

ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ АТМОСФЕРЫ В ПЕРИОД ВЫПАДЕНИЯ ОЧЕНЬ СИЛЬНЫХ СНЕГОПАДОВ В ПЕРМСКОМ КРАЕ

Рассмотрена зависимость интенсивности очень сильных снегопадов от общего влагосодержания атмосферы в Пермском крае за период 1979–2013 гг. Наибольшая теснота связи выявлена между максимальной интенсивностью осадков и максимальным и средним влагосодержанием атмосферы. Показано распределение количества влаги в пространстве и во времени, выявлено влияние орографии. Установлено, что 47% значений общего влагосодержания, при котором образуется опасное явление, изменяется в пределах от 4,0 до 7,9 кг/м².

Ключевые слова: влагосодержание; очень сильный снегопад; опасное природное явление; Пермский край.

Введение

Исследованию влагосодержания в отдельных слоях и во всей толще атмосферы уделяется большое внимание [1–5]. К настоящему времени накоплен значительный по объему материал наблюдений за влагосодержанием атмосферы [6. С. 25].

В научном плане проведение исследований, связанных с влагосодержанием, объясняется тем, что оно позволяет более полно учесть энергетические ресурсы атмосферы, оценка которых важна при решении задач по активным воздействиям на циклоны [7. С. 103; 8. С. 17].

В практическом плане использование данных о количестве влаги в слоях атмосферы оказывает существенную помощь при фронтологическом анализе, особенно в тех случаях, когда в поле температуры, барических тенденциях или ветра приземный фронт выражен нечетко [9. С. 80; 10. С. 30].

Известно, что с процессами влагообмена связаны образование облачности и выпадение осадков [11. С. 93; 12. С. 14], которые в свою очередь могут оказывать не только положительное, но и отрицательное влияние на некоторые стороны жизнедеятельности человека [13. С. 3].

Изучение процессов формирования очень сильного снегопада в зависимости от общего влагосодержания воздушной массы над территорией Пермского края имеет важный практический характер. В зависимости от синоптических условий сильные снегопады могут уменьшать дальность видимости до критических значений, тем самым приводя к снижению скорости движения транспорта и осложняя взлет и посадку воздушных судов, а также способствуют образованию снежных заносов и накатов, затрудняя работу наземного транспорта и, порой, останавливая её полностью. Выпадение мокрого снега создает колоссальную нагрузку на линии электропередач, приводя к их обрыву, и тем самым наносит социальный и экономический ущерб [14. С. 69].

Таким образом, выбранная проблема – изучение общего влагосодержания атмосферы как фактора формирования очень сильного снегопада – является актуальной.

Цель данного исследования – установление зависимости между количеством влаги во всей толще ат-

мосферы и интенсивностью очень сильных снегопадов в Пермском крае за период 1979–2013 гг.

Влагосодержание и способы его определения

Под общим (интегральным) влагосодержанием понимается количество водяного пара в килограммах, содержащееся в столбе атмосферы с площадью основания 1 м² [15. С. 456], которое может быть определено несколькими способами. Метод самолетного зондирования является одним из наиболее эффективных подходов [16. С. 338], но в силу своей дороговизны он используется крайне редко и на ограниченной территории.

Определение количества влаги также возможно по результатам радиометрических измерений из космоса [17. С. 670; 18. С. 33], однако следует помнить, что наиболее точное определение влагосодержания возможно лишь над водной поверхностью в определенных географических районах в определенные сезоны года, характеризующихся достаточно большим увлажнением. Наиболее простым и надежным методом определения влагосодержания является аэрологический метод, который позволяет рассчитать запасы влаги в атмосфере из прямых измерений влажности воздуха радиозондом на различных высотах [19; 20. С. 40].

Изучение количества влаги на основе данных реанализа получило широкое распространение [21. С. 245; 22. С. 1084]. Несмотря на ряд ограничений [23. С. 923], данные реанализа являются термодинамически согласованными и полезными источниками [24. С. 50], в том числе применительно к осадкам, испарению и распределению запасов влаги в атмосфере.

Исходные данные

К опасным природным явлениям (ОЯ) холодного периода относится очень сильный снегопад, когда количество осадков, выпавшее за 12 ч, составляет 20 мм и более [25. С. 18]. По данным метеорологических ежемесячников [26], за период 1979–2013 гг. были отобраны дни, когда данное явление наблюдалось на территории Пермского края. В результате за исследуемый период опасный снегопад отмечался суммарно в течение 28 дней. За день с явлением принят день, когда явление было зарегистрировано на

одной или нескольких метеорологических станциях (МС); одно явление, продолжающееся до 48 ч, рассматривалось как один случай.

Число случаев и интенсивность снегопадов, достигших критерия ОЯ, сопоставлялись с данными реанализа CFS (Climate Forecasting System) [27, 28] об общем влагосодержании атмосферы PWAT (precipitable water, кг/м²). Выбор данного архива был обусловлен рядом причин:

- высокое пространственное разрешение (0,5 градуса);
- шаг по времени 1 ч;
- огромное количество различных параметров;
- удобный формат данных в коде GRIB2;
- глубина архива с 1979 г. по настоящее время.

Извлечение данных об общем влагосодержании атмосферы в узлы сетки и их сплайн-интерполяция в координаты МС выполнялись с помощью программного пакета ArcGis 10.1. В результате для каждого дня с очень сильным снегопадом получены значения количества влаги в сроки 0.00, 6.00, 12.00, 18.00 ч всемирного согласованного времени (BCB). В случае, когда снегопад достиг опасной величины днем, интенсивность ОЯ сопоставлялась со значениями общего влагосодержания в сроки 6.00 и 12.00 BCB, когда

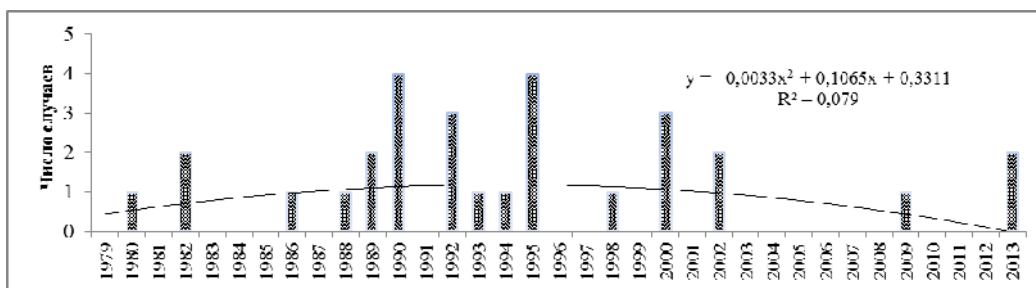
ночью – в сроки 18.00 и 0.00 ч BCB, так как измерение осадков производится два раза в сутки: в 3.00 и 15.00 BCB.

Анализ полученных результатов

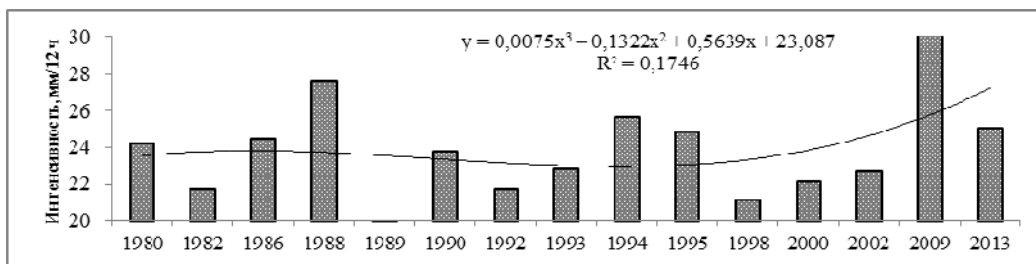
Временное распределение числа случаев очень сильных снегопадов в Пермском крае за период 1979–2013 гг. имеет следующие особенности: ОЯ отмечается реже, чем в половине лет, от одного до четырех случаев в год (рис. 1, а).

Основная часть опасных снегопадов (57%) наблюдалась в период с 1988 по 1995 г., который характеризуется наличием максимальной годовой повторяемости явления. Также можно указать на общую тенденцию к уменьшению числа случаев опасных снегопадов в Пермском крае.

Распределение интенсивности явления по годам отличается от распределения числа случаев. Так, на фоне уменьшения повторяемости возрастает интенсивность очень сильного снегопада (рис. 1, б). До 1995 г. отмечается ровный тренд с интенсивностью ОЯ на уровне 24 мм/12 ч. Начиная с 1998 г. наблюдается возрастающий тренд до интенсивности в 27 мм/12 ч.



а



б

Рис. 1. Распределение числа случаев (а) и интенсивности (б) очень сильных снегопадов в Пермском крае по годам за период 1979–2013 гг.

Внутригодовая изменчивость количества случаев очень сильных снегопадов и их интенсивности показана на рис. 2, из которого видно, что минимумы значений зафиксированы в феврале (один случай при интенсивности 21,1 мм/12 ч), максимумы такого же согласования не имеют. Наибольшая повторяемость опасного снегопада отмечается в ноябре (29%) при интенсивности ниже средней многолетней (22,2 мм/12 ч). Максимальная интенсивность явления (26,3 мм/12 ч) наблюдается в апреле при частоте случаев в 14%.

Зимой в режиме атмосферной циркуляции над Пермским краем преобладают циклоны северо-западного и западного типов, далее – юго-западного и южного, редко – северного. Необходимо отметить, что в среднем за холодный период на погоду в Пермском крае оказывают влияние около сотни циклонов разного типа, но опасный снегопад формирует около 1% из них [29. С. 89]. Образование очень сильного снегопада связано с крупномасштабной циклонической деятельностью, однако носит локальный характер, поэтому анализ временного и пространственного

распределения общего влагосодержания как осадкообразующего фактора является необходимым для

лучшего понимания причин, вызывающих образование снегопадов опасной величины в пункте.

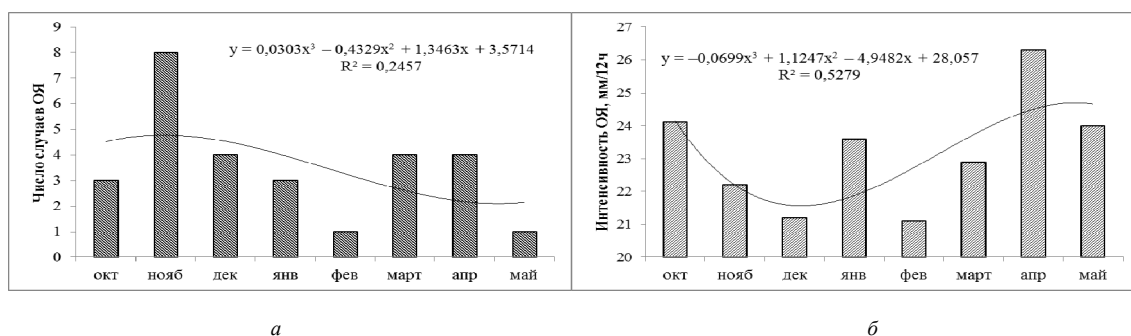


Рис. 2. Внутригодовое распределение числа случаев (а) очень сильных снегопадов и их интенсивности (б) в Пермском крае за период 1979–2013 гг.

Статистическое распределение общего влагосодержания атмосферы при выпадении опасного снегопада представлено в табл. 1. Данные описательной статистики получены на базе пакета анализа Excel. Исследу-

емое распределение общего влагосодержания имеет большой размах – от 3,2 до 20,4 кг/м², значимую асимметрию с преобладающим положительным отклонением от среднего и сильную вариацию [30. С. 24].

Таблица 1

Статистическое распределение общего влагосодержания при выпадении очень сильных снегопадов в Пермском крае за период 1979–2013 гг.

| Номер градации | Интервал общего влагосодержания, кг/м ² | Срединное значение интервала, кг/м ² | Частоты | Накопленные частоты | Повторяемость, % | Относительная частота | Накопленные относительные частоты |
|-----------------------|--|---|---------|------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 1 | 2,0–3,9 | 3,0 | 3 | 3 | 2 | 0,02 | 0,02 |
| 2 | 4,0–5,9 | 5,0 | 31 | 34 | 24 | 0,24 | 0,26 |
| 3 | 6,0–7,9 | 7,0 | 30 | 64 | 23 | 0,23 | 0,49 |
| 4 | 8,0–9,9 | 9,0 | 15 | 79 | 12 | 0,12 | 0,61 |
| 5 | 10,0–11,9 | 11,0 | 15 | 94 | 12 | 0,12 | 0,72 |
| 6 | 12,0–13,9 | 13,0 | 18 | 112 | 14 | 0,14 | 0,86 |
| 7 | 14,0–15,9 | 15,0 | 11 | 123 | 8 | 0,08 | 0,95 |
| 8 | 16,0–17,9 | 17,0 | 3 | 126 | 2 | 0,02 | 0,97 |
| 9 | 18,0–19,9 | 19,0 | 1 | 127 | 1 | 0,01 | 0,98 |
| 10 | 20,0–21,9 | 21,0 | 3 | 130 | 2 | 0,02 | 1,00 |
| Объем выборки | | | 130 | Мода | | | 7,1 |
| Минимальное значение | | | 3,2 | Стандартная ошибка | | | 0,36 |
| Максимальное значение | | | 20,4 | Стандартное отклонение | | | 4,05 |
| Среднее значение | | | 9,3 | Дисперсия выборки | | | 16,39 |
| Размах выборки | | | 17,2 | Экссесс | | | -0,26 |
| Медиана | | | 8,2 | Асимметричность | | | 0,67 |

Можно отметить, что основная часть случаев рассматриваемого ОЯ в Пермском крае наблюдается при общем влагосодержании от 4 до 16 кг/м². При этом наибольшая совокупная повторяемость приходится на 2 и 3 градации, т.е. около половины значений количества влаги в атмосфере сконцентрировано в интервале от 4,0 до 7,9 кг/м². Таким образом, в качестве средней величины общего влагосодержания при выпадении опасного снегопада следует считать моду со значением в 7,1 кг/м². Отдельные случаи с повторяемостью 1–2% отмечаются как при более низких (менее 3,9 кг/м²), так и при более высоких значениях (более 16,0 кг/м²) количества влаги в атмосфере.

Временная изменчивость общего влагосодержания атмосферы в период выпадения очень сильного снегопада на территории Пермского края главным образом определяется циркуляционными условиями и характеризуется следующими особенностями (рис. 3):

1. Экстремально высокие значения запасов влаги (минимального, максимального и среднего) отмечаются в 1982 г. и составляют 12,7–21,7 кг/м². Очень сильный снегопад в этом году сформировался при среднем влагосодержании в 16,3 кг/м².

2. Экстремально низкие значения влагосодержания (минимального, максимального и среднего) наблюдаются в разные годы: минимального – в 1989 г. и составляет 2,7 кг/м², максимального – в 1998 г. и достигает 5,7 кг/м², среднее значение количества влаги при выпадении опасного снегопада равняется 4,7 кг/м² и отмечалось в 1993 г.

3. Нисходящий тренд (на 8 единиц) среднего влагосодержания при ОЯ наблюдается в период 1979–1989 гг., ровный тренд с количеством влаги на уровне 7,3 кг/м² – в период 1990–1995 гг., плавный восходящий (на 2 единицы) – с 1998 г. по настоящее время.

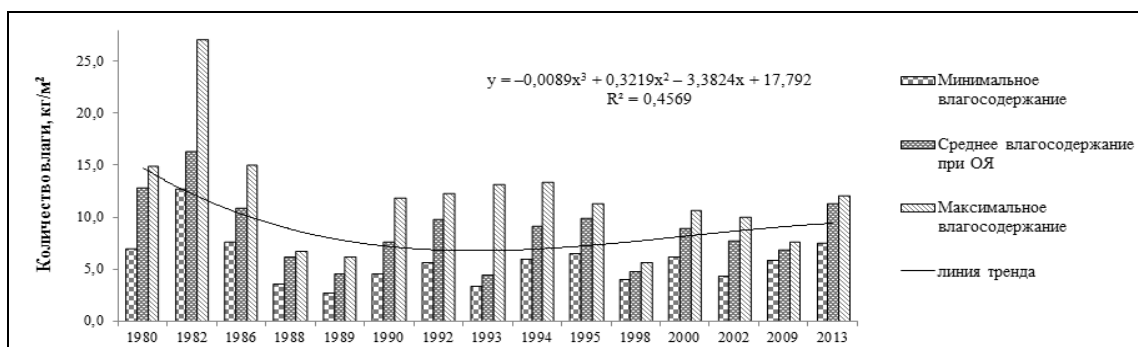


Рис. 3. Распределение осредненного общего влагосодержания в атмосфере при выпадении опасных снегопадов в Пермском крае за период 1979–2013 гг.

Восходящий тренд общего влагосодержания с конца 90-х гг. прошлого века согласуется с восходящим трендом интенсивности очень сильного снегопада, из чего можно заключить, что формирование снегопада опасной величины напрямую зависит от изменения количества влаги в атмосфере.

Содержание водяного пара в земной атмосфере за короткие промежутки времени претерпевает существенные временные изменения. Экстремальные ве-

личины (максимум и минимум) общего влагосодержания атмосферы могут различаться в одном и том же физико-географическом районе в несколько раз. Так, зимой величина общего влагосодержания варьируется от 0,3 до 20 кг/м³, летом – от 1 до 55 кг/м³ [6. С. 27].

Общее влагосодержание имеет внутригодовую изменчивость, которая согласуется с внутригодовой вариацией интенсивности очень сильного снегопада (рис. 4).

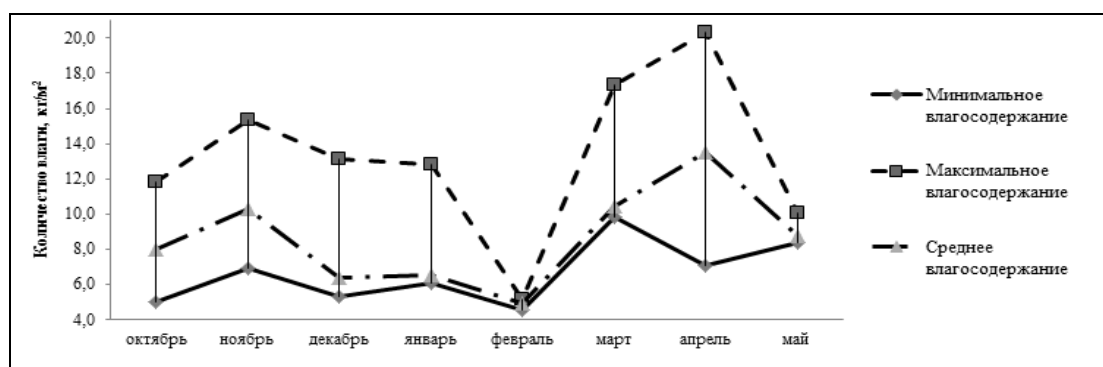


Рис. 4. Интервал общего влагосодержания в атмосфере при выпадении опасных снегопадов за период 1979–2013 гг. в Пермском крае по месяцам

В осенне-зимний период опасные снегопады наблюдаются при минимальных значениях влаги в атмосфере от 4,5 до 6,9 кг/м³, в весенний – от 7,0 до 9,8 кг/м³. Максимальные значения аналогичного распределения не имеют, но можно обозначить пиковые: с минимумом в феврале – 5,2 кг/м³ и максимумом в апреле – 20,4 кг/м³, а также преобладающие значения от 10,1 до 17,4 кг/м³. Самый широкий интервал значений влагосодержания отмечается в апреле и равняется 7,0–20,4 кг/м³, самый узкий в феврале – 4,0–5,2 кг/м³. Следовательно, можно сделать вывод о том, что очень сильные снегопады, выпадающие в апреле (феврале), имеют максимальную (минимальную) интенсивность благодаря наличию высокого (низкого) содержания влаги в атмосфере.

Значение коэффициента корреляции, полученного между количеством атмосферной влаги и интенсивностью рассматриваемого ОЯ, варьируется от 0,1 до 0,7 (табл. 2). Наибольшая теснота связи ($r = 0,7$) установлена между максимальной интенсивностью осадков и максимальным и средним влагосодержанием атмосферы, которое может быть использовано в каче-

стве дополнительной характеристики при диагнозе и прогнозе максимальной интенсивности осадков опасной величины в холодный период года.

Существует зависимость между влагосодержанием и температурой воздушной массы, т.е. в атмосферном воздухе содержится тем больше количества водяного пара, чем выше температура [31]. Эта зависимость прослеживается четко, особенно при выпадении очень сильного снегопада в переходные периоды года. Так, например, 10 апреля 1990 г., когда по рассматриваемой территории выпадали осадки смешанного характера, пространственное изменение общего влагосодержания варьировалось от 4,8 до 19,2 кг/м³. На севере края, где отмечался наиболее низкий фон температуры воздуха, снегопад достиг опасной величины при количестве влаги в воздухе в 7,1 кг/м³. Интересно отметить, что формирование опасного явления произошло при содержании влаги, близком к наименьшему значению, в то время как в южных районах края, где запасы влаги достигали значений 11,3–19,2 кг/м³, осадки выпадали в виде дождя на фоне положительных значений температуры воздуха.

Значение коэффициентов корреляции между общим влагосодержанием атмосферы и интенсивностью очень сильных снегопадов

| Общее влагосодержание, кг/м ² | Интенсивность опасного снегопада, мм/12 ч | | |
|--|---|--------------|---------|
| | минимальная | максимальная | средняя |
| Минимальное | 0,3 | 0,5 | 0,4 |
| Максимальное | 0,1 | 0,7 | 0,4 |
| Среднее | 0,1 | 0,7 | 0,4 |

Таким образом, предположение о выпадении снегопада опасной величины, сделанного на основе данных только о влагосодержании воздушной массы, может быть ошибочным, так как необходимо проводить комплексный анализ с учетом распределения температуры воздуха по вертикали с целью определения фазового состояния осадков.

Пространственное распределение общего влагосодержания по земному шару обладает закономерным возрастанием значений от полюсов к экватору, однако простого зонального распределения не получается в связи с влиянием физико-географических и циркуляционных условий, времени года, характера подстилающей поверхности. Так, зимой в умеренных широтах суммарное содержание водяного пара над континентами составляет около 3 кг/м² и близко по значению к влагосодержанию в полярных широтах. В то же время над умеренными широтами океанов количество влаги достигает 20 кг/м² [6. С. 26].

Анализ распределения общего влагосодержания в период образования опасного снегопада по территории Пермского края позволяет отметить некоторые особенности. Наименьшее среднее значение количества влаги в атмосфере, осреднённое за период 1979–

2013 гг., отмечается на МС Вая, расположенной на северо-востоке рассматриваемой территории на высоте 183 м над уровнем моря, и составляет 7,3 кг/м², наибольшее – на МС Чайковский, расположенной на крайнем юго-западе на высоте 98 м над уровнем моря, и достигает 10,0 кг/м². Территориальное распределение общего влагосодержания характеризуется уменьшение значений с юго-запада на северо-восток, что согласуется с распределением приземного поля температуры воздуха [32. С. 30]. Однако заметим, что распределение содержания влаги противоположно распределению поля осадков, так как их годовая норма в Пермском крае возрастает от 410 мм на юго-западе до 1 000 мм на северо-востоке [33. С. 96].

За исследуемый период очень сильный снег фиксировался на 13 МС из 25, расположенных в Пермском крае, большая часть случаев отмечалась в северной половине территории. При этом наименьшее содержание влаги в земной атмосфере составило 6,1 кг/м² и наблюдалось на МС Губаха, расположенной на востоке края на высоте 274 м над уровнем моря; наибольшее – 16,2 кг/м² на МС Гайны, расположенной на северо-западе территории на высоте 196 м над уровнем моря (рис. 5).

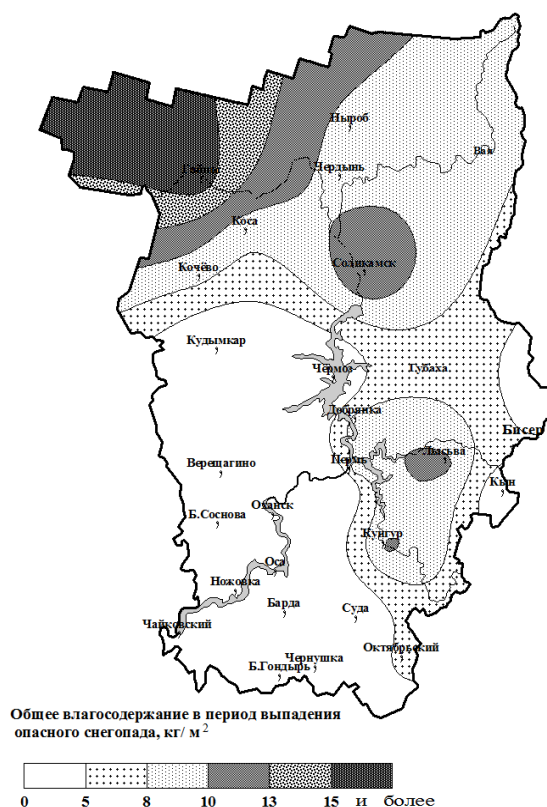


Рис. 5. Территориальное распределение общего влагосодержания атмосферы при выпадении очень сильного снегопада в Пермском крае, осредненного за период 1979–2013 гг.

Для детального анализа пространственного распределения общего влагосодержания разделим территорию Пермского края на северную и южную половину. Таким образом, воображаемая линия должна пройти вблизи параллели 59° с.ш. через МС Чермоз и Губаха, оставляя их на северной половине. При этом в северной части края содержания влаги в атмосферном воздухе при выпадении снегопада опасной величины уменьшается от 16,2 кг/м² на северо-западе до 6,1 кг/м² на юго-востоке, в то время как число случаев с ОЯ, наоборот, увеличивается (от одного случая на МС Гайны до шести на МС Чердынь). Значит, для образования очень сильного снегопада на северо-востоке края достаточно запасов влаги в атмосфере в интервале 6–9 кг/м². В южной половине края очень сильный снег отмечается преимущественно на востоке. Частота случаев возрастает от одного на юге (МС Октябрьский) до четырех на севере (МС Лысьва, расположенная на высоте 223 м над уровнем моря). При этом распределение общего влагосодержания имеет аналогичное распределение: количество влаги в атмосфере возрастает с юга (6,4 кг/м² в Октябрьском) на север (10,5 кг/м² в Лысьве).

Отметим, что прослеживается общая закономерность распределения общего влагосодержания в период выпадения опасного снегопада для южной и северной половины Пермского края: ОЯ наблюдается при меньшем содержании влаги в атмосфере на МС, находящихся на большей высоте.

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Преобладающее значение количества влаги в атмосфере, при котором образуются снегопады опасной величины, приходится на интервал от 4,0 до 7,9 кг/м².
2. Наиболее тесная связь ($r = 0,7$) наблюдается между максимальной интенсивностью опасного снегопада и максимальным и средним интегральным влагосодержанием атмосферы.
3. Максимальная (минимальная) интенсивность очень сильных снегопадов, выпадающих в апреле (феврале), отмечается при наличии высокого (низкого) содержания влаги в атмосфере.
4. В осенне-зимний период опасные снегопады наблюдаются при минимальных значениях влаги в атмосфере от 4,5 до 6,9 кг/м², в весенний – от 7,0 до 9,8 кг/м².
5. Общее влагосодержание в период выпадения очень сильного снега уменьшается с юго-запада на северо-восток.
6. Выявлено, что при меньшем содержании влаги в атмосфере опасный снегопад формируется на МС, находящихся на большей высоте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев Л.Т. Динамика облаков. Л. : Гидрометеиздат, 1981. 311 с.
2. Матвеев Л.Т., Солдатенко С.А. Влагосодержание вертикального столба атмосферы // Труды ВНИИГМИ–МЦД, 1982. Вып. 94. С. 36–42.
3. Кузнецова Л.П. Атмосферный влагообмен над территорией СССР. М. : Наука, 1983. 173 с.
4. Скляднева Т.К., Ломакина Н.Я., Бедарева Т.В. Пространственно-временное распределение общего содержания водяного пара и озона в континентальных районах Сибири и переходной зоне «материк-океан» Дальнего Востока // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1077–1083.
5. Ситнов С.А., Мохов И.И. Особенности распределения водяного пара в атмосфере над европейской территорией России летом 2010 года // ДАН. 2013. Т. 448, № 2. С. 206–212.
6. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л. : Гидрометеиздат, 1986. Т. 1. 264 с.
7. Калинин Н.А. Энергетика циклонов умеренных широт. Пермь : Изд-во Перм. ун-та, 1999. 192 с.
8. Калинин Н.А., Ветров А.Л. Генерация доступной потенциальной энергии вследствие крупномасштабной конденсации в циклонах умеренных широт // Метеорология и гидрология. 2002. № 4. С. 17–27.
9. Домбковская Е.П. О возможности использования данных общего влагосодержания атмосферы в синоптическом анализе // Труды ГМЦ, 1973. Вып. 110. С. 73–85.
10. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Определение водности и водозапаса кучево-дождевой облачности по информации метеорологического радиолокатора // Метеорология и гидрология. 2011. № 2. С. 30–43.
11. Морозова Л.И. Эволюция осадков в связи с изменением влагосодержания воздуха и вертикальных скоростей в системе южных циклонов // Труды ГМЦ. 1974. Вып. 139. С. 93–97.
12. Семенова А.П. К вопросу о связи осадков с влагосодержанием атмосферы // Труды УкрНИГМИ. 1982. Вып. 188. С. 14–17.
13. Калинин Н.А., Булгакова О.Ю., Дегтярева Л.А. Пространственное распределение комплексных критериев погодной изменчивости по территории Пермского края и Удмуртской республики // Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология. Науки о Земле. 2013. Вып. 4. С. 3–8.
14. Пицальникова Е.В. Аналитический обзор современного состояния проблемы влияния циклонической деятельности на условия формирования обильных осадков в холодный период года // Географический вестник. Пермь, 2014. № 1 (28). С. 69–79.
15. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л. : Гидрометеиздат, 1984. 751 с.
16. Мазин И.П. О климатологии и физическом строении облаков // Известия РАН. ФАО. 1994. Т. 30, № 3. С. 338–344.
17. Заболотских Е.В. и др. О точности микроволновых спутниковых измерений скорости приводного ветра, влагосодержания атмосферы и водозапаса облаков // Известия РАН. ФАО. 2002. Т. 38, № 5. С. 670–675.
18. Наумов А.П., Китай Ш.Д., Ошарина Н.Н. К определению интегрального влагосодержания атмосферы радиометрическим методом при различных геофизических условиях // Успехи современной радиоэлектроники. 2003. № 11. С. 33–37.
19. Иванов В.Э., Фридзон М.Б., Ессяк С.П. Радиозондирование атмосферы. Технические и метеорологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств. Екатеринбург : Изд-во УрО РАН, 2004. 596 с.
20. Островский Е.В., Фридзон М.Б. Надежность и достоверность определения общего влагосодержания дистанционными методами при их сопоставлении с данными стандартного радиозондирования атмосферы // Научный вестник МГТУГА. 2008. № 133. С. 40–44.
21. Ameni G.G., Kumar P. NVAP and Reanalysis-2 global precipitable water products: Intercomparison and variability studies // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2005. Vol. 86. P. 245–256. DOI: 10.1175/BAMS-86-2-245.
22. Марченко О.Ю., Мордвинов В.И., Антохин П.Н. Исследование долговременной изменчивости и условий формирования атмосферных осадков в бассейне реки Селенги // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1084–1090.

23. Cullather R.I., Bromwich D.H., Serreze M.C. The atmospheric hydrologic cycle over the Arctic Basin from reanalyses. Part I: Comparison with observations and previous studies // *Journal Climate*. 2000. P. 923–937.
24. Калинин Н.А., Лукин И.Л. Генерация доступной потенциальной энергии вследствие притока длинноволновой радиации в атмосфере // *Метеорология и гидрология*. 2014. № 3. С. 50–62.
25. *Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения*. РД 52.27.724-2009. Обнинск : ИГ-СОЦИН, 2009. 50 с.
26. *Метеорологические ежемесячники*. Екатеринбург, 1979–2013. Ч. 2, вып. 9. № 1–12.
27. Saha S. and coauthors. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis // *Bull. of the American Meteorological Society*. 2010. Vol. 91. P. 1015–1050. DOI: 10.1175/2010-BAMS-3001.1
28. Saha S. and coauthors. The NCEP Climate Forecast System Version 2 // *Journal of Climate*. 2014. Vol. 27. P. 2185–2208. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1
29. Пищальникова Е.В. Влияние циклонической деятельности на формирование очень сильных снегопадов в Пермском крае // *Географическое изучение территориальных систем : материалы IX регион. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых*. Пермь, 2014. С. 87–92.
30. Исаев А.А. Статистика в метеорологии и климатологии. М. : Изд-во МГУ, 1988. 248 с.
31. Дроздов О.А., Григорьева А.С. Влагооборот в атмосфере. Л. : Гидрометеиздат, 1963. 313 с.
32. *Атлас Пермского края* / под общ. ред. А.М. Тартаковского. Пермь : Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2012. 124 с.
33. Калинин Н.А., Абзалилова Д.И., Булгакова О.Ю. Экономические показатели эффективности использования метеорологической информации в дорожном хозяйстве Пермского края // *Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология. Науки о Земле*. 2012. Вып. 4. С. 96–103.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 21 мая 2015 г.

THE MOISTURE CONTENT OF THE ATMOSPHERE DURING VERY HEAVY SNOWFALLS IN PERM KRAI

Tomsk State University Journal, 2015, 397, 240–247. DOI: 10.17223/15617793/397/38

Pischalnikova Evgeniia V., Kalinin Nikolay A. Perm State National Research University (Perm, Russian Federation). E-mail: evapopova@rambler.ru; kalinin@psu.ru

Keywords: moisture content; heavy snowfall; natural hazards; Perm Krai.

The dependence of the intensity of a very heavy snowfall from the total moisture content of the atmosphere is considered for Perm Krai in 1979–2013. In this period a dangerous natural phenomenon, the very heavy snowfall, was fixed 28 times. The case of the dangerous phenomenon is the day when the phenomenon was registered at one or more meteorological stations (MS); one phenomenon, continuing to 48 hours, was regarded as one case. Frequency and intensity of a dangerous snowfall was compared with the data of CFS reanalysis on the total moisture content of the atmosphere PWAT (precipitable water, kg/m²). Their extraction in the grid nodes and spline interpolation in MS coordinates were performed with the software package ArcGis 10.1. For each day with a very heavy snowfall there are values of moisture in terms of 0, 6, 12, 18 hours of the universal coordinated time (UTC) for 25 MS of Perm Krai. The study led to the following conclusions. The statistical distribution of the total moisture content has a wide scope – from 3.2 to 20.4 kg/m², a significant asymmetry in the predominantly positive deviation from the mean, and strong variations. A dangerous snowfall is formed when the predominant amount of moisture in the atmosphere is from 4.0 to 7.9 kg/m². Most close relationship ($r = 0.7$) is observed between the maximum intensity of a very heavy snowfall and the maximum and average moisture content of the atmosphere. Annual variability of the amount of moisture in the atmosphere and intensity of a snowfall has shown that the maximum (minimum) intensity of a very heavy snow falling in April (February) is consistent with the presence of high (low) moisture content in the atmosphere. A dangerous snowfall is observed at the minimum values of moisture in the atmosphere from 4.5 to 6.9 kg/m² in the autumn–winter period and from 7.0 to 9.8 kg/m² in the spring period. The spatial variation of the total moisture content in the period of a very heavy snow falling in Perm Krai has a well-defined feature: it decreases from south-west to north-east, which is consistent with the distribution of surface temperature field and opposite to the distribution of precipitation field. The orographic effect was observed. Dangerous snowfalls are formed at MS located at a greater height with a smaller moisture content in the atmosphere.

REFERENCES

1. Matveev, L.T. (1981) *Dinamika oblakov* [The dynamics of the clouds]. Leningrad: Gidrometeoizdat.
2. Matveev, L.T. & Soldatenko, S.A. (1982) Vlagosoderzhanie vertikal'nogo stolba atmosfery [The moisture content of a vertical column of the atmosphere]. *Trudy VNIIGMI-MTsD*. 94. pp. 36–42.
3. Kuznetsova, L.P. (1983) *Atmosfernyy vlagooobmen nad territoriyey SSSR* [Atmospheric moisture exchange over the Soviet territory]. Moscow: Nauka.
4. Sklyadneva, T.K., Lomakina, N.Ya. & Bedareva, T.V. (2012) Prostranstvenno-vremennoe raspredelenie obshchego soderzhaniya vodyanogo para i ozona v kontinental'nykh rayonakh Sibiri i perekhodnoy zone “materik-okean” Dal'nego Vostoka [Spatial and temporal distribution of the total content of water vapor and ozone in the continental regions of Siberia and the transition zone “continent-ocean” of the Far East]. *Optika atmosfery i okeana*. 25 (12). pp. 1077–1083.
5. Sitnov, S.A. & Mokhov, I.I. (2013) Osobennosti raspredeleniya vodyanogo para v atmosfere nad evropeyskoy territoriyey Rossii letom 2010 goda [Features of distribution of water vapor in the atmosphere over the European territory of Russia in summer 2010]. *Doklady Akademii Nauk*. 448 (2). pp. 206–212.
6. Zuev, V.E. & Komarov, V.S. (1986) *Statisticheskie modeli temperatury i gazovykh komponent atmosfery* [Statistical models of temperature and gas components of the atmosphere]. V. 1. Leningrad: Gidrometeoizdat.
7. Kalinin, N.A. (1999) *Energetika tsiklonov umerennykh shirot* [Energy of cyclones of temperate latitudes]. Perm: Perm State University.
8. Kalinin, N.A. & Vetrov, A.L. (2002) Generatsiya dostupnoy potentsial'noy energii vsledstvie krupnomasshtabnoy kondensatsii v tsiklonakh umerennykh shirot [Generation of the available potential energy as a result of large-scale condensation in the cyclones of temperate latitudes]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 4. pp. 17–27.
9. Dombkovskaya, E.P. (1973) O vozmozhnosti ispol'zovaniya dannykh obshchego vlagosoderzhaniya atmosfery v sinopticheskom analize [On the possibility of using data on the moisture content of the atmosphere in the synoptic analysis]. *Trudy GMTs*. 110. pp. 73–85.
10. Kalinin, N.A. & Smirnova, A.A. (2011) Opredelenie vodnosti i vodozapasa kuchevo-dozhdevoy oblachnosti po informatsii meteorologicheskogo radiolokatora [Determination of water content of cumulonimbus clouds by the weather radar information]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2. pp. 30–43.

11. Morozova, L.I. (1974) Evolyutsiya osadkov v svyazi s izmeneniyem vlagosoderzhaniya vozdukh i vertikal'nykh skorostey v sisteme yuzhnykh tsiklonov [Evolution of precipitation due to changes in the moisture content of the air and vertical velocities in the southern cyclones]. *Trudy GMTs*. 139. pp. 93–97.
12. Semenova, A.P. (1982) K voprosu o svyazi osadkov s vlagosoderzhaniiem atmosfery [On the connection of precipitation with the moisture content of the atmosphere]. *Trudy UkrNIGMI*. 188. pp. 14–17.
13. Kalinin, N.A., Bulgakova, O.Yu. & Degtyareva, L.A. (2013) Economic indicators for the efficiency of using the meteorological information in a public road system of the Perm region. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle – Bulletin of Udmurt University. Biology & Earth Sciences*. 4. pp. 3–8. (In Russian).
14. Pishchal'nikova, E.V. (2014) Analiticheskiy obzor sovremennoy sostoyaniya problemy vliyaniya tsiklonicheskoy deyatel'nosti na usloviya formirovaniya obil'nykh osadkov v kholodnyy period goda [Analytical review of the current state of the problem of the influence of cyclonic activity in the conditions of formation of heavy rainfall during the cold period]. *Geograficheskiy vestnik*. 1 (28). pp. 69–79.
15. Matveev, L.T. (1984) *Kurs obshchey meteorologii. Fizika atmosfery* [Course of general meteorology. The physics of the atmosphere]. Leningrad: Gidrometeoizdat.
16. Mazin, I.P. (1994) O klimatologii i fizicheskom stroenii oblakov [Climatology and physical structure of clouds]. *Izvestiya RAN. FAO*. 30 (3). pp. 338–344.
17. Zabolotskikh, E.V. et al. (2002) O tochnosti mikrovolnovykh sputnikovykh izmereniy skorosti privodnogo vetra, vlagosoderzhaniya atmosfery i vodozapasa oblakov [On the accuracy of microwave satellite measurements of wind speed, atmospheric moisture content and water content of clouds]. *Izvestiya RAN. FAO*. 38 (5). pp. 670–675.
18. Naumov, A.P., Kitay, Sh.D. & Osharina, N.N. (2003) K opredeleniyu integral'nogo vlagosoderzhaniya atmosfery radiometricheskimi metodami pri razlichnykh geofizicheskikh usloviyakh [Determination of the moisture content of the atmosphere by an integral radiometric method with different geophysical conditions]. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki – Achievements of Modern Radioelectronics*. 11. pp. 33–37.
19. Ivanov, V.E., Fridzon, M.B. & Essyak, S.P. (2004) *Radiozondirovanie atmosfery. Tekhnicheskie i metrologicheskie aspekty razrabotki i primeneniya radiozondovykh izmeritel'nykh sredstv* [Radiosonde of the atmosphere. Technical and metrological aspects of the development and application of radiosonde measurement tools]. Ekaterinburg : UrO RAN.
20. Ostrovskiy, E.V. & Fridzon, M.B. (2008) Nadezhnost' i dostovernost' opredeleniya obshchego vlagosoderzhaniya distantsionnymi metodami pri ikh sopostavlenii s dannymi standartnogo radiozondirovaniya atmosfery [Reliability and accuracy of the determination of total moisture content by remote methods when they are compared with data of standard radiosonde of the atmosphere]. *Nauchnyy vestnik MGTU GA –Scientific Herald of the Moscow State University of Civil Aviation*. 133. pp. 40–44.
21. Amenu, G.G., Kumar, P. (2005) NVAP and Reanalysis-2 global precipitable water products: Intercomparison and variability studies. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 86. pp. 245–256. DOI: 10.1175/BAMS-86-2-245
22. Marchenko, O.Yu., Mordvinov, V.I. & Antokhin, P.N. (2012) Issledovanie dolgovremennoy izmenchivosti i usloviy formirovaniya atmosferynykh osadkov v bassejne reki Selengi [A study of long-term variability and conditions for the formation of precipitation in the basin of the Selenga River]. *Optika atmosfery i okeana*. 25 (12). pp. 1084–1090.
23. Cullather, R.I., Bromwich, D.H. & Serreze, M.C. (2000) The atmospheric hydrologic cycle over the Arctic Basin from reanalyses. Part I: Comparison with observations and previous studies. *Journal Climate*. 13. pp. 923–937.
24. Kalinin, N.A. & Lukin, I.L. (2014) Generation of available potential energy due to the long-wave radiation influx in the atmosphere. *Russian Meteorology and Hydrology*. 3. pp. 168–177.
25. Rosgidromet. (2009) *Nastavlenie po kratkosrochnym prognozam pogody obshchego naznacheniya* [Manual on short-term weather forecasts for general use]. RD 52.27.724-2009. Obninsk: IG-SOTsIN.
26. *Meteorologicheskie ezheemesyachniki*. (1979–2013). 2 (9): 1–12.
27. Saha, S. et al. (2010) The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. of the American Meteorological Society*. 91. pp. 1015–1050. DOI: 10.1175/2010-BAMS-3001.1
28. Saha, S. et al. (2014) The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*. 27. pp. 2185–2208. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1
29. Pishchal'nikova, E.V. (2014) [The impact of cyclonic activity in the formation of very heavy snowfall in Perm Krai]. *Geograficheskoe izucheniye territorial'nykh sistem* [Geographical study of territorial systems]. Proc. of the IX Regional Scientific and Practical Conference of students, graduate students and young scientists. Perm. pp. 87–92. (In Russian).
30. Isaev, A.A. (1988) *Statistika v meteorologii i klimatologii* [Statistics in meteorology and climatology]. Moscow: Moscow State University.
31. Drozdov, O.A. & Grigor'eva, A.S. (1963) *Vlagooborot v atmosfere* [The hydrologic cycle in the atmosphere]. Leningrad: Gidrometeoizdat.
32. Tartakovskiy, A.M. (ed.) (2012) *Atlas Permskogo kraya* [Atlas of Perm Krai]. Perm: Perm State University.
33. Kalinin, N.A., Abzalilova, D.I. & Bulgakova, O.Yu. (2012) Spatial distribution of complex criteria of weather variability on the territory of Perm Krai and the Udmurt Republic. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle – Bulletin of Udmurt University. Biology & Earth Sciences*. 4. pp. 96–103. (In Russian).

Received: 21 May 2015