

АЭРОСИНОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ГРАДА НАД ЮГО-ВОСТОКОМ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

В.П. Горбатенко, Л.Г. Ананова, Х.Т. Апостолиди, А.А. Карпова

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Томск

На фоне глобального потепления климата над юго-востоком Западной Сибири участились случаи выпадения града. В работе проанализированы аэросиноптические условия образования града за 2013–2022 гг. Получено, что наибольшая повторяемость града формируется в циклонах, приходящих на исследуемую территорию с юго-запада (22 %), запада (20 %), и в циклонах местного происхождения (14 %). Чаще всего град образуется на холодных фронтах (30 %) и фронтах окклюзии (22 %). Согласно данным аэрологического зондирования, высота верхней границы конвективной облачности в дни с градом меняется в пределах 5,5–7,0 км. Максимальные значения высоты верхней границы облаков в дни с выпадением града наблюдаются в июле и достигают 12 км. Средние значения вертикальной мощности градовых облаков меняются в пределах 4,5–7,0 км.

Ключевые слова: град, синоптический анализ, индексы неустойчивости атмосферы.

AEROSYNOPTIC CONDITIONS FOR THE FORMATION OF HAIL OVER THE SOUTHEAST OF WESTERN SIBERIA

V.P. Gorbatenko, L.G. Ananova, Kh.T. Apostolidi, A.A. Karpova

Tomsk State University, Tomsk

Against the background of global warming over the south-east of Western Siberia, hail has become more frequent. The paper analyzes the aerosynoptic conditions of hail formation for the period 2013–2022. It was found that the hail is formed with highest frequency in cyclones coming to the study area from the southwest (22 %), west (20 %) and in cyclones of local origin (14 %). Most often, hail is formed on cold fronts (30 %) and occlusion fronts (22 %). According to aerological sounding data, the height of the upper limit of convective cloudiness on days with hail varies within 5.5–7.0 km. The maximum values of the height of the upper boundary of the clouds on days with hail fall are observed in July and reach 12 km. The average values of the vertical power of hail clouds vary within 4.5–7.0 km.

Key words: hail, synoptic analysis, indices of atmospheric instability.

На территории Западной Сибири тенденция потепления климата в последнее десятилетие продолжается во все сезоны, кроме зимы [1]. Атмосфера Западной Сибири в теплый период года становится все более теплой, смещаются временные границы устойчивого перехода средних суточных значений температуры воздуха, увеличивается период года, когда вероятность развития опасных конвективных явлений высока. На этом фоне чрезвычайные ситуации, обусловленные развитием глубокой мезомасштабной конвекции, в последнее десятилетие повторяются гораздо чаще, чем до 2000 г. [2]. В том числе замечено увеличение повторяемости таких опасных конвективных явлений, как гроза и град, улучшение качества прогноза которых становится все более актуальным.

Однако град – очень сложное для качественного прогноза событие, обусловленное недостатком исходной информации [3]. Недостаток информации вызван тем, что для прогнозирования града, наряду с пониманием синоптической ситуации, необходимо иметь данные радиометеорологического и аэрологического зондирования. На территории Западной Сибири аэрологическое зондирование проводится на станциях, отстоящих на большом расстоянии друг от друга, причем временной интервал между выпусками радиозонда составляет 12 часов (выпуск радиозонда осуществляется в 06 и 12 ч ВСВ) и отличается от промежутка времени с максимальным развитием конвективных процессов. Метеорологические радиолокаторы, расположенные в районе г. Новосибирска, обслуживают лишь небольшую часть территории в радиусе до 300 км, в то время как частота выпадения града увеличивается и на территориях, расположенных севернее. В качестве примера можно привести изменчивость повторяемости гроз и града на территории Томской области, расположенной в диапазоне 56–61° с.ш. и 75–89° в.д. [2, 4, 5].

В настоящее время для решения проблемы улучшения качества прогноза предлагаются глобальные модели атмосферы, которые выдают информацию, заменяющую данные фактического аэрологического зондирования [3]. Однако существует проблема при использовании этой информации, поскольку исследования взаимосвязи характеристик градовых облаков, размера града, а также площади, поврежденной градом, с параметрами атмосферы проводятся недостаточно или не проводятся совсем. При этом редкая сеть аэрологических станций Западной Сибири вряд ли обеспечит хорошие перспективы развития этой методики прогноза града, поэтому наиболее актуальными задачами видятся исследования аэросиноптических условий формирования градовых облаков над Западной Сибирью.

Целью настоящей работы является анализ синоптических процессов, которые обеспечивают формирование мощной конвективной облачности, продуцирующей град, и ряда параметров мощности развития конвекции, определяемых с помощью аэрологического зондирования атмосферы.

Информационной базой о случаях выпадения града послужили записи журнала «Шторм» с 2013 по 2022 г., предоставленные Томским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС). Синоптический анализ производился на базе архива АМСГ Томск, где были выбраны приземные и кольцевые карты погоды за даты, когда регистрировались случаи выпадения града над территорией Томской области.

Для выявления характеристик неустойчивости атмосферы в дни с градом за период июнь–август была использована база данных аэрологического зондирования атмосферы на станциях Новосибирск, Колпашево, Александровское. Однако для анализа характеристик состояния атмосферы было выбрано только 83 случая, поскольку аэрологические данные в дни выпадения града часто отсутствуют.

Заметим, что до эпохи глобального потепления над Томской областью наблюдалось не более чем 14–28 дней с грозой в год [2]. При этом повторяемость гроз увеличивалась с изменением географической широты от 60 до 55° с.ш., а дней с градом в этих широтах наблюдалось в среднем от 1 до 4 в год. Анализ частоты регистрации случаев града и диаметра градин за период 2015–2018 гг. представлен в работе [4]. Результаты, полученные за последние годы (табл. 1), демонстрируют как существенное увеличение числа дней с градом, отмеченных на территории Томской области, так и тот факт, что град в течение грозового сезона регистрировался в окрестности одной и той же станции по несколько раз.

Причем если в XX в. град чаще регистрировался только в южной части территории, то в 2019–2022 гг. он не единожды за год выпадал даже на станциях, расположенных близ 60° с.ш. (табл. 2). Заметим, что согласно [6, 7] среднее число дней с градом на метеорологических станциях Томской области в период до 1965 г. составляло не более одного дня в год на севере области и не более двух дней на юге. При этом наибольшее число дней с градом за весь период наблюдения не превышало трех случаев выпадения на севере области и шести на юге.

Таблица 1

Отношение числа дней с градом (n) на метеостанциях Томской области к числу станций (N), регистрировавших град

Год	Среднее за периоды, гг. [6, 7]		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
	1891–1965	1966–1985										
n/N	3/3	5/4	8/6	4/5	7/6	10/9	12/9	6/5	11/8	24/15	18/13	16/12

Таблица 2

**Примеры увеличения временной и пространственной локализации
выпадения града в 2020 г.**

Метеостанция	Географические координаты		Время выпадения града, ч, ВСВ	Продолжи- тельность, мин
	широта, с.ш.	долгота, в.д.		
15.05.2020 г.				
Майск	57,8	77,2	13:27	1
Напас	59,9	82,0	13:29	1
19.06.2020 г.				
Александровское	60,5	77,8	5:45	3
Александровское			6:54	2
20.07.2020 г.				
Белый Яр	58,5	85,1	4:50	15
Степановка	58,7	86,8	7:45	5
Колпашево	58,3	83,9	8:58	2

За период 1966–1985 гг. случаев выпадения града регистрировалось немного больше (на 1–2 события), а причиной тому было, по-видимому, улучшение методики наблюдений. При этом число метеорологических станций на территории Томской области, согласно справочникам, в 60-е годы XX в. составляло 27–28, а в исследуемый в настоящей работе период повторяемости града их 23, т. е. на увеличение числа дней с зарегистрированным градом не повлияла плотность визуальных наблюдений.

Очевидно, что и число станций, регистрирующих град, и число событий в последние годы увеличилось в 3–5 раз. Причем возросло не только число дней с градом за счет увеличения продолжительности теплого периода года [8]. Есть основания предполагать, что стали больше и размеры площади конвективных облаков, генерирующих град, и продолжительность их жизни. Доказательством тому является, например, тот факт, что метеорологические станции (Майск и Напас) 15.05.2020 г. регистрировали град практически одновременно, хотя и расположены на расстоянии более 200 км (см. табл. 2).

Сопоставление времени регистрации града позволяет предполагать, что он является продуктом одного и того же комплекса конвективных ячеек. На широте 60,5° с.ш. (станция Александровское) град 19.06.2020 г. выпадал дважды с интервалом около часа, немного превышающим время жизни стандартной конвективной ячейки. Следовательно, можно предположить, что физические характеристики конвективных комплексов, обуславливающих формирование града в этот день, намного превосходили свойственные этому региону ранее. Значит, облачные системы, формиру-

ющие град над Западной Сибирью, в последние годы становятся все более обширными в пространстве, а мощных конвективных ячеек, продуцирующих продолжительное выпадение града, стало больше в одном комплексе конвективных ячеек и формируются они значительно чаще.

Увеличение повторяемости опасных конвективных явлений может быть обусловлено двумя причинами: повторяемостью синоптических процессов, обеспечивающих выход на исследуемую территорию теплых и влажных воздушных масс, и увеличением неустойчивости атмосферы на фоне изменившихся условий прогрева и увлажнения подстилающей поверхности. При наличии на исследуемой территории практически неограниченных источников местной влаги в виде болотных комплексов, неустойчивость атмосферы на фоне потепления, несомненно, увеличивается.

Поэтому есть основания предполагать наличие изменений термодинамических характеристик всей толщи тропосферы, приводящих к усилению турбулентных потоков и повторяемости опасных конвективных явлений. Суточный ход повторяемости выпадения града (рис. 1) ярко демонстрирует роль конвективной неустойчивости атмосферы в формировании мощной облачности, поскольку более 50 % всех случаев выпадения града приходится на период 14–17 ч местного времени, с ярко выраженным максимумом в 15 ч, и более 80 % – на период 13–19 ч.

Для каждого случая выпадения града анализировались синоптические карты, по которым определялся тип и генезис барических образований, во время господства которых выпадал град.

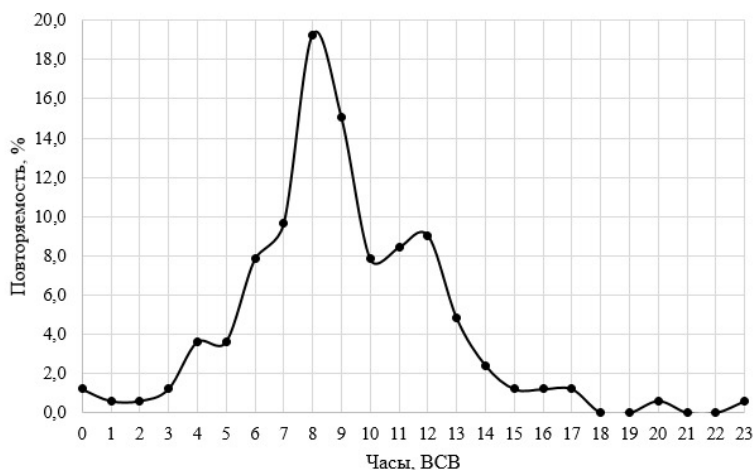


Рис. 1. Суточный ход повторяемости выпадения града на юго-востоке Западной Сибири за 2013–2022 гг.

Для более детального изучения синоптических условий и возникновения опасных явлений, в частности града, в каждом типе барических образований в исследовании использовалась классификация [9]. В данной методике барические образования подразделяются на несколько типов по месту зарождения и траектории движения.

В соответствии с данной классификацией выделяются барические образования, приходящие на территорию Западной Сибири и влияющие на погодные условия, такие как:

I – западные циклоны, перемещающиеся из центральных районов Европейской России к Восточно-Сибирскому плоскогорью вдоль 60–65° с.ш.

II – западные циклоны, образующиеся на волне полярного фронта в районе Екатеринбурга, Омска, Самары.

III – юго-западные циклоны, приходящие из районов Каспийского и Аральского морей и смещающиеся на северо-восток.

IV – северные циклоны, образующиеся в Карском море и северных районах Западной Сибири, смещаются на юго-юго-восток.

V – южные циклоны, приходящие из районов Ашхабада, Ташкента или из междуречья Амударьи и Сырдарьи, смещаются на северо-восток.

VI – местные циклоны, образующиеся непосредственно на территории Западной Сибири: на южной части или в районе междуречья Обь–Иртыш. Ведут себя достаточно статично и имеют минимальные вектора смещения, из которых нет возможности выделить преобладающий.

VII – северные циклоны, которые приходят из районов Кольского полуострова, Баренцева моря или севера европейской территории России, смещаются на юго-восток в направлении Омска.

C VIII по XII – типы антициклонов, приходивших на территорию Западной Сибири и образывавшихся над ней.

Для выявления региональных особенностей возникновения града на юго-востоке Западной Сибири по кольцевым картам погоды определялся тип барического образования, при котором возникал град. За один случай принималось выпадение града на одной станции. Для синоптического анализа было рассмотрено 127 случаев.

Каждый случай с градом за период с 2013 по 2022 г. классифицировался по месяцу и типу барического образования, в котором наблюдался (табл. 3):

1. Циклон (с I по VII тип).
2. Антициклон (с VIII по XII тип).
3. Седловина.
4. Малоградиентное поле.

Анализ синоптических условий при выпадении града на юго-востоке Западной Сибири показал, что абсолютное большинство случаев с выпа-

Таблица 3

**Повторяемость (%) града в различных типах барических образований
на юго-востоке Западной Сибири с 2013 по 2022 г.**

Типы барических образований	Месяцы							Всего за сезон
	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	
I	3,9	3,9	3,9	3,9	2,4	2,4	–	20,4
II	–	3,1	2,4	1,6	3,1	–	–	10,2
III	1,6	4,7	6,3	6,2	2,4	0,8	–	22,0
IV	–	3,9	1,6	–	0,8	–	–	6,3
V	–	–	3,1	2,4	0,8	–	–	6,3
VI	–	–	1,6	7,9	1,6	2,4	0,8	14,3
VII	–	3,9	3,1	–	–	–	–	7,0
Антициклоны (VIII–XII)	–	1,6	–	0,8	3,1	2,4	–	7,9
Седловина	–	–	–	0,8	1,6	1,6	–	4,0
Малогradientное поле	–	–	–	0,8	0,8	–	–	1,6
Всего	5,6	21,3	22,0	24,4	16,5	9,4	0,8	100

дением града (86,5 %) в данном районе возникает в циклонах, как и следовало ожидать.

Заметим, что сезон грозовой активности над исследуемым регионом начинается во второй половине апреля, а заканчивается в октябре, но в сумме за эти два месяца плотность разрядов молний не превышает 1 % [5], однако случаев выпадения града на эти месяцы приходится 6,5 %.

Большое число майских случаев выпадения града на исследуемой территории приходится на 2020 г.: град регистрировался 5 станциями, расположенными в разных частях территории, в течение 3 дней (6, 15 и 26 мая). Заметим, что весна 2020 г. на исследуемой территории наступила раньше срока и характеризовалась очень высокими значениями температуры воздуха, причем самыми теплыми за историю наблюдений были и апрель, и май [10]. Прогрев подстилающей поверхности и высокое влагосодержание атмосферы обеспечили усиление конвективного потенциала атмосферы в пришедших с северной части ЕТР циклонах и формирование градовой облачности. Замеченной особенностью формирования градовых облаков в этот год в мае было наличие высоких контрастов температуры приземного слоя атмосферы в зоне фронтов: 8–12 °C/1000 км.

Наибольший процент повторяемости града наблюдался в июле в местных циклонах (VI тип) – 7,9 %, а также чуть меньше в июне в юго-западных циклонах (III тип) – 6,3 %. Июль стал месяцем с самой высокой градовой деятельностью – 24,4 %. Вторым месяцем с активным выпадением града стал июнь – 22,0 %, в котором преобладают юго-западные циклоны

(III тип). Замечено, что в мае повторяемость циклонов всех типов примерно одинакова и составляет 3–5 %, кроме южных (V) и местных (VI) циклонов, которые в этом месяце не отмечались. Май характеризуется высокой циклонической активностью, поэтому и повторяемость града в мае почти такая же, как в июне и июле.

В общую сумму повторяемости града за период с апреля по октябрь наибольший вклад вносят юго-западные циклоны (III тип) – 22,0 %, западные циклоны (I тип) – 20,4 % и местные циклоны (VI тип) – 14,3 %.

За анализируемый период исследования основная часть циклонов, в которых отмечалось выпадение града (61,6 %), имела давление от 991 до 1000 гПа.

В антициклональных условиях град наблюдался достаточно редко и в основном на восточной периферии. Всего в антициклонах отмечалось 7,9 % всех случаев с градом. Минимальная повторяемость выпадения града отмечалась в седловине – 4,0 % и малоградиентном поле – 1,6 %.

При анализе синоптических карт было замечено, что местные циклоны (VI) могут достаточно долго находиться на территории Западной Сибири, так как не имеют определенного вектора смещения, а также именно этот тип очень часто регенерировал и увеличивал время своего существования на данной территории. Юго-западные циклоны (III), несмотря на то, что имели вектор смещения и редко регенерировали над рассматриваемым районом, чаще остальных приходили на юго-восток Западной Сибири, и, соответственно, конвективная деятельность чаще развивалась именно в данном типе барических образований.

По условиям возникновения град можно разделить на фронтальный и внутримассовый. Все случаи с градом за период с 2013 по 2022 г. классифицировались не только по типу барического образования, но также и по наблюдению в зоне фронта (с выделением типа) или во внутримассовых условиях (табл. 4).

Таблица 4

Повторяемость (%) фронтального и внутримассового града на юго-востоке Западной Сибири с 2013 по 2022 г.

Тип фронта	Месяц							Всего за сезон
	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	
Холодный	1,6	3,9	5,5	7,9	6,3	3,9	0,8	29,9
Теплый	2,4	6,3	2,4	3,9	3,1	–	–	18,1
Окклюзия	1,6	3,1	6,3	5,5	4,7	0,8	–	22,0
Вторичный	–	4,0	4,7	1,6	1,6	3,1	–	15,0
Внутримассовый град	–	4,0	3,1	5,5	0,8	1,6	–	15,0
Всего	5,6	21,3	22,0	24,4	16,5	9,4	0,8	100

За период исследования максимальные значения повторяемости града отмечались на холодных фронтах и фронтах окклюзии – 30 и 22 % соответственно, повторяемость града на теплых фронтах несколько ниже и составляет 18 %. Во внутримассовых условиях град формируется в 15 % случаев, такую же повторяемость имеет град на вторичных холодных фронтах.

Такое распределение было весьма ожидаемо, так как чаще всего условия для градовой деятельности формируются на холодных фронтах и фронтах окклюзии. Это связано с особенностями возникновения характерных типов облачности для данных фронтов и скоростью их перемещения.

Наибольший процент выпадения града наблюдался на холодных фронтах в июле – 7,9 %, на теплых фронтах в мае и на фронтах окклюзии в июне – по 6,3 %.

Подробный анализ синоптических условий в дни выпадения града на юго-востоке Западной Сибири показал, что внутримассовая конвективная облачность, образующаяся над Западной Сибирью, продуцирует более 15 % случаев выпадения града. Наблюдались ли такие случаи до периода глобального потепления, установить пока не удалось. Заметим, что град, сформировавшийся во внутримассовой облачности, регистрировался только в мае, июне и июле при высокой температуре воздуха у поверхности земли: $22 \leq T \leq 31$ °C.

Поскольку на фоне меняющегося климата град над территорией Западной Сибири стал регистрироваться чаще, актуально сравнить степень развития конвекции в атмосфере в период, когда град стал выпадать чаще, с результатами предыдущих исследований.

В качестве характеристик конвекции используются термодинамические параметры атмосферы – индексы неустойчивости, которые разработаны на основе температурно-влажностных профилей, полученных по данным аэрологических наблюдений. Посредством индексов неустойчивости представляется возможным качественно и количественно оценивать степень устойчивости атмосферы, а зная их пороговые значения – прогнозировать развитие грозы и опасных конвективных явлений погоды. К достоинству индексов неустойчивости атмосферы относится универсальность, так как они позволяют сравнивать параметры конвекции в разных по физико-географическим характеристикам регионах мира и изучать динамику и эволюцию погодных явлений, связанных с конвекцией.

Для исследования были выбраны такие индексы, как: K-index, Totals, CAPE, CINS, EQLV, LFCT [12]. Индексы выписывались по данным аэрологического зондирования атмосферы на станциях Александровское, Колпашево, Новосибирск и Барабинск за сроки 00 и 12 ВСВ [13] в зависимости от взаимного расположения пункта зондирования и метеостанции,

отмечавшей град, а также срока, ближайшего к моменту выпадения града. Были рассмотрены только случаи с выпадением града в летние месяцы, так как в переходные сезоны в журнале «Шторм» могла отмечаться крупа вместо града. За период исследования июнь–август получилось отобрать 83 случая. В табл. 5 приведены значения индексов неустойчивости и значения давления атмосферы (гПа) на высоте нижней (LFCT) и верхней (EQLV) границ конвективной облачности в дни выпадения града за период 2013–2022 гг. Разница высоты верхней и нижней границ конвективной облачности позволила определить мощность конвективно-неустойчивого слоя (КНС) облачности при возникновении града. Получено, что толщина КНС в дни с градом превышает 4 км, увеличиваясь к югу, и в июле может превышать 7 км. Необходимо помнить, что высота верхней границы КНС может превышать вышеуказанные значения, поскольку аэрологическое зондирование атмосферы в сроки максимального развития конвекции в исследуемом регионе не производится.

Выявить особенности характеристик конвекции, включая индексы, характеризующие верхнюю и нижнюю границы градовой облачности в период с 2020 по 2022 г. в дни, когда град регистрировался чаще, чем в

Таблица 5

**Значения индексов неустойчивости атмосферы,
высота верхней и нижней границы облачности в дни с градом**

Месяц	Значение	Индексы неустойчивости атмосферы				
		K-index, °C	Totals, °C	CAPE, Дж/кг	EQLV, гПа	LFCT, гПа
Июнь	Среднее	22	46	170	516	803
	Максимум	36	54	962	829	912
	Минимум	8	35	0,2	215	673
Июль	Среднее	26	47	471	394	782
	Максимум	42	58	3112	736	897
	Минимум	5	29	5	189	658
Август	Среднее	26	48	457	433	765
	Максимум	35	54	2953	719	864
	Минимум	3	38	0,3	191	498
Всего	Среднее	25	47	347	459	786
	Максимум	42	59	3112	830	912
	Минимум	3	29	0,2	189	498
	σ	7,7	4,9	637,3	184,5	77,2

Примечание. σ – среднеквадратическое отклонение.

предыдущие годы, не удалось. Средние значения индексов неустойчивости даже в годы с максимально развитой конвективной облачностью не выходят за пороговые значения, опубликованные в [2, 12]. Следовательно, полученные значения индексов можно использовать для прогноза града, особенно если эти значения рассчитываются по базам спутникового зондирования атмосферы, позволяющим определить пространственную локализацию градовой облачности, а также скорость и направление ее перемещения. Например, детализированное пространственное положение очагов высокой степени неустойчивости атмосферы и их динамику можно отслеживать с помощью спектрорадиометра MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на космических платформах EOS AM-1 (Terra) и EOS PM-1 (Aqua).

В результате проведенных исследований получено:

1. Число случаев выпадения града в умеренных широтах Западной Сибири в последние годы увеличилось в 3–5 раз.

2. Конвективные облачные системы, в которых образуется град, становятся все более обширными в пространстве, а мощные конвективные ячейки, продуцирующие продолжительное выпадение града, стали формироваться значительно чаще.

3. Максимальная повторяемость выпадения града приходится на 15 ч местного времени.

4. Наибольшую повторяемость случаев выпадения града обеспечивает выход на исследуемую территорию циклонов с юго-западных (22 %) и западных (20 %) направлений.

5. Значительную долю случаев выпадения града (14 %) обеспечивают циклоны, сформировавшиеся над территорией Западной Сибири и стационирующие над ней.

6. Максимальные значения повторяемости града отмечались на холодных фронтах и фронтах окклюзии – 30 и 22 % соответственно. До 15 % случаев град над Западной Сибирью формируется при внутримассовых условиях.

7. Исследование данных аэрологического зондирования атмосферы в дни с градом показало, что значения индексов неустойчивости атмосферы в период максимальной повторяемости града (2020–2022 гг.) не выходят за пороговые значения, определенные для Западной Сибири. Мощность конвективной облачности при возникновении града также не отличается от результатов, полученных ранее.

8. Максимальные значения высоты верхней границы облаков в дни с выпадением града наблюдаются в июле и составляют примерно 12 км. Средние значения высоты конвективной облачности для июня и августа составляют примерно 5–7 км.

Литература

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
2. Горбатенко В.П., Кузевская 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.
3. Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т. Прогноз града и оценка его размера на основе глобальной математической модели атмосферы // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2022. № S685. С. 133–140.
4. Горбатенко В.П., Пустовалов К.Н., Громова А.В., Нагорский П.М. Опасные конвективные явления над Западной Сибирью в XXI веке // Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы: доклады конференции (Нальчик, 8–10 сентября 2021 г.). Нальчик: Изд-во «Принт Центр», 2021. С. 455–460.
5. Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Пустовалов К.Н., Громова А.В. Грозовая активность над Западной Сибирью // Геосферные исследования. 2022. № 4. С. 123–134. DOI: 10.17223/25421379/25/8.
6. Справочник по климату СССР. Вып. 20. Ч. V. Облачность и атмосферные явления. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 323 с.
7. Справочник по климату СССР. Вып. 20. Метеорологические данные за отдельные годы. Ч. VIII. Атмосферные явления. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 491 с.
8. Горбатенко В.П., Волкова М.А., Носырева О.В., Кузевская И.В. Современные тенденции климатических характеристик, влияющих на развитие транспортной системы Томской области // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7, № 4. С. 71–95. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-4-71-95.
9. Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Поднебесных Н.В. Циркуляция атмосферы над Западной Сибирью в 1976–2004 гг. // Метеорология и гидрология. 2007. № 5. С. 28–36.
10. Изменение климата. Информационный бюллетень. [Электронный ресурс]. URL: https://ecology.gpntb.ru/uploads/file/Matherials/Izmenenie_klimata_N88_DecJan_202.pdf (дата обращения: 20.06.2023).
11. Горбатенко В.П., Тунаев Е.Л., Пустовалов К.Н., Волкова М.А., Нечепуренко О.Е. Изменения циклогенеза над западной Сибирью в 1976–2017 гг. // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. С. 35–57.
12. Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Севастьянов В.В. Индексы неустойчивости атмосферы и их пороговые значения, оптимальные для прогноза гроз над Сибирью // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 44–59.
13. Atmospheric Soundings // University of Wyoming College of Engineering. [Электронный ресурс]. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обращения: 20.06.2023).