

# МЕЗОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА ОСАДКОВ ХОЛОДНОГО ФРОНТА ПО ДАННЫМ X-ПОЛОСОВОГО РАДАРА\*

Ю. О. ПАЛАМАРЧУК, С. В. ИВАНОВ

*Одесский государственный экологический университет, Украина*

e-mail: odessa.pogoda@paco.net, svvivo@te.net.ua

Spatial features of the precipitation field on a cold front are studied on the base of X-band radar data. Meso-scale structures of high intensity rain are identified. The mass and energy characteristics of these structures are few times higher than average frontal values.

## Введение

Микрофизические процессы являются одними из наиболее сложных в атмосфере. Несмотря на большой объем данных, получаемых при проведении специализированных наблюдательных экспериментов с помощью современных дистанционных и контактных методов измерений, нелинейная природа и процессы переходов влаги из одной фазы в другую еще не выяснены до конца. Кроме того, эти процессы характеризуются сильной пространственной и временной изменчивостью на мезомасштабах. Эти обстоятельства налагают определенные требования на сеть наблюдений за осадками и облачностью, которая на сегодняшний день не вполне им удовлетворяет. Так, сеть наземных осадкомеров в большинстве регионов довольно редкая и не способна обеспечить детальное описание структур осадков на мезомасштабах. Сеть погодных радаров над Западной Европой и Северной Америкой обеспечивает покрытие данными с высоким пространственным и временным разрешением [1, 2]. Но эти данные содержат информацию о характеристиках отражательной способности атмосферы при определенных погодных условиях, которые связаны с водностью атмосферы сложными и неоднозначными зависимостями. В частности, в работе [3] показано, что оценки содержания влаги в атмосфере по данным радара с использованием известных  $Z-R$ -соотношений и данные наземных осадкомеров, полученные по одной и той же области, могут различаться в два раза. Недостаточная изученность процессов формирования и выпадения осадков, а также их сильная изменчивость на мезомасштабах являются причинами того, что оправдываемость численных прогнозов осадков остается практически на том же уровне, что и 20 лет назад [4, 5].

В данной работе предпринята попытка исследовать мезомасштабную структуру осадков на холодном фронте и получить оценки потока влаги и скрытого тепла, связанных с

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке НАТО (грант № 981044 "Extreme precipitation events").  
© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2006.

этим структурами. Решение этой задачи поможет усовершенствовать схемы параметризации облачности и осадков в численных системах прогноза за счет лучшего понимания физических процессов формирования и выпадения осадков, переноса массы воды и энергии на синоптическом и мезомасштабах.

В разд. 1 дается характеристика синоптической ситуации в период прохождения холодного фронта над Западной Европой. В разд. 2 описан X-полосовой радар, находящийся в Метеорологическом институте университета в Бонне, с помощью которого выполнялись дистанционные измерения. Пространственная структура полей осадков на холодном фронте приводится в разд. 3. Обобщение результатов и выводы представлены в разд. 4.

## 1. Синоптический обзор погодных условий над Европой 1–2 января 2005

Погодные условия над Атлантико-Европейским регионом 1–2 января 2005 г. определялись активным взаимодействием обширного циклона на севере Атлантики и интенсивного гребня Азорского антициклона, распространяющегося на северо-восток через территорию Центральной и Южной Европы (рис. 1). Этот процесс сопровождался активным западным переносом на высотах, вызванным наличием квазиширотной полярной высотной фронтальной зоны над севером Великобритании. В верхней тропосфере присутствовало струйное течение, что служило дополнительным фактором интенсификации фронтальной системы.

Термические и динамические факторы способствовали обострению холодного участка арктического фронта в ложбине над северной Атлантикой. Холодный фронт перемещался с северо-запада на юго-восток Европы со средней скоростью 60 км/ч. Контраст температур на поверхности 850 гПа составил 5...8 °С. Активность холодного участка арктического фронта и связанной с ним мощной облачной системы с последующим выпадением

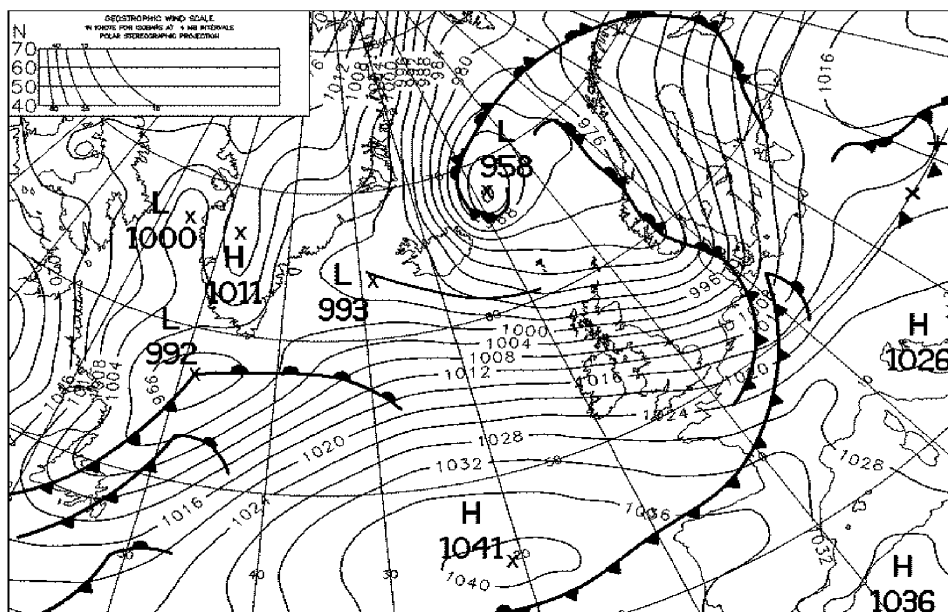


Рис. 1. Карта анализа приземного давления на 2 января 2005 г. 00:00.

ливневых осадков обусловлена интенсивным выносом теплых влажных воздушных масс с центральной Атлантики.

## 2. Характеристики X-полосового метеорологического радара

X-полосовые радары относятся к одному из последних поколений метеорологических радаров. Они работают на длинах волн 2.5...4 см и частотах 4...8 ГГц и обладают двумя существенными преимуществами перед своими предшественниками. Во-первых, они значительно (примерно в восемь раз) экономичнее S-полосовых радаров и имеют намного меньший размер, что позволяет использовать их как в стационарных условиях, так и с мобильных платформ (самолетов и автомобилей). Во-вторых, благодаря использованию меньшей длины волны они более чувствительны и могут определять капли меньшего размера, а также снег.

Данный тип радара позволяет получать данные с азимутальным разрешением  $1^\circ$  и радиальным разрешением 150 м. В прямоугольной системе координат разрешение между лучами линейно увеличивается с удалением от радара. Сканирование производится в четырех различных режимах, повторяющихся с различными интервалами времени. Два основных режима сканирования с индикатором кругового обзора 50 и 100 км (PPI-50 и PPI-100) выполняются каждые 5 мин при углах возвышения луча  $2.5$  и  $1.5^\circ$  соответственно. Каждые 30 мин выполняется трехмерное сканирование в радиусе 50 км при восьми углах возвышения:  $1.5$ ,  $2.5$ ,  $3.5$ ,  $4.5$ ,  $6$ ,  $9$ ,  $12$  и  $15^\circ$ . Кроме того, четыре раза за каждые 30 мин производится вертикальное зондирование атмосферы. Каждое из сканирований выполняется в течение 45 с.

В настоящей работе использовались данные, полученные в режиме PPI-100 в период 1–2 января 2005 г., когда холодный фронт проходил непосредственно над районом Западной Европы, где расположен радар Метеорологического института в Бонне, что позволило получить достаточно подробную информацию о структуре осадков и ее эволюции.

## 3. Пространственная структура осадков

Предыдущие исследования с использованием X-полосовых радаров показали, что поля осадков в пределах атмосферных фронтов имеют полосовую структуру [5–9]. Фронтальная зона включает несколько полос в 30...70 км с интенсивными осадками, они перемежаются более широкими полосами — до 60...120 км, в которых осадки имеют меньшую интенсивность. Протяженность этих полос вдоль линии фронта составляет приблизительно 100 км.

Для оценки преобладающих пространственных масштабов в структуре осадков был использован спектральный анализ. Следует отметить, что преобразование Фурье применялось к рядам данных интенсивности отраженного сигнала вдоль направления луча, а не к данным о содержании воды в атмосфере. В силу неоднозначной связи между этими двумя величинами такой подход не позволяет говорить непосредственно о величине осадков. С другой стороны, обработка первичной информации свободна от ошибки, привносимой в данные о водосодержании атмосферы из-за несовершенства  $Z-R$ -соотношения. Поэтому можно считать, что при изучении пространственной структуры поля осадков именно

первичные данные об интенсивности радиоэха (а не их абсолютные значения) могут быть более пригодными.

Другой аспект использования численной процедуры преобразования Фурье заключается в требовании эквидистантности отсчетов ряда. При использовании данных в полярной системе координат такое преобразование может быть выполнено только вдоль луча радара. Это в свою очередь поднимает вопрос о репрезентативности полученных результатов в условиях значительной анизотропности полей фронтальных осадков.

В исследовании фронт проходил непосредственно над местом расположения радара. Это позволило получить оценки пространственных спектров как вдоль линии фронта, так и по ортогонали к нему, в направлении движения фронта. На рис. 2 приведен снимок фронтальных осадков, полученный с помощью радара на 2 января 2005 г. 00:41. В отличие от описания пространственного распределения фронтальных осадков, представленного в указанных выше работах, можно видеть, что поле осадков на фронте состоит не из сплошной линии, а представляет собой цепочку отдельных ячеек с высокой интенсивностью осадков, вытянувшихся вдоль линии фронта. На рис. 3 показаны оценки пространственных спектров по четырем направлениям: на северо-восток и юго-запад — вдоль линии фронта и на северо-запад и юго-восток — в ортогональном к линии фронта направлении. Последняя группа спектральных оценок не содержит каких-либо значимых пиков на фоне “красного шума”, за исключением высокочастотной части спектра за линией фронта, общий уровень фона которого к тому же несколько выше, чем у спектра перед фронтом. Другими словами, перед линией холодного фронта каких-либо преобладающих пространственных форм в поле осадков не наблюдается, а за фронтом отмечаются неболь-

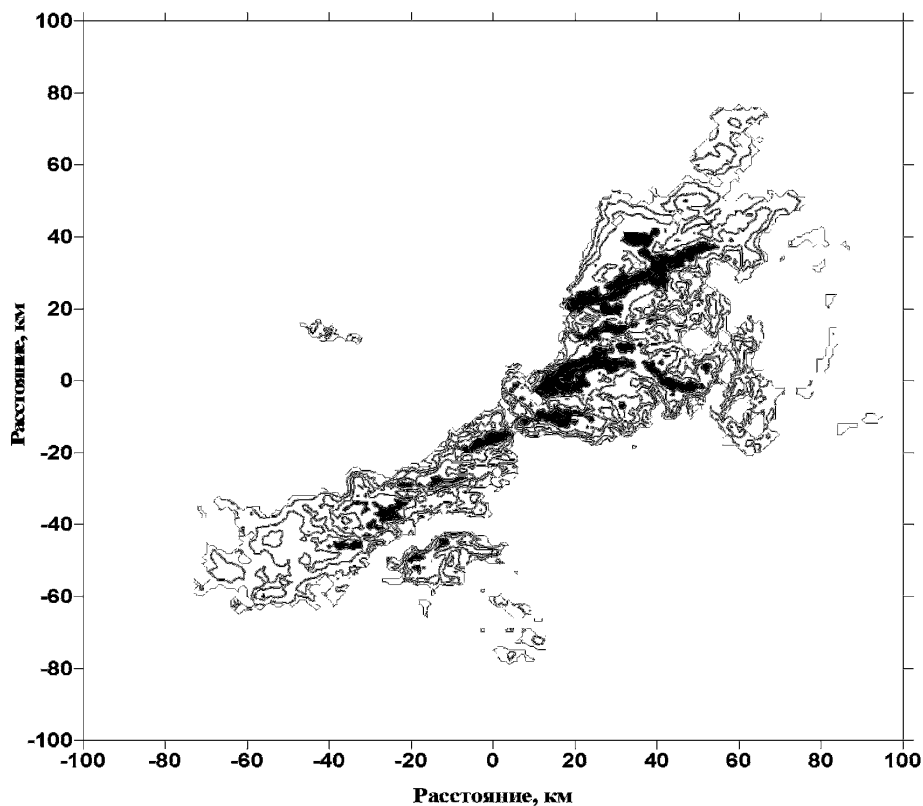


Рис. 2. Радиолокационное изображение поля осадков на холодном фронте на 2 января 2005 г. 00:41. Ячейки с высокой интенсивностью осадков показаны темным цветом.

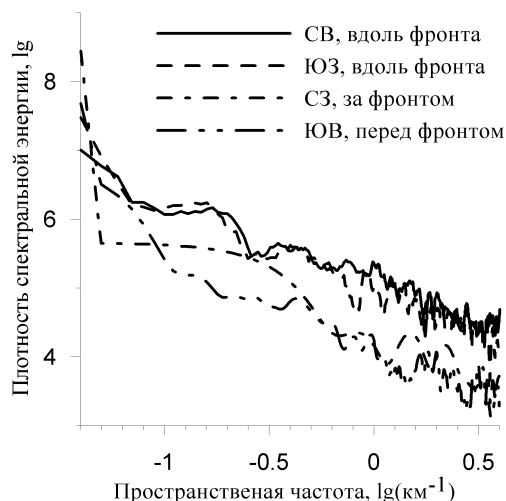


Рис. 3. Средние пространственные спектры радиоэха по различным направлениям относительно положения фронта.

шие по размеру (менее 1 км) и слабые по интенсивности ячейки осадков. Последующий анализ этих ячеек показал их хаотичное поведение, хотя это может быть связано с тем, что время их существования меньше интервала между сканированиями (5 мин). В отличие от этой группы, на пространственных спектрах вдоль линии фронта имеют место два значимых пика, превышающих 95 %-ный доверительный интервал, которым соответствуют пространственные масштабы порядка 2...3 и 7...10 км. Причем более крупные (7...10 км) из этих ячеек осадков присутствуют вдоль всей линии фронта, тогда как меньшие (2...3 км) отмечаются в основном на левом крыле фронта ближе к центру циклона.

Для исследования временной эволюции ячеек осадков была использована следующая процедура. Выделена расчетная область размером  $130 \times 20$  км, соответствующая области фронта, которая перемещалась вместе с ним. Для однородного покрытия в пределах этой области выполнялось сглаживание исходных данных и последующее преобразование системы координат из сферической в декартову. Радиус сглаживания выбран равным 800 м. Такое значение является минимально возможным для того, чтобы заполнить все узлы формируемой прямоугольной сетки. При этом процедура сглаживания с таким параметром не должна вносить существенных искажений на больших масштабах. Оценки пространственных спектров, полученные по этой области (не приводятся), близки к тем, что показаны на рис. 3 (северо-восток и юго-запад — вдоль линии фронта). Они подтверждают существование двух преобладающих масштабов, 2...3 и 7...10 км, в поле осадков на протяжении всего периода времени прохождения фронта над рассматриваемой областью. Использование порогового значения для интенсивности отражения в 35 дБ (примерно 5 мм/ч) позволило по серии последовательных во времени изображений установить, что такая пространственная изменчивость обусловлена наличием ячеек интенсивных осадков. Причем траектории движения таких ячеек отклоняются от направления распространения фронта на угол в  $40 \dots 50^\circ$  к центру циклона. Такое поведение, очевидно, является результатом относительного смещения ячеек осадков вдоль перемещающегося фронта. С этим смещением связаны и потоки массы влаги и скрытого тепла от периферии циклона к его центру. Последующее высвобождение энергии за счет потоков скрытого тепла при выпадении осадков вблизи центра циклона может усиливать циклоническую циркуляцию. Такой процесс нелинейной динамики, связанный с переносом энергии вверх по каскаду,

в данном случае от мезомасштабных структур к синоптическим образованиям, еще не исследован до конца.

Следующий пример иллюстрирует важную роль мезомасштабных ячеек осадков при переносе водной массы. На рис. 4 показано изменение во времени содержания воды в атмосфере (*а*) и размера области (*б*), связанных с осадками различной интенсивности. Максимальное содержание водной массы в атмосфере в пределах фронта связано с ячейками интенсивных осадков (радиоэхо более 35 дБ, что примерно равно 5 мм/ч). Они содержат приблизительно 50 % всей водной массы фронта, но занимают только 10...15 % площади общей фронтальной области. В то же время максимальная площадь на фронте покрыта слабыми осадками интенсивностью около 0.3...0.7 мм/ч (15...20 дБ) (рис. 5). Таким обра-

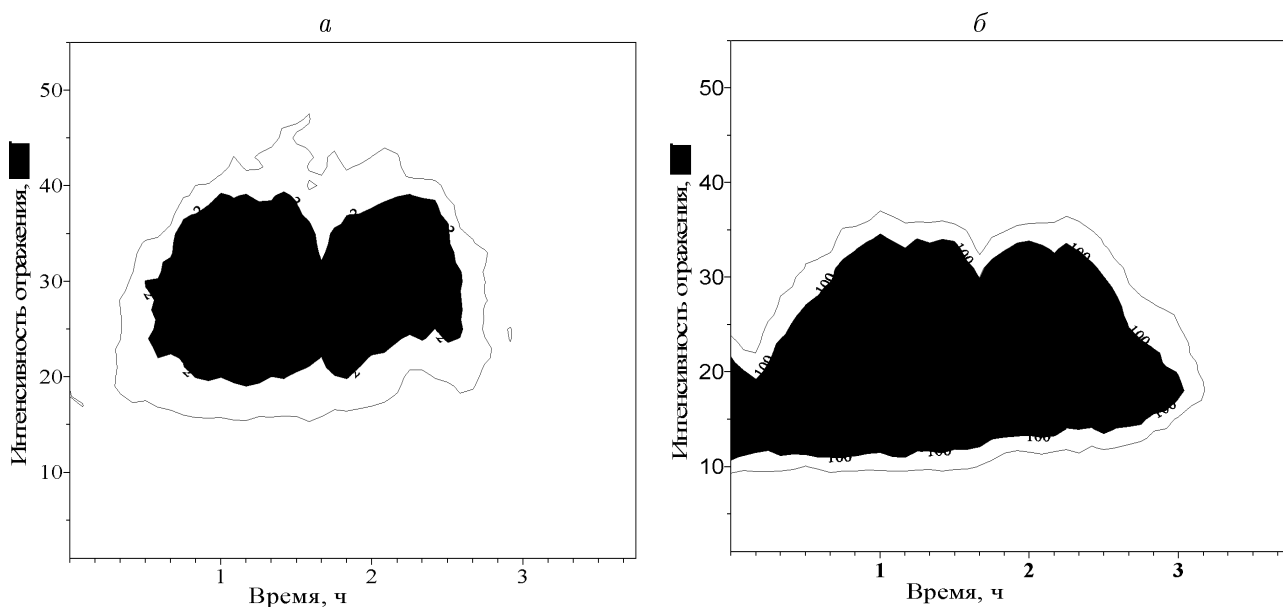


Рис. 4. Объем воды ( $10^5 \text{ м}^3$ ) — *а* и размер области ( $\text{км}^2$ ) — *б*, соответствующие различной отражательной способности (интенсивности осадков) при прохождении холодного фронта.

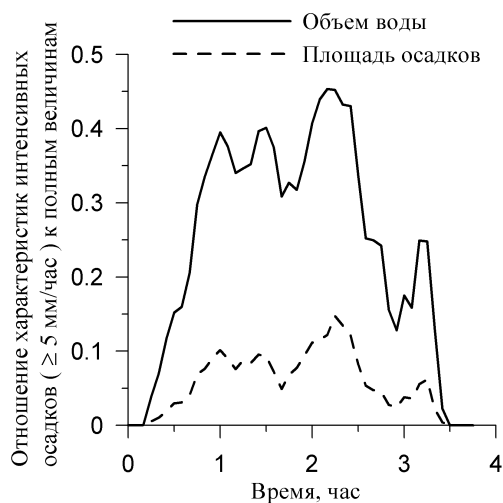


Рис. 5. Отношение объема воды и размера области, покрываемой осадками интенсивностью выше 5 мм/ч, к соответствующим полным величинам для холодного фронта при его прохождении над исследуемой областью.

зом, можно заключить, что потоки массы влаги и, соответственно, потоки скрытой энергии, связанные с мезомасштабными ячейками интенсивных осадков, в три-четыре раза превышают средние фоновые оценки для фронта.

Полученные результаты наглядно свидетельствуют о важности учета мезомасштабных особенностей поля осадков холодного фронта при оценке потоков массы и энергии. Учитывая тот факт, что массовые и энергетические характеристики таких мезомасштабных ячеек в несколько раз превышают фоновые значения, использование осредненных значений может приводить к значительным ошибкам. Очевидно, это является одной из главных причин того, что численные модели прогноза погоды все еще недостаточно надежно описывают развитие мезомасштабных атмосферных процессов. Пространственное разрешение современных моделей имеет порядок 10 км. Это не позволяет в явном виде описывать рассмотренные в данной работе мезомасштабные процессы, а их параметризация основывается, как правило, на средних характеристиках.

## Заключение

Рассмотрены пространственные особенности поля осадков с использованием данных X-полосового радара высокого разрешения. Исследуется случай прохождения холодного фронта над Западной Европой непосредственно над местом расположения радара. Установлено, что интенсивные фронтальные осадки связаны главным образом с мезомасштабными ячейками, имеющими характерные горизонтальные размеры порядка 2...3 и 7...10 км. В них сосредоточена почти половина всей массы воды на фронте, в то время как суммарная площадь, покрываемая этими ячейками, не превышает 10...15% от всей фронтальной области выпадения осадков. Эти максимумы осадков переносятся фронтом, но одновременно перемещаются вдоль линии фронта от периферии циклона к его центру. В результате их траектории отклоняются от направления перемещения фронта примерно на 40...50° по направлению к центру циклона.

Полученные результаты показывают, насколько важно учитывать мезомасштабные особенности пространственной структуры поля осадков холодного фронта, так как их массовые и энергетические характеристики могут отличаться от осредненных в несколько раз.

## Список литературы

- [1] COLLIER C.G. Accuracy of radar estimates by radar. Pt I: Calibration by telemetering raingauges // J. of Hydrology. 1986. N 83. P. 207–223.
- [2] CRUM T.D., SAFFLE R.E., WILSON J.W. An update on the NEXRAD program and future WSR-88D support to operations // Weather and Forecasting. 1998. N 13. P. 253–262.
- [3] AUSTIN P.M. Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall // Monthly Weather Review. 1987. N 115. P. 1053–1070.
- [4] TOTH Z., KALNAY E., TRACTON S.M. ET AL. A synoptic evaluation of the NCEP ensemble // Weather and Forecasting. 1997. N 12. P. 140–153.

- [5] RAIBLE C., BISCHOF G., FRAEDRICH K., KIRK E. Statistical single station short-term forecasting of temperature and probability of precipitation: Area interpolation and NWP-combination // Weather and Forecasting. 1999. N 14. P. 203–214.
- [6] BROWNING K.A. Mesoscale structure of rain system in the British Isles // J. Meteorol. Soc. Japan. 1974. Vol. 52, N 11. P. 314–327.
- [7] KREITZBERG C.W., BROWN H.A. Mesoscale weather systems within an occlusion // J. Appl. Meteorol. 1970. N 9. P. 417–432.
- [8] HOUZE R.A., HOBBS P.V. Organization and structure of precipitating cloud systems // Adv. Geophys. 1982. N 24. P. 225–315.
- [9] HOBBS P.V., MATEJKA T.J., HERZEGH P.H. ET AL. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. Pt I: A case study of a cold front // J. Atmos. Sci. 1980. N 37. P. 568–596.

*Поступила в редакцию 19 октября 2006 г.*