

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНВЕКТИВНЫХ КЛАСТЕРОВ, ВОССТАНОВЛЕННЫЕ ПО ДАННЫМ ИНСТРУМЕНТОВ ЗОНДИРОВАНИЯ ATOVS

И.В. Кужевская¹⁾, К.Н. Пустовалов²⁾, А.А. Шарапова¹⁾

¹⁾ Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; ivk@ggf.tsu.ru

²⁾ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3; const.pv@yandex.ru

Резюме. В последние несколько лет пристальное внимание привлекают погодные аномалии, связанные с дождевыми паводками. Целью настоящих исследований является анализ повторяемости экстремальных сумм осадков, их генезиса и оценка возможности их обнаружения с помощью результатов спутникового зондирования. Исследовались метеорологические ряды атмосферных осадков суточного разрешения 23 станций юга Западной Сибири с 1951 по 2017 гг. Для выявления экстремальных климатических явлений в режиме атмосферных осадков использован рекомендованный ВМО индекс – R5d (максимальная пентадная сумма осадков). Получено, что 90 % всех метеорологических станций исследуемого региона зарегистрировали значительное превышение пентадных сумм осадков относительно месячных норм после 2000 года. Повторяемость экстремумов в рядах осадков демонстрирует наличие высокой пространственной неоднородности их проявления, а сумма выпавших осадков часто превышает уровень средних значений в 2-3 раза. Значения максимальных пентадных сумм осадков становятся все больше над центральным и южным районами Западной Сибири. Большинство случаев далеко отстоящих значений в распределении пентадных сумм осадков географически приходится на территорию южнее 56°с.ш., что сказывается на гидрологическом режиме всего бассейна р. Обь. Над северной частью территории такие осадки чаще обусловлены наличием развитых фронтов. На юге территории высокие пентадные суммы преимущественно формируются на фоне мезомасштабных процессов. Диагностировать и прогнозировать экстремально высокие суммы осадков на территории юго-востока Западной Сибири позволяют данные о вертикальных профилях относительной и удельной влажности, полученных на основе спутниковых измерений. Сохранение тенденции увеличения повторяемости развития мощной мезомасштабной конвекции на территории исследования приведёт к дальнейшему увеличению повторяемости таких опасных метеорологических явлений, как град, интенсивные ливни, шквалов и др., причиняющих значительный ущерб.

Ключевые слова. Мезомасштабные конвективные комплексы, атмосферные осадки, климатические показатели экстремальности, спутниковое зондирование.

CHARACTERISTICS OF CONVECTIVE CLUSTERS RECONSTRUCTED FROM DATA OBTAINED WITH ATOVS SENSING TOOLS

I.V. Kuzhevskaya¹⁾, K.N. Pustovalov²⁾, A.A. Sharapova¹⁾

1) Tomsk State University,
36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia; ivk@ggf.tsu.ru

2) Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Tomsk
Academy of Sciences (IMCES SB RAS),
10/3, Akademichesky Ave., 634055, Tomsk, Russia; const.pv@yandex.ru

Summary. In the last years the weather anomalies associated with rainfall have received considerable scientific attention. The aims are to analyze the frequency of occurrence of extreme precipitation amounts, study their genesis and assess the possibility of detection using by remote sensing data. The present research is based on data series of daily atmospheric precipitation from 23 stations in the south of Western Siberia during the period 1951-2017. We used WMO R5d index (greatest 5-day total rainfall; mm) to identify extreme climatic phenomena in the regime of atmospheric precipitation. It was found that 90% of all weather stations of study area recorded a significant excess in the R5d index values relative to monthly values after 2000 year. Repeatability of extrema in precipitation records indicates the presence of high spatial heterogeneity; in addition an amount of precipitation often exceeds the average values by 2-3 times. The R5d index values tend to increase over the central and southern regions of Western Siberia. Most outlying cases in the distribution of pentad precipitation amounts geographically to the south of 56°N. This circumstance has an impact on hydrological regime of the entire Ob river basin. Over the northern part of the territory such precipitation is more often due to the presence of active fronts. In the south of the territory high R5d index values are mainly related to mesoscale processes. To recognize and predict extreme precipitation amounts in the southeast of Western Siberia the vertical profiles of relative and specific humidity from remote sensing data can be used. A tendency towards increasing repeatability of development of deep mesoscale convective systems will necessarily lead to growth of hazards events (hail, downpours, squalls, etc.) in the study area.

Keywords. Mesoscale convective systems, heavy precipitation, indicators for climate extremes, remote sensing.

Введение

Современные климатические изменения проявляются не только в изменении средних величин, но и в резком увеличении частоты и интенсивности экстремальных климатических событий. В первую очередь заметны и активно обсуждаются температурные аномалии. Тогда как анализ атмосферных осадков сопряжен с рядом трудностей. Атмосферные осадки характеризуются

высокой степенью кластеризации в пространстве и во времени, и не формируют классического скалярного поля (Золина О.Г. и др., 2016) как другие характеристики атмосферы (температура, давление). Проявлением этой кластеризации являются пространственная неоднородность выпадения ливневых осадков вообще и экстремальных осадков с интенсивностями в десятки раз превосходящими уровень средних значений (Коршунов А.А., 2009-2015) в частности. Крайне важным является факт того, что степень кластеризации и интенсивность экстремальных осадков во времени могут меняться совершенно иначе, чем средние величины осадков.

В последние несколько лет пристальное внимание привлекают погодные аномалии, связанные с дождевыми паводками, возникшими в результате выпадения сильных осадков.

Сильные осадки, как правило, связаны с облачностью вертикального развития на фронтах окклюзий или холодных катафронтах и в настоящее время довольно легко поддаются прогнозу. Основные трудности своевременного диагноза и прогноза конвективной облачности и связанных с ней осадков, гроз и других опасных конвективных явлений, сопряжены с большой пространственной и временной изменчивостью облачности и сложностями усвоения информации о её физических характеристиках в прогностических региональных мезомасштабных моделях (Зверев А.С., 1957; Воробьев В.И., 1991; Ананова Л.Г. и др., 2007). Задача еще более 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, на фоне которой могут возникать опасные и чрезвычайные ситуации для населения, различной инфраструктуры и сельского хозяйства. В этом случае, кроме стандартных методов, которые использует синоптик при составлении прогноза, необходима дополнительная информация метеорологических радиолокаторов, спутников или продуктов численного моделирования регионального масштаба.

Целью настоящих исследований является анализ повторяемости экстремальных сумм осадков, их генезиса и оценка возможности обнаружения облачных структур с повышенным влагосодержанием с помощью результатов спутникового зондирования.

Согласно работе (Второй оценочный доклад..., 2014) пространственный анализ среднегодовых аномалий общей облачности выявил наличие устойчивых и глубоких изменений в распределении разных видов и форм облачности и в частоте их повторения. В частности, была отмечена хорошо выраженная тенденция к увеличению доли облачности вертикального развития, наблюдаемая во все сезоны года (скорость изменения варьирует от 1%/10лет в зимний сезон до 3%/10 лет и более в теплое время года), а также уменьшение слоисто-дождевой облачности и увеличение вклада облаков верхнего яруса. Уменьшение статической устойчивости в атмосфере и, как следствие, интенсификации конвективных процессов может происходить вследствие совре-

менного изменения климата. Эти изменения выражаются в ослаблении зонального переноса и увеличении вероятности прорывов воздушных масс с юга и севера (Мохов и др., 2006). Так, во второй половине XX в. – начале XXI в. замечено влияние глобальных климатических изменений на вихревую активность в атмосфере (Мохов и др., 1992) и обнаружена тенденция к увеличению доли конвективной облачности (в том числе кучево-дождевых облаков) в Северной Евразии (Chernokulsky et al., 2011). Сохранение тенденции увеличения повторяемости развития мощной мезомасштабной конвекции приведет к дальнейшему увеличению повторяемости таких опасных метеорологических явлений, как град, интенсивные ливни, шквалы и др., причиняющие значительный ущерб (Горбатенко и др., 2009).

В рамках поставленной цели в настоящей работе решаются три задачи:

Исследование повторяемости экстремальных осадков над территорией Западной Сибири.

Изучение генезиса облачности, вызвавшей экстремальные осадки.

Оценка перспективы использования спутниковой информации для уточнения физических характеристик конвективных кластеров, обусловивших выпадение таких осадков.

Материалы и методы исследования

Информационной базой для оценки изменчивости метеорологических (по данным наблюдений) и расчетных параметров, характеризующих современные климатические условия на юго-востоке Западной Сибири, послужили данные суточного разрешения об атмосферных осадках с 23 метеорологических станций с 1951 по 2017 гг. из архива ВНИИГМИ-МЦД.

В работе для выявления экстремальных климатических явлений в режиме атмосферных осадков использованы рекомендованный ВМО индекс *R5d* (Framework Programme..., 1999). Индекс *R5d* (максимальная пентадная сумма осадков) рассчитывается как максимальное в году количество атмосферных осадков, выпавших за последовательные пять суток, он выявляет ситуации, ассоциируемые с возникновением дождевых паводков.

Для выделения пространственных особенностей изменений индекса *R5d* в пределах Западной Сибири область исследования, ограниченная 60-92° в.д. и 50-65° с.ш., была поделена на четыре района. Район, ограниченный широтами 60-57° с.ш. обозначен в работе как «Север Западной Сибири», широтами 56-54° с.ш. – «Центральная часть Западной Сибири», широтами 53-51° с.ш. – «Юг западной Сибири» и отдельно выделены горные станции – «Горный Алтай». Месячные нормы осадков заимствованы из (Научно-прикладной..., 1993).

Для оценки облачного покрова над исследуемой территорией использовались данные радиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>). Этот радиометр является одним из ключевых съемочных приборов, установленных на борту американских спутников TERRA (на орбите с 1999 г.) и AQUA (на орбите с 2002 г.), осуществляющих исследования Земли из космоса по программе EOS

(Earth Observing System) национального аэрокосмического агентства (NASA) США (Aqua: project Science; Terra: The EOS flagship; NOAA: comprehensive large array-data stewardship system (CLASS), 2017).

Дополнительно привлекались данные сети синоптических станций в коде SYNOP (KH-1) (Earth, Ocean, and Atmospheric Science) о количестве и формах облачности в срок, атмосферных явлениях в срок и между сроками, и сумме осадков за 12 часов. В целях уточнения информации о пространственном распределении облачности и осадков над данной территорией строился монтаж изображений MODIS с синоптической наноской.

Для детальной оценки характеристик облачности и потоков влаги использовались данные о вертикальном профиле относительной и удельной влажности, полученные в Сибирском центре ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» (<http://rcpod.ru>) на основе измерений комплекса инструментов зондирования атмосферы Advanced TIROS Operational Vertical Sounder (ATOVS) КА «NOAA-18» и «NOAA-19». Данные ATOVS имеют пространственное разрешение 0.25° по широте и долготе, для 42 уровней по изобарической высоте от 1050 до 0.1 гПа (Li et al., 2000). Для исследования была использована информация в слое от 1000 до 100 гПа (20 уровней), который примерно соответствует тропосфере.

Валидация данных ATOVS, проведённая в различных регионах России (Мельник и др., 2013; Четырин и др. 2015; Шукин и др., 2013), на основе сравнения с данными аэрологического зондирования показала их хорошую точность. Так, средняя абсолютная ошибка температуры воздуха по данным ATOVS в 00:00 и 12:00 ВСВ составляет 2 и 1°C соответственно.

Для приближённой оценки формы облачных массивов осуществлялось 2D- и 3D-картирование данных относительной влажности (f) и удельной влажности (q). В ходе 2D-картирования строилась контурная карта значений относительной влажности выше 90% в горизонтальном или вертикальном разрезе слоя тропосферы в исследуемом районе. При 3D-картировании на основе трёхмерного массива данных относительной влажности осуществлялось построение 3D-изоповерхности для порогового значения относительной влажности $f_k = 90\%$, которое приближённо принималась за границу облачности.

Результаты

Повторяемость экстремальных осадков

В зависимости от поставленной задачи и географического расположения территории для научных исследований выбирают различные определения экстремальных осадков. Авторы (Золина, Булыгина 2016) выделяют три основных группы характеристик экстремальных осадков – абсолютные значения (осадки, превышающие выбранное некоторым образом пороговое значение); пороговые квантили и периоды с непрерывными осадками (продолжительность и интенсивность). Третья группа характеристик существенно отличается от первых двух. В этом случае анализируются не индивидуальные дни с осадками (которые предполагаются независимыми в первых

двух случаях), а периоды, в течение которых наблюдались осадки. К этой группе можно отнести и индекс ВМО – максимальная пентадная сумма осадков, выпавших за последовательные пять суток. Такая характеристика атмосферных осадков позволяют оценить нагрузку на территорию, вызванную вероятностью формирования дождевых паводков.

В ходе настоящих исследований получено, что увеличение повторяемости максимальной пентадной суммы осадков ($R5d$) наблюдается, в основном, над центральным и южным районами Западной Сибири (табл. 1). В этих районах превышения осадков, выпавших за 5 последовательных суток, смогли превысить месячную норму на станции более чем на 190%. В табл. 1 частота подобных превышений за исследуемый период представлена в графе «ЧП». Например, по данным превышения пентадными суммами осадков их месячных норм на станции Колпашево, зафиксировано 3 таких превышения, причем, все они отмечены после 2000 года.

Станции, на которых превышения пентадной суммой осадков месячных норм не было зафиксировано после 2000 года, составляют около 10% от всех рассмотренных. В большинстве случаев максимальное в году количество атмосферных осадков, выпавших за последовательные пять суток, зафиксировано в июле-августе. На долю июля и августа приходится и максимальное число зафиксированных превышений $R5d$ месячных норм этих месяцев. На ряде станций (Змеиногорск, Рубцовск, Кош-Агач и Славгород) замечено многократное превышение месячных норм и в другие (от апреля до августа) месяцы теплого периода, что в районах этих станций часто приводит к весенним паводкам.

Таблица 1. Характеристики экстремальных осадков над Западной Сибирью.

Географическое положение	Станции	Абсолютный максимум пентадной суммы, мм (год, месяц)	\bar{X} , СКО мм	Месячные нормы осадков, мм	$\frac{R5d}{\text{норма}} \sum_{\text{ос}}$	ЧП/ из них после 2000
Север Западной Сибири (65-57° с.ш.)	Напас	101.6	56.3	84	121	6
		(июль 2011)	18.0			2
	Средний Васюган	101.2	51.7	80	126.5	4
		(июль 1973)	15.2			0
	Колпашево	86.9	53.5	64	135.8	3
		(август 2004)	13.7			3
	Пудино	117.1	52.3	76	154.1	4
		(август 2012)	17.5			1
	Первомайское	72.2	43.3	67	107.8	5
		(август 1962)	11.6			1
	Бакчар	113	51.6	74	152.7	8
		(июль 1996)	20.9			4

Продолжение таблицы 1.

Центральная часть Западной Сибири (56-54 ° с.ш.)	Томск	102.8	49.8	76	135.3	5
		(август 1994)	16.6			2
	Тайга	83.5	50.5	80	104.3	2
		(июль 1988)	13.0			0
	Тисуль	97	52.7	78	124.4	8
		(июль 1968)	18.0			1
	Болотное	135.8	47.9	61	222.6	9
		(июнь 1991)	20.7			0
	Барабинск	102.7	40.1	73	140.7	10
		(июль 1967)	18.7			5
	Кемерово	97.7	45.4	70	139.6	6
		(июль 1982)	14.7			2
	Огурцово	117.9	47.4	72	163.8	8
		(июль 1982)	20.6			3
Юг западной Сибири 53-51° с.ш.	Камень-на-Оби	97.2	39.6	64	151.9	4
		(июль 1995)	13.4			1
	Барнаул	91.3	47.6	70	130.4	10
		(июль 1990)	16.2			4
	Славгород	109.2	40.2	40	273	14
		(июнь 1984)	19.0			3
	Бийск-Зональная	88.1	51.4	56	157.3	11
		(май 2001)	15.2			5
	Яйлю	164.7	85.0	136	121.1	7
		(июль 2012)	24.9			4
	Рубцовск	101.8	42.9	53	192.1	18
		(июль 1977)	16.8			6
	Змеиногорск	103.8	64.2	53	195.8	23
		(сентябрь 1981)	15.9			9
Горный Алтай	Кызыл-Озек	118.4	67.8	82	144.4	6
		(май 2014)	16.6			2
	Кара-Тюрек	112.2	53.8	52	215.8	2
		(сентябрь 1999)	15.1			0
	Кош-Агач	41.7	21.5	27	154.4	17
		(июль 2012)	7.8			4

Так, по данным Докладов об особенностях климата на территории Российской Федерации (Доклад об особенностях..., 2008-2016; Государственный доклад «О состоянии..., 2014) за отдельные годы «*сильные дожди*» на терри-

тории Западной Сибири наблюдались практически каждый год и несли большие ущербы экономике. Наибольший ущерб был нанесен Новосибирской области в июле 2009 года и составил 13 млн. рублей. В Алтайском крае и Республике Алтай последствиями сильного дождя были повреждены сельхозкультуры и произошло размытие дорог, ущерб составил более 3 млн. рублей. «*Дождевые паводки*» на территории исследования наблюдаются не ежегодно (около 5 случаев за 10 лет) в основном весной и летом. Результатами дождевых паводков становились затопления участков дорог, мостов и населённых пунктов. После мощных дождей реки не могут сбросить воду с застроенной и перегороженной городскими техническими сооружениями поймы, что и обеспечивает существенный подъем уровней воды. Наибольший ущерб за последние годы составил 6.5 млрд. руб в 2014 году в результате выпадения осадков 29-30 мая в районах притоков р. Обь (реки Катунь, Песчаная, Чарыш, Бия). Территория настоящих исследований включает этот район и обеспечивает актуальность достижения поставленной цели.

Климатические ряды значений индекса $R5d$ были проанализированы с применением автокорреляционной функции. Замечено, что в рядах многолетней повторяемости $R5d$ отчетливо прослеживается квазипериодичность (2 года и 6 лет), обусловленная, скорее всего, повторяемостью синоптических процессов. Возможно, такая повторяемость событий может служить элементом климатического прогноза. На фоне изменений, с хорошо заметными периодами, обнаруживаются годы, когда значения индекса $R5d$ превышают уровень свои средних значений более чем в 2-2.5 раза. Причем приурочены они к временным периодам годовых сумм осадков, выходящих за пределы $\pm 1 \cdot \text{СКО}$. На рисунке 1 приведен временной ход значений индекса $R5d$ и годовых сумм осадков на примере станции Рубцовск.

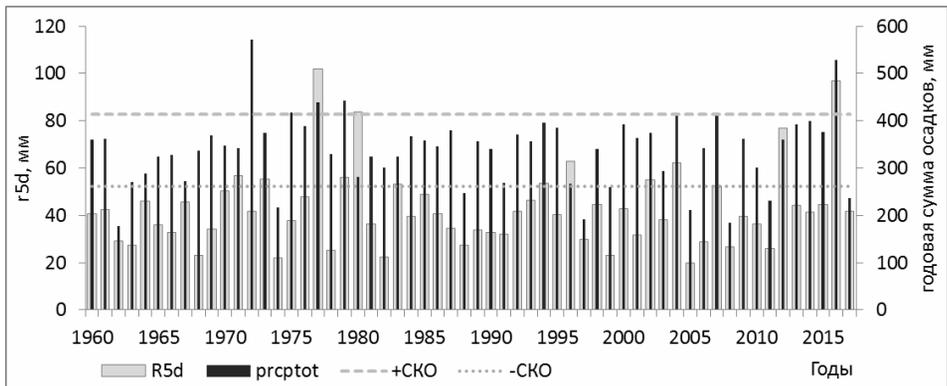


Рисунок 1. Временной ход значений индекса $R5d$ и годовых сумм осадков на ст. Рубцовск $R5d$ - максимальное в году количество атмосферных осадков, выпавших за последовательные пять суток; $prcptot$ – годовая сумма осадков; $+СКО$ и $-СКО$ – граница интервала средней многолетней суммы осадков с учетом среднего квадратического отклонения

При исследовании параметров распределения было отмечено, что в каждом из выделенных в табл. 1 географических районов отмечаются случаи выхода абсолютных максимальных значений индекса $R5d$ за пределы 99.9% квантиля.

На рис. 2 представлены распределения значений индекса $R5d$ на станциях, презентативных для каждого из выделенных географических районов.

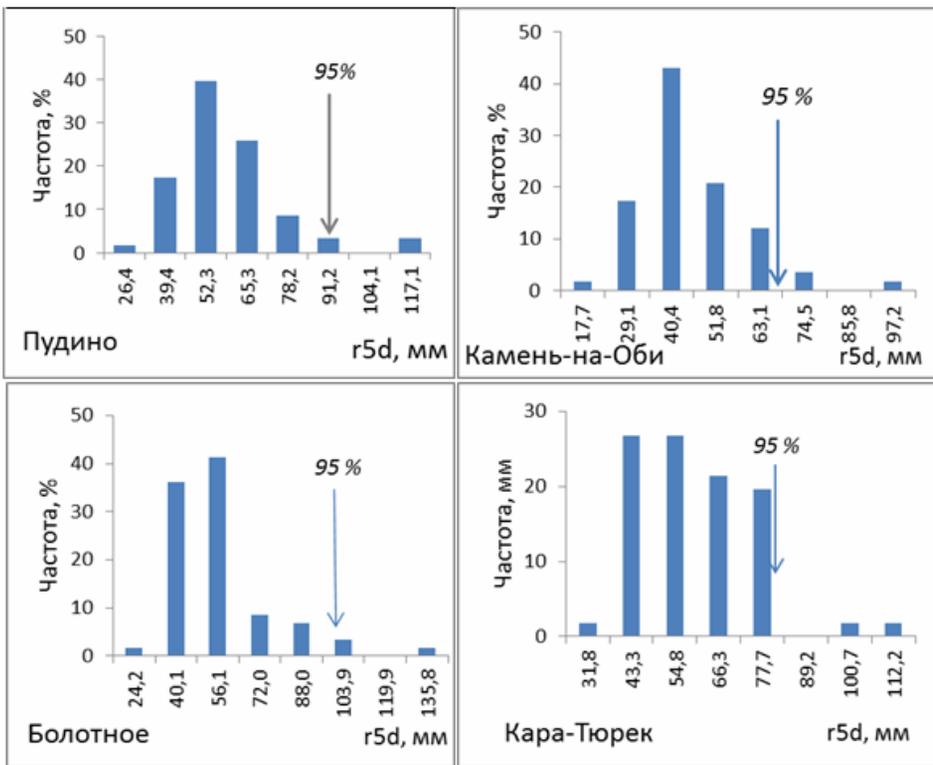


Рисунок 2. Повторяемость значений индекса $R5d$ с указанием 95 % квантиля

Изучение генезиса облачности, вызвавшей экстремальные осадки

Поскольку большинство случаев далеко отстоящих значений в распределении пентадных сумм осадков географически приходится на территорию южнее 56° с.ш., то для детального анализа физических характеристик атмосферы в момент формирования максимальных осадков представлен случай образования такой суммы (97.1 мм) в районе ст. Рубцовск (пентада 05-09.08.2016). Это второе по повторяемости редкое событие в ряду значений индекса $R5d$ на этой станции.

Основным барическим образованием, определяющим погодные условия в период с 5 по 9 августа 2016 г., являлась высотная ложбина, которая прослеживалась до высоты 9 км. На картах барической топографии АТ-300 за 6 августа хорошо наблюдался высотный циклон с двумя замкнутыми изобарами. Общий фон атмосферного давления у поверхности земли характеризовался размытым барическим полем с малыми градиентами и средними значениями давления не менее 1005.0 гПа. Облачность высотной ложбины составляли, преимущественно, мезомасштабные конвективные комплексы (МКК). В ночь на 6 августа с территории Казахстана в район станции Рубцовск вышел мезовихрь. Облачность хорошо видна на космическом снимке (рис. 3 и 4). Эта

система обеспечила выпадение максимальной пентадной суммы осадков. Нужно отметить, что именно в ночь на 6 августа выпало максимальное количество осадков за рассматриваемую пентаду – 75 мм. Продолжительность ливневого дождя, который дал такое количество осадков составила 1 ч 15 мин. В последующие дни, а именно 7 – 9 августа мезовихрь разрушался. Над рассматриваемой территорией оставались мезомасштабные конвективные комплексы (МКК), которые также давали осадки. Так, например, 7 августа сумма осадков в Рубцовске составила 10 мм и 9 августа – 12 мм.

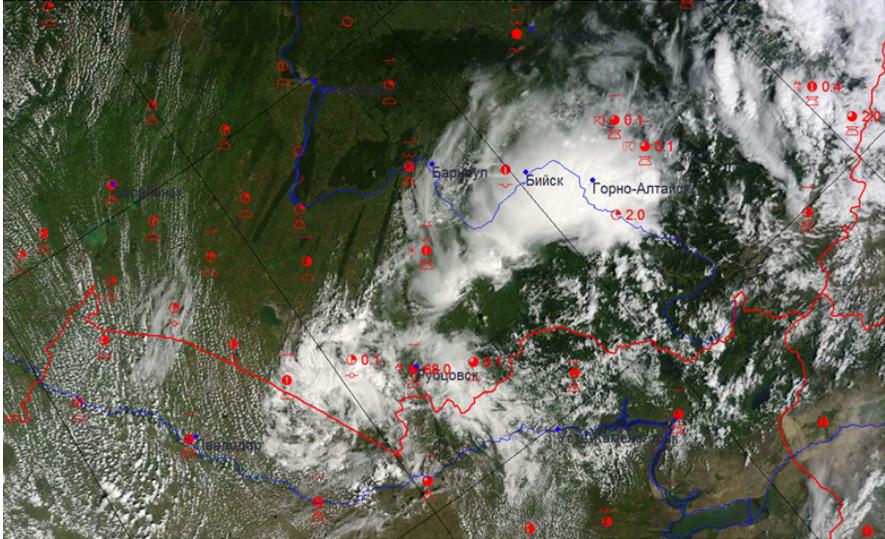


Рисунок 3. Фрагмент монтажа космических RGB-изображений MODIS (композит 1, 4 и 3 каналов) за 05:49 UTC с сокращенной синоптической наноской за 3:00 UTC (осадки за 12:00) 6.08.2016

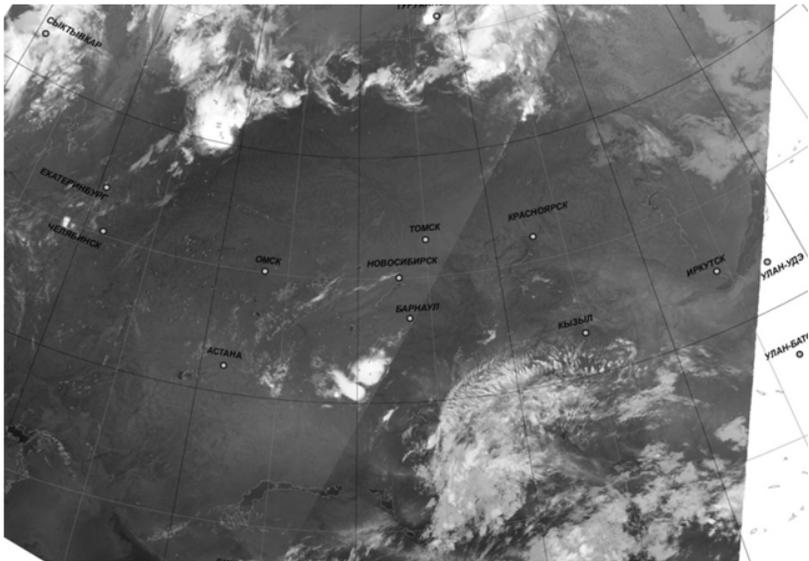


Рисунок 4. Фрагмент монтажа космических изображений КА Aqua за 05.08.2016 время 20:16 и 21:55 UTC (MODIS 8,4 – 8,7 мкм) [<http://www.rcpod.ru>]

В целом, при анализе ежедневных монтажей снимков КА Terra и Aqua за период с 2008 по 2017 годы (3600 монтажей) выявлено, что на четверти исследуемой территории (53-51° с.ш.) образуется около 45% от всех мезомасштабных вихрей и мезомасштабных конвективных комплексов.

В результате исследований получено, что над юго-востоком Западной Сибири выпадение максимальной пентадной суммы сильных осадков обусловлено, чаще всего, наличием внутримассовых конвективных облачных систем.

Оценка перспективы использования спутниковой информации для уточнения физических характеристик конвективных кластеров, обусловивших выпадение таких осадков

Для оценки физических характеристик мезомасштабных конвективных систем, с которыми было связано выпадение экстремальных осадков, использованы данные о вертикальных профилях относительной и удельной влажности, полученных на основе измерений ATOVS.

Трёхмерный массив данных значений относительной и удельной влажности стал основой для построения 3D-изоповерхностей значений относительной (f_k) и удельной (q_k) влажности (рис. 5). Заметим, что 3D-изоповерхность относительной влажности приблизительно характеризует расположение и форму облачных массивов, а 3D-изоповерхность удельной влажности – расположение и форму потоков влаги.

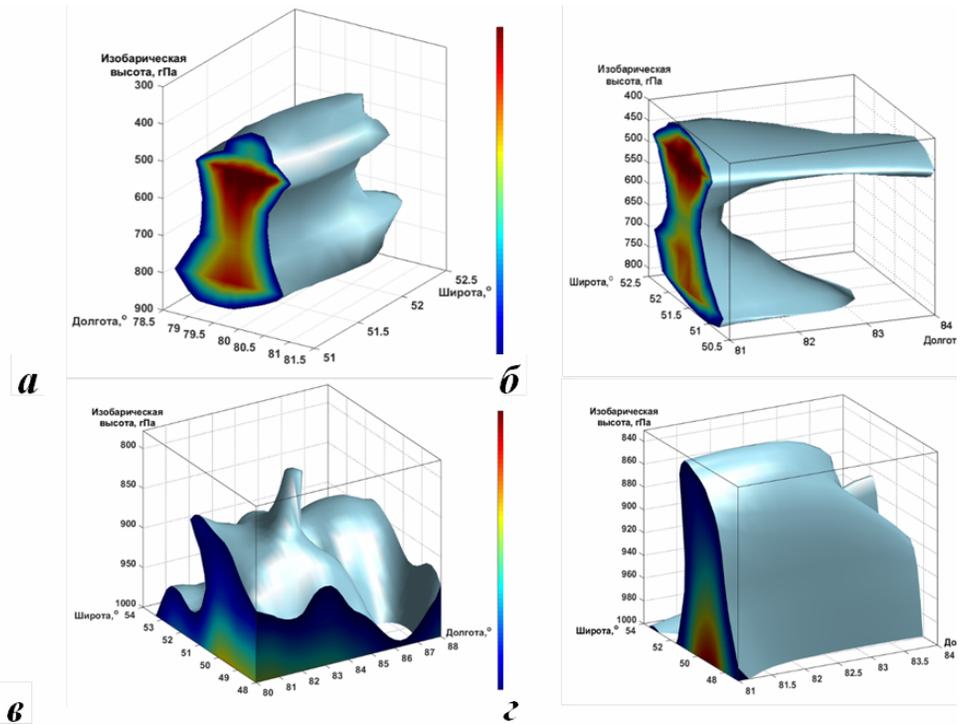


Рисунок 5. 3D-изоповерхности порогового значения относительной влажности – f_k (а, б) и удельной влажности – q_k (в, г), построенные по данным ATOVS за 22:04 UTC 5.08.2016 (а, б) и 00:42 UTC 6.08.2016 (в, г)

Анализ изоповерхностей относительной и удельной влажности за 22:04 UTC 5.08.2016 и 00:42 UTC 6.08.2016 во время последовательных пролётов спутников NOAA с интервалом ~ 2.5 часов (рис. 5) позволяет проследить динамику мезомасштабной конвективной системы – смещение области с наличием МКК в северо-восточном направлении, а также увеличение площади облаков верхнего яруса.

Контурные карты изолиний значений относительной и удельной влажности в горизонтальном разрезе на различных уровнях по высоте на рис. 6 позволяют выделить области с повышенным влагосодержанием.

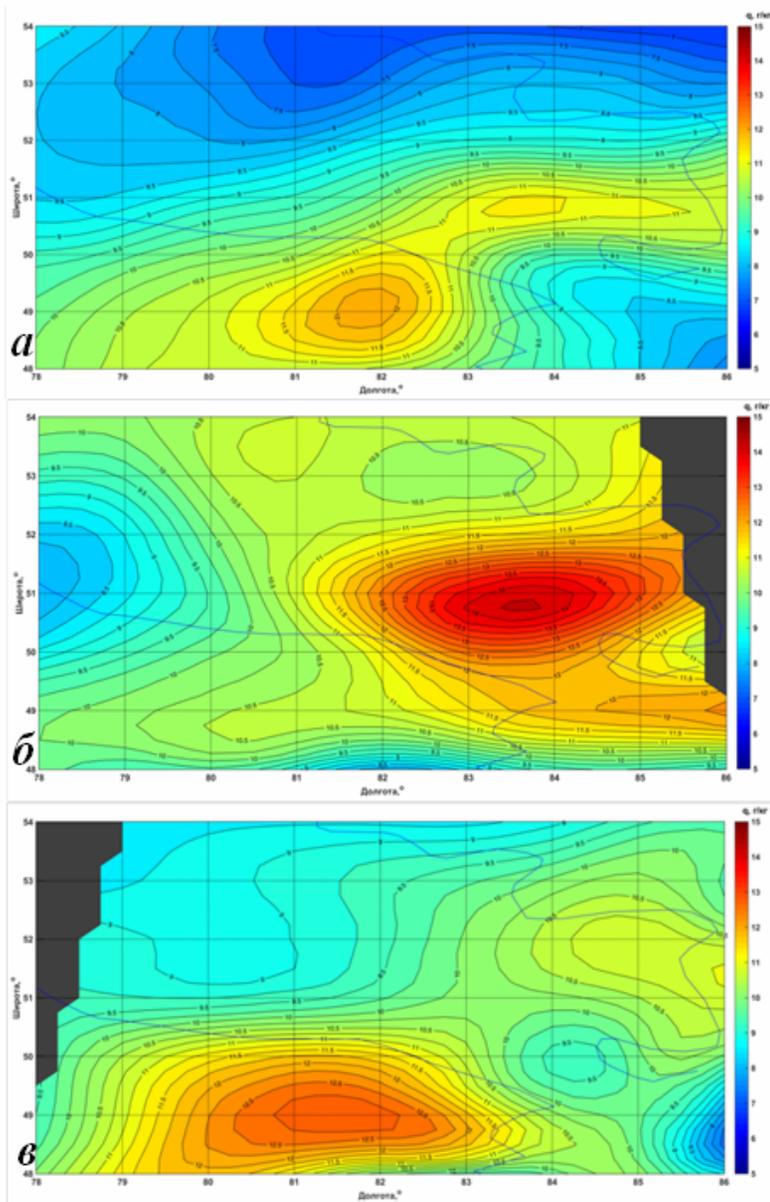


Рисунок 6. Изолинии удельной влажности на высоте 1000 гПа по данным ATOVS за пролеты 22:15 UTC 4.08.2016 (а), 12:28 UTC 5.08.2016 (б) и 00:42 UTC 6.08.2016 (в)

Величина q_k на поверхности 1000 гПа превышала 9 г/кг, тогда как, известно, что ливневые осадки прогнозируются уже при меньших её значениях. Аналогично было проанализировано более 30 случаев выпадения на юге Западной Сибири сильных осадков и осадков за последовательные пять суток.

Формирование рассмотренного выше мезовихря произошло на фоне размытого барического поля. Нужно отметить, что для юга Западной Сибири размытые барические поля или расположение на этой территории периферии антициклона является нормой для теплого периода (Климат России, 2001). В теплом периоде, для районов южнее 56° с.ш., преобладает направление ветра южной четверти. Для северных районов более характерны частые выходы циклонов и северное, северо-западное направление ветра. Поэтому, на юге и севере исследуемой территории характер формирования максимальных в году пентадных сумм осадков, носит принципиально различный характер. Получено, что на юге территории пентадные суммы, превышающие уровень средних значений, часто формируются именно на фоне мезомасштабных процессов.

Как показывают результаты анализа современного характера циркуляции атмосферы на фоне её многолетних колебаний (Кононова, Самохина, 2017), суммарная годовая продолжительность атмосферных процессов, способствующих выпадению обильных осадков, на период с 2005 г. и до настоящего времени, наибольшая за весь период наблюдений для всей территории России. Вероятность возникновения метеорологически обусловленных опасных природных процессов сейчас также наибольшая, а это требует повышенного внимания к превентивным мерам.

Дискуссия

Значительное превышение пентадной суммой осадков месячных норм после 2000 года зарегистрировали 90 % всех метеорологических станций исследуемого региона.

Повторяемость экстремумов в рядах осадков демонстрирует наличие высокой пространственной неоднородности их проявления, что соответствует исследованиям, проведенным для других территорий (Шабанов и др., 2017). Однако сумма выпавших осадков превышает уровень средних значений в 2-3 раза.

Увеличение повторяемости максимальной пентадной суммы осадков наблюдается, в основном, над центральным и южным районами Западной Сибири. Полученный результат согласуется с выводами, приведенными в (Барашкова и др., 2015) о наличии тенденции к увеличению значений индекса $R5d$ на большей части исследованной авторами территории, а также с выводами работы (Огурцов и др., 2016), согласно которым на территории юга Западной Сибири отмечается увеличение годовой суммы сильных осадков (выше 95% квантиля, индекс $R95p$) и максимальной в году суточной суммы осадков ($R1d$). Большинство случаев далеко отстоящих значений в распределении пентадных сумм осадков географически приходится на территорию южнее 56° с.ш., что оказывает огромное влияние на гидрологический режим практически всего региона.

В рядах многолетней повторяемости экстремальных осадков отчетливо прослеживается квазипериодичность, но даже с учетом этого факта, предвидеть год (климатический прогноз), благоприятный для формирования экстремальных осадков или территорию, где их вероятнее всего можно ожидать, не представляется возможным.

Считается, что внутримассовые конвективные кластеры не характерны для территории Западной Сибири с точки зрения опасности образования опасных конвективных явлений вообще и экстремальных ливневых осадков в том числе. Изучение синоптического положения в дни с экстремальными суммами осадков на территории юга Западной Сибири обнаружило, что все рассмотренные случаи выпадения сильных осадков связаны с облачностью мезомасштабных конвективных комплексов, образовавшихся вне линий фронта. На юге и севере исследуемой территории характер формирования максимальных в году пентадных сумм осадков носит различный характер. Над северной частью территории такие осадки чаще обусловлены наличием развитых фронтов. На юге территории высокие пентадные суммы часто формируются, преимущественно, на фоне мезомасштабных процессов.

Данные о вертикальном профиле относительной и удельной влажности, полученных на основе измерений ATOVS позволяют диагностировать и прогнозировать экстремально высокие суммы осадков на территории юго-востока Западной Сибири. Для подтверждения рабочей гипотезы в рамках настоящих исследований проведена валидация результатов спутникового зондирования данными аэрологических измерений. Результаты достаточно хорошо согласуются с представленными в (Щукин и др. 2013).

Сохранение тенденции увеличения повторяемости развития мощной мезомасштабной конвекции на территории исследования приведёт к дальнейшему увеличению повторяемости таких опасных метеорологических явлений, как град, интенсивные ливне, шквалов и др., причиняющих значительный ущерб.

Заключение

В работе проанализировано распределение максимальных в году пентадных сумм осадков ($R5d$) в пределах территории Западной Сибири за период с 1951 по 2017 гг. Составлен реестр случаев образования $R5d$.

Среди случаев формирования $R5d$ преобладают летние события.

Проведено сравнение максимальных в году пентадных сумм осадков с месячными нормами осадков. Выявлено, что в отдельные годы сумма осадков, выпавших за пять последовательных суток может превысить месячную норму осадков более чем на 100%.

Замечено, что в рядах многолетней повторяемости $R5d$ отчетливо прослеживается квазипериодичность (2 года и 6 лет), обусловленная, скорее всего, повторяемостью синоптических процессов.

На территории юга Западной Сибири образуется 44% всех мезовихрей и МКК на исследуемой территории.

Более чем в 60% случаев формирование $R5d$ для юга территории происходит на мезомасштабных процессах.

Благодарности

Результаты исследования получены при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

Список литературы

Ананова Л.Г., Горбатенко В.П., Луковская И.А. 2007. Особенности радиолокационных характеристик конвективной облачности при шквалах на юго-востоке Западной Сибири. – Метеорология и гидрология, № 7, с. 51 – 56.

Барашкова Н.К., Волкова М.А., Кужевская И.В. 2015. Современный климатический режим атмосферных осадков на территории Томской области. – Труды Главной геофизической обсерватории, вып. 576, с. 129–152.

Воробьев В.И. 1991. Синоптическая метеорология. – Л., Гидрометеиздат, 616 с.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.В. Ясюкевича, В.А. Говоркова. 2014. – М., Росгидромет, 1009 с.

Горбатенко В.П., Константинова Д.А. 2009. Конвекция в атмосфере над юго-востоком Западной Сибири. – Оптика атмосферы океана, т. 22, № 1, с. 17 – 21.

Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2014 году». – М., МЧС России; ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ).

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2008-2016 гг. – Москва.

Зверев А.С. 1957. Синоптическая метеорология: учебное пособие для вузов. – Л., Гидрометеиздат, 558 с.

Золина О.Г., Булыгина О.Н. 2016. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России. – Фундаментальная и прикладная климатология, т. 1, с. 84 – 103. DOI: 10.21513/2410-8758-2016-1-84-103

Климат России / под ред. Н.В. Кобышевой. 2001. – СПб., Гидрометеиздат, 655 с.

Кононова Н.К., Самохина О.Ф. 2017. Колебания температуры воздуха в высоких широтах России и их связь с циркуляцией атмосферы Северного полушария. – Фундаментальная и прикладная климатология, т. 4, с. 28-56.

Коршунов А.А., Коршунова Н.Н. Чрезвычайные ситуации в России, связанные с неблагоприятными условиями погоды в 2009, 2010, 2014, 2015 году. [Электронный ресурс]. – URL доступа: <http://meteo.ru/pogoda-i-klimat/118-chrezvychajnye-situatsii-v-rossii/401-chrezvychajnye-situatsii-v-2009-godu> (дата обращения 06.10.2016).

Мельник К.О. 2013. Технологии ИТЦ «СКАНЭКС» по приему и обработке информации с метеорологических полярно-орбитальных ИСЗ. – В кн.: Тезисы IV международного школа-семинара «Спутниковые методы и системы исследования Земли» (Таруса, 19 - 25 февраля 2013). [Электронный ресурс]. – URL: http://d33.infospace.ru/d33_conf/tarusa2013.html.

Мохов И.И., Акперов М.Г. 2006. Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа. – Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, т. 42, № 4, с. 467–475.

Мохов И.И., Мохов О.И., Петухов В.К., Хайруллин Р.Р. 1992. Влияние глобальных климатических изменений на вихревую активность в атмосфере. – Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана, т. 28, № 1, с. 11–26.

Научно-прикладной справочник. Многолетние данные. 1993. – СПб., Гидрометеоздат, вып. 20, 720 с.

Огурцов Л.А., Чередыко Н.Н., Волкова М.А., Журавлев Г.Г. 2016. Динамика показателей экстремальности климата на территории Западной Сибири. – Оптика атмосферы и океана, т. 29, № 8, с. 633-639. Doi:10.15372/AOO20160803

Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – Росгидромет, 2014. – 1009 с.

Четырин Ю.С., Давиденко А.Н. 2015. Методика восстановления вертикальных профилей параметров атмосферы для их использования прогностическими подразделениями Дальневосточного гидрометеорологического центра. – Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов, № 42. с. 129–138.

Шабанов П.А., Матвеева Т.А., Маркина М.Ю. 2017. Межгодовые изменения событий очень сильных осадков на Европейской части России. – Фундаментальная и прикладная климатология, т. 4, с. 106 – 123. Doi: 10.21513/2410-8758-2017-4-106-123

Щукин Г.Г., Чичкова Е.Ф., Караваев Д.М. 2013. Микроволновый радиометр для валидации спутниковых данных температурно-влажностного зондирования атмосферы. – Радиотехнические и телекоммуникационные системы, № 1, с. 28-31.

Aqua: project Science. [Электронный ресурс]. – URL: <https://aqua.nasa.gov> (дата обращения 23.06.2017).

Chernokulsky A.V., Bulygina O.N., Mokhov I.I. 2011. Recent variations of cloudiness over Russia from surface daytime observations. – Environ. Res. Lett., vol. 6, No 3, pp. 035202.

Earth, Ocean, and Atmospheric Science. [Электронные данные]. – URL: <http://www.eoas.fsu.edu/rawdata/syn/> (дата обращения 23.06.2017).

EOSDIS Worldview. [Электронные данные]. – URL: <https://earthdata.nasa.gov/labs/worldview/> (дата обращения 23.06.2017).

Framework Programme: Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions (STARDEX). (1999). – URL: <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/> (дата обращения: 15.11.2014).

Li J., Wolf W., Menzel P. 2000. Global Soundings of the Atmosphere from ATOVS Measurements: The Algorithm and Validation. – Journal of Applied Meteorology, vol. 39, is. 8, pp.1248–1268.

NOAA: comprehensive large array-data stewardship system (CLASS). [Электронный ресурс]. – URL: https://www.class.ncdc.noaa.gov/data_available/tovs_atovs/index.htm (дата обращения 23.06.2017).

Terra: The EOS flagship. [Электронный ресурс]. – URL: <https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments> (дата обращения 23.06.2017).

Статья поступила в редакцию: 13.11.2017 г.

После переработки: 24.04.2018 г.