

О СТАТИСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ И ОСАДКОВ*

Ф.Л. Быков, В.А. Гордин

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

Научно-исследовательский университет «Высшая школа экономики»

bphilipp@inbox.ru, vagordin@mail.ru

Введение

Качественная связь атмосферных фронтов и выпадения осадков общеизвестна, например [8]. Однако количественные оценки этой связи затруднительны, в первую очередь из-за того, что само определение атмосферного фронта (и в смысле дефиниции, и в смысле алгоритма построения) достаточно нетривиально. Здесь мы проводим такие количественные оценки.

Определение атмосферных фронтов

Исследования по оценке структуры атмосферных фронтов, их образования, устойчивости и связи с осадками имеют длинную историю, см. [7, 9, 10].

В работах [2, 5] авторы сформулировали алгоритм построения линий атмосферного фронта на произвольном барическом уровне и продемонстрировали качество работы этого алгоритма. Входной информацией для построения линий атмосферного фронта служат поля геопотенциала, температуры и ветра на регулярной сетке. Вклад этих полей в финальный фронтальный параметр (далее называется также интенсивностью фронта) зависел от барического уровня и сезона и определялся нами по синхронизированным во времени архивам аэрологических наблюдений и полей объективного анализа (ОА) за период с ноября 2009 по июнь 2012 г. Критерием качества алгоритма было максимальное различие между корреляционными функциями (КФ), построенными по двум частям архива: (А) пара точек находится в одной синоптической массе воздуха; (Б) пара точек разделена атмосферным фронтом. Фронты проводились по полям ОА. Чем больше разница между такими КФ, построенными по какому-то набору числовых параметров в финальном предикторе фронта, тем лучшим считался данный набор. Результат (параметры оптимизированного в указанном

* *Статья носит дискуссионный характер*

смысле алгоритма определения линий атмосферных фронтов) оказался существенно зависящим от барического уровня и от сезона.

Важный блок нашего алгоритма – оценка КФ по данным аэрологических измерений, гарантирующий положительную определенность последних, описан в [1, 3, 5, 6]. Он основан на теории возмущений самосопряженных операторов. Примеры КФ, полученных в результате данной оптимизации критерия, приведены на рис. 1.

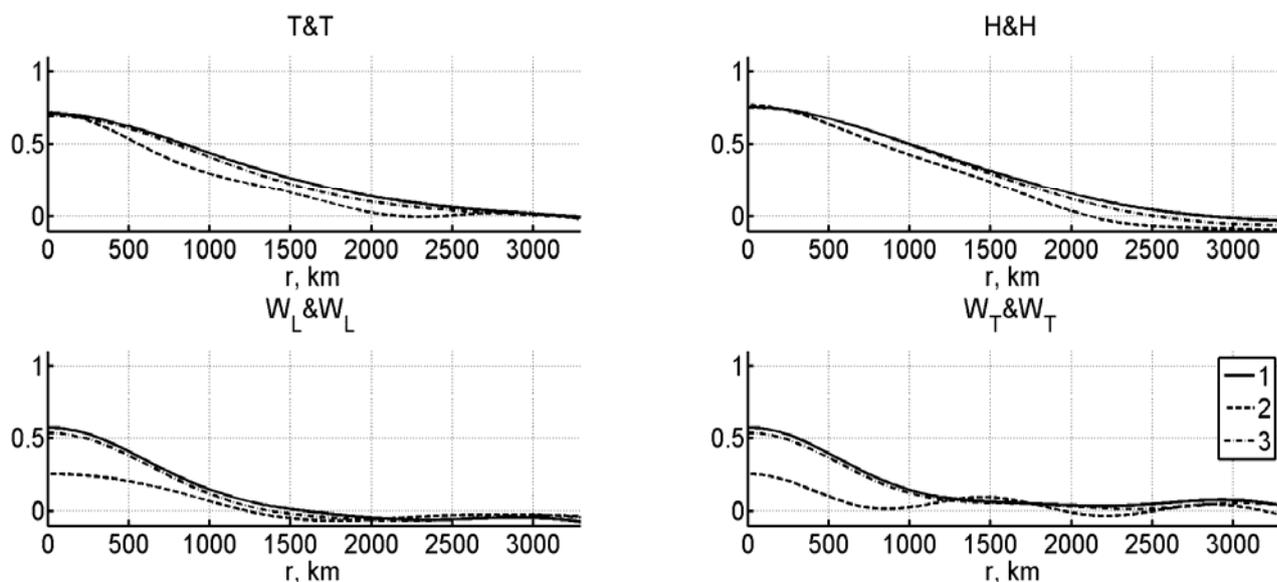


Рис. 1. КФ для барического уровня 850 гПа, построенного по мартам 2010–2012 гг.:
линия 1 – по массиву (А); линия (2) – по массиву (Б); линия (3) – общая КФ по всему ансамблю пар точек наблюдения.

Приведенные на рис.1 графики показывают существенное влияние, которое линии фронтов оказывают на статистические связи между аэрологическими полями в разных точках. Связи убывают с расстоянием, но принадлежность к различным синоптическим массам эквивалентна увеличению расстояния на несколько сотен километров. Отметим, что КФ на этих графиках не равны 1 при $r=0$. Это объясняется учетом 1) ошибок наблюдения; 2) мелкомасштабными процессами в атмосфере, которые «проваливаются» сквозь современную сеть аэрологических наблюдений, где аэрологические станции не располагаются на расстояниях меньших 50км друг от друга. Здесь, как и в оценках, приведенных в [2–5], гладкая корреляционная функция дополняется функцией с носителем, сосредоточенным в нуле.

Здесь предполагалось, что все поля, для которых оцениваются КФ, однородны и изотропны. Оценки анизотропии по многолетнему архиву аэрологических наблюдений проведены в [4]. Из этих оценок, в частности, следует, что для рассматриваемых регионов и уровней учет анизотропии несущественен.

Наш алгоритм не только позволяет проводить линии атмосферного фронта, но и обозначать тип и силу фронта (мы разделяем сильный, средний, слабый фронт, сильный фронт окклюзии, слабый фронт окклюзии). При этом вдоль одной и той же линии тип фронта может меняться. Алгоритм применим как к полям ОА, так и к полям прогностическим. Эксперименты мы проводили на глобальных полях NCEP (National Centers for Environment Prediction, USA) шаг $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$, с заблаговременностью до 36 ч; и на полях, полученных по модели COSMO (Consortium for Small-Scale Modelling, Россия), шаг 7×7 км, территория: – Центральная и Восточная Европа до Урала, заблаговременность – до 48 ч. Примеры построения прогноза атмосферных фронтов показаны на рис. 2, 3. Тонкими линиями показаны изолинии температуры и геопотенциала.

На рис. 4 приведена соответствующая карта облачности, полученная в инфракрасном диапазоне со спутника METEOSAT-9. Фронты, приведенные на рис.2, 3, проходят по восточной границе зоны облаков (чуть западнее Твери, Смоленска и Киева) и соответствуют зоне наибольших температурных градиентов.

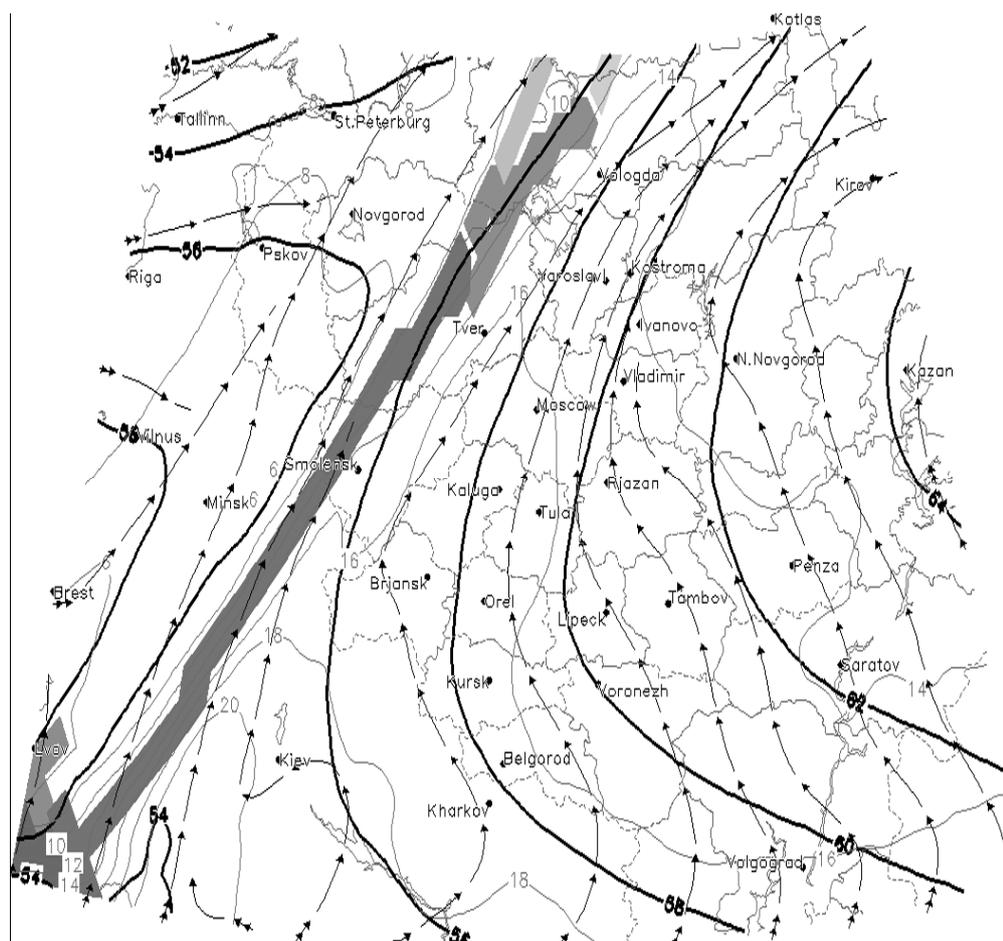


Рис. 2. Фрагмент карты атмосферных фронтов от 00 ВГВ 20 сентября 2012 года, построенных по модели NCEP с заблаговременностью 12 ч. Уровень 925гПа.

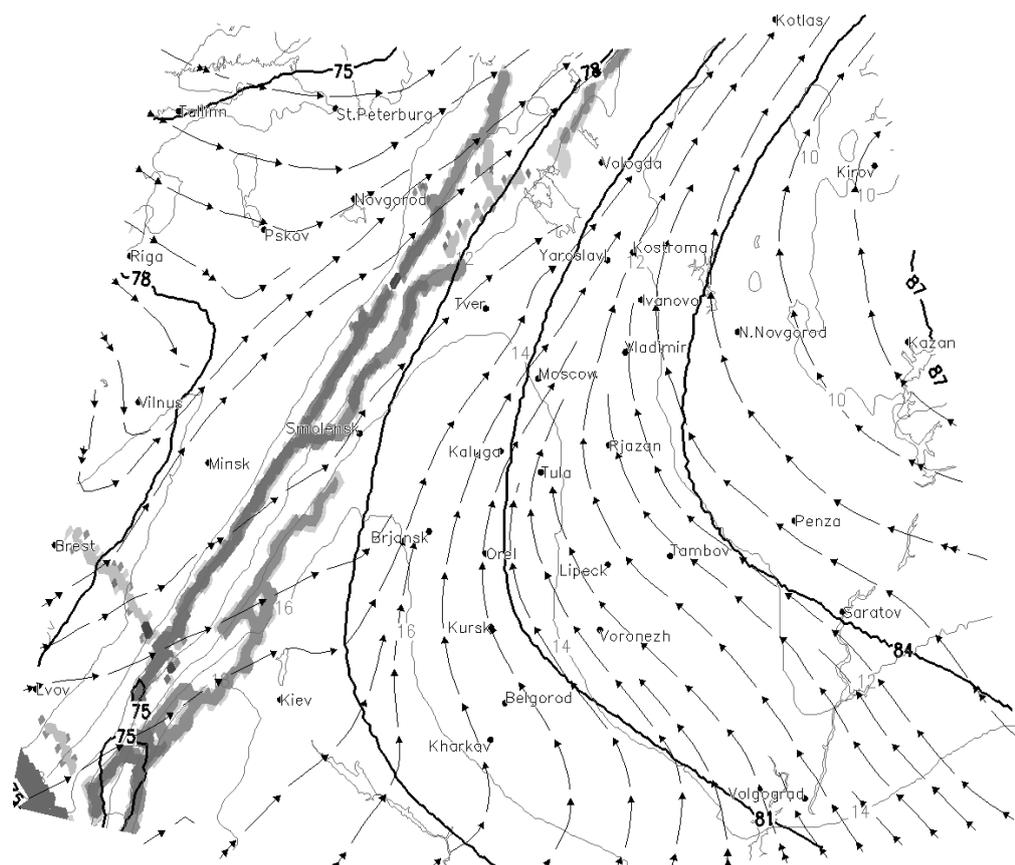


Рис. 3. То же по модели COSMO.

При сравнении с рис. 2 видна существенно более качественная проработка деталей атмосферного фронта – следствие лучшего пространственного разрешения модели COSMO.

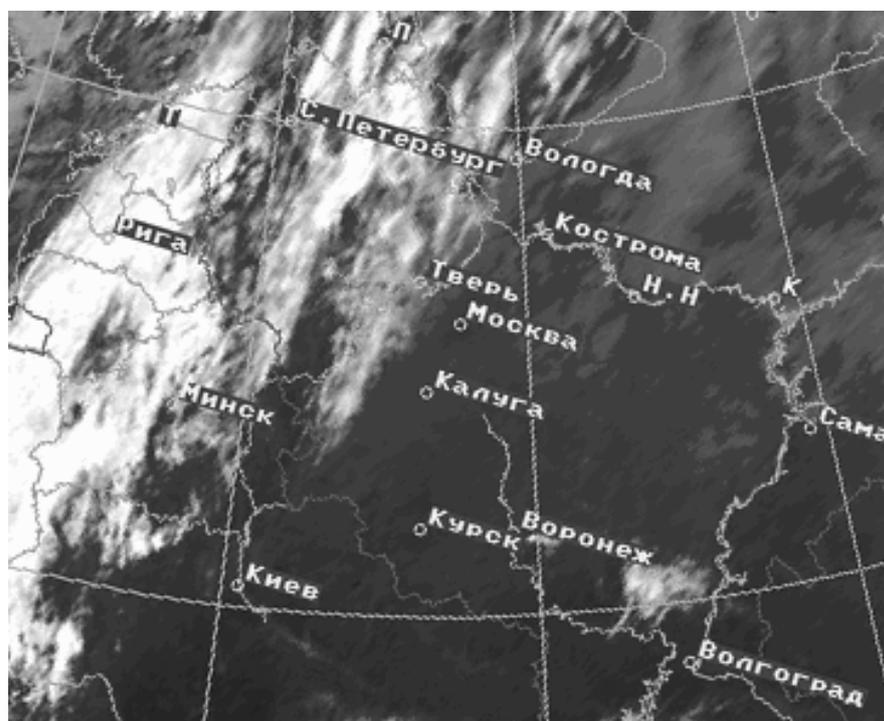


Рис. 4. Карта облачности, полученная в четвертом инфракрасном диапазоне со спутника METEOSAT-9. Время и территория соответствуют рис.2, 3.

Тип фронта и осадки

Количество осадков, которое выпадает в зоне фронта, мы оценивали по спутниковым данным, обрабатываемым NOAA и доступным по адресу ftp://ftp.star.nesdis.noaa.gov/pub/smcd/emb/f_f/hydroest/world/world/. Эти данные покрывают поверхность планеты, за исключением полярных областей. Временное разрешение 1 час, пространственное разрешение $0,045^\circ \times 0,045^\circ$. Данные эти не вполне надежные. В частности, бывают случаи, когда на части освещенной территории данные фактически отсутствовали, а в представленных на сайте числовых полях вместо значка отсутствия данных выставлялись нули осадков. Разумеется, все замеченные ошибочные поля выбрасывались нами из статистического ансамбля. К достоинствам архива следует отнести его большой объем, позволяющий выявлять статистические связи, несмотря на зашумленность, недоступное в других случаях высокое временное и пространственное разрешение. В оценках ниже использовался архив за марты 2010-2012 гг. Рассматривалась территория севернее 30 градуса с. ш. Это дало примерно 47 млн измерений осадков после усреднения их до сетки NCEP $0,5^\circ \times 0,5^\circ$.

Выпадение осадков связано с прохождением над данной точкой не только фронта на уровне поверхности, но и на нижних тропосферных уровнях.

На рис. 5 приведена зависимость среднего количества осадков от барического уровня фронта и от интенсивности этого фронта.

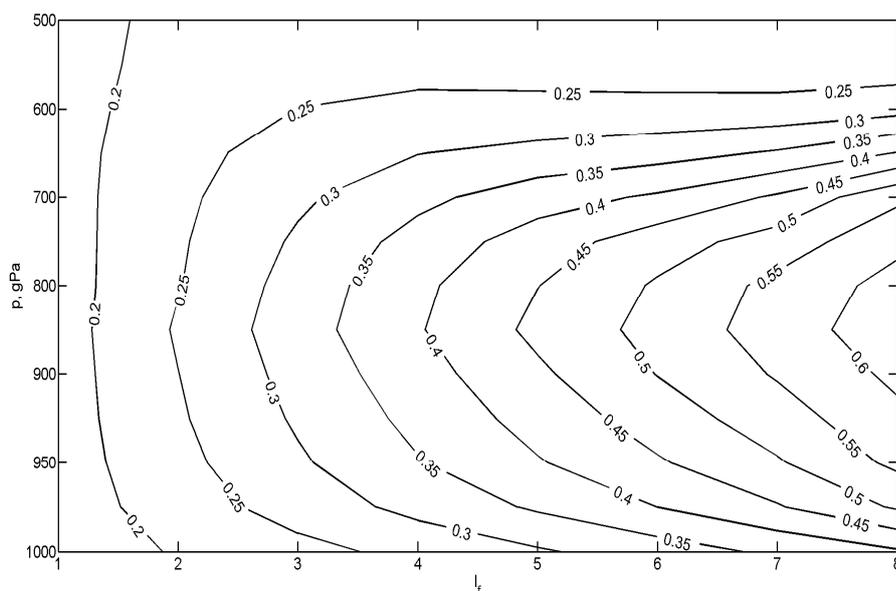


Рис. 5. Средние количества осадков (мм) за последний час в зависимости от барического уровня фронта (ось ординат) и от интенсивности этого фронта (ось абсцисс).

Среднее количество осадков за час по нашему архиву равно 0,144 мм.

Фронты окклюзии здесь не учитывались. Видно, что среднее (статистически) количество осадков тем больше, чем больше интенсивность фронта, оцениваемая по нашему алгоритму. Наиболее существенно для количества осадков наличие фронта на уровне 850 гПа. Оценки проводились по данным спутникового зондирования осадков.

Время прохождения фронта и осадки

Осадки, разумеется, выпадают не только точно вдоль линии фронта, но также впереди и позади него. Мы агрегировали все сильные и средние фронты в одну группу и оценили зависимость от времени прохождения фронта. Из рис. 6 следует, что наиболее интенсивные осадки наблюдаются в период от 3 часов до прохождения на барическом уровне 850 гПа до 6 часов после для холодного атмосферного фронта и от 3 до 12 часов до прохождения теплого фронта на барическом уровне 850 гПа. Для фронтов окклюзии более влиятелен уровень 800 гПа.

Помимо среднего количества осадков существенна также вероятность выпадения значительных (например выше 0,5 мм/ч) осадков. На рис. 7 представлена такая информация.

Рис. 6, 7 позволяют сделать вывод, что фронты окклюзии в целом сильнее влияют на выпадение осадков, чем обычные фронты и при прогнозе осадков их нельзя игнорировать.

Влажность на фронте и осадки

Влажность воздуха существенно связана с интенсивностью осадков и их вероятностью. Наличие алгоритма построения фронтов и необходимых архивов позволили нам произвести количественные оценки.

На рис. 8 показана зависимость среднего количества осадков от относительной влажности R (вычислялась по полям ОА модели NCEP) и интенсивности атмосферного фронта на уровне 850 гПа.

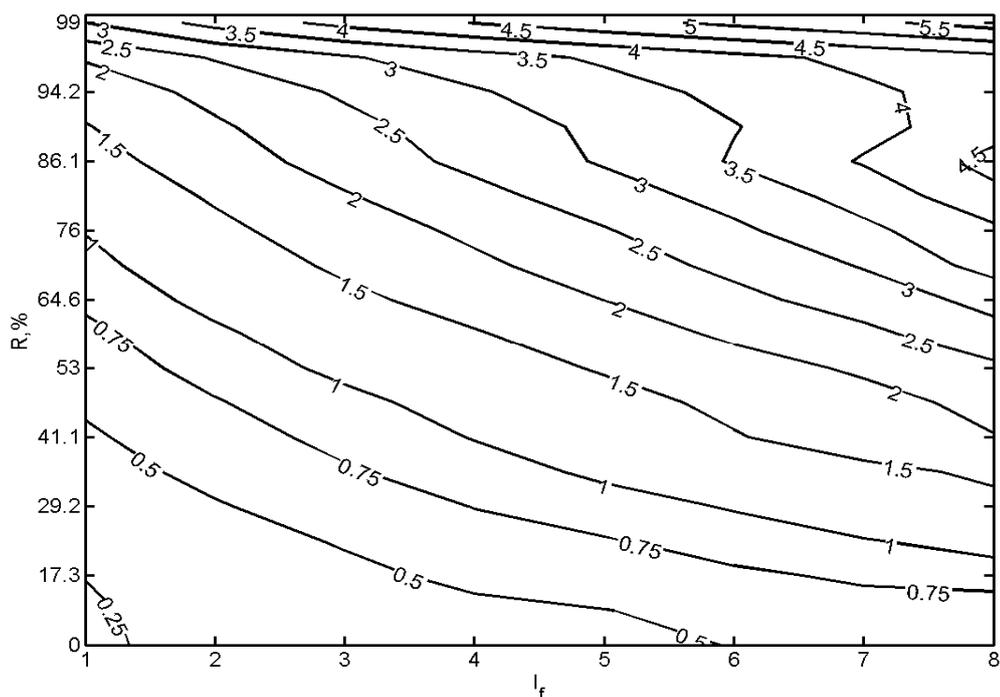


Рис. 8. Изолинии среднего количества осадков (мм), выпавших за следующие 6 часов после прохождения фронта. Ось абсцисс – интенсивность фронтов на 850 гПа, ось ординат – влажность на 850 гПа, %. Глобальное среднее количество осадков за 6 часов по нашему архиву равно 0,84 мм.

Из рис. 8 следует, что с сильными осадками связаны исключительно «влажные» фронты. Количественные оценки дают основание рассчитывать на возможность создания эффективного алгоритма прогноза осадков на основе прогностических полей геопотенциала, температуры, ветра (для построения фронтов) и влажности.

Заключение

Показана сильная статистическая связь между атмосферными фронтами в нижней тропосфере и осадками. Связь усиливается, если в качестве дополнительного предиктанта использовать относительную влажность. Это существенно для практического решения задач прогноза погоды, поскольку сложные с физической точки зрения прогнозы облачности и осадков пока еще дают довольно скромные результаты.

Мы благодарны Б.Е. Пескову, поддерживавшему эту работу на всех ее этапах, за полезные обсуждения и синоптические рекомендации.

Список использованных источников

1. Алдухов О.А., Багров А.Н., Гордин В.А. Статистические характеристики прогностических метеорологических полей и их использование для объективного анализа // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 10. – С. 18–33.
2. Алдухов О.А., Быков Ф.Л., Гордин В.А. Крупномасштабные трехмерные корреляционные функции для атмосферы Земли // Ярославский педагогический вестник. Серия Естественные науки. – 2012. – № 4. – Стр. 36–43.
3. Алдухов О.А., Гордин В.А. Трехмерные корреляционные функции основных аэрологических величин // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 37, № 1. – С. 3–23.
4. Алдухов О.А., Гордин В.А. Оценки анизотропии корреляционной структуры полей метеорологических величин по наблюдениям глобальной аэрологической сети // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 41, № 3. – С. 399–409.
5. Быков Ф.Л., Гордин В.А. Трехмерный объективный анализ структуры атмосферных фронтов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 48, № 2. – С. 172–188.
6. Гордин В.А. Математика, компьютер, прогноз погоды и другие сценарии математической физики. – М.: Физматлит, 2010. – 733 с.
7. Калашник М.В., Ингель Л.Х. Геострофическое приспособление и фронтогенез в стратифицированных двухкомпонентных средах. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 42, № 4. – С.554-565.
8. Песков Б.Е. Влияние различных термодинамических и синоптических условий на развитие гроз и ливней // Труды ЦИП. – 1966. – Вып. 149. – С. 46–58.
9. Шакина Н.П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов. - Л.: Гидрометеиздат, 1985.
10. Hoskins B.J. The mathematical theory of frontogenesis. // Ann. Rev. Fluid Mech. – 1982. – V.14, P.131-151.

Поступила в редакцию 20.09.2012 г.

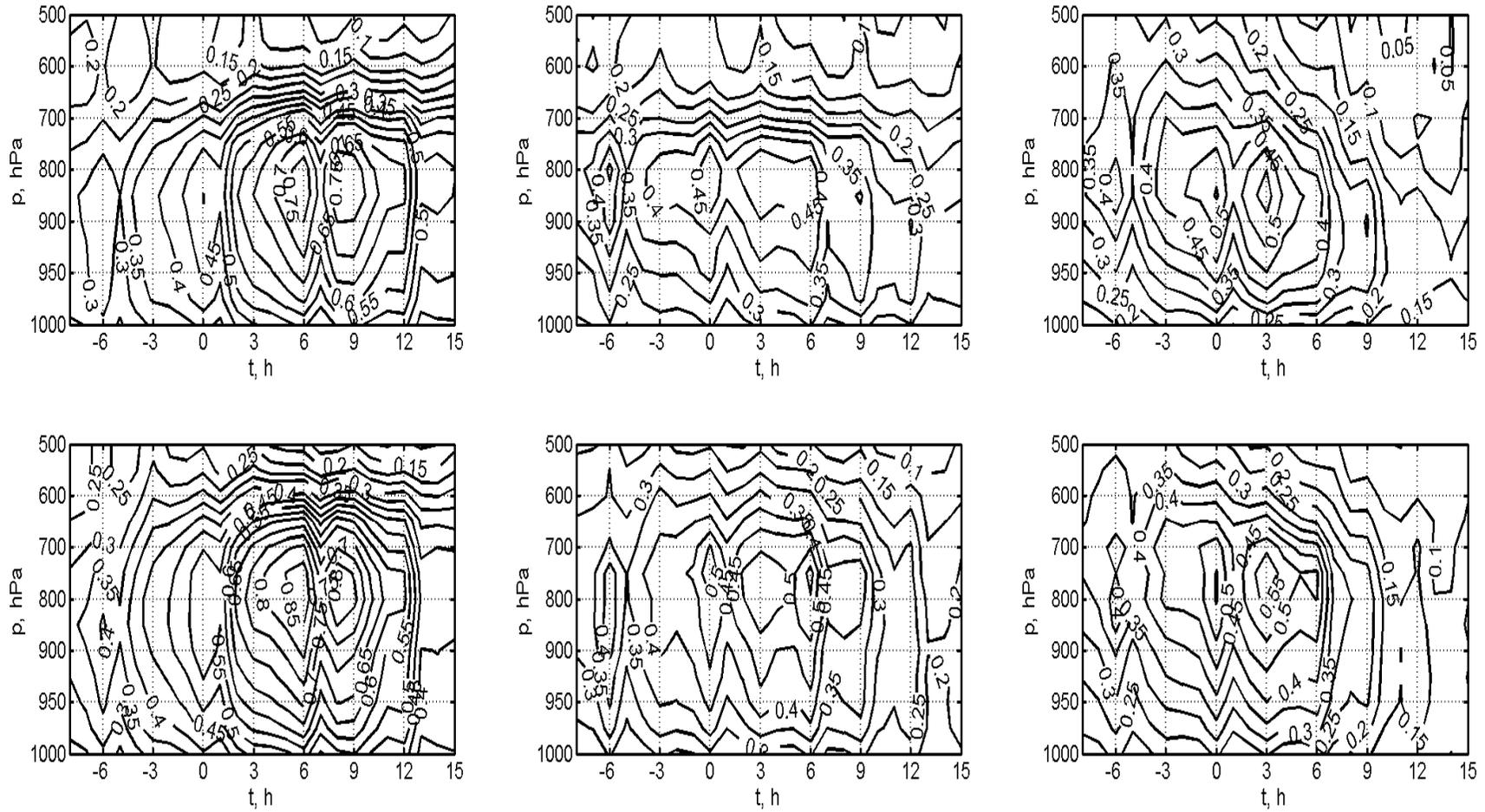


Рис. 6. Средняя интенсивность осадков (мм/ч) в зависимости от барического уровня (ось ординат) и от времени прохождения фронта (в часах). Справа от нуля – область перед фронтом, слева – позади. Столбцы слева направо: теплый фронт, стационарный фронт, холодный фронт. Первая строка – обычный фронт. Вторая строка – фронт окклюзии. Средняя интенсивность осадков за час по нашему архиву равна 0,144 мм/ч.

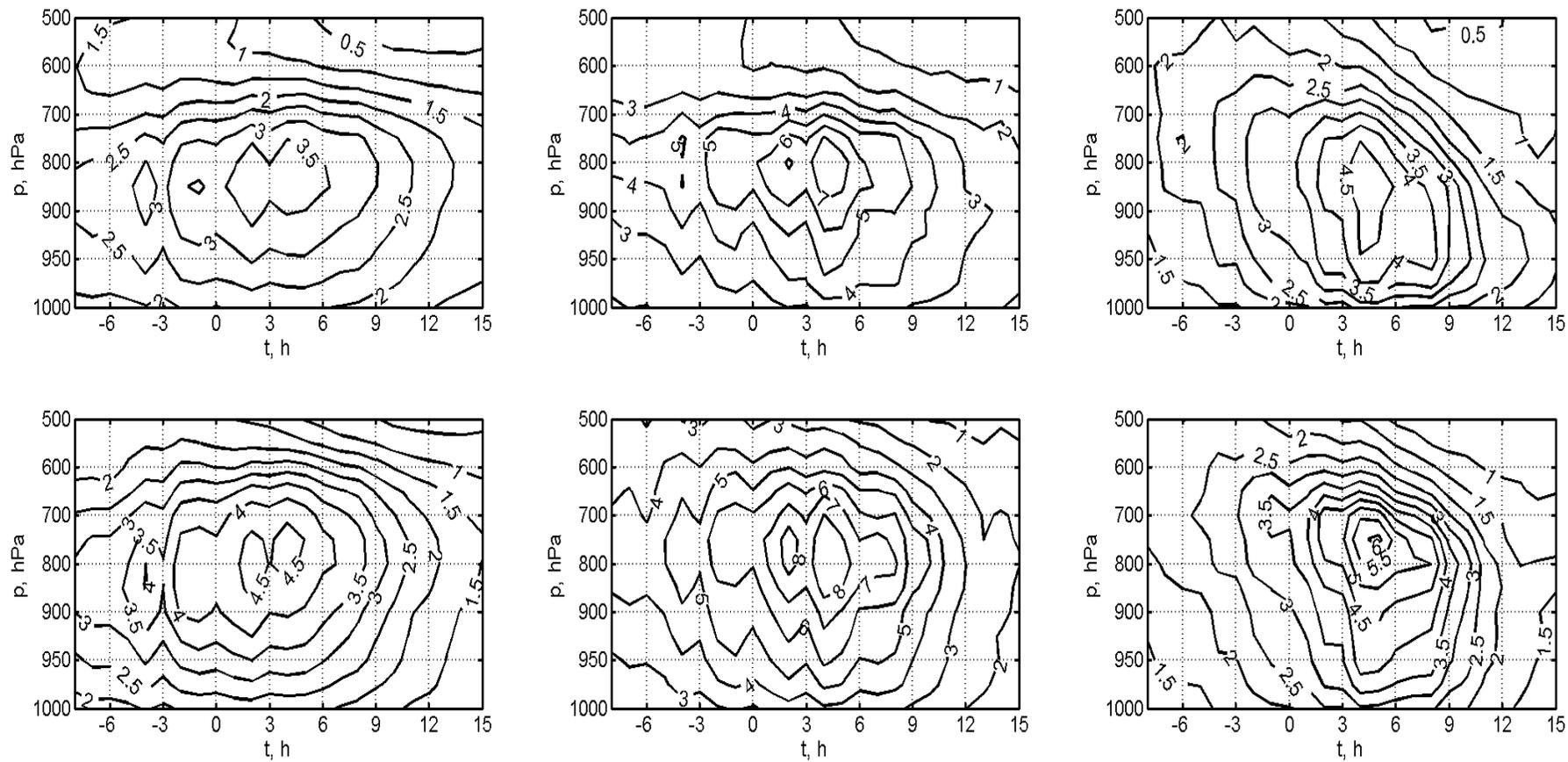


Рис. 7. Вероятность выпадения значительных (выше 0,5 мм/ч) осадков.

Значению 1 соответствует средняя вероятность осадков по нашему архиву, равная 7,12 %. Обозначения такие же, как на рис. 6.