

Мезомасштабные конвективные системы над Западной Сибирью и их характеристики по данным дистанционного зондирования

К.Н. Пустовалов

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3
Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
E-mail: const.pv@yandex.ru*

В работе на основании анализа данных пассивного и активного зондирования, выполняемого с помощью спутников и наземных средств измерений, получены оценки различных характеристик мезомасштабных конвективных систем и сопутствующих им явлений над Западной Сибирью.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, атмосферно-электрические процессы, конвективные системы

Mesoscale convective systems over Western Siberia and their characteristics according to remote sensing data

K.N. Pustovalov

*IMCES, Tomsk
TSU, Tomsk*

In this work, based on the analysis of passive and active sounding data performed using satellites and ground-based measuring instruments, estimates of various characteristics of mesoscale convective systems and accompanying phenomena over of Western Siberia are obtained.

Keywords: remote sensing, atmospheric-electrical processes, convective systems

Введение

Одним из последствий изменения климата является изменение повторяемости кучево-дождевой облачности и связанных с ней опасных явлений. Существенное увеличение доли конвективной облачности во второй половине XX – начале XXI вв. наблюдается в регионах Северной Евразии [1–3]. Сохранение данной тенденции ведёт к соответствующему увеличению повторяемости таких опасных явлений как: грозы, град, шквалы, интенсивные ливни и др. Наиболее опасными проявлениями конвективной облачности являются мезомасштабные конвективные системы (МКС), включая их разновидность – мезомасштабные конвективные комплексы (МКК) [4–6]. Чаще всего МКС/МКК образуются в тропических широтах, однако, они также отмечаются в умеренных [4–15]. В том числе, МКС регистрируются на территории Западной Сибири [16–19].

МКС/МКК в тропических широтах имеют площадь непрерывного облачного покрова с температурой верхней границы ниже -32°C не менее 10^5 км^2 [4, 5, 20], а в умеренных – их размеры уступают размерам МКС/МКК в тропических широтах [14, 18].

Согласно [11, 12, 14, 15], жизненный цикл МКС в большинстве случаев начинается после полудня, достигая максимального развития вблизи полуночи, и заканчивается

вскоре после рассвета. Условиями, необходимыми для зарождения МКС/МКК, являются поступление большого количества влаги в нижние слои атмосферы и наличие синоптической неоднородности для обеспечения конвергенции воздушных потоков.

Электрическая структура МКС по вертикали оказалась гораздо сложнее аналогичной структуры внутримассовой грозовой ячейки. Согласно [20–22], в восходящих потоках МКС зарегистрировано четыре основных слоя заряда с изменяющейся полярностью, а в нисходящих – до шести слоёв, чередующейся полярности, в большинстве экспериментов вблизи нулевой изотермы выявлено существование интенсивного тонкого слоя положительного заряда и смоделирован механизм его образования.

Оценки успешности прогноза МКС/МКК по моделям WRF-NMM и WRF-ARW показали, что в большинстве случаев прогностическое положение МКС/МКК не соответствует фактическому, а для внутримассовых ситуаций МКС/МКК иногда вообще не воспроизводятся [13]. Оценки вертикальной структуры облаков, связанных с МКС/МКК, по данным реанализов ERA, JRA и MERRA в сравнении с наблюдениями CloudSat/CALIPSO показали, что для этих реанализов характеристики облачности заметно недооцениваются, особенно для JRA-55 и MERRA-2.

На территориях европейской части России и сопредельных государств, по данным за 2009–2019 гг., преобладающими типами мезомасштабных систем явились МКС (осесимметричного и линейного типа) и суперячейки [14].

С МКС часто связаны высотные разряды в атмосфере (спрайты, джеты и другие) [23]. В работе [24] проанализирована повторяемость спрайтов на территории России и отмечено, что самая высокая частота инициации спрайтов наблюдается в Краснодарском крае, на Алтае и Дальнем Востоке. При этом на Алтае (юго-восток Западной Сибири) ежегодно отмечается высокая интенсивность спрайтовой активности.

Для южной части Западной Сибири показано, что МКС формируется при средней и слабой степени неустойчивости атмосферы [17]. При этом над Западной Сибирью граница активной конвекции за последнее десятилетие значительно сместилась в северном направлении [25], что может способствовать формированию МКС не только в южной части региона, но и севернее. Также на территории Западной Сибири в последнее десятилетие растут средние и экстремальные значения температуры воздуха, экстремальные количества осадков в летние месяцы, продолжительность грозового сезона и годового числа дней с грозой, а также числа дней с продолжительным градом и с градом большого диаметра [26, 27]. Согласно результатам расчетов по модели INM-CM5.0 до 2100 г., тенденции к увеличению экстремальных событий в этом регионе будут сохраняться [27]. Исходя из вышесказанного в ближайшие десятилетия следует ожидать увеличения повторяемости и интенсификации МКС в Западной Сибири, а также сопутствующих им опасных конвективных явлений.

Ранее для Западной Сибири проводились исследования влияния мощной конвективной облачности, в том числе МКС, на электрическое состояние приземной атмосферы и грозовую активность [27–31]. Однако, атмосферно-электрические процессы при прохождении МКС для территории Западной Сибири на сегодняшний день исследованы недостаточно.

Цель данной работы заключалась в комплексном исследовании МКС над Западной Сибирью: их характеристик, структуры и сопутствующих явлений по данным активного и пассивного зондирования в радио-, ИК- и видимом диапазонах, а также на основе измерений атмосферно-электрических величин в приземном слое.

Характеристики МКС по данным пассивного спутникового зондирования в видимом и ИК-диапазонах

На первом этапе исследования выполнялось визуальное дешифрирование МКС на основе видимых и ИК-каналов радиометра MODIS, полученных по данным дневных пролётов спутников Terra, Suomi NPP и Aqua [<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>]. Критериями отбора МКС были: наличие на спутниковом изображении скопления кучево-дождевых облаков, объединённых единой наковальной квазилокальной формы с минимальным размером (вдоль большой полуоси) не менее 50 км (Рис. 1). Поскольку использование данных MODIS не позволяет оценить время жизни и трансформацию исследуемых облачных систем, то далее будем говорить только о МКС (осесимметричных или линейных). Всего за период 2010–2019 гг. было дешифрировано более 460 случаев прохождения МКС. Над территорией исследования в среднем за год регистрировалось 27 случаев МКС.

На основе синоптических карт [<https://meteoinfo.ru/mapsynop/>] МКС разделялись на фронтальные и внутримассовые. Дешифровочным признаком фронтальной МКС являлось вхождение её в состав облачной системы атмосферного фронта (главным образом, холодного фронта и фронта окклюзии). Внутримассовые МКС дешифровывались как: изолированные МКС, расположенные в пределах одной воздушной массы.

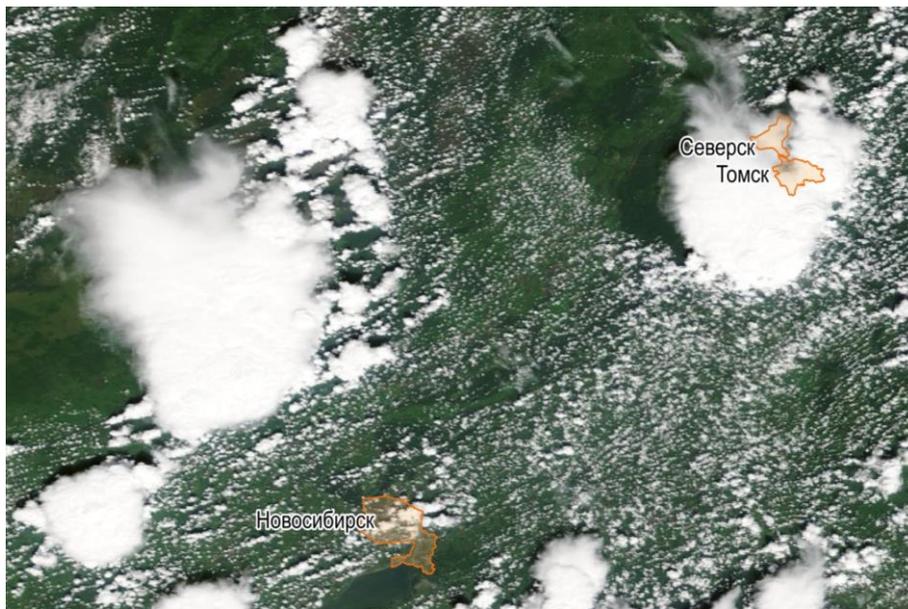


Рис. 1. Пример RGB-изображения по данным MODIS с наличием мезомасштабных конвективных систем в окрестностях городов Новосибирск, Томск и Северск (оранжевые полигоны – границы этих городов).

На следующем этапе исследования для оценки морфологических и микрофизических характеристик МКС была проведена формализация и дополнительная фильтрация отобранных ранее случаев прохождения МКС. Для этого использованы следующие продукты 2 уровня обработки, полученные по данным MODIS во время пролётов спутников Terra и Aqua (пакеты MODATML2 и MYDATML2 [<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>]): температура на верхней границе облачности (ВГО) – Cloud Top Temperature (*CTT*); высота ВГО – Cloud Top Height (*CTH*); оптическая толщина облачности – Cloud Optical Thickness (*COT*); интегральное влагосодержание – Cloud Water Path (*CWP*); эффективный радиус облачных частиц –

Cloud Effective Radius (*CER*); давление на ВГО – Cloud Top Pressure (*CTP*). На основе этих массивов данных для каждого МКС формировалась маска, для каждого пикселя (5×5 км) которой должны были выполняться следующие условия: $CTT \leq 241$ К (-32 °С) и $COT \geq 30$. Пороговое значение $COT = 30$ было подобрано эмпирически с целью выделения наиболее плотной части МКС и исключения относительно тонких слоёв перистой облачности, растекающихся на значительные расстояния от центра МКС. Схема построения маски МКС и расчёта её характеристик иллюстрируется рисунке 2.

Для каждого анализируемого случая рассчитывались площадь маски *S*. Для исключения небольших и, как правило, хаотично организованных конвективных систем, маска которых имеет небольшую площадь и «рваный» вид, из отобранных на первом этапе МКС исключались те, площадь маски которых была меньше 5000 км². После формализации и дополнительной фильтрации число случаев МКС сократилось до 279. Для отобранных случаев рассчитывались длины хорд маски вдоль широты и долготы – l_{lat} и l_{lon} , соответственно. Значения l_{lat} и l_{lon} , соответствующие 95-перцентиллю, принимались в качестве предварительной оценки протяжённости всего МКС без учёта её неровных краёв (сопутствующих кучево-дождевых облаков) – L_{lat} и L_{lon} .

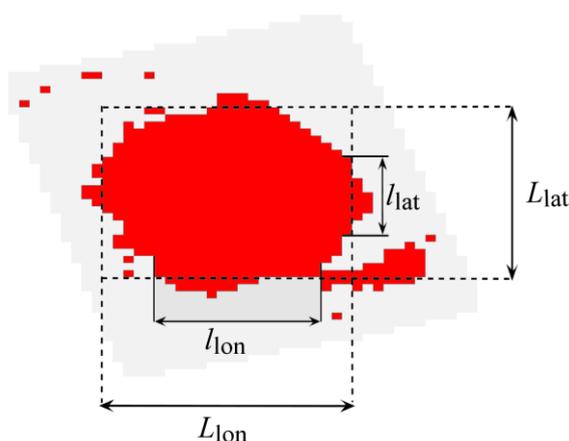


Рис. 2. Схема расчёта характеристик МКС посредством создания маски ($CTT \leq -32^\circ\text{C}$, $COT \geq 30$), определения её геометрических характеристик и анализа значений микрофизических характеристик облачности в попадающих в неё пикселях MODIS.

Далее, по данным *CTH*, *CWP*, *CER*, *CTT* и *CTP*, оценивались значения высоты ВГО, интегрального влагосодержания, эффективного радиуса частиц, температуры и давления на верхней границе ВГО МКС. Каждая из анализируемых характеристик рассматривалась отдельно для фронтальных и внутримассовых МКС. Результаты статистического анализа характеристик МКС представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики МКС различного происхождения.

Тип МКС	Параметр	Статистические характеристики							
		<i>M</i>	<i>Me</i>	<i>SD</i>	<i>IQR</i>	<i>P</i> ₅	<i>P</i> ₂₅	<i>P</i> ₇₅	<i>P</i> ₉₅
Все случаи	<i>S</i> , ×10 ³ км ²	9,3	8,3	3,7	4,6	5,2	6,5	11	17
	<i>CTH</i> , км	11	11	0,9	1,0	9,2	10	11	12
	<i>CWP</i> , кг/м ²	1,3	1,3	0,2	0,2	1,0	1,2	1,4	1,5
	<i>CER</i> , мкм	26	26	1,9	2,3	23	25	27	29
Фронталь	<i>S</i> , ×10 ³ км ²	10	9,2	4,1	5,7	5,3	6,8	13	19
	<i>CTH</i> , км	11	11	0,9	1,1	9,3	10	11	12

	<i>CWP</i> , кг/м ²	1,3	1,3	0,2	0,2	1,0	1,1	1,4	1,5
	<i>CER</i> , мкм	26	26	2,1	3,1	22	24	27	29
Внутримассовые	<i>S</i> , ×10 ³ км ²	8,8	7,9	3,3	3,6	5,1	6,4	10	16
	<i>CTH</i> , км	11	11	0,9	1,0	9,0	10	11	12
	<i>CWP</i> , кг/м ²	1,3	1,3	0,2	0,2	1,0	1,2	1,4	1,5
	<i>CER</i> , мкм	26	27	1,7	2,0	23	25	27	29
<i>Примечание.</i> В этой и следующих таблицах: <i>M</i> – среднее арифметическое, <i>Me</i> – медиана, <i>Mo</i> – мода, <i>SD</i> – среднее квадратическое отклонение, <i>IQR</i> – интерквартильный размах, <i>P</i> ₅ , <i>P</i> ₂₅ , <i>P</i> ₇₅ , <i>P</i> ₉₅ – значения, соответствующие 5-, 25-, 75- и 95- процентилем, соответственно, <i>Min</i> и <i>Max</i> – минимальное и максимальное значения величины.									

Для всех случаев МКС (279 случаев) на юге Западной Сибири, согласно таблице 1, в среднем характерны следующие значения характеристик. Высота ВГО в среднем равна около 11 км и, как правило, изменяется в диапазоне 9÷12 км. Среднее значение *S* равно 9·10³ км² (медиана – 8·10³ км²), а её минимальное и максимальное значения (при доверительной вероятности 95 %) – 5·10³ км² и 17·10³ км², соответственно. Интегральное влагосодержание облачности МКС, как правило, изменяется в диапазоне 1÷1,5 кг/м² и имеет среднее значение 1,3 кг/м². Эффективный радиус облачных частиц в МКС в среднем равен 26 мкм, а его минимальное и максимальное значения (при доверительной вероятности 95 %) – 23 и 29 мкм, соответственно. Сопоставление характеристик МКС фронтального (40 % случаев) и внутримассового (60 %) происхождения показало, что площадь и размеры внутримассовых МКС меньше фронтальных, в то время как их микрофизические характеристики, в целом, имеют близкие значения. Отметим, что полученные значения характеристик МКС соответствуют местному околополуденному времени, обусловленному временем пролета спутников Terra, Suomi NPP и Aqua над исследуемой территорией.

Структура МКС по данным активного (радио- и оптического) спутникового зондирования

Для исследования структуры МКС были использованы данные активной радио и оптической локации облачной тропосферы со спутников. Из имеющегося набора случаев прохождения МКС были оставлены только те МКС, область расположения которых пересекали орбиты спутников CALIPSO (28 случаев) и CloudSat (15 случаев). Оба спутника движутся по практически идентичным орбитам на высоте ~ 705 км со скоростью ~ 7,51 км/с и наклоном плоскости орбит, равным 98,2°. На борту CALIPSO установлен облачно-аэрозольный лидар CALIOP (длины волн $\lambda = 532$ и 1064 нм), а на борту CloudSat – метеорологический радар CPR [17, 19].

Были использованы данных вертикальных профилей следующих величин:

1. полного излучения обратного рассеяния (Total Attenuated Backscatter) на длине волны 532 нм по данным лидара CALIOP (далее *TAB*₅₃₂);
2. радиолокационной отражаемости облаков и осадков по данным радара CPR (далее *Z*).

На основе данных радара CPR и лидара CALIOP была проведена оценка структуры МКС. Рассмотрим её подробно на примере прохождения МКС 12.06.2019 г. В этот интервал над югом Западной Сибири отмечено прохождение облачной системы фронта окклюзии циклона, развивающегося на полярном фронте (основном) и разделяющем тропическую и умеренную воздушные массы. Фронт окклюзии простирался на ~1000 км с юго-запада на северо-восток. Точка окклюзии, а также тёплый и холодный фронты циклона располагались над Казахстаном. В тёплом секторе циклона

отмечались высокие температуры воздуха (более 30°C в дневное время) и имело место интенсивная адвекция тепла, направленная от Аральского моря на юг Западной Сибири. Облачная система фронта окклюзии была представлена главным образом облаками верхнего яруса, а также серией мезомасштабных конвективных систем асимметричного типа – мезомасштабных конвективных комплексов.

Крупнейшая из них (анализируемая далее) имела протяжённость более 300 км и развивалась на северной оконечности барической ложбины, связанной с фронтом окклюзии. Эта МКС существовала около 12 ч (с 00 до 12 ч UTC). Высота её верхней границы превышала 12 км на значительной части площади. В течение большей части времени существования МКС с ней была связана интенсивная грозовая активность и ливневые осадки.

Рассматриваемая МКС находилась на стадии максимального развития и имела как конвективную, так и слоистообразную области. Кроме того, непосредственно после МКС отмечалось прохождение фронтальной облачной системы фронта окклюзии и внутримассовых кучево-дождевых облаков. Вариации высоты ВГО, оцененной по максимуму сигнала TAB_{532} и двух фиксированных значений Z (-15 и -10 дБ), представлены на рисунке 3. Профиль Z был разделен на отдельные области: КО – конвективная область, СО – область слоистообразной облачности, ФО – фронтальная облачность (фронт окклюзии), ВМ – внутримассовая облачность (кучевые и кучево-дождевые облака).

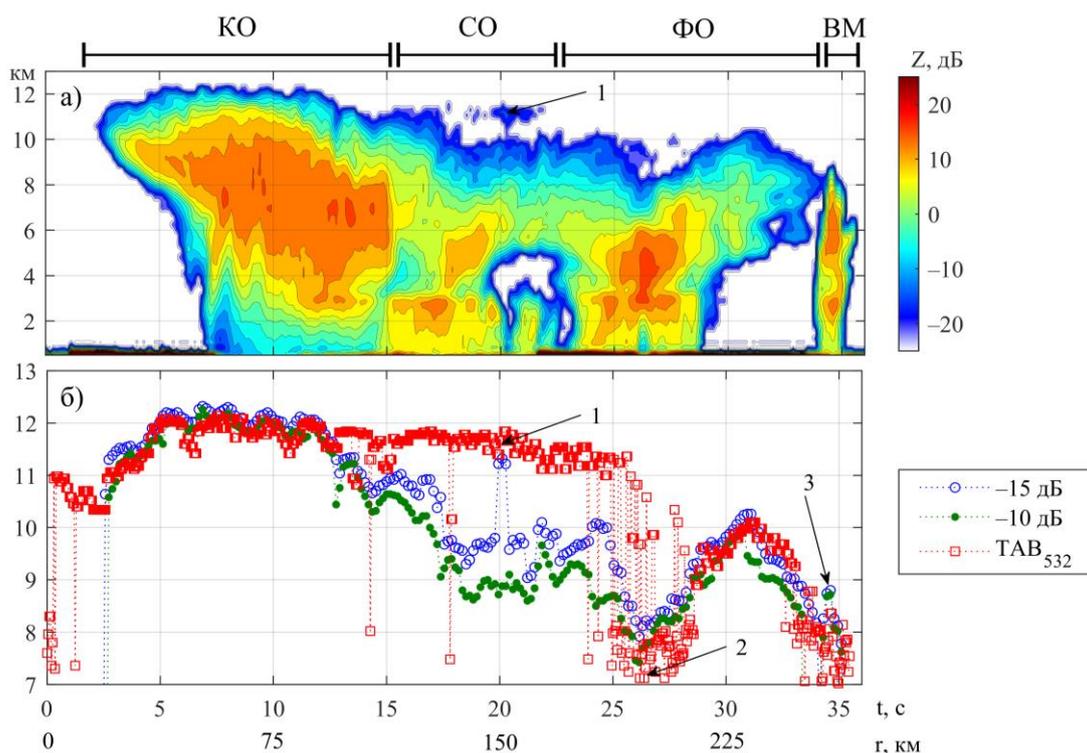


Рис. 3. Профиль отражаемости Z вдоль траектории пролёта CloudSat и CALIPSO (а), вариации высоты изолинии $Z = -15$ и -10 дБ и высоты максимума TAB_{532} (б).

Данные за 12.06.2019 г. : 1 – вуаль (пелена), зарегистрированная над СО; 2 – опускание максимума TAB_{532} ; 3 – верхняя граница ВМ. По оси ординат – высота, по оси абсцисс – расстояние (r) и время пролёта спутника (t) от точки отсчёта.

Анализ вертикального профиля радиолокационной отражаемости в пределах МКС (пример на Рис. 3) показал следующее. В КО высокие значения радиолокационной

отражаемости ($Z \geq 10$ дБ) приходится на диапазон высот $\sim 4-10$ км. При этом, распределение Z в КО было фактически квазиоднородным в полосе высот толщиной $\sim 3-4$ км. Учитывая, что орбита спутника пересекала передний фронт МКС под углом, большим $\pi/4$, протяженность области высоких значений отражаемости вдоль переднего фронта КО была не менее 250 км, а протяженность вдоль орбиты составила не менее 70 км. Квазивертикальные полосы (языки) радиоэха в нижней части КО были связаны с нисходящими потоками и зонами ливневых осадков. В ОСО, в отличие от КО, высокие значения Z отмечались преимущественно в средней и нижней тропосфере.

Сравнительный анализ ВГО по данным радио- (H_Z) и оптической (высота $H_{ТАВ}$) локации показал следующее:

- для КО и ФО значения H_Z и $H_{ТАВ}$ практически совпадают;
- в ОСО $H_{ТАВ}$ превышает H_Z для $Z = -15$ и -10 дБ на величину от 1 до 3 км (аналогичные результаты были получены для случаев, когда МКС находились на стадии максимального развития или на более поздних);
- для H_Z со значениями $Z \leq -15$ выявлены отдельные участки, где H_Z и $H_{ТАВ}$ близки друг к другу;
- связанный с ВГО отклик в сигнале лидара появляется раньше, чем в сигнале радара на 2–2,5 с (15–19 км вдоль орбиты);
- значение $H_{ТАВ}$ на интервале $t \sim 0-2,5$ с, когда связанный с ВГО сигнал радара отсутствует, позволило оценить высоту тропопаузы, находящейся непосредственно над наковальной;
- возрастание в КО с 10,5 до 12,5 км как H_Z , так и $H_{ТАВ}$ указывает на то, что под влиянием восходящих конвективных потоков возможно либо выгибание тропопаузы вверх, либо её пробитие;
- для области ВМ значения H_Z и $H_{ТАВ}$ ведут себя идентичным образом.

Характеристики МКС по данным доплеровского метеорологического радиолокатора

Радиолокационные характеристики МКС по данным наземных радаров для Западной Сибири, их изменение в жизненном цикле МКС и взаимосвязь с сопутствующими явлениями остаются слабо изученными. В связи с вышесказанным, производилась оценка радиолокационных характеристик МКС на юге Западной Сибири по данным ДМРЛ-С, а также их пространственно-временной изменчивости и связи с интенсивностью осадков и грозовой активностью.

Для достижения поставленной цели были отобраны случаи прохождения МКС над территорией юга Западной Сибири в теплый период 2021 г., для которого имелись в наличии данные ДМРЛ-С, зарегистрированные в аэропорту Толмачёво (г. Новосибирск). Производилось дешифрирование МКС на спутниковых изображениях [<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>; <https://meteologix.com/>]. Отбирались организованные скопления кучево-дождевых облаков, объединённые общей вершиной (наковальной) и имеющие следующие характеристики: оптическая плотность облаков 23 и более, температура на верхней границе облаков -32 °С и ниже, горизонтальный размер наковальной – 50 км и более. Всего отобрано 12 случаев МКС.

Далее для отобранных случаев прохождения МКС над территорией исследования выбирались данные ДМРЛ-С в формате LNR (*.lnr). Затем производилась визуализация (шаг по времени 30 мин) рассчитанных по данным ДМРЛ-С радиолокационных характеристик облачности и осадков с помощью специализированного ПО ВОИ ДМРЛ-С «ГИМЕТ-2010», а также извлечение изображений пространственной изменчивости характеристик МКС из рабочей области «ГИМЕТ-2010», их оцифровка

(разложение изображения на значения каналов R, G и B в каждом пикселе) и экспорт полученных данных в формате MAT (*.mat) с помощью разработанного авторами приложения на языке MATLAB (MathWorks).

Наследующем этапе проводилась пакетная обработка содержащихся в MAT-файлах данных, которая включала раскодирование RGB кода, географическую привязку каждого пикселя, объединение данных пространственной изменчивости характеристик МКС за последовательные моменты времени (с шагом 30 мин) в виде 3D-матриц, статистический анализ изменчивости характеристик МКС, а также создание тематических изображений, иллюстрирующих их пространственно-временные изменения (пример представлен на рис. 4).

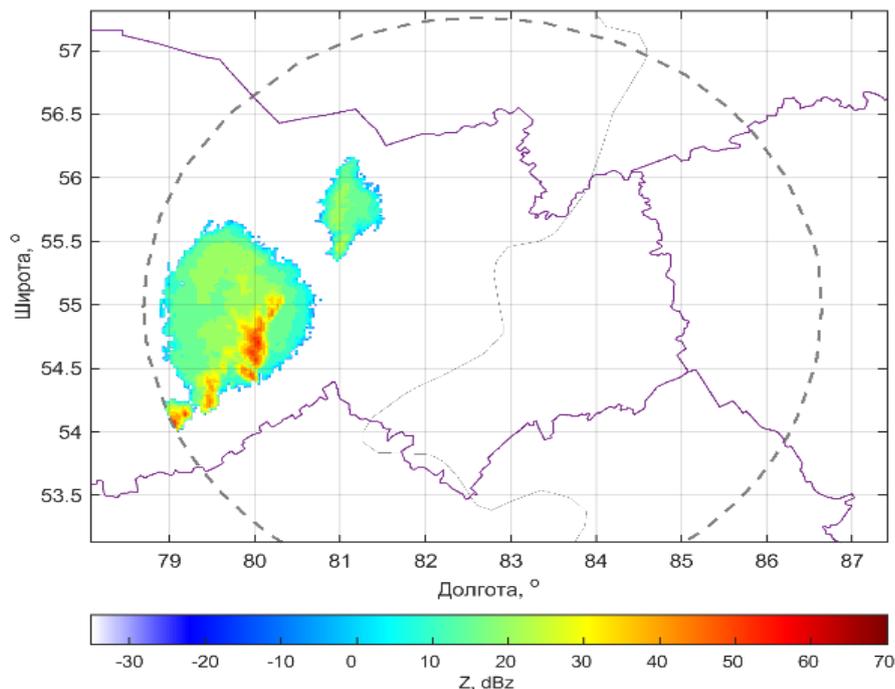


Рис. 4. Пространственная изменчивость максимальной радиолокационной отражаемости в МКС (05.07.2021 г., 3:30 местного времени). Пунктирная кривая ограничивает зону обзора ДМРЛ-С.

В таблице 2 приведены статистические характеристики изменчивости (как пространственной, так и временной) некоторых характеристик МКС, полученных по данным ДМРЛ-С: максимальной радиолокационной отражаемости (Z_{\max}), интегральной водности (Q), высоты верхней границы облачности ($H_{\text{ВГО}}$) и интенсивности осадков (I_p) в МКС. Согласно этой таблице, среднее значение максимальной радиолокационной отражаемости в исследованных случаях МКС (Z_{\max}) равно ~ 16 dBZ, а её типичный диапазон изменения (от P_{25} до P_{75}) – $10 \div 22$ dBZ. Относительно невысокие среднее и типичные значения Z_{\max} , рассчитанные для МКС в целом объясняются доминированием модальных значений Z_{\max} (около 16 dBZ), связанными с областями слоистообразной облачности в МКС, площадь которых в стадии зрелости и диссипации значительно превышает площадь конвективной области МКС (рис. 4). Распределение Z_{\max} является асимметричным и имеет «тяжёлый» хвост. Значения Z_{\max} в пределах верхнего квартиля (75-процентиль и более), наблюдающиеся, главным образом, в конвективной области МКС, где формируются ливни, грозы и град, составляют $21 \div 53$ dBZ.

Таблица 2. Средние по всем случаям значения статистических характеристик (см. примечание к табл. 1) для Z_{\max} , Q , $H_{\text{ВГО}}$ и I_p в МКС, рассчитанные на основе их значений по всей площади МКС и в течении всего периода их существования.

Стат. характеристики	Z_{\max} , dBZ	Q , кг/м ²	$H_{\text{ВГО}}$, км	I_p , мм/ч
<i>M</i>	16,1	0,7	7	1,6
<i>Mo</i>	15,9	0,2	7,3	0,4
<i>P₂₅</i>	10,1	0,2	5,9	0,14
<i>P₇₅</i>	21,6	0,7	8,3	1,4
<i>P₉₅</i>	31,4	2,6	9,6	7,3
<i>Max</i>	52,5	18,7	13,2	73,3

Аналогичным образом ведут себя другие проанализированные характеристики МКС. Интегральная водность облачности МКС в среднем равна 0,7 кг/м² и, как правило, изменяется в диапазоне 0,2 до 0,7 кг/м², а её значения в пределах верхнего квартиля составляют 1÷19 кг/м². Высота верхней границы облачности МКС в среднем равна 7 км и, обычно, изменяется в диапазоне 6–8 км, а её значения в пределах верхнего квартиля – 8÷13 км. Интенсивность осадков, выпадающих из МКС, в среднем равна 1,6 мм/ч и, обычно, изменяется в диапазоне 0,1÷1,4 мм/ч, а её значения в пределах верхнего квартиля – 7÷73 мм/ч.

В динамике радиолокационных характеристик МКС прослеживаются стадии их жизненного цикла: развития, зрелости и диссипации. В табл. 3 приведены основные характеристики жизненного цикла рассмотренных случаев МКС. Согласно табл. 2, длительность стадии развития в среднем составила 2,2 ч. При этом её минимальная длительность равна 0,5 ч, а максимальная – 4 ч. Длительность стадии зрелости также в среднем была равна 2,2 ч, а её максимальное и минимальное значения – 4 ч и 1 ч, соответственно. Стадия диссипации в среднем длилась 2,8 ч. Максимальная длительность этой стадии составила 5 ч, а минимальная – 0,5 ч. В большинстве рассмотренных случаев стадия диссипации являлась наиболее длительной среди всех стадий развития МКС. Общая длительность существования МКС в среднем составляла ~7 ч. Наибольшая длительность существования МКС составила 11 ч, а наименьшая – 3,5 ч. Максимальные значения радиолокационных характеристик МКС, чаще всего, отмечались вечером (18–21 ч местного времени). Однако, также были зарегистрированы случаи МКС с ночным и утренним максимумом развития МКС.

Таблица 3. Статистические характеристики (см. примечание к табл. 1) длительности стадий жизненного цикла и общей длительности существования МКС.

Статистические характеристики	Длительность стадий развития МКС, ч			Общая длительность существования МКС, ч
	развития	зрелости	диссипации	
<i>M</i>	2,2	2,2	2,8	7,2
<i>Min</i>	0,5	1	0,5	3,5
<i>Max</i>	4,0	4	5,0	11

По данным ДМРЛ-С во всех рассмотренных случаях в течении жизненного цикла МКС отмечалась гроза и сильный ливневой дождь. Кроме того, в 75 % случаев регистрировался град. Заметим, что данные явления наблюдались, главным образом, над конвективной частью МКС (в одном или нескольких пикселях), для которой $Z_{\max} > 20$ dBZ, а также, преимущественно, на стадии зрелости МКС. Факт наличия

грозы во всех случаях МКС подтверждается данными WWLLN. Так, в среднем в МКС было зарегистрировано 642 разрядов молний (максимум – около 3000 разрядов).

В большинстве рассмотренных случаев отмечалось качественное согласие между изменением в жизненном цикле средних (по всей площади) значений Z_{\max} в МКС, изменением средней интенсивности осадков и грозовой активности (по данным WWLLN). Максимальная интенсивность осадков и максимальное количество разрядов молний за 30 мин (N), как правило, отмечались при максимальных Z_{\max} в МКС.

Таким образом, в результате проведенных исследований получены радиолокационные характеристики структуры МКС, формирующихся над Западной Сибирью и обеспечивающих ливневые осадки, грозы и град. Конвективные ячейки в МКС, в которых образуются сильные ливневые дожди, грозы и град, могут быть выявлены при значениях $Z_{\max} > 22$ dBZ, $Q > 1$ кг/м² и $H_{\text{ВГО}} > 8$ км.

Электрическая структура МКС и связанные с ней атмосферно-электрические процессы по данным измерений с помощью электростатических флюксометров

На основе спутниковых изображений облачности (по данным спутников Terra, Aqua, Suomi NPP, NOAA-20, Электро-Л и Himawari-8), были отобраны случаи прохождения МКС в окрестностях г. Томска за период 2006–2020 гг.

Для оценки изменчивости градиента потенциала электрического поля ($\nabla\phi$) и полярных электропроводностей (λ_{\pm}) при прохождении МКС были использованы данные мониторинга атмосферно-электрических величин за период с 2006–2020 гг., полученные на геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (ГО ИМКЭС; г. Томск; 56°28'32" с. ш., 85°03'17" в. д.). Градиент потенциала электрического поля приземного слоя атмосферы измерялся электрическими флюксометрами «Поле-2» (2009–2017 гг.) и «CS110» (2017–2020 гг.). Полярные электропроводности регистрировались с помощью измерителя «Электропроводность-2».

На рисунке 5 представлен типичный пример вариаций градиента потенциала электрического поля и полярных электропроводностей при прохождении МКС над геофизической обсерваторией ИМКЭС СО РАН.

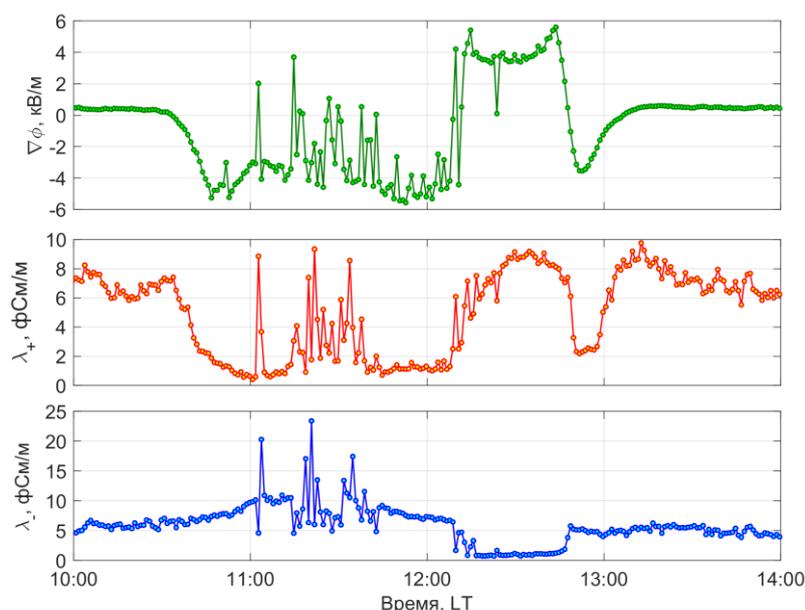


Рис. 5. Пример вариаций градиента потенциала электрического поля ($\nabla\phi$) и полярных электропроводностей (λ_{\pm}) при прохождении МКС вблизи г. Томска

В ходе исследования определены формы «медленных» вариаций градиента потенциала электрического поля при прохождении МКС. Также получены оценки некоторых количественных параметров «медленных» вариаций $\nabla\phi$ электрического поля при прохождении МКС: общей продолжительности и размаха вариаций (Табл. 4).

Форма «медленных» вариаций $\nabla\phi$, как правило, характеризуется одним продолжительным (более 30 мин) отрицательным возмущением электрического поля, за которым следуют одно или несколько непродолжительных положительных возмущений, чередующихся с отрицательными. Средняя продолжительность «медленных» вариации $\nabla\phi$ при прохождении МКС (D_v) составляет около 2,5 часов. При этом, максимальные значения D_v составляют 5 часов и более. Размах «медленных» вариаций $\nabla\phi$ (A_v), составляет, как правило, ~ 10 кВ/м (в среднем 13 кВ/м) и может достигать 20 кВ/м и более.

Сравнение полученных оценок характеристик «медленных» вариаций $\nabla\phi$ при прохождении МКС с аналогичными характеристиками для одиночных внутримассовых кучево-дождевых облаков показало следующее. Длительность «медленных вариаций» электрического поля при прохождении МКС в 2 раза, а их амплитуда в 5 раз превышает аналогичные характеристики для одиночных кучево-дождевых облаков [10–12].

Таблица 4. Статистические характеристики (см. примечание к табл. 1) длительности (D_v) и размаха (A_v) «медленных» вариаций $\nabla\phi$ при прохождении МКС над г. Томском и его окрестностями.

Параметры	Статистические характеристики							
	M	Me	SD	IQR	P_5	P_{25}	P_{75}	P_{95}
D_v , мин	140	120	80	94	60	75	170	300
A_v , кВ/м	13	12	6	8	4	9	17	20

Характеристики грозовой активности, связанной с МКС, по данным ОНЧ-радиоизлучения

Поскольку развитие МКС всегда сопровождается интенсивной грозовой активностью, то была проведена оценка характеристик области грозовой активности, связанной с МКС.

С начала XXI в. в мире активно развивается Всемирная сеть локализации молний – World Wide Lightning Location Network (WWLLN). Сеть WWLLN даёт информацию о грозовой активности над всем земным шаром посредством регистрации электромагнитных сигналов от гроз в ОНЧ-диапазоне (3–30 кГц). В настоящее время сеть состоит из более 70 пунктов приёма, в том числе на территории России. При этом грозопеленгационная сеть WWLLN обеспечивает возможность локализации молниевых разрядов в глобальном масштабе. Эффективность обнаружения разрядов молний (30 кА и более) составляет около 30 % [3].

В рамках данного исследования были использованы данные WWLLN, накопленные за период 2016–2020 гг. Оперативные данные (за 1 ч), получаемые сетью WWLLN, выкладываются в открытом доступе с задержкой 6 часов на её официальном сайте [3].

Для отобранных случаев МКС была проведена «оцифровка» координат разрядов молний за одночасовые интервалы времени, расположение которых соответствовало положению МКС во время дневных пролетов спутников Terra или Aqua (t_0), а также ± 6 ч относительно t_0 (Рис. 6). При этом было введено допущение, что МКС смещается по квазилинейной траектории и в течение времени своего существования генерирует молнии, формируя линейно вытянутый грозовой очаг.

Это позволило провести оценку следующих параметров грозовых очагов: продолжительность грозовой активности (T); количество разрядов молний (N); площадь грозового очага (S'); перемещение грозового очага (L); плотность разрядов молний (ρ). Площадь грозового очага рассчитывалась как площадь эллипса, большая и малая полуось которого определялись на основе координат разрядов.

На следующем этапе проводились оценки статистических характеристик полученных значений. Результаты представлены в таблице 5. Грозовая деятельность при прохождении МКС над югом Западной Сибири длится в среднем 8 часов (медиана – 9 ч), T менее 4 часов зарегистрировано не было. Количество зарегистрированных разрядов молний составляет в среднем около $0,53 \cdot 10^3$ разрядов (медиана – $0,9 \cdot 10^3$). Минимальное значение N (при доверительной вероятности 95 %) составляет около $0,17 \cdot 10^3$ разрядов, а максимальное – $2,4 \cdot 10^3$.

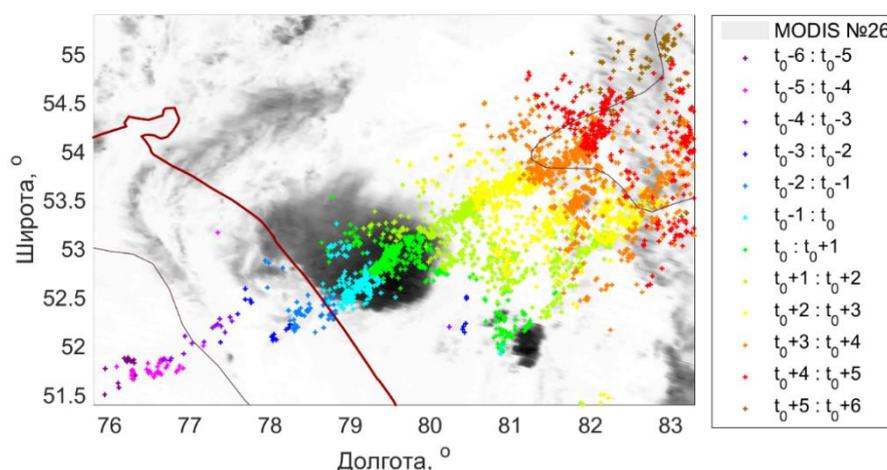


Рис. 6. Пример тематического изображения МКС и связанного с ней грозового очага. Маркеры различных цветов соответствуют разрядам молний за одночасовые интервалы времени $\pm 1-6$ ч относительно времени спутникового снимка (t_0).

Таблица 5. Статистические характеристики (см. примечание к табл. 1) параметров грозовых очагов, связанных с МКС.

Параметры	Статистические характеристики							
	M	Me	SD	IQR	P_5	P_{25}	P_{75}	P_{95}
T , часы	8,2	9,0	3,0	6,3	4,0	5,3	11	12
N , $\times 10^3$	0,9	0,53	0,8	0,1	0,17	0,3	1,6	2,4
S' , $\times 10^3$ км ²	10	5,7	12	14	7,2	18	15	38
L , $\times 10^3$ км	0,5	0,5	0,3	0,4	0,2	0,2	0,6	1,0
ρ , раз./км ²	0,2	0,1	0,1	0,2	0,02	0,1	0,3	0,4

Площадь грозового очага, как правило, изменяется в диапазоне $7 \div 38 \cdot 10^3$ км² и составляет в среднем около 5700 км² (медиана – $6 \cdot 10^3$ км²). При этом зарегистрированы случаи с S' более $4 \cdot 10^4$ км². Плотность разрядов молний в пределах грозового очага составляет в среднем $0,2$ раз./км² (медиана – $0,1$ раз./км²) и изменяется от $0,02$ до $0,4$ раз./км². Разряды концентрируются преимущественно вблизи переднего фронта МКС и их количество быстро убывает с удалением от него. Среднее значение L составляет ~ 480 км, а её минимальное и максимальное значения (при доверительной вероятности 95 %) – 160 и 1000 км, соответственно. Анализ траекторий движения МКС

показал, что они перемещаются с юго-запада на северо-восток.

Характеристики полей осадков, восстановленные по данным микроволнового спутникового зондирования

Известно, что с прохождением МКС также связаны интенсивные и продолжительные осадки над относительно большой территорией. В связи с этим, производилась оценка характеристик полей осадков, связанных с МКС над югом Западной Сибири, по данным GPM IMERG [Global Precipitation Measurement Mission NASA: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/GPM/overview/index.html (Дата обращения: 15.11.2021)]. GPM IMERG представляет собой базу данных восстановленных сумм атмосферных осадков в ячейках $0,1 \times 0,1^\circ$ по широте и долготе, рассчитанных с помощью алгоритма Integrated MultisatellitE Retrievals from GPM (IMERG) по данным группировки спутников Global Precipitation Measurement (GPM).

Для случаев прохождения МКС над Западной Сибирью были получены данные продукта GPM IMERG DAY FINAL, содержащие информацию о накопленной за сутки сумме атмосферных осадков и проведена их обработка и анализ. Пример данных этого продукта, соответствующих экстремальному наводнению в г. Тулуне в 2019 г., представлен на рис. 7.

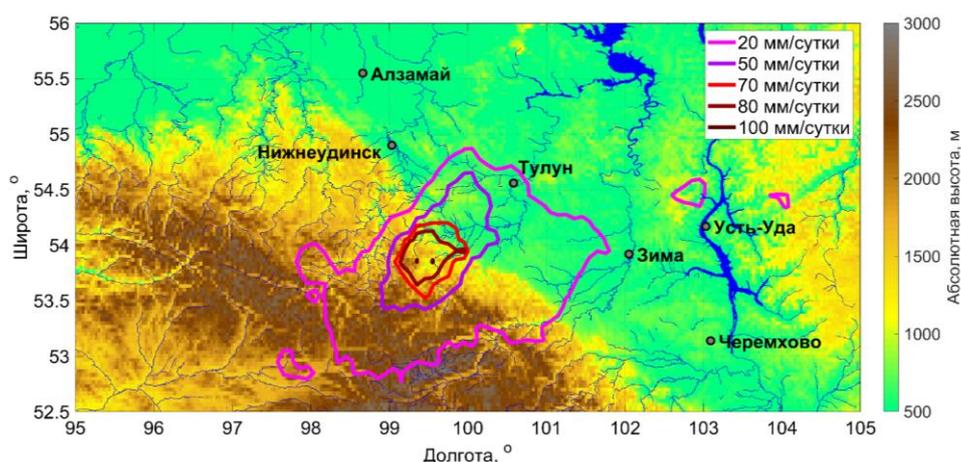


Рис. 7. Пример пространственного распределения суточных сумм осадков над югом Сибири за 26.06.2019 г. по данным GPM IMERG.

Для каждого отобранного случая МКС рассчитывались площадь зоны с осадками (S_p) и интенсивность осадков в пределах этой зоны (I_p). Производился статистический анализ изменчивости этих величин. В таблице 6 представлены основные статистические характеристики изменчивости S_p и I_p .

Таблица 6. Статистические характеристики (см. примечание к табл. 1) параметров полей осадков S_p и I_p при прохождении МКС.

Параметры	Статистические характеристики									
	M	Me	SD	IQR	P_5	P_{25}	P_{75}	P_{95}	P_{99}	Max
$S_p, \times 10^3 \text{ км}^2$	34	35	5,3	5,7	23	31	37	40	41	42
$I_p, \text{ мм/сутки}$	4,2	2,2	5,7	4,6	0,1	0,8	5,3	15	27	110

Отмечено, что среднее арифметическое значение площади зоны с выпавшими из МКС осадками равно $34 \cdot 10^3 \text{ км}^2$. Типичный диапазон изменения S_p , ограниченный 25-м

и 75-м процентилями (P_{25} и P_{75}), составляет $31 \div 37 \cdot 10^3$ км². Минимальное и максимальное значения площади с осадками при доверительной вероятности 95 % (P_5 и P_{95}) составляют ~ 23 и $40 \cdot 10^3$ км², соответственно. Абсолютный максимум – $\sim 42 \cdot 10^3$ км². Наибольшая повторяемость S_p (43 %) лежит в диапазоне $34 \div 38 \cdot 10^3$ км². При этом средняя площадь самого МКС 9,3 тыс. км² (Табл. 1).

Интенсивность осадков в отдельных ячейках ($0,1 \times 0,1^\circ$), располагающихся в пределах зоны осадков из МКС, в среднем равна 4,2 мм/сутки (медиана 2,3 мм/сутки). Типичный диапазон изменения I_p составляет $0,8 \div 5,3$ мм/сутки, а минимальное и максимальное значения при доверительной вероятности 95 % – 0,1 и 15 мм/сутки, соответственно. Абсолютный максимум достигал ~ 110 мм/сутки. Для сравнения, по данным [<http://www.pogodaiklimat.ru/>] средняя норма осадков в летние месяцы на метеостанциях Новосибирск, Томск, Барнаул составляет ~ 2 мм/сутки. При этом повторяемость значений $I_p > 2$ мм/сутки в одной ячейке при прохождении МКС составляет ~ 50 %, а $I_p > 10$ мм/сутки – ~ 3 %.

Условия зарождения и перемещения МКС в Западной Сибири

Юг Западной Сибири, на котором, как правило, отмечаются МКС, представлен преимущественно равнинными формами рельефа – Васюганской, Кеть-Тымкой, Ишимской и Кулундинской равнинами, Барабинская низменностью и другими. Юго-восточная часть этого региона представлена горным рельефом – Алтай, Салаирский кряж, Кузнецкий Алатау и Западные Саяны. Основную часть равнинной территории этого региона (северную и центральную) занимает лесоболотная зона, включающая крупнейшую в северном полушарии болотную систему – Большое Васюганское болото. К югу от лесоболотной зоны расположена лесостепная и степная зона, которые также характеризуются значительной заболоченностью и большим количеством мелководных водоёмов, расположенных как в бессточных областях (солёные озёра), так и в поймах рек (верхнего течения р. Иртыш и р. Обь, а также и их притоков).

Исходя из существующих представлений о формировании климата летом здесь должна господствовать циклоническая циркуляция. Однако, по наблюдениям последних двух десятилетий, обнаружено увеличение повторяемости меридиональных южных потоков [1–3]. Такие изменения синоптической ситуации приводят к формированию обширных областей с аномально теплым воздухом, что способствует развитию мощной кучево-дождевой облачности.

Для оценки повторяемости мезомасштабных конвективных систем над данным регионом произведён расчёт количества случаев МКС (фронтальных и внутримассовых), отобранных по спутниковым изображениям по данным видимых и ИК-каналов спектро радиометра радиометра MODIS, которые приходятся на ячейки $2^\circ \times 2^\circ$ по широте и долготе как. На основе произведённых расчётов были построены сглаженные распределения повторяемости (в % от общего количества) МКС различного генезиса (Рис. 8).

Согласно рис. 8, наибольшая повторяемость МКС наблюдается на северо-западной периферий Алтайских гор, Салаирским кряжем и Барабинской низменностью, а также Кулундинской и Ишимской равнинами. При этом, над юго-западом Томской области (Большим Васюганским болотом) отмечается «язык» повышенной повторяемости МКС. Однако, карта повторяемости МКС (Рис. 8) построена по данным только дневных пролётов спутников Terra и Aqua (околополуденные часы) и не учитывает МКС, формирующиеся и перемещающиеся в другое время суток.

На основе данных индексов конвективной неустойчивости K Index и Total Totals, полученных из реанализа ERA5 (ECMWF) с сервера Copernicus Climate Change Service [<https://cds.climate.copernicus.eu/>], был проведён анализ пространственной изменчивости

конвективной неустойчивости над Западной Сибирью. Отмечено, что в летние месяцы максимальная конвективная неустойчивость (максимальные значения K Index и Total Totals) отмечается над степной зоной юга Западной Сибири в приграничных районах России и Казахстана (Рис. 9).

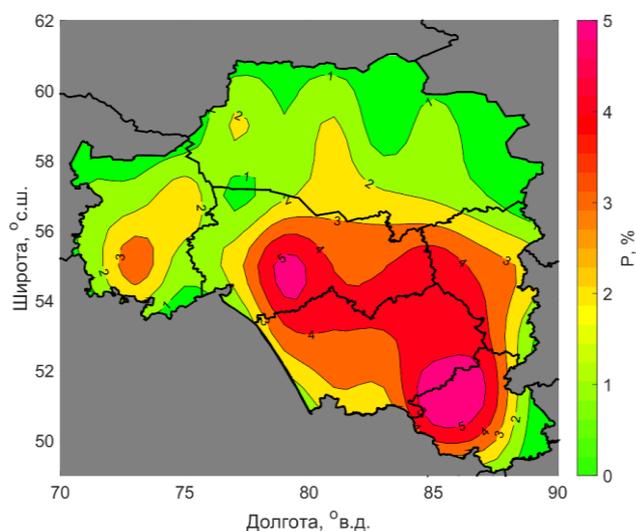


Рис. 8. Сглаженное распределение повторяемости МКС, как фронтального, так и внутримассового происхождения, на юге Западной Сибири.

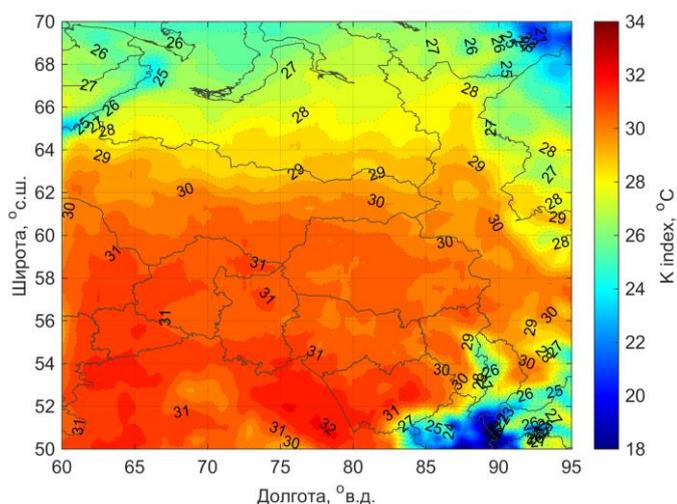


Рис. 9. Пространственное распределение средних арифметических значений K Index (≥ 75 -процентиля) за 2010–2020 гг. в 9:00 UTC (16:00 местного времени).

Для анализа повторяемости МКС над югом Западной Сибири, с учётом всего времени их существования был проведён анализ траекторий перемещения МКС, восстановленных по координатам связанных с ними разрядов молний по данным WWLLN (Рис. 10).

Согласно рис. 10, МКС также, как правило, образуются в степной зоне на юге региона и перемещаются с юго-запада на северо-восток. Такое направление перемещения МКС обусловлено как меридиональным переносом, связанным с выходом на юг Западной Сибири южных циклонов, так и наличием горных массивов на юго-востоке территории.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать следующий вывод. Основным очагом возникновения и поддержания мезомасштабных конвективных систем над

регионом исследования является степная зона юга Западной Сибири, на которой имеется большое количество сильно прогреваемых в тёплый период года мелководных водоёмов и, как следствие, отмечается высокая конвективная неустойчивость.

Предложена схема формирования МКС, состоящая из следующих основных этапов: а) над хорошо прогреваемыми в тёплый период года мелководными водоёмами происходит интенсивное испарение влаги; б) возникает и усиливается конвективная неустойчивость в атмосфере; в) образуются кучевые, а затем кучево-дождевые облака; г) формируются организованные скопления кучево-дождевых облаков – мезомасштабные конвективные системы.

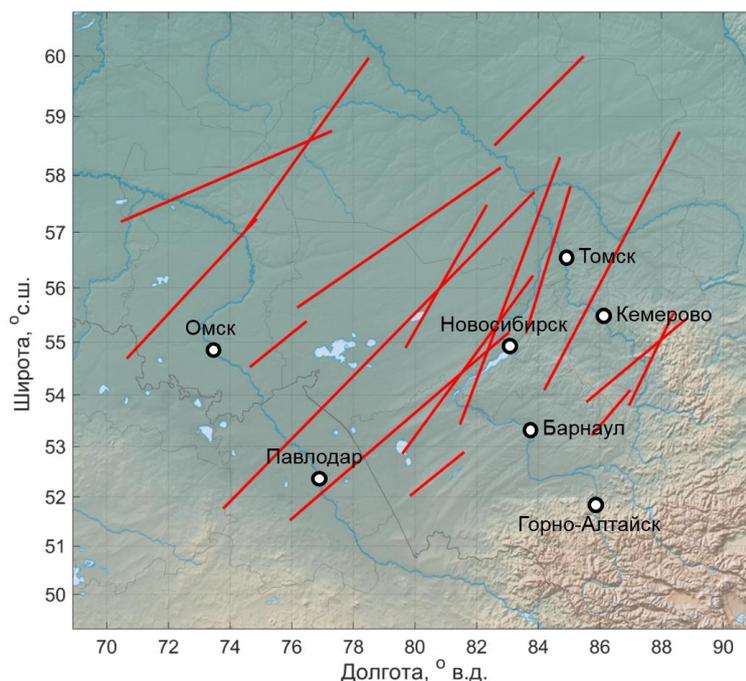


Рис. 10. Траектории перемещения серии МКС на юге Западной Сибири, восстановленные по данным грозовой активности.

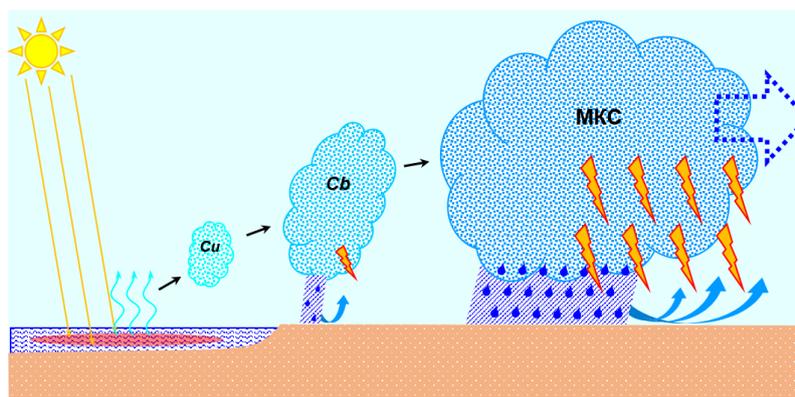


Рис. 11. Схема формирования МКС над перегретыми мелководными водоёмами и последующего образования, трансформации и объединения конвективной облачности (Cu, Cb – кучевая и кучево-дождевая).

Образовавшиеся над этой территорией МКС, затем смещаются на расстояния до 1000 км и более в северо-восточном направлении, которому способствуют как особенности региональной циркуляции атмосферы в тёплый период года, так и наличие

горных массивов на юго-востоке региона. При смещении МКС в более северные широты и их прохождении над болотными комплексами, над которыми в летний период отмечается значительное увеличение влагозапаса и конвективного потенциала атмосферы, может происходить «подпитка» МКС, что способствовать их дальнейшему перемещению и увеличению времени существования.

Заключение

Установлены условия образования и перемещения МКС над Западной Сибирью, а также получены оценки их характеристик и внутренней структуры, а также сопутствующих им неблагоприятных и опасных явлений по данным пассивного и активного зондирования в видимом, ИК- и радиодиапазонах, а также данным измерений атмосферно-электрических величин.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН, проект FWRG-2021-0001 (номер госрегистрации 121031300154-1).

Литература

1. Кононова Н.К. Особенности циркуляции атмосферы Северного полушария в конце XX – начале XXI века и их отражение в климате // Сложные системы. – 2014. – № 2 (11). – С. 13–41.
2. Chernokulsky A.V., Bulygina O.N., and Mokhov I.I. Recent variations of cloudiness over Russia from surface daytime observations // Environmental Research Letters. – 2011. V. 6, № 3. – P. 035202.
3. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Коршунова Н.Н., Курганский М.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Швець Н. В., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология. – 2022. – № 5. – С. 27–41.
4. Maddox R.A. Mesoscale convective complexes // Bull. of the Amer. Meteorol. Soc. – 1980. – V. 61. – P. 1374–1387.
5. Houze R.A. Jr. Mesoscale convective systems // Reviews of Geophysics. – 2004. – V. 42. – P. RG4003.
6. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы. – М.: Географический факультет МГУ, 2007. – 126 с.
7. Fritsch J.M., Kane R.J., Chelius C.H. The contribution of mesoscale convective weather systems to the warm season precipitation in the United States // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 1986. – V. 25. P. 1333–1345.
8. Velasco I., Fritsch J.M. Mesoscale convective complexes in the Americas // Journal of Geophysical Research. – 1987. – V. 93, No. D8, – P. 9561–9613.
9. McAnelly R.L., Cotton W.R. The precipitation life cycle of mesoscale convective complexes over the central United States // Monthly Weather Review. – 1989. – V. 117. – P. 784–808.
10. Augustine J.A., Howard K.W. Mesoscale convective complexes over the United States during 1986 and 1987 // Monthly Weather Review. – 1991. – V. 119. – P. 1575–1589.
11. Laing A.G., Fritsch J.M. The global population of mesoscale convective complexes // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1997. – V. 123. – P. 389–405.
12. Абдуллаев С.М., Желнин А. А., Ленская О. Ю. Структура мезомасштабных конвективных систем в Центральной России // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 1. – С. 20–32.
13. Быков А.В., Шихов А.Н. Прогноз мезомасштабных конвективных систем с применением глобальных и мезомасштабных гидродинамических моделей. –

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. – 2018. – Т. 15, № 2. – С. 213–224.

14. Спрыгин А.А. Параметры долгоживущих мощных конвективных структур на Европейской территории России и сопредельных территориях и возможности унификации их прогноза // Гидрометеорологические исследования и прогнозы, 2020, № 1(375), с. 21–47.

15. Chernokulsky A., Shikhov A., Yarinich Y., Sprygin A. An Empirical Relationship among Characteristics of Severe Convective Storms, Their Cloud-Top Properties and Environmental Parameters in Northern Eurasia // Atmosphere. – V. 14 (1). – P. 174

16. Кужевская И.В., Пустовалов К.Н., Шарапова А.А. Характеристики конвективных кластеров, восстановленные по данным инструментов зондирования ATOVS // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2018. – Т. 2. – С. 69–85.

17. Жукова В.А., Кошикова Т.С., Кужевская И.В. Оценка параметров мезомасштабных конвективных комплексов на основе спутниковых и аэрологических данных (Западная Сибирь) // Геосферные исследования/Geosphere Research. – 2019. – № 2. – С. 86–97.

18. Koshikova T.S., Pustovalov K.N., Zhukova V.A., Kuzhevskaya I.V., Nagorskiy P.M. The spatio-temporal distribution of mesoscale convective complexes over the south-east of Western Siberia // Геосферные исследования/Geosphere Research. – 2021. – №. 3. – P. 115–124.

19. Nagorskiy P.M., Zhukov D.F., Kartavykh M.S., Oglezneva M.V., Pustovalov K.N., Smirnov S.V. Properties and Structure of Mesoscale Convective Systems over Western Siberia According to Remote Observations // Russian Meteorology and Hydrology. – 2022. – V. 47, № 12. – P. 938–945.

20. Houze R. A. Jr. Cloud Dynamics. 2nd Edition. – Elsevier Inc, 2014. – 496 p.

21. Stolzenburg M., Rust W.D., Smull B.F., Marshall T.C. Electrical structure in thunderstorm convective regions. 1. Mesoscale convective systems // Journal of Geophysical Research. – 1998. – V. 103, № D12. – P. 14059–14078.

22. Евтушенко А.А., Мареев Е.А. О генерации слоев электрического заряда в мезомасштабных конвективных системах // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 45, № 2. – С. 255–265.

23. Бекряев В.И. Молнии, спрайты и джеты. – СПб: Изд-во РГГМУ, 2009. – 96 с.

24. Evtushenko A, Svechnikova E, Kudryavtsev A. Analysis of Sprite Activity in Middle Latitudes // Atmosphere. – 2024. – V. 15(2). – P. 169.

25. Горбатенко В.П., Кужевская И.В., Пустовалов К.Н., Чурсин В.В., Константинова Д.А. Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях изменяющегося климата Западной Сибири // Метеорология и гидрология. – 2020. – № 5. – С. 108–117.

26. Kuzhevskaya I.V., Volkova M.A., Nechepurenko O.E., Chursin V.V. A study of hailstorms in the South of Western Siberia // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – V. 698. – P. 1–7.

27. Харюткина Е. В., Логинов С. В., Морару Е. И., Пустовалов К. Н., Мартынова Ю. В. Динамика характеристик экстремальности климата и тенденции опасных метеорологических явлений на территории Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35, № 02. – С. 136–142.

28. Нагорский П.М., Морозов В.Н., Смирнов С.В., Пустовалов К.Н. Электродный слой в электрическом поле мощной конвективной облачности // Известия вузов. Радиофизика. – 2013. – Т. 56, № 11. – С. 853–863.

29. Пустовалов К.Н., Нагорский П.М. Основные типы вариаций электрического поля при прохождении кучево-дождевых облаков различного генезиса // Оптика атмосферы и океана, 2016. – Т. 29, № 8. – С. 647–653.

30. Пустовалов К.Н., Нагорский П.М. Сравнительный анализ электрического состояния приземного слоя при прохождении кучево-дождевых облаков в тёплый и холодный периоды года // Оптика атмосферы и океана, 2018. – Т. 31, № 6. – С. 451–455.
31. Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M. Response in the surface atmospheric electric field to the passage of isolated air mass cumulonimbus clouds // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2018. – V. 172. – P. 33–39.