреляции

Характеристика шторма	MLLCL, м	MLLFC, м	MLCAPE, J kg ⁻¹	MLCIN, J kg ⁻¹	PW, мм	DLS, m s ⁻¹	MLS, m s ⁻¹	LLS, m s ⁻¹	MLEHI _{0-3km}	MLWMS	SRH1, m ² s ⁻²	SRH3, m ² s ⁻²	SCP	SHIP	STP	SWEAT
Значения индексов для стартовой точки ветровала																
Диаметр шторма	0.08	0.09	<u>0.23</u>	<u>-0.13</u>	<u>0.31</u>	0.00	0.01	<u>0.33</u>	<u>0.31</u>	<u>0.19</u>	<u>0.22</u>	<u>0.17</u>	0.20	0.06	0.08	<u>0.30</u>
Мин. темп. ВГО	-0.11	<u>-0.14</u>	<u>-0.38</u>	<u>0.16</u>	<u>-0.36</u>	-0.02	-0.08	0.02	<u>-0.37</u>	<u>-0.33</u>	-0.07	<u>-0.16</u>	<u>-0.21</u>	<u>-0.32</u>	<u>-0.16</u>	<u>-0.44</u>
Продолжительность жизни	0.15	<u>0.35</u>	<u>0.44</u>	<u>-0.26</u>	<u>0.29</u>	<u>0.17</u>	<u>0.20</u>	0.01	<u>0.50</u>	<u>0.47</u>	0.15	<u>0.26</u>	<u>0.43</u>	<u>0.52</u>	<u>0.30</u>	<u>0.35</u>
Максимальные значения индексов в радиусе 100 км от стартовой точки ветровала																
Диаметр шторма	0.10	-0.03	<u>0.20</u>		<u>0.21</u>	-0.06	-0.01	<u>0.31</u>	<u>0.28</u>	<u>0.17</u>	<u>0.18</u>	<u>0.12</u>	<u>0.18</u>	-0.01	0.09	<u>0.36</u>
Мин. темп. ВГО	-0.07	0.01	<u>-0.36</u>		<u>-0.24</u>	0.05	-0.06	0.00	<u>-0.34</u>	<u>-0.30</u>	-0.05	-0.11	<u>-0.19</u>	<u>-0.25</u>	-0.11	<u>-0.48</u>
Продолжительность жизни	<u>0.18</u>	0.16	<u>0.52</u>		<u>0.34</u>	0.08	0.17	0.06	<u>0.53</u>	<u>0.48</u>	0.13	<u>0.25</u>	<u>0.39</u>	<u>0.57</u>	<u>0.32</u>	<u>0.41</u>

Зависимости между

(a) – ML CAPE и минимальной температурой на ВГО

(b) – ML WMAXSHEAR и продолжительностью жизни МКС



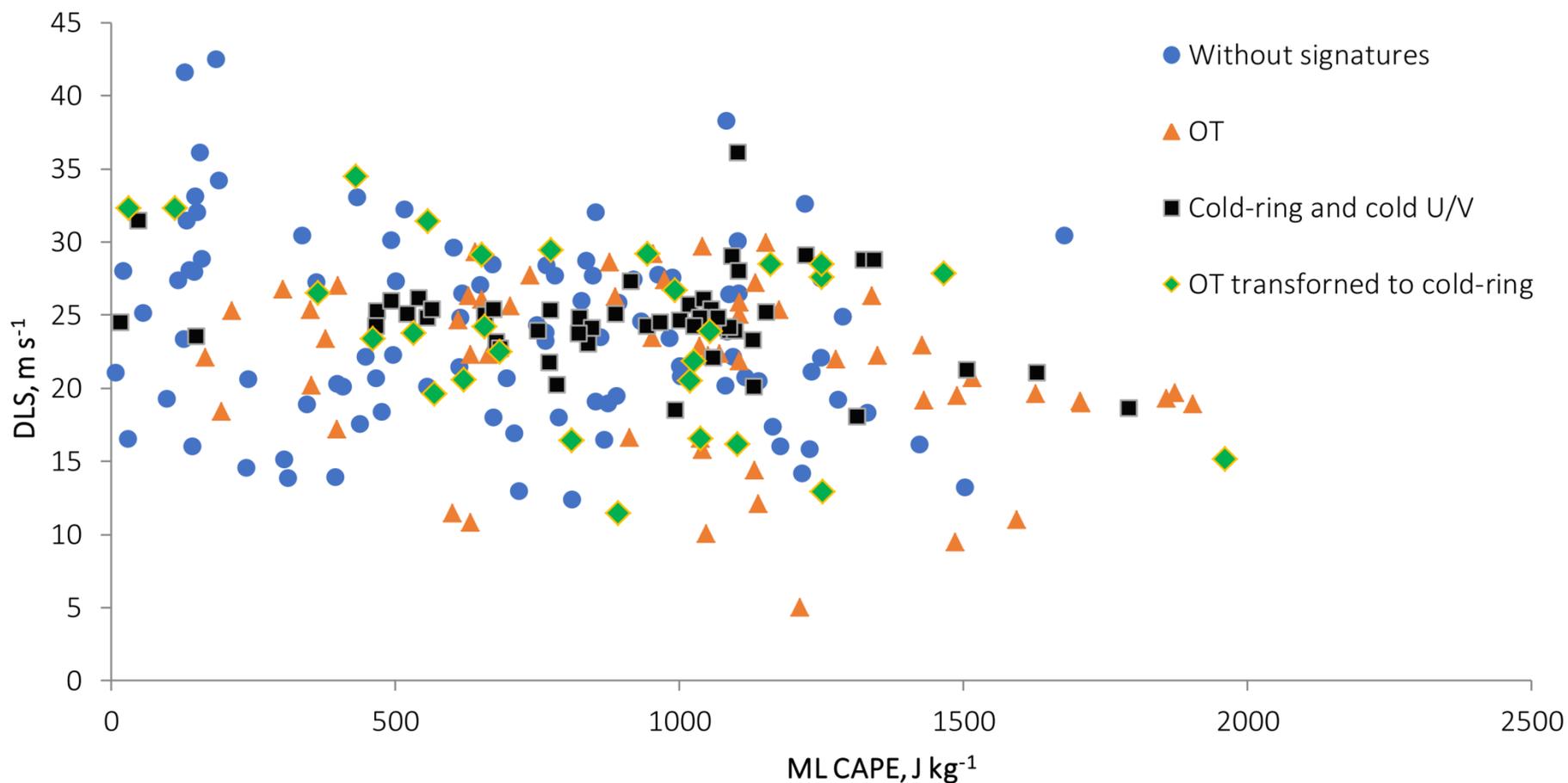
Медианные значения индексов, связанные с различными типами сигнатур на ВГО

Выделены индексы, имеющие статистически значимые различия по тестам Краскела-Уоллиса и медианному тесту

Типы сигнатур	ML LCL, m	ML LFC, m	MLCAPE, J kg ⁻¹	MLCIN, J kg ⁻¹	PW, mm	DLS, m s ⁻¹	MLS, m s ⁻¹	LLS, m s ⁻¹	MLEHI _{0-3km}	MLWMS	SRH1, m ² s ⁻²	SRH3, m ² s ⁻²	SCP	SHIP	STP	SWEAT
Значения индексов для стартовой точки ветровала																
Нет сигнатур	<u>1101</u>	<u>1781</u>	<u>471</u>	-21	<u>34.5</u>	<u>20.5</u>	<u>17.8</u>	11.8	<u>0.34</u>	<u>560</u>	95	<u>135</u>	<u>1.30</u>	<u>0.20</u>	<u>0.21</u>	<u>294</u>
OT	<u>1157</u>	<u>1929</u>	<u>773</u>	-25	<u>37.0</u>	<u>20.1</u>	<u>16.3</u>	10.4	<u>0.74</u>	<u>741</u>	89	<u>162</u>	<u>2.69</u>	<u>0.28</u>	<u>0.25</u>	<u>331</u>
Cold-ring cold U/V	<u>1199</u>	<u>1803</u>	<u>769</u>	-27	<u>36.1</u>	<u>22.2</u>	<u>18.8</u>	10.0	<u>0.84</u>	<u>819</u>	99	<u>184</u>	<u>3.52</u>	<u>0.38</u>	<u>0.31</u>	<u>362</u>
Трансформация	<u>1479</u>	<u>2070</u>	<u>555</u>	-48	<u>34.0</u>	<u>22.4</u>	<u>18.5</u>	11.0	<u>0.73</u>	<u>607</u>	123	<u>229</u>	<u>3.97</u>	<u>0.38</u>	<u>0.31</u>	<u>346</u>
Максимальные значения индексов в радиусе 100 км от стартовой точки ветровала																
Нет сигнатур	<u>833</u>	2405	<u>707</u>		<u>36.2</u>	<u>23.4</u>	<u>19.2</u>	13.4	<u>0.68</u>	<u>722</u>	131	<u>198</u>	<u>2.56</u>	<u>0.35</u>	<u>0.37</u>	<u>333</u>
OT	<u>902</u>	2460	<u>1005</u>		<u>39.2</u>	<u>22.7</u>	<u>19.3</u>	13.2	<u>1.05</u>	<u>939</u>	147	<u>203</u>	<u>4.49</u>	<u>0.46</u>	<u>0.43</u>	<u>379</u>
Cold-ring cold U/V	<u>895</u>	2299	<u>982</u>		<u>37.6</u>	<u>24.5</u>	<u>20.9</u>	13.2	<u>1.05</u>	<u>963</u>	150	<u>256</u>	<u>5.64</u>	<u>0.63</u>	<u>0.57</u>	<u>397</u>
Трансформация	<u>1145</u>	2507	<u>915</u>		<u>35.9</u>	<u>23.8</u>	<u>20.4</u>	12.3	<u>0.94</u>	<u>818</u>	161	<u>283</u>	<u>5.10</u>	<u>0.52</u>	<u>0.53</u>	<u>383</u>

Шквалы и смерчи, связанные с различными типами сигнатур на ВГО, в пространстве признаков CAPE/DLS

Показаны максимальные значения CAPE и DLS в радиусе 100 км от стартовой точки ветровала



Заключение и перспективы

- Большинство случаев шквалов и смерчей связаны с суперячейками и квазилинейными системами (КЛКС). Доля случаев смерчей, связанных с КЛКС, составляет 34% (в США не более 20%). Большинство штормов, вызывающих шквалы и смерчи, являются долгоживущими.
- Свыше 60% шквалов и 54% смерчей связаны с сигнатурами на ВГО. Наиболее распространенная сигнатура – ОТ. Доля случаев смерчей, связанных с сигнатурами, в 3,5 раза выше, чем в Европе.
- Суперячейки формируются при более низком CAPE и PW, чем КЛКС и МКК
- Минимальная температура ВГО имеет сильную отрицательную корреляцию с CAPE, PW и композитными параметрами, связанными с CAPE. Продолжительность жизни штормов имеет сильную корреляцию с параметром WMAXSHEAR и другими композитными индексами.
- Наилучшим дискриминатором для штормов с сигнатурами на ВГО и без них является CAPE, и некоторые композитные индексы (например ENI)
- Перспективы исследования – расширения выборки за счет данных спутника HIMAWARI-8 по Восточной Сибири и Дальнему Востоку (архив доступен с 2015 г.)

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/>*