

МЕТЕОРОЛОГИЯ

УДК 551.515.4

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МЕЗОМАСШТАБНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ И АЭРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

В.А. Жукова, Т.С. Кошикова, И.В. Кужевская

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия



Проведен анализ мезомасштабных конвективных кластеров (МКК) за период с 2008 по 2018 г. работы по наземным и спутниковым данным. Определены синоптические ситуации образования МКК и продуцирование опасных явлений, проведена оценка состояния атмосферы с помощью индексов неустойчивости KIND и LIFT. МКК формируется при средней и слабой степени неустойчивости атмосферы. Все МКК связаны с продуцированием грозы, доля ливней составляет 15% от общего числа случаев, сильного дождя – 1%, града – 7% и сильного ветра – 5%.

Ключевые слова: Западная Сибирь, мезомасштабный конвективный комплекс, спутниковая информация.

Введение

На фоне происходящих глобальных климатических изменений отмечается тенденция увеличения повторяемости конвективных облачных структур и сумм ливневых осадков на территории Западной Сибири, и роста ущерба от них [Алексеев и др., 2014]. Сохранение такой тенденции повторяемости развития мощной мезомасштабной конвекции приведет к дальнейшему увеличению повторяемости таких опасных метеорологических явлений, как град, интенсивные ливни, шквалы и др. Сильные ливневые дожди вызывают наводнения, размывают дороги, дамбы, в горных районах приводят к возникновению селей. Крупный град наносит ущерб сельскохозяйственным культурам, повреждает автомобили, крыши домов и т.д. Гроза приводит к повреждению работы электросетей, вызывает лесные и торфяные пожары. Шквалы и смерчи приносят значительные, часто катастрофические разрушения [Горбатенко, Константинова, 2009].

Согласно статистическим данным, в России 40% всех случаев опасных метеорологических явлений приходится на опасные явления (ОЯ), связанные с зонами образования активной конвекции. Основные трудности своевременного прогнозирования конвективной облачности и связанных с ней опасных метеорологических явлений обусловлены большой пространственной и временной изменчивостью облачности и сложностью усвоения информации о ее физических характеристиках в прогностических региональных мезомасштабных моделях [Пьянков, Шихов, 2014].

Задача усложняется, когда прогноз касается количественных показателей развития внутримассовой

конвекции – мощности и водности облачных ячеек, имеющих прямое отношение к оценке величины ожидаемых осадков. Качественный прогноз невозможен без как можно более точного диагноза ряда физических характеристик облачности. В этом случае, кроме стандартных методов, которые использует синоптик при составлении прогноза, необходима дополнительная информация метеорологических радиолокаторов, спутников или продуктов численного моделирования регионального масштаба [Кужевская, Пустовалов, Шаропова, 2018].

Необходимость применения данных дистанционного зондирования Земли при организации мониторинга и прогнозирования опасных природных явлений не вызывает сомнений. В последние годы их роль как источника информации об опасных природных явлениях неуклонно возрастает. Повышается оперативность доступа к данным, увеличивается число действующих на орбите спутниковых систем, их пространственное и временное разрешение. В настоящее время в России действуют несколько систем космического мониторинга опасных гидрометеорологических явлений как на федеральном уровне, так и в отдельных регионах. На основе их применения обнаруживаются признаки возникновения чрезвычайных ситуаций, ведется их мониторинг, оценивается ущерб [Асмус и др., 2008].

По мнению авторов [Purdom, 1976; Вельтищев, 1988], снимки с геостационарных спутников дают наилучшее представление об эволюции конвективных систем. Данные обычных наблюдений в свободной атмосфере (радиозондирования) не обеспечивают необходимого пространственно-временного разрешения для составления прогноза развития опасных явлений погоды. Наблюдения ведутся с по-

лярно-орбитальных и геостационарных метеорологических искусственных спутников Земли (МИСЗ). Полярно-орбитальные МИСЗ серии NOAA «Тетта» и «Аква» позволяют получать информацию о температуре атмосферы, концентрации водяного пара, радиационном балансе и других характеристиках атмосферы. С их помощью можно наблюдать мезомасштабные системы разных размеров с одной и той же точки обзора, проводить мониторинг и своевременно оповещать о зарождении и приближении коротко живущих циклонов макро- и мезомасштаба, создающих штормовые условия.

Хотя спутниковая информация в начале своего развития и носила, скорее, качественный характер, ее анализ показал, что в атмосфере Земли очень часто встречаются системы движений с горизонтальными масштабами порядка $10\text{--}10^2$ км, которые ранее ускользали из поля зрения метеорологов. Процессы подобного масштаба не улавливались существующей сетью измерений, особенно в свободной атмосфере, в отличие от движений синоптического масштаба. Идентификация конвективных движений на масштабах мезо- β (20–200 км) и мезо- α (>200 км) может способствовать повышению качества краткосрочного прогноза погоды, поскольку эти мезомасштабные структуры обладают характерным временем жизни – от нескольких часов до нескольких десятков часов.

Прогноз опасных конвективных явлений осложнен тем, что диаметр конвективной ячейки, способной продуцировать такие явления, составляет не более 10 км, а «время жизни» такой ячейки обычно не превышает 40–50 мин [Шметер, 1972; Мучник, 1974]. Опасные явления, сформировавшиеся в конвективной ячейке или в совокупности таких ячеек, проявляются локально и далеко не всегда фиксируются даже наблюдателями метеорологических станций, поскольку для исследуемого региона их сеть имеет недостаточное покрытие [Горбатенко и др., 2018].

Для прогноза МКК используется два основных подхода [Быков, Ветров, Калинин, 2017]: 1) расчет физико-статистических параметров (индексов) неустойчивости по выходным данным глобальных прогностических моделей; 2) прямое моделирование атмосферной конвекции мезомасштабными моделями с высоким пространственным разрешением. При этом наибольшую сложность представляет прогнозирование места и времени возникновения МКК и зон опасных явлений [Быков, Шихов, 2018].

Существует несколько мезомасштабных моделей атмосферы для анализа, прогноза формирования и эволюции МКК, а также интенсивности связанных с ним опасных явлений, но наилучшим качеством прогноза МКК в теплый период года обладает модель ПЛАВ (ПолуЛагранжева, основанная на уравнении абсолютного вихря), адаптированная для территории России, так как ошибки воспроизведения

синоптической ситуации данной моделью встречаются реже, чем у модели GFS. Совместно с этой моделью для синоптических ситуаций с незначительным динамическим фактором следует применять различные виды индексов плавучести LI (в особенности ML LI), индекс CAPE (энергии неустойчивости) [Быков, 2018].

Модель ПЛАВ разработана в Институте вычислительной математики РАН и применяется в Гидрометцентре России в качестве оперативной. Модель использует широтно-долготную сетку с горизонтальным разрешением в Северном полушарии по широте и долготе $0,18\times 0,225^\circ$ [Tolstykh et al., 2015; Толстых и др., 2017]. Прогноз рассчитывается на срок 10 сут, формат выходных данных – GRIB-1. Расчет прогноза осуществляется два раза в сутки. Выходная продукция модели доступна для распространения на ftp-серверы заинтересованных исследователей, в частности такой доступ есть и у Томского государственного университета.

Представление об устойчивости атмосферы можно получить как исходя из формы облачности, так и рассчитав индексы неустойчивости. В негидростатических мезомасштабных моделях для прогноза опасных метеорологических явлений погоды, связанных с конвекцией, используются количественные значения индексов, характеризующих конвекцию по ряду параметров [Schulz, 1989; Johns, Doswell, 1992]. Индексы неустойчивости традиционно рассчитываются на основе данных радиозондирования и данных метеорологических характеристик на разных изобарических поверхностях. Такие индексы, как LIFT (различие температуры окружающей среды и частицы, поднимающейся с уровня 500 м и 850 гПа), TOTL (комплексная характеристика статической стабильности и влажности в слое 850–500 гПа) и KIND (комплексная характеристика статической стабильности и влажности в слое 850–700 гПа), можно отнести к наиболее часто используемым в различных исследованиях.

В настоящее время при разработке современных методов прогноза гроз, града, шквалов, смерчей используется более 10 параметров состояния атмосферы, рассчитанных на основе аэрологического зондирования [Ленская, 2007; Васильев, Алексеева, Песков, 2009; Горбатенко и др., 2011; Губенко, Рубинштейн, 2014; Быков и др., 2017]. При развитии в атмосфере глубокой конвекции значения индексов достигают значений, позволяющих судить о развитии того или иного опасного конвективного явления с определенной вероятностью. В результате предварительных исследований [Горбатенко и др., 2015, 2016] было получено, что значения индексов KIND и LIFT (табл. 1) наиболее перспективны для разработки методов прогноза грозы над Сибирью. Эти индексы также наиболее востребованы на практике при прогнозе гроз в других регионах [Горбатенко и др., 2018].

Поскольку МКК образуется в результате перегрева отдельных масс воздуха при неустойчивой стратификации атмосферы в ее нижних слоях, то над сушей наиболее благоприятные условия для его возникновения создаются в теплую половину года в областях пониженного давления атмосферы. От-

дельные перегретые массы воздуха при таких условиях начинают ускоренно перемещаться по вертикали вверх. Сначала подъем массы ненасыщенного воздуха происходит практически сухоадиабатически, но на уровне конденсации воздух достигает состояния насыщения.

Таблица 1

Индексы неустойчивости, применяемые при оценке степени устойчивости атмосферы

Table 1

Instability index for assessment of the atmosphere state

Описание индексов (единица измерения)	Название, аббревиатура	Формула для расчета
Индексы, в расчете которых используется только температура, °C	Lifted index, LIFT	$LIFT = T_{500} - T_{parcel1}$
Индексы, в расчете которых используется температура и характеристики влажности, °C	K-index, KIND	$KIND = (T_{850} - T_{500}) + TD_{850} - (T_{700} - TD_{700})$

Примечание: T_{850} , T_{700} , T_{500} – температура окружающей среды на уровнях 850, 700 и 500 гПа соответственно; TD_{850} , TD_{700} – температура точки росы на уровнях 850 и 700 гПа соответственно; $T_{parcel1}$ – температура частицы на уровне 500 гПа, поднимающейся с уровня 500 м над земной поверхностью при среднем давлении, температуре и точке росы.

Note: T_{850} , T_{700} , T_{500} – accordingly, the ambient temperature at levels 850, 700 и 500 гПа; TD_{850} , TD_{700} – accordingly, dew point temperature levels 850 и 700 гПа; $T_{parcel1}$ – temperature of particle on levels 500 гПа, rising from level 500 м above the earth's surface at medium pressure, temperature and dew point.

Выше уровня конденсации воздух поднимается влажноадиабатически. Благодаря понижению температуры происходят конденсация водяного пара и образование конвективной облачности, при развитии которой образуется МКК. Скорость восходящих потоков, вертикальная мощность и водность образующегося мезомасштабного конвективного комплекса зависят от степени неустойчивости атмосферы, а реализацию таких опасных явлений погоды, как, например, шквал, можно рассматривать как результат перехода энергии неустойчивости воздушной массы в кинетическую энергию. На этом основаны практически все существующие в настоящее время методы прогноза опасных явлений погоды, обусловленные конвекцией [Горбатенко и др., 2011]. МКК, являясь объектом мезомасштаба, попадает в подсеточный режим модели ПЛИАВ с широтно-долготной сеткой $0,18 \times 0,225^\circ$. Следовательно, является трудно прогнозируемым объектом для модели, но при этом в начале развития МКК можно зафиксировать на спутниковых изображениях и дать прогноз его развития и движения. По результатам авторов [Кужевская и др., 2018], на территории юга Западной Сибири образуется 44% всех мезовихрей и МКК на исследуемой территории, и более чем в 60% случаев формирование сильных осадков, достигших критериев ОЯ, наблюдается на мезомасштабных процессах. Так как территория Западной Сибири не предрасположена к образованию таких мезомасштабных комплексов, но при этом частота появления МКК в последние годы увеличивается, изучение МКК и его прогноз являются актуальными.

Целью настоящего исследования являются анализ мезомасштабных конвективных кластеров, их возникновение, развитие, а также анализ индекса неустойчивости в дни с МКК.

Материалы и методы исследования

Для оценки повторяемости параметров МКК на юго-востоке Западной Сибири за теплый период (апрель–сентябрь) 2008–2018 гг., использовались метод визуального дешифрирования облачности, данные радиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Спектрорадиометр MODIS является одним из ключевых приборов на спутниках «Terra» и «Aqua» [EOSDIS Worldview]. Космические аппараты «Terra» (EOS-AM1) и «Aqua» (EOS-AM1) являются частью комплексной программы NASA EOS (Earth Observing System), направленной на исследование Земли и состоящей из трех специализированных спутников «Terra», «Aqua» и «Aqua», предназначенных для исследования суши, воды и атмосферы соответственно. Спектрорадиометр MODIS имеет 36 каналов и позволяет производить регулярную съемку территории с пространственным разрешением от 250 до 1 000 м [Успенский, Кухарский, Успенский, 2015].

Информационной базой для определения явлений, наблюдавшихся на исследуемой территории, на момент прохождения МКК послужили журналы штормовых оповещений за период с 2015 по 2018 г., по данным 127 метеорологических станций Западно-

Сибирского УГМС. Для определения явлений принимались станции, находящиеся в точке расположения МКК, и близлежащие станции в радиусе влияния 50 км в течение суток, в которые фиксировался МКК.

В ходе работы был составлен каталог случаев МКК по данным наземных и спутниковых приборов; проведена оценка повторяемости возникновения МКК и неустойчивости атмосферы; были определены синоптические ситуации образования МКК и продуцирование ими опасных явлений.

Область исследования условно располагается между 50 и 60° с.ш. и 70 и 90° в.д., в которую входят

пять территориально-административных единиц, расположенных на юго-востоке Западной Сибири: Томская, Новосибирская и Кемеровская области, Республика Алтай и Алтайский край. На карте-схеме территории исследования (рис. 1) пунктиром выделена область части болотного комплекса Западной Сибири, включая Большое Васюганское болото. Температурно-влажностные характеристики Васюганского болота, которые влияют на тепловой баланс территории, во многом сравнимы с теми же значениями, которые характерны для такого же распределения над водной поверхностью.

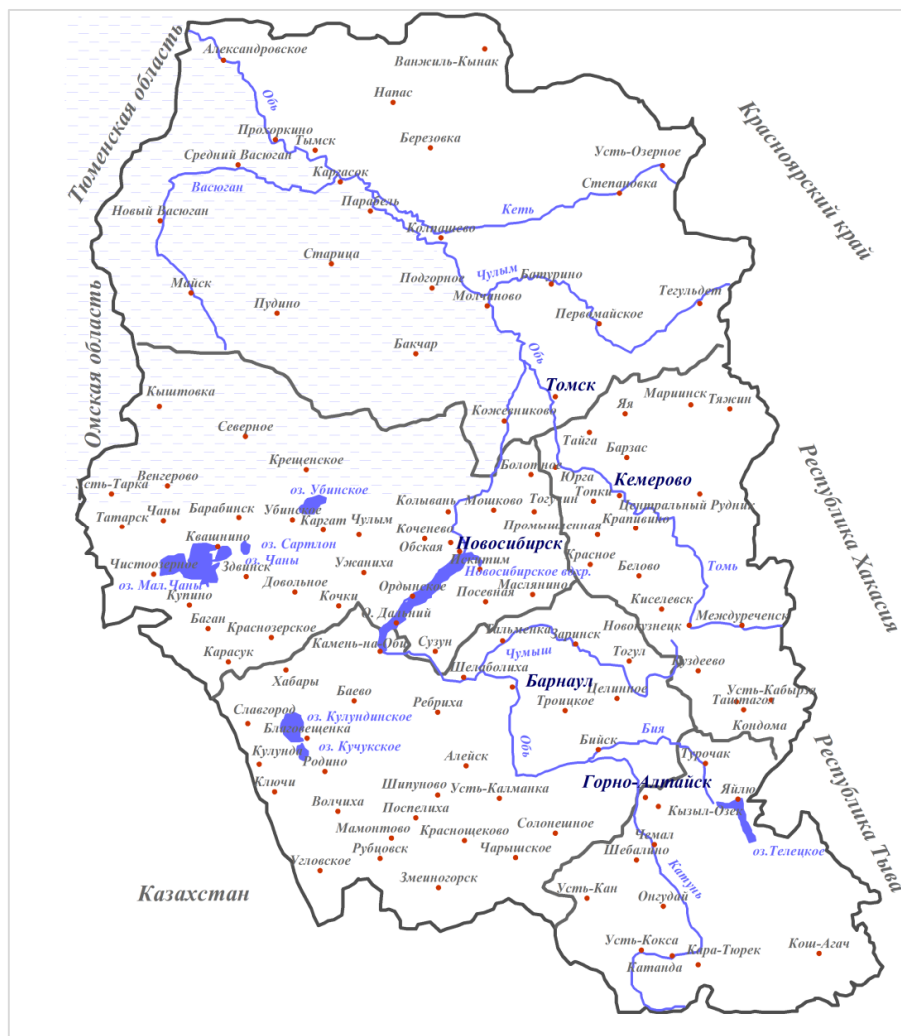


Рис. 1. Территория исследования

Fig. 1. Area under study

В качестве объекта исследования рассматриваются мезомасштабные конвективные комплексы. Согласно определению авторов [Пьянков, Шихов, 2014], МКК – это массивы кучево-дождевой облачности квазиокруглой формы диаметром более 200 км и площадью порядка 100 тыс. км².

МКК в классификации Р.А. Мэддокса [Андерсон, Вельтицев, 1973] выделяется как отдельная составляющая и определяется как комплекс кучево-дождевых облаков, инфракрасные изображения которых имеют: площадь непрерывного облачного покрова с температурой верхней границы ниже –32°C

составляет не менее 10^5 км^2 ; площадь внутреннего района с температурой верхней границы ниже -52°C не менее $5 \times 10^4 \text{ км}^2$; в период максимального развития отношение малой оси облачной системы к большой не менее 7/10. Жизненный цикл МКК составляет около 16 ч. МКК развиваются, преимущественно, в вечерние и ночные часы. Хотя первые грозы развиваются во вторую половину дня, организованный мезомасштабный комплекс появляется только к вечеру. Максимального размера и интенсивности МКК достигает к полуночи и продолжает давать осадки до утра.

В работе за МКК принимался массив кучево-дождевой облачности диаметром 50 км и более, исходя из того, что территория исследования не предназначена к образованию МКК, и даже такой небольшой по размерам облачный массив способен

генерировать опасные явления (гроза, град, сильные и продолжительные ливни). Характерной особенностью МКК является большая продолжительность существования (около 10 ч), но его влияние на условия погоды может осуществляться до 24–36 ч. МКК визуально дешифрировались на RGB композите, который включает в себя три канала: 0,65 мкм; 0,45 мкм; 3,5 мкм.

В работе мезомасштабные комплексы рассматриваются как на фронтальных, так и на внутримассовых системах. На рисунке 2 представлены примеры образования МКК в облачности со стадией развития «след циклона» и в составе облачности холодного фронта. Представленные спутниковые снимки были составлены в программе BEAM VISAT 5.0 с помощью RGB композита.

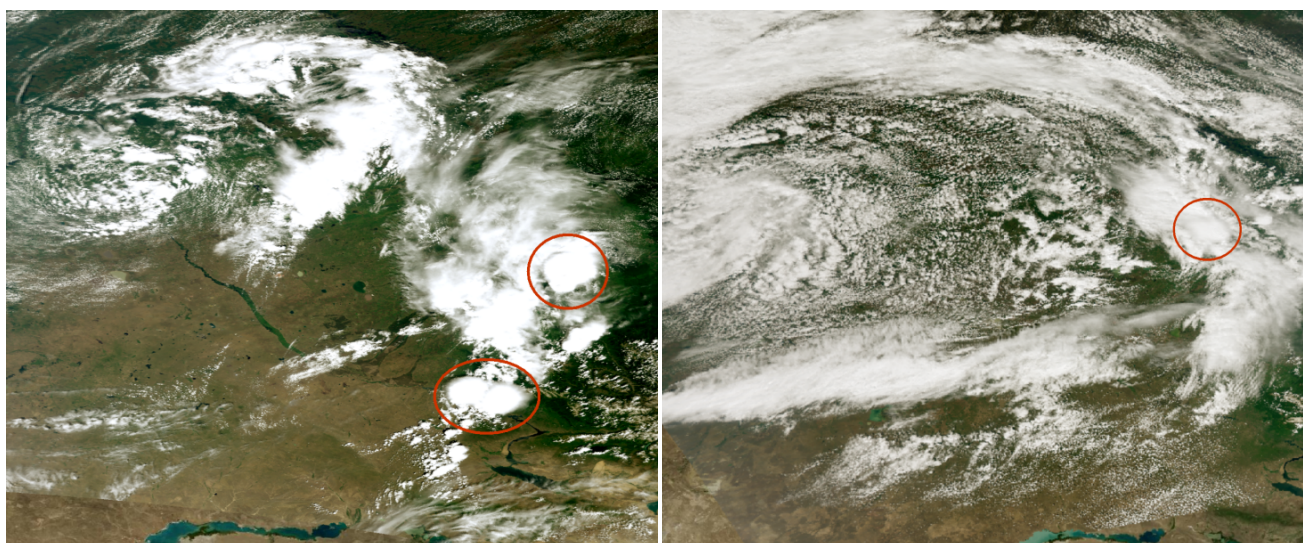


Рис. 2. Примеры образования МКК на внутримассовых облачных системах (справа; 22 июня 2017 г., время пролета 5:45 UTC) и фронтальных облачных системах (слева; 16 июня 2018 г., время пролета 7:40 UTC)

Fig. 2. Example of mesoscale convective system (red circles) on the air-mass (right) on June, 22, 2017 Time 5:45 UTC and along frontal (left) systems on June, 16, 2018 Time 7:40 UTC

Для характеристики неустойчивости атмосферы в дни наличия МКК использовались результаты аэрологического зондирования на пяти станциях юго-востока Западной Сибири (Александровское, Барабинск, Барнаул, Колпашево, Новосибирск) за период 2015–2018 гг. [Зондирование атмосферы]. Зондирование производится два раза в сутки: в 00.00 и 12.00 по всемирному скоординированному времени. Результаты аэрологического зондирования содержат дискретную информацию о значениях температуры и влажности воздуха и характеристиках ветра во всей толще слоя атмосферы, в котором развивается конвекция над Западной Сибирью, а именно до высоты 10–15 км. Для характеристики конвекции использовались индексы, рассчитываемые по данным аэрологического зондирования, которые широко ис-

пользуются для прогноза развития грозы, града, шквала и других опасных явлений погоды [Andersson et al., 1989; Schulz, 1989; Kunz, 2007]. Это индекс, описывающий скрытую нестабильность атмосферы – LIFT, и индекс, в котором кроме стратификации температуры присутствуют характеристики влажности – KIND.

В работе применялась классификация состояний атмосферы, приведенная в табл. 2 [Andersson et al., 1989; Горбатенко и др., 2011].

Результаты

В результате визуального дешифрирования МКК за период 2008–2018 гг. получена повторяемость дней с их наличием (рис. 3).

Таблица 2

Интервалы значений индексов для различных состояний атмосферы

Table 2

Thresholds of instability indices for different state of the atmosphere

Состояние атмосферы	Явления погоды	Индексы	
		LIFT	KIND
Слабо неустойчива	Наличие ливней	$-3 \div 0$	$25 \div 30$
Неустойчива	Наличие ливней и отдельных гроз	$-6 \div -3$	$30 \div 35$
Сильно неустойчива	На всей территории регистрируются грозы	$-9 \div -6$	$35 \div 40$
Крайне неустойчива	Гроза, град	< -9	> 40

Суммарное количество дней с МКК за 11 лет составило 230 дней. В среднем за 11 лет был зафиксирован 21 день с наличием МКК в теплый период (с апреля по сентябрь). Максимум повторяемости дней с МКК наблюдался в 2016 г. и составил 31 день. Необходимо отметить, что 2016 г. был аномальным по многим метеорологическим параметрам. Так, например, летом 2016 г. многократно регистрировались новые суточные максимумы температуры воздуха, нормы среднемесячной температуры для некоторых станций Западной Сибири были превышены на 3–8°. Атмосферные осадки на исследуемой территории преимущественно были в норме, хотя местами превысили ее в 1,5–2 раза [МетеоИнфо].

Минимальное количество дней с МКК отмечалось в 2010 г. – 12 дней. Этот факт можно объяснить тем, что над европейской территорией России в 2010 г. установился аномально долгий блокирующий антициклон, просуществовавший почти 2 мес. Поэтому для Западной Сибири синоптические условия формировались под влиянием быстро смещающихся циклонов, частым выносом холодных воздушных масс, что мало способствовало возникновению МКК.

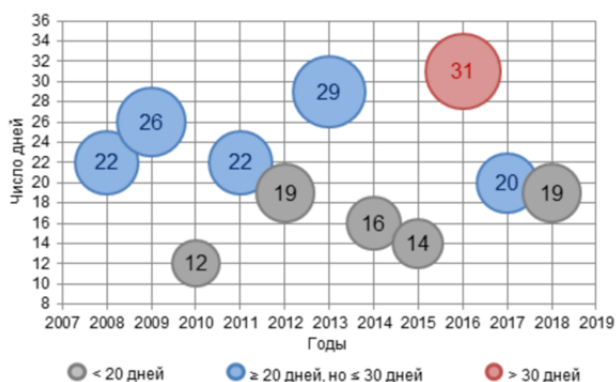


Рис. 3. Временной ход повторяемости МКК за теплый период с 2008 по 2018 г. на юго-востоке Западной Сибири

Fig. 3. The number of days with MCS in the south-eastern part of Western Siberia during warm season 2008–2018

С помощью индексов неустойчивости KIND и LIFT была проведена оценка степени устойчивости атмосферы в дни формирования и прохождения МКК в районе между 50 и 60° с.ш. и 70 и 90° в.д. В табл. 3 приведена повторяемость условий атмосферы на основе граничных условий из табл. 2.

Таблица 3

Значения индексов для различных состояний атмосферы

Table 3

Frequency of threshold value of indices for different state of the atmosphere

Состояние атмосферы	Повторяемость для индексов, %	
	LIFT	KIND
Слабо неустойчива	53	30
Неустойчива	19	51
Сильно неустойчива	–	6
Крайне неустойчива	–	–
Вне диапазона	28	13

Оценка неустойчивости атмосферы в дни с МКК показала, что атмосфера в 53% случаев слабо неустойчива в соответствии с интерпретацией индекса неустойчивости LIFT. Подобная неустойчивость характерна только для условий образования ливней по территории. При анализе состояния атмосферы с использованием KIND в 51% случаев, это состояние характеризуется как неустойчивое. Как известно, KIND характеризует степень конвективной неустойчивости воздушной массы, которая необходима для возникновения и развития гроз, его расчет основан на вертикальном градиенте температуры, влажности воздуха в нижней тропосфере, а также учитывает вертикальную протяженность влажного слоя воздуха. Следовательно, минимум в 51% случаев образования МКК могло сопровождаться грозой.

При оценке неустойчивости атмосферы в дни с МКК получено, что если руководствоваться пороговыми значениями авторов [Andersson et al., 1989; Горбатенко и др., 2011], то получается, что МКК в районе исследования были сформированы при средней и слабой степени неустойчивости. На основе выбранной классификации не было отмечено попа-

дания в градации «сильно неустойчива» и «крайне неустойчива», при этом были зафиксированы значения индексов неустойчивости, которые не попали в эти градации. Возможно, это связано с тем, что время проведения аэрологическое зондирование не совпадает со временем максимально возможного развития конвективных процессов на исследуемой территории.

При определении синоптических ситуаций образования МКК и продуцирования ими опасных явлений был взят доступный для исследования теплый период с 2015 по 2018 г. В ходе работы все случаи наблюдения МКК были разбиты на шесть синоптических ситуаций. При возникновении на фронталь-

ных системах мезомасштабные комплексы встречались в составе облачности холодного фронта, фронта окклюзии и на полосах кучево-дождевой облачности вторжения в окклюзию. На внутримассовых образованиях появление МКК отмечалось в тыловой части облачного вихря, в стадии развития облачного вихря «следа циклона» или в составе мезомасштабного вихря.

Для выявления закономерности частоты появления МКК на той или иной синоптической ситуации, были построены диаграммы распределения, показывающие процентное соотношение синоптических ситуаций к общему числу дней с МКК за каждый год в отдельности (рис. 4).



Рис. 4. Синоптические условия образования МКК

Fig. 4. Synoptic conditions of MSCs formation

В 2015 г. МКК наиболее часто образовывались на фронтальных системах, преимущественно в составе облачности холодных фронтов, на случаи внутримассового характера приходится наименьший процент – 21%. В теплый период 2015 г. преобладал зональный перенос, и с точки зрения климатологии этот год можно считать «нормальным» для рассмотренной территории.

В 2016 г. наблюдалось увеличение повторяемости мезомасштабных процессов. Это объясняется аномалией погодных условий, так как лето 2016 г. в России стало самым жарким в истории регулярных метеонаблюдений, а июнь этого же года – вторым самым теплым в истории метеонаблюдений в Сибирском федеральном округе, уступив только июню 2012 г. [МетеоИнфо]. Кроме того, атмосферная циркуляция тем летом характеризовалась преобладанием меридиональных переносов над Западной Сибирью. Среди внутримассовых процессов МКК преимущественно образовывались на месте облачного вихря в стадии развития «след циклона».

Для 2017 г. характерно образование МКК как при фронтальных, так и внутримассовых процессах в равном соотношении. Этот факт можно объяснить тем, что июнь 2017 г. в Сибирском федеральном

округе стал вторым самым жарким в истории метеонаблюдений (еще теплее был только июнь 2012 г.), а в июле и августе на смену жаре пришли рекордно низкие температуры [МетеоИнфо]. В 2017 г. зафиксирован единичный случай за 4 года, когда МКК наблюдался в составе мезовихря.

Очень похожая ситуация с 2015 г. сложилась и в 2018 г. МКК в 84% случаев образовывался на фронтальных системах, но здесь уже преимущественно в составе облачности фронта окклюзии (42%). Прошедший июнь на территории Сибири стал самым жарким в истории регулярных метеонаблюдений в стране, т.е. с 1891 г.

Доля образования МКК на холодном фронте составляет не менее 1/3 всех событий, и в периоды развития аномальной погоды она заметно уменьшается. Совокупная доля окклюдирования во многом зависит от аномалий и к концу исследуемого периода составляет преобладающую часть процессов, образованных на фронте окклюзии. Возникновение МКК на стадии развития облачного вихря «след циклона» и на мезомасштабном вихре вызывают большую опасность, чем на фронтальных системах, так как эти ситуации считаются малодоступными для прогнозирования погодных условий.

На основе просмотра штормовых оповещений, были выявлены дни с наличием явлений по градации *опасные явления* и *комплекс метеорологических явлений* (КМЯ). Комплекс метеорологических явлений определяется как сочетание двух и более одновременно наблюдающихся метеорологических явлений, каждое из которых по интенсивности (силе) не достигает критериев ОЯ, но близко к ним и наносит ущерб не меньших размеров, чем ОЯ.

Рассматривалась зависимость наличия как ОЯ, так и КМЯ от синоптической ситуации, зафиксированных на момент прохождения МКК (рис. 5). ОЯ были характерны для всех дней с наличием МКК, образующихся на рассмотренных синоптических ситуациях.

Намного реже встречается КМЯ, при этом их большая частота повторений приходится на фронт

окклюзии и холодный фронт. В кучево-дождевых полосах вторжения в окклюзию и во время прохождения мезовихря КМЯ не было зафиксировано. Выявлены два дня, когда на метеорологических станциях не было зафиксировано опасных явлений, и три дня, когда метеорологические станции отсутствовали в районе образования МКК, что говорит о редкой сети наблюдений.

Далее мы более подробно рассмотрим, сочетание каких именно метеорологических явлений достигло критериев ОЯ и КМЯ в момент прохождения МКК. Перечень и критерии опасных природных явлений, наблюдавшихся при развитии мезомасштабного конвективного комплекса и действующие на территории деятельности ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС», приведены в табл. 4 [Перечень и критерии...].

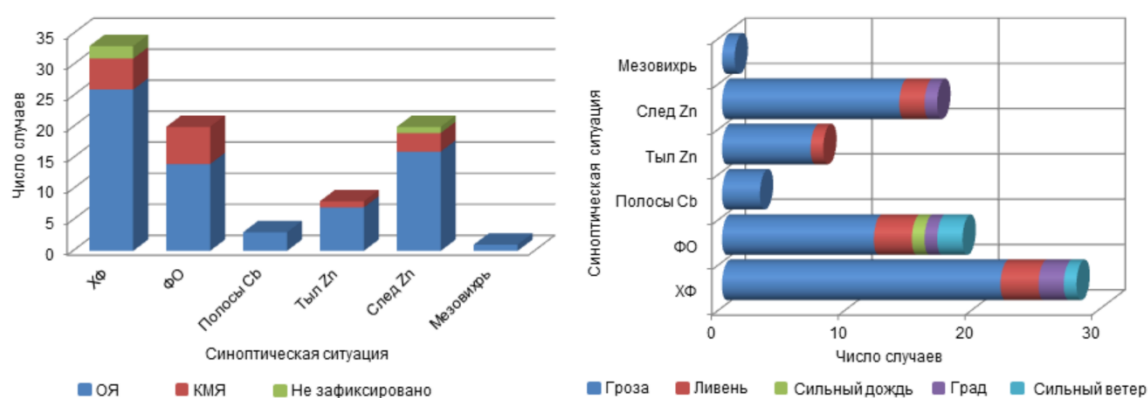


Рис. 5. Суммарная повторяемость ОЯ и КМЯ в зависимости от синоптической ситуации (слева), наблюдаемые ОЯ и КМЯ (справа)

Fig. 5. Total frequency of hazardous phenomena and complex of hazardous phenomena depending on a synoptic condition (left), observed by hazardous phenomena (right)

Таблица 4

Перечень и критерии гидрометеорологических явлений, сочетания которых образуют ОЯ

Table 4

The list and criteria of the weather events forming hazardous phenomena

Гроза	Наличие явления
Ливень	Не менее 20 мм за период не более 1 ч
Сильный дождь (дождь со снегом, мокрый снег, снег с дождем)	Не менее 35 мм (в горных и ливнеопасных районах – не менее 20 мм) за период не более 12 ч
Град	Диаметр 6–19 мм
Сильный ветер	Скорость ветра (включая порывы) 20–24 м/с

В 100% рассматриваемых нами случаях образования МКК была зафиксирована гроза (см. рис. 5). На основании этого мы можем утверждать, что вне зависимости от формирования МКК на фронтальной системе или на внутримассовой, при возникновении мезомасштабного комплекса будут возникать грозо-

вые очаги. И так как все МКК за 4 года сопровождалась грозой, далее в описании все явления идут в сочетании с грозой. «Ливень» наблюдается практически во всех синоптических ситуациях формирования МКК, за исключением мезовихря и кучево-дождевых полос вторжения в окклюзию, но лишь в

15% сумма выпавших при этом осадков достигает критериев ОЯ. В еще более меньшей доле (1%) сумма выпавших осадков достигала критерия «Сильный дождь». Град при прохождении МКК фиксировался в 7% дней, из них 2% приходится на синоптическую ситуацию «след циклона», что подтверждает ее опасность, особенно при учете слабого прогноза этого мезомасштабного образования.

Заключение

За теплый период с 2008 по 2018 г. на территории юго-востока Западной Сибири суммарное количество дней с МКК составило 230 дней. Из них максимум повторяемости дней с МКК наблюдался в 2016 г. (31 день). Оценка неустойчивости атмосферы в дни с МКК показала, что по принятой классификации индексов неустойчивости, в 72% (LIFT) и в 81% (KIND) случаев атмосферу можно характеризовать как слабо неустойчивую или неустойчивую. При подобном состоянии неустойчивости атмосферы вероятно образованиеливней и отдельных гроз по территории.

На основе просмотра штормовых оповещений ОЯ выявлено, что во все дни с наличием МКК была за-

фиксирована гроза. На основании этого мы можем утверждать, что вне зависимости от синоптических условий образования МКК, будь то фронтальная система или внутримассовая ситуация, при их развитии будут возникать грозовые очаги. Оценка неустойчивости атмосферы в соответствии с принятой классификацией сильно занижает нам вероятность возникновения грозы, по крайней мере, в случае формирования МКК.

При сопоставлении синоптических ситуаций с возникновением МКК, доля их образования на холодном фронте составляет не менее 1/3 всех событий, а в периоды развития мощных меридиональных переносов эта доля заметно уменьшается. Совокупная доля вклада в частоту формирования МКК процессов окклюдирования во многом зависит от аномалий и к концу исследуемого периода составляет преобладающую часть процессов, образованных на фронте окклюзии. Процессы, которые формируются в стадии развития облачного вихря «след циклона» или на мезомасштабном вихре, вызывают большую опасность, чем процессы, формируемые на фронтальных системах, так как они менее доступны для прогнозирования.

ЛИТЕРАТУРА

- Алексеев Г.В., Анисимов О.А., Ашик И.М. и др. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М. : Росгидромет, 2014. 1008 с.
- Андерсон Р.К., Вельтищев Н.Ф. Использование изображений со спутников в анализе и прогнозе погоды. Техническая записка ВМО № 124. М. : Изд-во ВМО, 1973. 275 с.
- Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Милехин О.Е., Соловьев В.И., Успенский А.Б. Использование спутниковых данных ДЗЗ для решения задач гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды // Вопросы электромеханики. Труды ВНИЭМ. 2008. Т. 105. С. 6–16.
- Быков А.В. Моделирование и прогноз опасных метеорологических явлений конвективного происхождения на Урале. Пермь, 2018. 151 с.
- Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А. Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 101–119.
- 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.
- Васильев Е.В., Алексеева А.А., Песков Б.Е. Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2009. № 1. С. 5–15.
- Вельтищев Н.Ф. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование. Сборник лекций : пособие для самостоятельной работы студентов. Л. : Гидрометеиздат, 1988. 136 с.
- Горбатенко В.П., Константинова Д.А. Конвекция в атмосфере над юго-востоком Западной Сибири // Оптика атмосферы океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 17–21.
- Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Золотухина О.И., Тунаев Е.Л. Термодинамические условия формирования мезомасштабной конвекции в атмосфере Западной Сибири // Известия вузов. Физика. 2011. Т. 54, № 11–3. С. 148–155.
- Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Нечепуренко О.Е. Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектро радиометра MODIS в дни с грозами, над территорией Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2015. № 5. С. 10–19.
- Горбатенко В.П., Нечепуренко О.Е., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю. Верификация параметров неустойчивости атмосферы, восстановленных по данным спектро радиометра MODIS/Terra данными аэрологического зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 07. С. 603–607.
- Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Севастьянов В.В., Нечепуренко О.Е. Индексы неустойчивости атмосферы и их пороговые значения, оптимальные для прогноза гроз над Сибирью // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 44–59.
- Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Пример сравнения индексов неустойчивости средней тропосферы в прогностической модели с информацией о грозовой активности // Метеорология и гидрология. 2014. № 5. С. 40–53.
- Кужевская И.В., Пустовалов К.Н., Шарапова А.А. Характеристики конвективных кластеров, восстановленные по данным инструментов зондирования ATOVS // Фундаментальная и прикладная климатология. М. : Изд-во ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 2018. Т. 2. С. 23.

Ленская О.Ю. Методические вопросы использования спутниковой и радиолокационной информации в мезомасштабном прогнозе (на примере опасных явлений погоды в Москве 24 июля 2001 г.) // Вестник Челябинского государственного университета. 2007. № 6. С. 66–79.

Мучник В.М. Физика грозы. Л. : Гидрометеиздат, 1974. 351 с.

Пьянков С.В., Шихов А.Н. Опасные гидрометеорологические явления: режим, мониторинг, прогноз. Пермь, 2014. 248 с.

Толстых М.А., Шашкин В.В., Фадеев Р.Ю., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Богословский Н.Н., Гойман Г.С., Махнорылова С.В., Юрова А.Ю. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. М. : Триада-ЛТД, 2017. 166 с.

Успенский А.Б., Кухарский А.В., Успенский С.А. Валидация результатов спутникового мониторинга температуры поверхности суши // Метеорология и гидрометеорология. 2015. № 2. С. 81–95.

Шметер С.М. Физика конвективных облаков. Л. : Гидрометеиздат, 1972. 232 с.

Andersson T., Andersson M., Jacobsson C., Nilsson S. Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in Southern Sweden // Meteorol. Mag. 1989. V. 116. P. 141–146.

Johns R.H., Doswell C.A. Severe local storms forecasting. Wea. Forecasting. 1992. P. 558–612.

Kunz M. The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2007. V. 7. P. 327–342.

Tolstykh M.A., Volodin E.M., Kostykin S.V., Fadeev R.Y., Shashkin V.V., Bogoslovskii N.N., Vilfand R.M., Kiktev D.B., Krasjuk T.V., Mizyak V.G., Shlyayeva A.V., Geleyn J.-F., Ezau I.N., Yurova A.Y. Development of the multiscale version of the SL-*AV* global atmosphere model // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. V. 40 (6). P. 374–382.

Purdom J.F.W. Some uses of high resolution GOES imagery in the mesoscale forecasting of convection and its behavior // Mon. Wea. Rev. 1976. V. 104. P. 1474–1483.

Schulz P. Relationships of several stability indices to convective weather events in northeast Colorado // Wea. Forecasting. 1989. No 4. P. 73–80.

Перечень и критерии гидрометеорологических явлений, сочетания которых образуют ОЯ. URL: <http://www.meteo-ns.ru/pages/115>

EOSDIS Worldview. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>

Зондирование атмосферы. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

МетеоИнфо. URL: <https://meteoinfo.ru/climat-tabl3>

Авторы:

Жукова Вера Андреевна, магистрант, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: jukowa.vera2017@yandex.ru

Кошикова Татьяна Сергеевна, магистрант, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: tkoshikova@gmail.com

Кужевская Ирина Валерьевна, кандидат географических наук, доцент, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: ivk@ggf.tsu.ru

Geosphere Research, 2019, 2, 86–97. DOI: 10.17223/25421379/11/6

V.A. Zhukova, T.S. Koshikova, I.V. Kuzhevskaya

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

ASSESSMENT OF PARAMETERS OF MESOSCALE CONVECTIVE SYSTEMS BASED ON SATELLITE AND UPPER-AIR SOUNDING DATABASE

Using by ground-based and satellite tools, an analysis of mesoscale convective systems (MCSs) has been carried out. In the course of the study, we assessed a repeatability for the warm season (April to September) for 2008–2018. Within warm season of 2015–2018, the synoptic situations favorable to formation of MCSs which produced hazardous phenomena has been determined. To estimate of atmospheric stability we applied K-index and Lifted-index. On the basis of MatLab calculation method the linear dimensions of MCSs has been defined. The method used is visual interpretation of clouds to assess the repeatability and parameters of MCSs in the south-eastern part of Western Siberia based on RGB composite imagery (0.65; 0.45; 0.35 μm) using MODIS data. The study area is limited to 50 and 60 °N and 70 and 90 °E, which includes five administrative units geographically located in the West Siberia: Tomsk Oblast, Novosibirsk Oblast, Kemerovo Oblast, The Altai Republic and Altai Krai. The object of study is considered the mesoscale convective system (MCS), in the paper is classified as a complex of Cumulonimbus clouds with a diameter of 50 km and more. It is important to note that the study area is not predisposed to the MCS formation, and even such a small cloud cluster is capable of generating hazardous phenomena such as thunderstorms, hail, severe and prolonged downpours. A specific feature of the MCSs is a long period of existence (about 10 hours), but its effect on weather conditions track up to 24–36 hours. To characterize the atmospheric stability on days with MCSs we used measurements taken by five upper-air stations (Aleksandrovskoe, Barabinsk, Barnaul, Kolpashevo, Novosibirsk) at 0000 and 1200 UTC from 2015 to 2018. The results of upper-air sounding accommodate discrete information about the values of air temperature and humidity and wind characteristics within the entire thickness of the atmosphere, in which convection over Western Siberia may develops, namely up to 10–15 km. As convection parameters, we applied a stability indices that are widely utilize to forecast the thunderstorm/hail/squall development etc. Thus the Lifted-index describes the latent instability of the atmosphere whereas a calculation of K-index based on the vertical temperature lapse rate, and the amount and vertical extent of low-level moisture in the atmosphere.

During warm season the total number of days with MCSs equals 230 days for the entire period 2008–2018. The peak frequency of days with MCSs (31) was observed in 2016. This is due to the 2016 anomaly in many meteorological parameters. The minimum number of days with MCSs (12) was registered in 2010. The evaluation of atmospheric stability on the days with MCSs showed the following: the Lifted-index classifies the state of the atmosphere as slightly unstable (53% of all cases) in accordance with the generally accepted classification and only showers are observed throughout the territory. Using the K-index, in 51% of cases the state was assessed as unstable. The MCSs are mainly formed when the atmosphere is moderate and slightly unstable and their evolution accompanied by the presence of showers and isolated thunderstorms across the territory. Comparing the synoptic situations related with MCSs generation, it was found that the share of MCSs formed on the cold front equal a third of all events, and this ratio decreases markedly while activation of strong meridional circulation. The total share of contribution of occlusion processes to the MCSs frequency largely depends on the anomalies and by the end of the study period has the predominant part of the processes associated with the occluded front. Unlike the frontal cases, the processes formed at the stage of development of a cloud vortex, cold air developed system or mesovortex, have been found to be much more dangerous due to less possibility of prediction.

Keywords: *Western Siberia, mesoscale convective system, satellite information.*

References

- Alekseev G.V., Anisimov O.A., Ashik I.M. i dr. *Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmenenijah klimata i ih posledstvijah na territorii Rossijskoj Federacii* [The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation] Moscow: Izd-vo «Rosgidromet», 2014. 1008 p. In Russian
- Anderson R.K., Vel'tishhev N.F. *Ispol'zovanie izobrazhenij so sputnikov v analize i prognoze pogody* [Using satellite images in weather analysis and forecasting] // *Tekhnicheskaja zapiska VMO №124. Izd-vo VMO*, 1973. 275 p. In Russian
- Asmus V.V., Krovotyncev V.A., Milehin O.E., Solov'ev V.I., Uspenskij A.B. *Ispol'zovanie sputnikovyh dannyh DZZ dlja reshenija zadach gidrometeorologii i monitoringa okruzhajushhej sredy* [The use of satellite data of remote sensing of the Earth for solving problems of hydrometeorology and environmental monitoring] // *Electromechanical matters. VNIIEM studies*. 2008. T.105. pp.6–16. In Russian
- Bykov A. V. *Modelirovanie i prognoz opasnyh meteorologicheskikh javlenij konvektivnogo proishozhdenija na Urale* [Modeling and forecasting of dangerous meteorological phenomena of convective origin in the Urals]. Perm, 2018. 151 p. In Russian
- Bykov A.V., Vetrov A.L., Kalinin N.A. *Prognoz opasnyh konvektivnyh javlenij v Permskom krae s ispol'zovaniem global'nyh prognosticheskikh modelej* [Forecast of dangerous convective phenomena in the Perm region using global prognostic models] // *Hydrometeorological Research and Forecasting*. 2017. V. 363. pp. 101–119. In Russian
- Bykov A.V., Shihov A.N. *Prognoz mezomasshtabnyh konvektivnyh sistem s primeneniem global'nyh i mezomasshtabnyh gidrodinamicheskikh modelej* [Mesoscale convective systems forecast using global and mesoscale atmospheric models] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*. 2018. T. 15. № 2. pp. 213–224. In Russian
- Vasil'ev E.V., Alekseeva A.A., Peskov B.E. Conditions of occurrence and short-term forecast of strong squalls // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2009. 34: 1. <https://doi.org/10.3103/S1068373909010014>
- Vel'tishhev N.F. *Mezometeorologija i kratkosrochnoe prognozirovanie. Sbornik lekcij*. [Mesometeorology and short-term forecasting] Posobie dlja samostojatel'noj raboty studentov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988. 136 p. In Russian
- Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A. *Konvekcija v atmosfere nad jugo-vostokom Zapadnoj Sibiri* [Convection in the atmosphere over the south-east of Western Siberia] // *Optika atmosfery okeana*. 2009. T. 22, № 1, pp. 17–21. In Russian
- Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A., Zolotuhina O.I., Tunaev E.L. *Termodinamicheskie uslovija formirovanija mezomasshtabnoj konvekcii v atmosfere Zapadnoj Sibiri* [Thermodynamic conditions for the formation of mesoscale convection in the atmosphere of Western Siberia] // *Izvestija VUZov. Fizika*. 2011. T. 54, № 11–3. pp. 148–155. In Russian
- Gorbatenko V.P., Krechetova S.Ju., Belikova M.Ju., Nechepurenko O.E. Comparison of indices of atmospheric instability, restored according to radio sounding data and spectroradiometer MODIS in days with thunderstorms, over the territory of Western Siberia // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2015. 40: 289. <https://doi.org/10.3103/S1068373915050015>.
- Gorbatenko V.P., Nechepurenko O.E., Krechetova S.Ju., Belikova M.Ju. *Verifikacija parametrov neustojchivosti atmosfery, vostanovlennyh po dannyh spektoradiometra MODIS/Terra dannyh ajerologicheskogo zondirovanija*. [Verification of atmospheric instability parameters reconstructed using MODIS / Terra spectroradiometer data from upper-air sounding] // *Optika atmosfery i okeana*. 2016. T. 29. № 07. pp. 603–607. In Russian
- Gorbatenko V.P., Nechepurenko O.E., Konstantinova D.A., Sevast'janov V.V. *Indeksy neustojchivosti atmosfery i ih porogovyje znachenija, optimal'nye dlja prognoza groz nad Sibir'ju* [Atmospheric instability indices and their thresholds, optimal for forecasting thunderstorms over Siberia] // *Gidrometeorologicheskie issledovanija i prognozy*. 2018. № 2 (368). pp. 44–59. In Russian
- Gubenko I.M., Rubinshtein K.G. An example of comparing the instability indexes of the middle troposphere in a prognostic model with information about thunderstorm activity // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2014. 39: 308. <https://doi.org/10.3103/S1068373914050045>
- Kuzhevskaja I.V., Pustovalov K.N., Sharapova A.A. *Harakteristiki konvektivnyh klasterov, vosstanovlennye po dannyh instrumentov zondirovanija ATOVS* [Characteristics of convective clusters reconstructed according to the ATOVS probing tools] // *Fundamental'naja i prikladnaja klimatologija*. Moscow : Izd-vo FGBU «IGKJe Rosgidrometa i RAN», 2018. T.2. p. 23. In Russian
- Lenskaja O.Ju. *Metodicheskie voprosy ispol'zovanija sputnikovoj i radiolokacionnoj informacii v mezomasshtabnom prognoze (na primere opasnyh javlenij pogody v Moskve 24 ijulja 2001 g.)*. [Methodological issues of using satellite and radar information in a mesoscale forecast (using the example of hazardous weather in Moscow on July 24, 2001)] // *Vestnik Cheljabinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2007. № 6. pp. 66–79. In Russian
- Muchnik V.M. *Fizika grozy* [Thunderstorm physics] Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974. 351 p. In Russian
- P'jankov S.V., Shihov A.N. *Opasnye gidrometeorologicheskie javlenija: rezhim, monitoring, prognoz* [Dangerous hydrometeorological phenomena: mode, monitoring, forecast] Perm. 2014. 248 p. In Russian
- Purdum J.F.W. Some uses of high resolution GOES imagery in the mesoscale forecasting of convection and its behavior. *Mon. Wea. Rev.* 1976. 104, pp. 1474–1483.

- Tolstykh M.A., Shashkin V.V., Fadeev R.Ju., Shljaeva A.V., Mizjak V.G., Rogutov V.S., Bogoslovskij N.N., Gojman G.S., Mahnorylova S.V., Jurova A.Ju. *Sistema modelirovaniya atmosfery dlja besshovnogo prognoza* [Atmospheric modeling system for seamless prediction] Moscow: Triada-LTD. 2017. 166 p. In Russian
- Uspenskij A.B., Kuharskij A.V., Uspenskij S.A. Validation of the results of the satellite monitoring of land surface temperature // Russ. Meteorol. Hydrol. 2015. 40 (2): 131. <https://doi.org/10.3103/S1068373915020107>.
- Shmeter S.M. *Fizika konvektivnykh oblakov* [Convective clouds physics] Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972. 232 p. In Russian
- Andersson, T., Andersson M., Jacobsson C., and Nilsson S. Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in Southern Sweden // Meteorol. Mag. 1989. V. 116. pp. 141–146.
- Johns R.H., Doswell C.A. Severe local storms forecasting. Wea. Forecasting. 1992. pp. 558–612. 13.
- Kunz M. The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2007. V. 7. pp. 327–342.
- Tolstykh M.A., Volodin E.M., Kostykin S.V., Fadeev R.Y., Shashkin V.V., Bogoslovskii N.N., Vilfand R.M., Kiktev D.B., Krasjuk T.V., Mizyak V.G., Shlyaeva A.V., Geleyn J.-F., Ezau I.N., Yurova A.Y. Development of the multiscale version of the SL-AV global atmosphere model // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. V. 40(6). pp. 374–382.
- Purdum, J. F. W. Some uses of high resolution GOES imagery in the mesoscale forecasting of convection and its behavior. *Mon. Wea. Rev.*, 1976. 104, pp.1474–1483.
- Schulz P. Relationships of several stability indices to convective weather events in northeast Colorado // Wea. Forecasting. 1989. No 4. pp. 73–80.
- FGBU «Zapadno-Sibirskoe UGMS» Perechen' i kriterii gidrometeorologicheskikh javlenij, sochetaniya kotorykh obrazujut OJa. [List and criteria of hydrometeorological phenomena, combinations of which form an HP] [Elektronnyj resurs]. – URL: <http://www.meteo-nso.ru/pages/115>
- EOSDIS Worldview [Elektronnye dannye]. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>
- Zondirovanie atmosfery [Elektronnyj resurs]. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- MeteoInfo [Elektronnyj resurs]. URL: <https://meteoinfo.ru/climat-tabl3>

Authors:

Zhukova Vera A., undergraduate, Department of Meteorology and Climatology, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: jukowa.vera2017@yandex.ru

Koshikova Tatyana S., undergraduate, Department of Meteorology and Climatology, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: tkoshikova@gmail.com

Kuzhevskaya Irina Val., Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Department of Meteorology and Climatology, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: ivk@ggf.tsu.ru