

УДК 551.577(470.53)(045)

*Б.А. Сивков***ОСОБЕННОСТИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ АТМОСФЕРЫ, ПРИ КОТОРЫХ НАБЛЮДАЮТСЯ СИЛЬНЫЕ ОСАДКИ НА ТЕРРИТОРИИ ПЕРМСКОГО КРАЯ В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД ГОДА**

Рассмотрены вертикальные движения атмосферы при выпадении сильных осадков (≥ 50 мм/12 ч или ≥ 30 мм/1 ч) на территории Пермского края в течение 1979 – 2018 гг. на изобарических поверхностях 850, 700 и 500 гПа. Проведен анализ зависимости вертикальных движений от синоптической ситуации, стадии развития циклона, характера выпадающих осадков, средней температуры сезона и рельефа. Показано, что наиболее интенсивные восходящие движения наблюдаются при фронтальных осадках и циклонах, находящихся в стадии молодого барического образования. Интенсивность восходящих движений при выпадении обложных и смешанных осадков оказалась в 1,5–2 раза выше, чем при ливневых. Построение карт распределения вертикальных движений по территории Пермского края показало влияние рельефа на интенсивность вертикальных движений.

Ключевые слова: вертикальные движения, сильные осадки, опасные явления, реанализ CFS, Пермский край.

DOI: 10.35634/2412-9518-2021-31-1-88-96

Как известно, в образовании осадков принимают участие два основных процесса: конденсация водяного пара на начальном этапе и дальнейшее укрупнение облачных элементов за счет коагуляции [1; 2]. Важную роль в образовании осадков играют вертикальные движения. Во-первых, восходящие движения обеспечивают понижение температуры воздуха, благодаря которому в атмосфере наблюдается перенасыщение водяного пара и рост капель за счет конденсации. Во-вторых, капли, поднимаемые восходящими потоками в более высокие слои атмосферы, при падении должны пройти значительную толщину облака, благодаря чему они увеличиваются в размерах за счет коагуляции. Чем интенсивнее восходящие потоки, тем выше смогут подняться облачные элементы.

Другим важным фактором образования осадков является влагосодержание. При его низких значениях образуются осадки слабой интенсивности и/или они имеют кратковременный характер [3]. Таким образом, для образования сильных осадков необходимы два условия: высокое влагосодержание и интенсивные восходящие вертикальные движения.

Данная работа посвящена исследованию вертикальных движений при выпадении сильных осадков, достигших критериев опасного явления (ОЯ): сильный ливень и очень сильный дождь.

Критерием сильного ливня является количество выпавших осадков не менее 30 мм за период не более 1 ч; очень сильного дождя – количество выпавших осадков не менее 50 мм (а в ливнеопасных районах не менее 30 мм) за период не более 12 ч¹.

Материалы и методы исследований

Материалами для исследования послужила следующая информация: 1) даты, когда наблюдались опасные явления в период с 1979 по 2018 г.; 2) данные реанализа модели CFS (Climate Forecasting System) в сроки 0, 6, 12 и 18 ч всемирного согласованного времени (BCV); 3) архив синоптических карт в программном комплексе ГИС Метео.

Для изучения зависимости скорости вертикальных движений от синоптической ситуации и стадии развития циклона для каждого случая с сильными осадками в градации ОЯ определялся тип фронтальной системы и стадия развития циклона, с которой они были связаны [4-6]. Для случаев ОЯ, которые наблюдались в период с 2004 по 2018 гг., анализ проводился по архиву синоптических карт с помощью программы ГИС Метео. Ввиду того, что данный архив начинается лишь с 2004 г., для расширения периода исследования с 1979 по 2003 г. были привлечены данные реанализа модели CFS. С помощью программы OpenGrADS на основе данных реанализа были построены приземные синоптические карты, высотные карты АТ₈₅₀, ОТ_{500/1000} и карты распределения осадков.

¹ РД 52.27.724–2019. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. М., 2019. 66 с.

Из данных реанализа также были получены значения скорости вертикальных движений на изобарических поверхностях 850, 700 и 500 гПа, которые уже были посчитаны моделью. В файлах реанализа скорость вертикальных движений соответствует параметру Vertical velocity (pressure) (VVEL) и имеет единицы измерения Па/с. Восходящие движения имеют отрицательные значения, а нисходящие – положительные. С помощью программы OpenGrADS поля вертикальных движений были сохранены в растровом формате GeoTIFF, который, кроме информации о скорости в каждом узле, также содержит метаданные об их географической привязке, что позволяет проводить пространственный анализ в таких геоинформационных системах, как ArcGIS и QGIS. Для каждого случая с сильными осадками были получены значения скорости вертикальных движений в сроки 0, 6, 12 и 18 ч ВСВ.

Как известно, сильные осадки (особенно ливневые), как правило, носят локальный характер, поэтому имеет смысл определять скорость вертикальных движений не только в конкретной точке (метеостанции), где было зафиксировано явление, но и в некотором радиусе от нее [7; 8]. Это позволяет избежать занижения интенсивности вертикальных движений в случаях пространственной ошибки. Поэтому в данном исследовании выбирались максимальные значения скорости в радиусе 50 км от метеостанции, на которой было зафиксировано ОЯ. С этой целью в программе QGIS для каждой метеостанции были построены буферные зоны с указанным радиусом, в пределах которых определялись значения скорости вертикальных движений.

Результаты и их обсуждение

За исследуемый период 1979–2018 гг. на метеостанциях Пермского края сильные осадки были зарегистрированы 130 раз. При этом 13 раз опасные явления наблюдались на двух станциях. Таким образом, всего за рассматриваемый период наблюдалось 117 случаев с ОЯ: 11 с сильным ливнем и 106 с очень сильным дождем [6].

Средняя скорость вертикальных движений без учета синоптической ситуации и эволюции циклонов составила $-0,423$ Па/с на изобарической поверхности 850 гПа, $-0,517$ Па/с на изобарической поверхности 700 гПа и $-0,506$ Па/с на изобарической поверхности 500 гПа. Таким образом, максимальные скорости вертикальных движений формируются на изобарической поверхности 700 гПа.

В зависимости от синоптической ситуации, при которой сформировались сильные осадки, поля вертикальных движений имеют разный характер распределения скорости (табл. 1).

Таблица 1

Статистические характеристики скорости вертикальных движений (Па/с) при выпадении сильных осадков в зависимости от синоптической ситуации

| Синоптическая ситуация | Статистическая характеристика, Па/с | | | |
|---|-------------------------------------|---------|---------|---------|
| | Максимум | Минимум | Среднее | Медиана |
| 850 | | | | |
| Холодный фронт | -0,059 | -1,439 | -0,471 | -0,444 |
| Теплый фронт | -0,150 | -1,176 | -0,462 | -0,445 |
| Фронт окклюзии | -0,160 | -1,077 | -0,457 | -0,430 |
| Волновое возмущение на малоподвижном фронте | -0,252 | -0,717 | -0,474 | -0,476 |
| Внутримассовые процессы | -0,048 | -0,336 | -0,204 | -0,203 |
| 700 | | | | |
| Холодный фронт | -0,006 | -1,310 | -0,533 | -0,448 |
| Теплый фронт | -0,148 | -1,668 | -0,533 | -0,541 |
| Фронт окклюзии | -0,165 | -1,472 | -0,580 | -0,518 |
| Волновое возмущение на малоподвижном фронте | -0,156 | -1,328 | -0,673 | -0,667 |
| Внутримассовые процессы | -0,040 | -0,387 | -0,205 | -0,221 |
| 500 | | | | |
| Холодный фронт | -0,071 | -0,941 | -0,490 | -0,453 |
| Теплый фронт | 0,007 | -1,528 | -0,558 | -0,422 |
| Фронт окклюзии | -0,060 | -1,885 | -0,592 | -0,586 |
| Волновое возмущение на малоподвижном фронте | -0,189 | -1,629 | -0,641 | -0,509 |
| Внутримассовые процессы | 0,004 | -0,486 | -0,187 | -0,178 |

Как следует из табл. 1, значительная разница в скорости вертикальных движений наблюдается между фронтальными осадками и осадками, связанными с внутримассовыми процессами. Так, скорость восходящих движений при осадках, образованных на атмосферных фронтах, в среднем составила $-0,466$ Па/с на изобарической поверхности 850 гПа, $-0,580$ Па/с на изобарической поверхности 700 гПа и $-0,570$ Па/с на изобарической поверхности 500 гПа. При этом скорость восходящих движений при внутримассовых осадках оказалась в 2–3 раза ниже. Такая большая разница, по-видимому, связана с тем, что восходящие потоки на фронтальных разделах складываются из упорядоченных вертикальных движений, а также термической и вынужденной (на холодных фронтах второго рода) конвекции, в то время как вертикальные движения при внутримассовых процессах формируются за счет лишь термической конвекции.

Если сравнивать скорость вертикальных движений на разных фронтах, то можно увидеть, что значения в целом оказываются близкими по величине, но даже в этих случаях можно выделить некоторые особенности. Например, максимальная скорость восходящих движений в нижней части тропосферы (850 гПа) наблюдается на холодных фронтах, а в средней тропосфере (500 гПа) наибольшие значения скорости достигаются на фронтах окклюзии. Вероятно, это связано с тем, что в нижней тропосфере вертикальные движения на холодных фронтах усиливаются вынужденной конвекцией, интенсивность которой уменьшается с высотой. В то же время в процессе окклюдирования, когда один фронт поднимается по поверхности другого, уровень с интенсивными восходящими движениями смещается в сторону средней тропосферы.

Если скорость восходящих движений на разных фронтах в целом отличается незначительно, то при разных стадиях развития циклонов, с которыми связаны сильные осадки, наблюдаются более заметные различия (табл. 2).

Таблица 2

Статистические характеристики скорости вертикальных движений (Па/с) при выпадении сильных осадков в зависимости от эволюции циклона

| Стадия развития циклона | Статистическая характеристика, Па/с | | | |
|-------------------------|-------------------------------------|---------|---------|---------|
| | Максимум | Минимум | Среднее | Медиана |
| 850 | | | | |
| Стадия волны | -0,252 | -0,562 | -0,445 | -0,463 |
| Молодой циклон | -0,132 | -1,439 | -0,574 | -0,512 |
| Максимальное развитие | -0,150 | -0,714 | -0,399 | -0,430 |
| Заполнение | -0,059 | -1,176 | -0,416 | -0,361 |
| 700 | | | | |
| Стадия волны | -0,430 | -0,733 | -0,651 | -0,716 |
| Молодой циклон | -0,112 | -1,472 | -0,776 | -0,690 |
| Максимальное развитие | -0,008 | -1,022 | -0,425 | -0,411 |
| Заполнение | -0,006 | -1,668 | -0,501 | -0,417 |
| 500 | | | | |
| Стадия волны | -0,403 | -0,954 | -0,609 | -0,544 |
| Молодой циклон | -0,155 | -1,885 | -0,697 | -0,669 |
| Максимальное развитие | -0,078 | -1,247 | -0,468 | -0,411 |
| Заполнение | 0,007 | -1,528 | -0,506 | -0,436 |

Как следует из табл. 2, наиболее высокая скорость вертикальных движений наблюдается тогда, когда циклон находится в стадии молодого барического образования. Средняя скорость на изобарической поверхности 850 гПа составила $-0,574$ Па/с, на изобарической поверхности 700 гПа $-0,776$ Па/с и на изобарической поверхности 500 гПа $-0,697$ Па/с (табл. 2). Наименьшие значения скорости вертикальных движений наблюдаются при сильных осадках, не связанных с циклонической деятельностью, то есть когда развиваются внутримассовые процессы (табл. 1).

В зависимости от физических условий образования, осадки принято делить на обложные, ливневые и осадки смешанного типа (когда наблюдается одновременное выпадение ливневых и обложных осадков). При этом для каждого типа осадков скорость вертикальных движений имеет различные значения.

В настоящем исследовании тип выпадающих осадков определялся по данным метеостанций. Они представляют собой файлы с закодированной, согласно [9], метеоинформацией. В файлах в том числе содержится информация о явлениях, которые наблюдались на метеостанции, их интенсивности, времени начала и окончания. Ливневые осадки кодируются цифрой 64, а обложные цифрой 63. Однако у этой информации есть доля субъективизма, так как иногда бывают ситуации, когда наблюдателю визуально трудно различить ливневой и обложной дождь, что, например, может произойти в случаях, когда слоистообразная облачность маскирует конвективную. Поэтому информацию о типе осадков необходимо тщательно анализировать. Например, в ситуации, когда на протяжении 12 ч наблюдатель фиксирует ливневой дождь неизменной интенсивности, что не характерно для данного типа осадков. Или, наоборот, наблюдатель кодирует обложной дождь, который часто меняет интенсивность от слабой до сильной и имеет малую продолжительность. В таких ситуациях невозможно однозначно определить, ливневой это дождь или же обложной. Поэтому логично данные случаи отнести к ситуациям, когда наблюдались осадки смешанного характера.

Тип осадков определялся только для случаев, которые были зафиксированы в период с 1997 по 2018 г. ввиду отсутствия более ранних данных. Всего за указанный период было зарегистрировано 77 случаев, когда наблюдались сильные осадки, достигшие критерия опасного явления [6]. Из них 47 случаев приходится на осадки ливневого характера, 5 случаев на осадки обложного характера и 25 случаев на осадки смешанного характера. В табл. 3 представлены некоторые статистические характеристики скорости вертикальных движений в зависимости от физических условий образования выпадающих осадков.

Таблица 3

Статистические характеристики скорости вертикальных движений (Па/с) при выпадении сильных осадков в зависимости от физических условий их образования

| Тип осадков | Статистическая характеристика, Па/с | | | |
|-------------|-------------------------------------|---------|---------|---------|
| | Максимум | Минимум | Среднее | Медиана |
| 850 гПа | | | | |
| Ливневые | -0,048 | -0,712 | -0,334 | -0,302 |
| Обложные | -0,498 | -0,827 | -0,607 | -0,571 |
| Смешанные | -0,059 | -1,176 | -0,519 | -0,463 |
| 700 гПа | | | | |
| Ливневые | -0,008 | -1,002 | -0,391 | -0,303 |
| Обложные | -0,421 | -0,912 | -0,684 | -0,631 |
| Смешанные | -0,006 | -1,668 | -0,707 | -0,664 |
| 500 гПа | | | | |
| Ливневые | 0,004 | -1,360 | -0,354 | -0,259 |
| Обложные | -0,080 | -0,924 | -0,697 | -0,809 |
| Смешанные | -0,071 | -1,885 | -0,791 | -0,774 |

Из табл. 3 следует, что наименьшая скорость восходящих вертикальных движений на всех изобарических поверхностях наблюдается при выпадении ливневых осадков. Скорость восходящих вертикальных потоков при обложных и смешанных осадках оказывается в 1,5–2 раза выше, чем при ливневых. Такое распределение скорости вертикальных движений можно объяснить тем, что, как известно, ливневые осадки связаны с кучево-дождевой облачностью, которую можно отнести к масштабу мезо-γ с горизонтальными размерами менее 50 км [10]. В то же время реанализ CFS имеет шаг сетки 0,5°, что на широте 60° соответствует размеру сетки приблизительно 55×27 км. В результате чего кучево-дождевая облачность как бы «проваливается» внутрь сетки и, как следствие, реанализ не позволяет определить скорость вертикальных движений как отдельного кучево-дождевого облака, так и системы такого рода облаков. Кроме того, поле вертикальных движений при образовании осадков ливневого характера более изменчиво, имеет более «рваную» структуру по сравнению с полем вертикальных движений при осадках обложного характера. Это приводит к тому, что в узел сетки может попасть как центр конвекции, так и область нисходящих потоков. Как следствие, средняя скорость вертикальных движений занижается.

По указанным выше данным метеостанций была также рассчитана продолжительность выпадения дождя для каждого случая с сильными осадками. Для выявления зависимости между скоростью вертикальных движений и продолжительностью выпадения осадков были вычислены коэффициенты корреляции на разных изобарических поверхностях. Расчет коэффициентов проводился двумя способами. В первом варианте учитывались все 77 случаев с сильными осадками. Однако, как было показано выше, реанализ не позволяет определить скорость вертикальных движений для процессов масштаба мезо-γ, поэтому для более точного выявления зависимости логично было бы исключить ливневые осадки из общей выборки. Таким образом, во втором варианте коэффициенты корреляции были посчитаны по выборке, которая содержит случаи ОЯ, связанные с выпадением только обложных осадков и осадков смешанного характера (всего 30 случаев). Оценка полученных коэффициентов корреляции на значимость проводилась с помощью вычисления доверительных интервалов [11]. Результаты расчетов представлены в табл. 4 (жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции).

Таблица 4

Значения коэффициентов корреляции между скоростью вертикальных движений и продолжительностью выпадения осадков на разных изобарических поверхностях

| Способ расчета коэффициента корреляции | Изобарическая поверхность, гПа | | |
|--|--------------------------------|--------------|--------------|
| | 850 | 700 | 500 |
| С учетом ливневых осадков | -0,59 | -0,53 | -0,55 |
| Без учета ливневых осадков | -0,55 | -0,24 | -0,06 |

Как следует из табл. 4, чем больше скорость восходящих потоков, тем продолжительнее наблюдаются осадки. При этом наблюдается довольно интересное распределение коэффициентов корреляции с высотой. При расчете коэффициентов с учетом всех типов осадков они мало изменяются с высотой. Если же корреляция посчитана только для обложных осадков и осадков смешанного типа, то ее значения резко уменьшаются с высотой и уже на изобарической поверхности 500 гПа приближаются к нулю. Такое распределение может быть связано с мощностью облаков, из которых выпадают осадки. Как известно, обложные дожди связаны со слоисто-дождевой облачностью, мощность которой, как правило, меньше кучево-дождевой. При этом над слоисто-дождевой облачностью располагается высокослоистая облачность, из которой в летнее время осадки не выпадают. Поэтому, несмотря на то что скорость вертикальных движений на изобарической поверхности 500 гПа еще значительна, восходящие потоки способствуют только образованию облачности среднего яруса, которая не дает осадков. В кучево-дождевой облачности наоборот вертикальные движения способствуют образованию осадков даже на изобарической поверхности 500 гПа, ввиду большей протяженности облака по вертикали и, как следствие, более мощного осадкообразующего слоя. Таким образом, при оценке продолжительности выпадения обложных осадков наиболее информативной является скорость вертикальных движений в нижней тропосфере. В случае ливневых осадков связь между их продолжительностью и скоростью вертикальных движений проявляется как минимум до середины тропосферы.

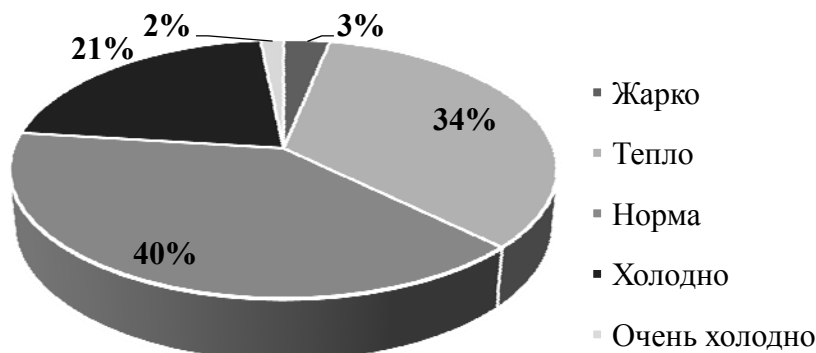


Рис. 1. Повторяемость случаев опасных явлений с сильными осадками в зависимости от температурных условий

С практической точки зрения необходимо знать, зависит ли скорость восходящих движений от температурных условий месяца. С этой целью для всех случаев с опасным явлением сравнивалась средняя температура месяца (T_{cp}), в котором наблюдалось данное опасное явление, со значениями средней многолетней температуры (T_{mn}), рассчитанной за период с 1979 по 2018 г. В результате были определены температурные условия, при которых наблюдалось опасное явление: жарко (при $\Delta T = T_{cp} - T_{mn} \geq 4$ °C), тепло (при $1 < \Delta T < 4$ °C), норма (при $-1 \leq \Delta T \leq 1$ °C), холодно (при $-4 < \Delta T < -1$ °C), очень холодно (при $\Delta T \leq -4$ °C) (рис. 1).

Из рис. 1 следует, что наибольшее количество случаев с сильными осадками наблюдается при малых отклонениях среднемесячной температуры от средней многолетней.

Рассмотрим, как изменяется скорость вертикальных движений при разных температурных режимах. В табл. 5 представлены средние значения скорости вертикальных движений при сильных осадках в зависимости от температурного режима.

Таблица 5

Статистические характеристики скорости вертикальных движений (Па/с) при выпадении сильных осадков в зависимости от температурного режима

| Температурные условия | Статистическая характеристика, Па/с | | | |
|-----------------------|-------------------------------------|---------|---------|---------|
| | Максимум | Минимум | Среднее | Медиана |
| 850 гПа | | | | |
| Жарко | -0,178 | -0,661 | -0,318 | -0,217 |
| Тепло | -0,059 | -1,439 | -0,445 | -0,431 |
| Норма | -0,048 | -1,077 | -0,421 | -0,380 |
| Холодно | -0,079 | -0,827 | -0,405 | -0,370 |
| Очень холодно | -0,445 | -0,463 | -0,454 | -0,454 |
| 700 гПа | | | | |
| Жарко | -0,136 | -1,101 | -0,481 | -0,343 |
| Тепло | -0,006 | -1,668 | -0,561 | -0,541 |
| Норма | -0,085 | -1,472 | -0,493 | -0,395 |
| Холодно | -0,008 | -1,238 | -0,500 | -0,500 |
| Очень холодно | -0,547 | -0,670 | -0,608 | -0,608 |
| 500 гПа | | | | |
| Жарко | -0,139 | -0,837 | -0,406 | -0,323 |
| Тепло | 0,004 | -1,629 | -0,537 | -0,427 |
| Норма | 0,007 | -1,885 | -0,496 | -0,426 |
| Холодно | 0,000 | -1,247 | -0,514 | -0,484 |
| Очень холодно | -0,255 | -0,865 | -0,560 | -0,560 |

Из табл. 5 следует, что в целом наибольшие значения скорости вертикальных движений наблюдаются тогда, когда температурный режим месяца можно классифицировать как теплый. В таких ситуациях повышенная температура воздуха способствует более сильному прогреву и как следствие увеличению скорости вертикальных восходящих движений. При жаркой погоде в атмосфере наблюдается сильный дефицит водяного пара. При таких условиях формирование сильных осадков становится затруднительным. В холодную погоду, наоборот, в атмосфере, как правило, содержится достаточное количество водяного пара, но нет необходимого прогрева для образования сильной конвекции и сильных осадков, поэтому в таких условиях наблюдалось лишь 2 случая с сильными осадками.

На значения скорости вертикальных движений в значительной степени может оказывать влияние неоднородный рельеф. Так, возвышенные формы рельефа способствуют увеличению интенсивности восходящих потоков, поэтому при прогнозе осадков необходимо учитывать местные орографические особенности.

В западной части Пермского края преобладает низменный и равнинный рельеф. В восточной же части края, где проходят Уральские горы, рельеф имеет горный характер [12]. Также небольшая возвышенность располагается в южной части региона (южнее Перми). Высота метеорологических станций меняется от 95,6 до 462,8 м над уровнем моря [13].

На рис. 2 представлено распределение средней скорости вертикальных движений на разных изобарических поверхностях, при которых наблюдались сильные осадки на территории Пермского края.

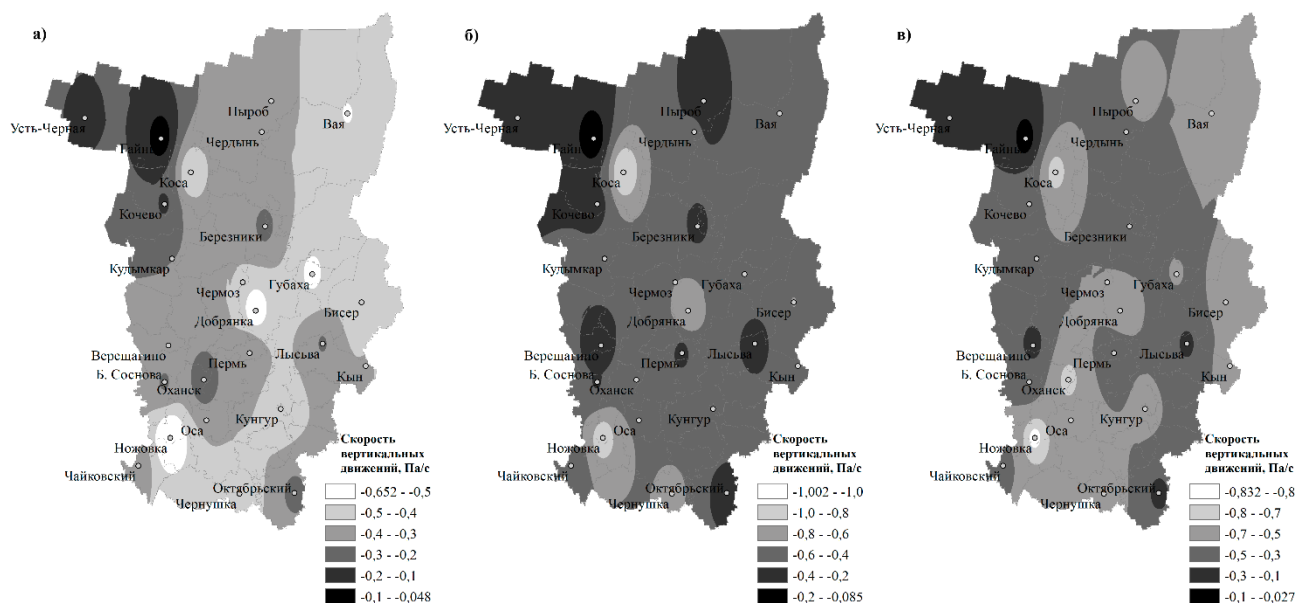


Рис. 2. Распределение средней скорости вертикальных движений (Па/с) на разных изобарических поверхностях, при которых наблюдались сильные осадки по территории Пермского края: а) 850 гПа; б) 700 гПа, в) 500 гПа

На рис. 2 видно, что рельеф Пермского края наиболее сильно оказывает влияние на распределение скорости восходящих потоков на изобарической поверхности 850 гПа. На поверхностях 700 и 500 гПа вертикальные движения имеют более равномерное распределение. Это связано с тем, что высота горной местности не превышает 1500 м над уровнем моря, что соответствует средней высоте изобарической поверхности 850 гПа. С увеличением высоты влияние рельефа ослабевает.

Также можно отметить, что на всех высотах прослеживается очаг высокой скорости вертикальных движений возле метеостанций Ножовка и Оса, расположенные у подножия Тулвинской возвышенности, имеющей высоту около 450–500 м над уровнем моря. Данный факт свидетельствует о том, что даже относительно невысокие формы рельефа могут оказывать влияние на поля вертикальных движений, что следует учитывать при составлении прогноза осадков.

Выводы

Подводя итоги исследования, можно сделать следующие выводы:

1. Более высокая скорость восходящих потоков наблюдается при сильных осадках, образующихся на атмосферных фронтах. При этом разница между значениями скорости на разных фронтах не значительна. Осадки, связанные с внутримассовыми процессами, образуются при меньшей скорости вертикальных движений.

2. Интенсивность вертикальных движений также зависит от стадии развития циклонов, с которыми связаны сильные осадки. Наиболее высокая скорость вертикальных движения наблюдается, когда циклон находится в стадии молодого барического образования. Наименьшие значения скорости вертикальных движений наблюдаются при сильных осадках, не связанных с циклонической деятельностью, то есть когда наблюдаются внутримассовые процессы.

3. Анализ зависимости между скоростью вертикальных движений и типом выпадающих осадков показал, что наименьшая скорость восходящих вертикальных движений на всех изобарических поверхностях наблюдается при выпадении ливневых осадков. Скорость восходящих вертикальных потоков при обложных осадках и осадках смешанного типа оказывается в 1,5–2 раза выше, чем при ливневых. Однако полученные результаты сравнения скорости вертикальных движений при разных типах осадков необходимо считать предварительными ввиду того, что скорость вертикальных движений при ливневых осадках по данным реанализа может быть занижена.

4. С помощью коэффициентов корреляции была выявлена связь между продолжительностью выпадения сильных осадков и скоростью вертикальных движений на разных изобарических поверхностях. Чем больше скорость восходящих потоков, тем продолжительнее наблюдаются осадки. Однако при оценке продолжительности выпадения обложных осадков наиболее информативной является скорость вертикальных движений в нижней тропосфере.

5. Анализ температурных условий образования сильных осадков показал, что наибольшие значения скорости вертикальных движений наблюдаются тогда, когда температурный режим месяца можно классифицировать как теплый. В таких ситуациях повышенная температура воздуха способствует более сильному прогреву и как следствие увеличению скорости вертикальных восходящих движений.

6. Выявлено влияние рельефа на распределение скорости вертикальных движений. Наиболее сильно рельеф Пермского края оказывает влияние на распределение скорости восходящих потоков на изобарической поверхности 850 гПа. На поверхностях 700 и 500 гПа вертикальные движения имеют более равномерное распределение. При этом было выявлено, что даже относительно невысокие формы рельефа могут оказывать влияние на поля вертикальных движений, что следует учитывать при составлении прогнозов осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева А.А. Подходы к решению проблемы прогнозирования сильных летних осадков // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С. 51-67.
2. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л: Гидрометеиздат, 1984. 751 с.
3. Марченко О.Ю., Мордвинов В.И., Антохин П.Н. Исследование долговременной изменчивости и условий формирования атмосферных осадков в бассейне реки Селенга // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 12. С. 1084-1090.
4. Калинин Н.А., Сивков Б.А., Дмитриев А.В. Условия формирования ливневых осадков теплого периода в Пермском крае // Вестн. Удм. ун-та. Серия Биология. Науки о Земле. 2020. Т. 30, вып. 3. С. 295-306.
5. Сергеева Е.С., Калинин Н.А. Характеристика условий выпадения очень сильных дождей в Пермском крае с помощью индексов неустойчивости атмосферы // Вестн. Удм. ун-та. Серия Биология. Науки о Земле. 2020. Т. 30, вып. 2. С. 207-214.
6. Сивков Б.А., Калинин Н.А. Особенности термодинамического состояния атмосферы при сильных осадках на территории Пермского края // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 83-95.
7. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В., Тарасов А.В. Анализ результатов численного прогноза ливневых осадков по модели WRF с применением различных параметризаций конвекции (на примере территории Пермского края) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. Вып. 373. С. 43-59.
8. Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А. Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2017. № 363. С. 101-119.
9. Методические указания по машинной обработке и контролю данных гидрометеорологических наблюдений. Вып. 9, часть 1, раздел 1. Обнинск: Изд-во ВНИЦГМИ-МЦД, 1976. 119 с.
10. Вельтишев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы. М.: Изд-во МГУ, 2006. 101 с.
11. Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В. и др. Климатология / Науч. ред. О.А. Дроздов, Н.В. Кобышева. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 568 с.
12. Назаров Н.Н. География Пермского края. Ч. 1. Природная (физическая) география: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Пермь: Перм. гос. ун-т, 2011. С. 5-134.
13. Пищальникова Е.В., Калинин Н.А. Условия формирования и прогноз обильных снегопадов в Пермском крае. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т., 2016. 168 с.

Поступила в редакцию 27.01.2021

Сивков Богдан Алексеевич, младший научный сотрудник
ФГБУ «Уральский государственный научно-исследовательский институт
региональных экологических проблем»
614039, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, 61а
E-mail: sivckovbogdan@yandex.ru

B.A. Sivkov

FEATURES OF VERTICAL MOTIONS OF THE ATMOSPHERE AT WHICH HEAVY PRECIPITATIONS ARE OBSERVED IN THE TERRITORY OF PERM REGION DURING THE WARM SEASON OF THE YEAR

DOI: 10.35634/2412-9518-2021-31-1-88-96

The paper considers the vertical motions of the atmosphere during heavy precipitation (≥ 50 mm/12h or ≥ 30 mm/1h) in Perm region during the period 1979–2018 on isobaric surfaces of 850, 700, and 500 hPa. The analysis of the dependence of the intensity of vertical motions on the synoptic situation, the stage of cyclone development, the nature of precipitation, average temperature of season, and topography is carried out. It is shown that the most intense upward motions are observed during frontal precipitation and cyclones that are in the stage of young baric structure. The intensity of upward motions in the case of widespread and mixed precipitation was 1.5–2 times higher than in the case of heavy rain. Construction of maps of the distribution of vertical motions in the territory of Perm region showed the influence of topography on the intensity of vertical motions.

Keywords: vertical motions, heavy precipitation, dangerous phenomenon, CFS reanalysis, Perm region.

REFERENCES

1. Alekseeva A.A. [The approaches to solving the problems of forecasting heavy summer precipitation], in *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2014, vol. 351, pp. 51–67 (in Russ.).
2. Matveev L.T. *Kurs obshchey meteorologii. Fizika atmosfery* [General Meteorology Course. Physics of the atmosphere], Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1984, 751 p. (in Russ.).
3. Marchenko O.Yu., Mordvinov V.I., Antochin P.N. [Investigation of long-term variability and conditions for formation of precipitation in the Selenge River basin], in *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2012, vol. 25, no. 12, pp. 1084–1090 (in Russ.).
4. Kalinin N.A., Sivkov B.A., Dmitriev A.V. [Formation conditions of warm-season storm rainfall in Perm region], in *Vestn. Udmurt. Univ. Ser. Biol. Nauki o Zemle*, 2020, vol. 30, iss. 3, pp. 295–306 (in Russ.).
5. Sergeeva E.S., Kalinin N.A. [Characteristic of conditions of heavy rains in Perm region using atmospheric instability indices], in *Vestn. Udmurt. Univ. Ser. Biol. Nauki o Zemle*, 2020, vol. 30, iss. 2, pp. 207–214 (in Russ.).
6. Sivkov B.A., Kalinin N.A. [Peculiarities of the thermodynamic state of the atmosphere under heavy precipitation in the Perm region], in *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, no.1 (375), pp.83–95 (in Russ.).
7. Kalinin N.A., Shikhov A.N., Bykov A.V., Tarasov A.V. [Analysis of numerical forecasts of heavy precipitation with the WRF model using various convection schemes (a case study for the Perm Krai)], in *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 373, pp. 43–59 (in Russ.).
8. Bykov A.V., Vetrov A.L., Kalinin N.A. [The forecast of dangerous convective phenomena in the Perm Krai with use of global prognostic models], in *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, iss. 363, pp. 101–119 (in Russ.).
9. Metodicheskie ukazaniya po mashinnoj obrabotke i kontrolyu dannyh gidrometeorologicheskikh nablyudenij. Iss. 9, part 1, section 1. Obninsk: VNIIGMI-MCD Publ. 1976. 119 p. (in Russ.).
10. Vel'tishhev N.F., Stepanenko V.M. *Mezometeorologicheskie processy* [Mesometeorological processes], Moscow: Mosc. Gos. Univ., 2006, 101 p. (in Russ.).
11. Drozdov O.A., Vasil'ev V.A., Kobysheva N.V. *Klimatologiya* [Climatology], Drozdov O.A. and Kobysheva N.V. (ed), Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1989, 598 p. (in Russ.).
12. Nazarov N.N. *Geografiya Permskogo kraja. CH. I. Prirodnaya (fizicheskaya) geografiya* [Geography of the Perm Territory. Part 1. Natural (physical) geography], Perm: Perm. Gos. Univ., 2011, pp. 5–134 (in Russ.).
13. Pishchal'nikova E.V., Kalinin N.A. *Usloviya formirovaniya i prognoz obil'nyh snegopadov v Permskom krae* [Conditions of formation and forecast of heavy snowfall in the Perm region], Perm: Perm. Gos. Univ., 2016, 168 p. (in Russ.).

Received 27.01.2021

Sivkov B.A., junior researcher
 Ural State Research Institute of Regional Environmental Problems
 Komsomolskiy prosp., 61a, Perm, Russia, 614039
 E-mail: sivkovbogdan@yandex.ru