

## Возможности метеорологических радиолокаторов в обнаружении облачности и опасных явлений погоды

Н.А. Калинин, А.А. Смирнова

Пермский государственный университет

С развитием промышленности человек становится все менее защищенным перед силами природы. Все больший экономический ущерб наносят природные катастрофы, все больше человеческих жизней они забирают. На одном из первых мест по частоте стоят опасные явления погоды: катастрофические ливни, грозы, град, шквал, смерчи. Для наблюдения за изменением погоды и анализом ее состояния в конкретный срок по всей территории земного шара расположены метеорологические наблюдательные станции, работающие по единой программе. В России до 1990 г. действовало 7332 метеостанции, в 1992 г. – 5654, а в 2002 г. – лишь 4898. Сокращение количества метеостанций в настоящее время, к счастью, прекратилось, однако это не могло не сказаться на качестве прогноза погоды, поскольку редкая сеть гидрометеостанций не всегда позволяет предсказать опасное явление, особенно если оно формируется на территории, не оснащенной метеостанциями. Согласно данным А.И. Бедрицкого и др. [1], оправдываемость опасных явлений с 1993 по 2002 г. снизилась с 96 до 86%.

Особую сложность представляет прогноз конвективных явлений (грозы, ливней, града, шквала), масштаб которых десятки – первые сотни километров. Такие явления связаны с кучево-дождевыми облаками (*Cb*). Основным источником получения информации о пространственном распределении конвективных явлений служит метеорологический радиолокатор (МРЛ), позволяющий обнаруживать эти явления в радиусе 200 км от МРЛ. Данные радиолокационных наблюдений одного МРЛ предупреждают о появлении конвективного явления с заблаговременностью 1–3 ч, а несколько МРЛ, обзор которых перекрывает друг друга, дают возможность прогнозировать такие явления на срок до 12 ч [2–5].

В основе МРЛ лежит принцип радиолокации. Радиолокация – это область радиотехники, которая использует излучение и отражение электромагнитных волн для обнаружения объектов и получения их характеристик путем преобразования отраженного сигнала (радиоэха).

Датой рождения радиолокационной метеорологии считается 20 февраля 1941 г., когда на побережье Великобритании при наблюдении за самолетом с помощью военной радиолокационной станции на расстоянии 11 км была обнаружена зона осадков [12].

В настоящее время МРЛ имеют широкое применение во всем мире. Они обладают обширным диапазоном возможностей и приспособлены к нуждам конкретной страны. В Великобритании используется радиолокатор «Siemens Plessey 45C». Его основная задача – измерение осадков для прогноза наводнений и прогноз погоды с заблаговременностью до 3 ч [13]. В США для штормоповещения, метеорологического обеспечения авиации и измерения осадков используется радиолокатор WSR–88D [15]. Метеорологические радиолокаторы в Германии (DWD) предназначены для наблюдения за явлениями погоды и обеспечения гидрометеорологической информацией служб водного управления и авиации [14]. В Италии основной проблемой являются катастрофические ливни, для диагноза и прогноза которых используются МРЛ марок «ALENIA-SMA» и «EEC-ERICSSON» [11]. МРЛ в Японии (марка «Mitsubishi») служат для измерения характеристик осадков и прогноза наводнения при эксплуатации плотин на горных реках [16]. МРЛ, разработанные в России (МРЛ-2, МРЛ-5), по всем рабочим параметрам превышают требования Всемирной метеорологической организации к метеорологическим радарам, не уступают параметрам подобных МРЛ Японии, Италии, Англии, Германии, США и даже превосходят их.

Помимо штормоповещения и метеообеспечения МРЛ являются также эффективным

средством получения информации о состоянии облачности после физико-химического воздействия на нее с целью предотвращения ливней и града либо увеличения осадков в засушливых районах. С помощью МРЛ изучают электрическую активность и зоны турбулентности в кучево-дождевых облаках.

С 90-х гг. прошлого века ручную обработку результатов радиолокационных наблюдений сменили автоматизированные системы, которые сами запускают радиолокатор для наблюдений, получают и обрабатывают их результаты, представляют пользователю отчет в виде карты метеоявлений с выделением контуров опасных явлений. В России автоматизация радиолокационных наблюдений производится с помощью двух программных комплексов: АКСОПРИ (автоматизированный комплекс сбора, обработки и представления радиолокационной информации), разработчиком которого является Центральная аэрологическая обсерватория (г. Долгопрудный Московской области), и АМРК – автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс «Метеоячейка», разработанный Институтом радарной метеорологии (п. Воейково Ленинградской области).

Для изучения возможностей более эффективного использования МРЛ при метеорологическом обеспечении отдельных регионов России нами были сформулированы две научно-практические задачи, реализация которых была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований совместно с администрацией Пермской области:

1. Провести исследование атмосферных процессов с целью выявления объективных критериев радиолокационного распознавания конвективной облачности и связанных с ней опасных явлений погоды на примере территории, ограниченной радиусом 200 км от МРЛ-5, расположенного в г. Перми. Эта территория включает в себя два субъекта Российской Федерации: центральную и южную части Пермского края и юго-запад Свердловской области.

2. В качестве демонстрации новых возможностей метеорологического радиолокатора, не использованных ранее ни у нас в стране, ни за рубежом, для этого же региона провести численный анализ облачности с целью получения полей ее пространственного распределения.

Поводом для постановки первой задачи послужило то обстоятельство, что при радиолокационной классификации явлений погоды решения об опасных метеорологических явлениях (ОЯ) принимаются на основе критериев распознавания по косвенным признакам – высоте радиоэха кучево-дождевого облака и его отражаемости. Отражаемость характеризует отражающие свойства единицы объема облачных элементов и выражается в  $\text{мм}^6/\text{м}^3$  или дБZ. Степень соответствия радиолокационной информации об ОЯ данным наземных наблюдений выявляется при сопоставлении этих видов информации. Критерии распознавания различны для разных физико-географических районов, сезонов года, конкретных МРЛ, принятых методик измерения, поэтому для нужд конкретного региона необходимо проводить отдельное исследование по выявлению или уточнению критериев.

Главным обстоятельством постановки второй задачи послужил тот факт, что результаты измерений количества облаков на метеорологических станциях не дают полного представления о распределении облачности по какой-либо территории (административному району, водосбору реки, трассе полета малой авиации), особенно при редкой сети метеостанций. Большие расстояния между метеостанциями ведут к вынужденному осреднению значений баллов облачности, а следовательно, к их сглаживанию, которое тем больше, чем больше площадь осреднения. При расстоянии между станциями 80-100 км и более значение балла облачности на станции существенно отличается от среднего по площади значения. Способность радиолокатора обнаруживать облачность дает возможность моделировать поля пространственного распределения облачности, совмещая площадные радиолокационные и контактные стационарные методы измерений облаков на основе численных методов.

При проведении исследования использовались синхронные радиолокационные и стационарные наблюдения за 1998–2002 гг. Радиолокационные данные представлены следующей информацией, полученной на МРЛ-5 с помощью АМРК «Метеоячейка» по восьми синоптическим срокам (0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 ч международного согласованного (гринвич-

ского) времени (МСВ)): вид и интенсивность явления; азимут и удаление явления от МРЛ; высота радиоэха облачности и ОЯ, связанных с *Cb*; максимальная отражаемость во всем слое облака; скорость порывов при шквалистом усилении ветра. Общее число рассмотренных явлений в анализируемый период составило 3154 случая грозы, 6038 – ливневого дождя, 216 – ливневого снега, 55 – града, 248 – шквалистых усилений ветра. В качестве исходного станционного материала использовались данные наблюдений 17 метеостанций Пермского края и 7 метеостанций Свердловской области, расположенных в радиусе действия МРЛ-5. Оценка синоптической ситуации производилась по приземным картам погоды. Данные о высоте тропопаузы и изотерм 0 и  $-22^{\circ}\text{C}$  получены на аэрологической станции Пермь–Бахаревка.

Рассмотрим основные результаты, полученные в ходе выполнения как первой, так и второй задач.

1. Для распознавания ОЯ выделяют однозначные и комплексные критерии [3]. К однозначным критериям относится величина отражаемости в *Cb* с явлением на высоте изотерм 0 и  $-22^{\circ}\text{C}$  ( $\lg Z_2$  и  $\lg Z_3$  соответственно), которая определяет связь отражаемости облака с количеством осадков и восходящими потоками в облаке. В пределах некоторого интервала значений можно с определенной степенью уверенности говорить о наличии того или иного явления. Превышение значения  $\lg Z$  над установленным пороговым критерием свидетельствует о том, что отмечается другое явление, обладающее большей интенсивностью. Если же  $\lg Z$  не достигает установленного критерия, то отмечается явление меньшей интенсивности.

Другим однозначным критерием служит максимальная высота радиоэха явления  $H_{\max}$ . В ходе своего развития конвективное облако достигает стадии, при которой начинается оледенение его вершины. С этого момента создаются условия для начала интенсивного разделения электрических зарядов и превращения облака в *Cb*. Так, возникновение гроз и града происходит после превышения радиоэхом *Cb* уровня изотермы  $-22^{\circ}\text{C}$ . Интенсивность явления зависит от мощности переохлажденной части облака ( $\Delta H = H_{\max} - H_{-22^{\circ}\text{C}}$ ).

Считается, что развитие облаков по вертикали происходит до уровня тропопаузы, которая в силу своих характеристик является задерживающим слоем для водяного пара. Однако в летний период иногда наблюдаются вертикальные движения воздуха такой интенсивности, что происходит «пробивание» тропопаузы и вынос водяного пара за ее границы. Поэтому превышение облаком уровня тропопаузы ( $\Delta H_{\text{троп}} = H_{\max} - H_{\text{троп}}$ ) также может служить критерием распознавания кучево-дождевых облаков.

Комплексные критерии рассчитываются на основе нескольких радиолокационных параметров облаков [3]. Критерий грозоопасности  $Y$  определяется следующим образом:

$$Y = H_{\max} \cdot \lg Z_3.$$

При резкой смене погоды рекомендуется проводить ежедневную корректировку критерия грозоопасности по высоте изотермы  $-22^{\circ}\text{C}$  ( $Y_{\text{кр}}$ ) [9]:

$$Y_{\text{кр}} = H_{-22^{\circ}\text{C}} \cdot \lg Z_{\min},$$

где  $\lg Z_{\min}$  – минимальное значение  $\lg Z_3$  в грозах. При  $Y < Y_{\text{кр}}$  фиксируется ливень.

Выявить границу между грозами и ливнями можно также на основе построения дискриминантной функции. Наиболее информативными предикторами для ее построения являются три радиолокационные характеристики:  $H_{\max}$ ,  $\lg Z_3$  и  $H_{-22^{\circ}\text{C}}$ . Пример разделения ливней и гроз с помощью дискриминантной функции для территории исследования приведен на рис. 1. При  $u > 0$  фиксируются грозы, при  $u < 0$  — ливни.

Шквалистых усилений ветра (более 15 м/с) следует ожидать в грозо- или градоопасном облаке при максимальной высоте радиоэха облака более 8 км и значении максимальной отражаемости в любой его части более 40 дБZ [2].

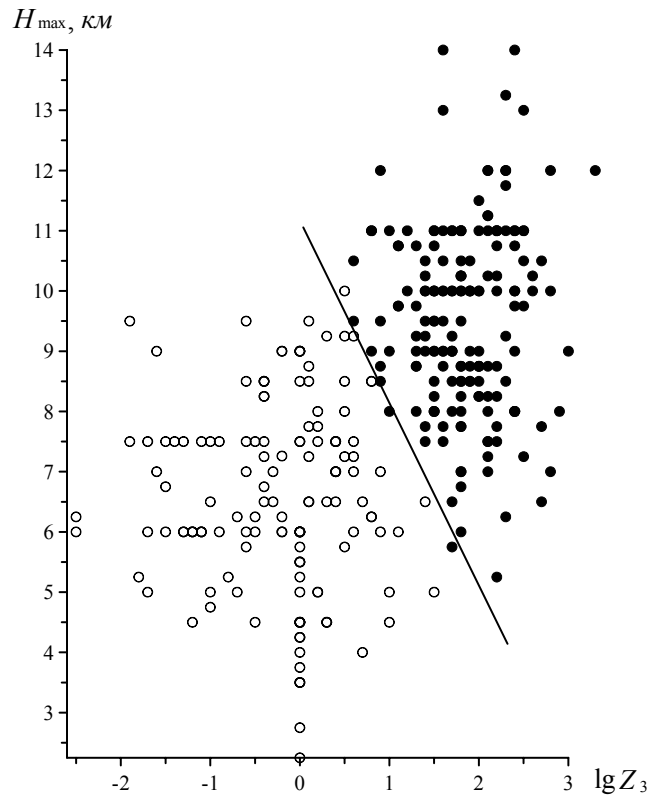


Рис. 1. Распределение ливней и гроз по дискриминантной функции  
 $u(H_{\max}, \lg Z_3, H_{-22^\circ\text{C}}) = 0,0548 H_{\max} + 0,325 \lg Z_3 + 0,08 H_{-22^\circ\text{C}} - 1,23$ :  
 ○ — ливень; ● — гроза

В США надежным критерием выделения районов с ОЯ признана вертикально проинтегрированная водность ( $M^*$ ) [16]. Этот критерий через отражаемость и высоту радиозаха облачности позволяет оценить массу воды на единицу площади по всей вертикальной протяженности  $Cb$ . Поскольку отражаемость зависит от размера облачных частиц, а они различны для ливней, грозовых облаков и града, то полученные значения  $M^*$  позволяют судить о виде явления.

Для уточнения рассмотренных радиолокационных критериев на территории исследования были получены статистические характеристики радиолокационных параметров в зависимости от состояния атмосферы. Проведение анализа позволило только на основе установления пороговых значений критериев повысить вероятность распознавания конвективных явлений с 91 до 96%. На рис. 2 приведены распределения уточненных радиолокационных критериев ( $H_{\max}$ , средней отражаемости в конвективном облаке на высоте 3-6 км  $\bar{Z}_{\max}$ ,  $\lg Z_3$ ,  $Y$  и  $M^*$ ) за 26 июля 2000 г. в радиусе 100 км от МРЛ (МРЛ установлен в точке в с координатами  $x = 100$ ;  $y = 100$ ).

На рис. 2 а приведена карта метеоявлений, обнаруженных радиолокатором и распознанных в соответствии с радиолокационными критериями АМРК «Метеоячейка». Из рис. 2 видно, что все используемые радиолокационные параметры довольно точно повторяют контуры облачности на карте метеоявлений, показывая максимальные значения каждой характеристики в зоне града и грозы, минимальные – в зоне облаков среднего (высота 2-6 км) и верхнего (более 6 км) ярусов. Следовательно, диагноз грозы и града лучше всего проводить по радиолокационным критериям  $\bar{Z}_{\max}$ ,  $\lg Z_3$ ,  $Y$ ,  $M^*$  (рис. 2 в – е), поскольку эти критерии позволяют с наименьшей погрешностью выделять явления.

При диагнозе ливневых осадков необходимо помнить, что максимальная отражаемость в ливнях отмечается вблизи изотермы  $0^\circ\text{C}$  и часто наблюдается вблизи поверхности

земли, что связано с выпадением осадков, поэтому критерий  $\bar{Z}_{\max}$  не дает возможности безошибочно распознать ливень. Согласно результатам анализа, ливни наиболее хорошо определяются по критериям  $H_{\max}$  и  $M^*$  (рис. 2 б, е). Таким образом, для диагноза опасных явлений погоды наиболее продуктивно использовать весь комплекс приведенных радиолокационных характеристик, что позволяет снизить ошибочную интерпретацию явлений [6, 8].

2. Полученная на метеостанциях и с помощью МРЛ информация об облачности существенно различается. В первом случае это количество облаков, характеризующее степень покрытия облачностью небосвода, во втором – радиозэх облаков (его отражаемость и конфигурация). Чтобы избежать большой ошибки при проведении анализа, район радиолокационных измерений был разбит на квадраты, в каждом из которых количество облаков ( $n$ ) определялось по 10-балльной шкале как доля площади квадрата, занятая облачностью.

С целью выбора оптимального размера квадрата были определены  $n$  для различных квадратов, размер которых изменялся от  $4 \times 4$  до  $400 \times 400$  км [6]. Последующая работа проводилась с квадратом  $25 \times 25$  км, предпочтение которому было отдано в силу того, что радиус обзора наблюдателем небосвода есть функция высоты нижней границы облаков и угла обзора облачности наблюдателем ( $r$ ). Для рассматриваемой территории  $r$  составляет в среднем 10 – 15 км.

Помимо этого, метеорологическая дальность видимости, определяемая наблюдателями на метеостанциях, данные которых анализировались, в среднем составила 12–33 км (интервал изменений широк из-за разницы физико-географических условий станций). Таким образом, достигается сопоставимость информации о количестве облачности, полученной различными методами.

Практически все задачи численного анализа и прогноза погоды с использованием методов усвоения данных метеорологических наблюдений основаны на минимизации ошибок восстановления анализируемых метеорологических полей, что позволяет снизить меру отклонения между рассчитанными и измеренными в реальных условиях полями. Построение полей облачности производилось путем совместного анализа данных радиолокационных и станционных измерений балла облачности методом вариационного согласования станционных и радиолокационных наблюдений за облачностью и облачными элементами, при котором учитываются преимущества обоих видов наблюдений. При этом были сформированы поля нулевого приближения посредством перевода радиолокационного изображения в балл облачности ( $N_0$ ), а также поля первого приближения путем корректировки станционных данных методом весовых коэффициентов ( $N_1$ ):

$$J(N) = \iint_G \left[ a (N - N_1)^2 + b \left( \left( \frac{\partial N}{\partial x} - \frac{\partial N_0}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial N}{\partial y} - \frac{\partial N_0}{\partial y} \right)^2 \right) \right] dx dy \rightarrow \min ,$$

где  $N$  – искомое поле облачности;  $G$  – область анализа;  $a$  и  $b$  – постоянные весовые коэффициенты

Так как от выбора поля первого приближения зависит конечная точность анализа, то его созданию уделялось большое внимание. Качество анализа оценивалось путем интерполяции проанализированных значений на станции, исключенных из анализа, и сравнения интерполированного значения и анализа.

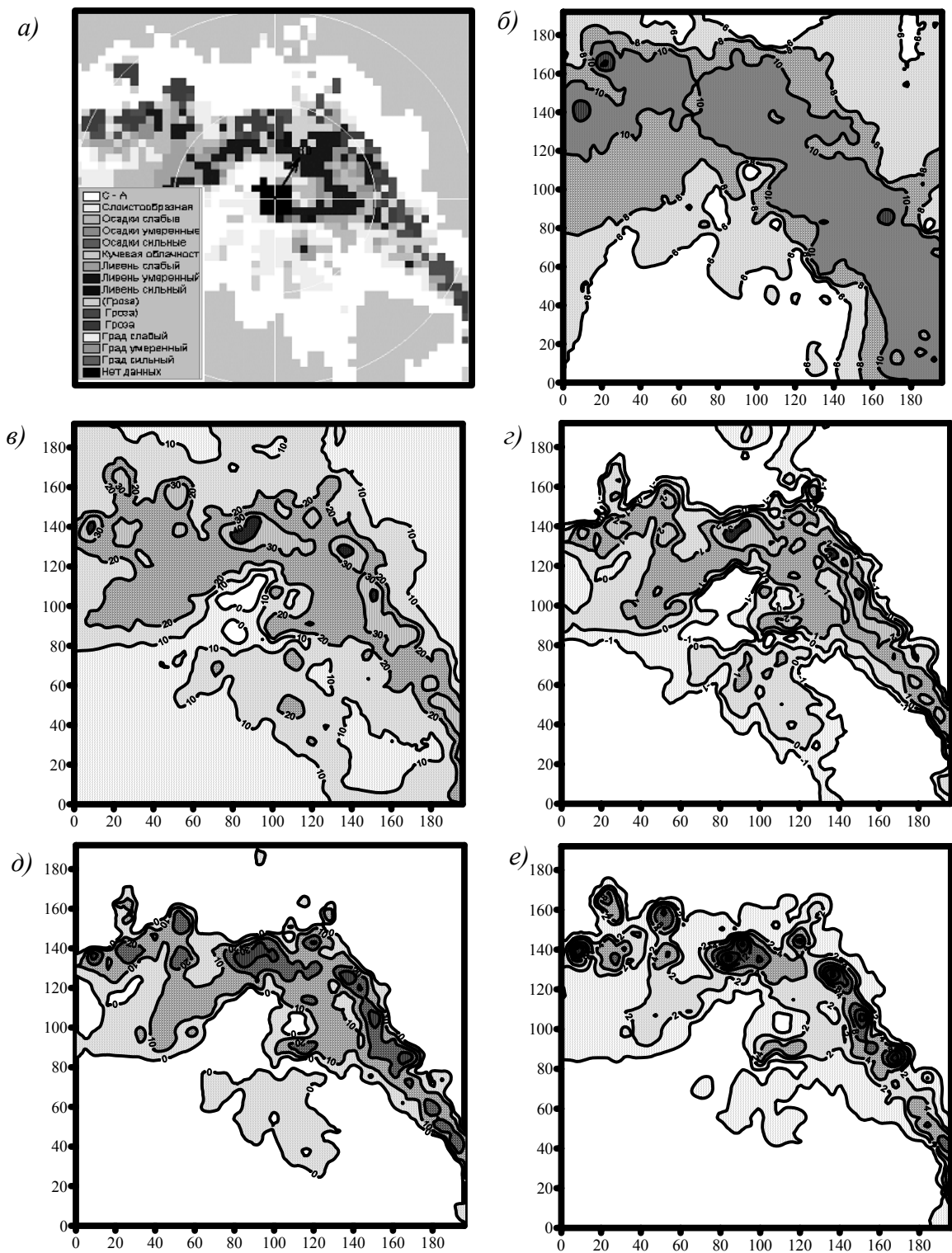


Рис. 2. Радиолокационные характеристики облачности и опасных явлений погоды в радиусе 100 км от МРЛ за 26.07.2000 г. (7:47 ч МСВ):  
 а) карта метеоявлений МРЛ; б) высота радиоэха облачности  $H_{\max}$ ;  
 в) отражаемость  $\bar{Z}_{\max}$ ; г)  $\lg Z_3$ ; д) критерий грозоопасности  $Y$ ;  
 е) вертикально проинтегрированная водность  $M^*$

Решение функционала позволило получить матрицу значений балла облачности в узлах сетки  $25 \times 25$  км по территории исследования [10]. Проверка результатов анализа показала, что при незначительной облачности, когда радиолокационный метод дает большую погрешность, точность полей численного анализа близка к точности полей станционных дан-

ных. При сложных метеоусловиях абсолютная ошибка анализа облачности составляет не более 1,3 балла [7]. По результатам проведенного анализа были построены поля распределения облачности, используемые для построения анализа (рис. 3 б, в), окончательное поле, построенное на основе вариационного согласования полей радиолокационных и стационарных наблюдений (рис. 3 г), а также контрольное поле (рис. 3 а) стационарных измерений облачности (на всех рисунках начало координат помещено в юго-западный угол исследуемой области). В рассматриваемый день на территории исследования отмечалась фронтальная облачность с ливнями, грозой и градом (карта метеоявлений МРЛ приведена на рис. 2 а). На ос-

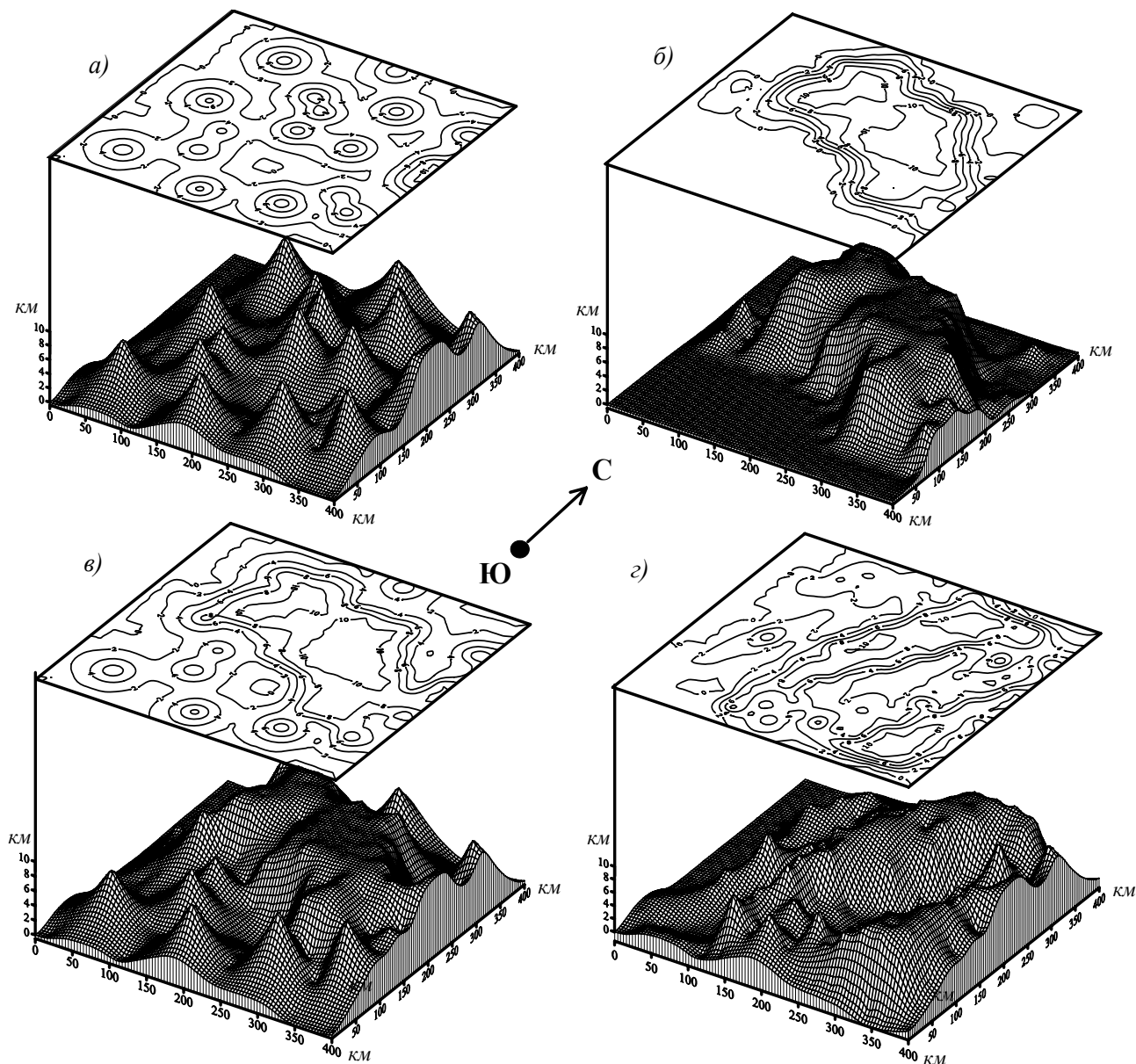


Рис. 3. Поля распределения количества облачности, используемые при построении анализа, за 26.07.2000 г. (срок 7:47 ч МСВ):

- а) контрольное поле анализа, построенное по стационарным данным;
- б) поле анализа, построенное по данным радиолокационных наблюдений ( $N_0$ );
- в) поле анализа, используемое в качестве поля первого приближения ( $N_1$ );
- г) окончательное поле анализа ( $N$ )

новании их визуального анализа можно отметить, что радиолокационные данные дополняют картину распределения облачности, полученную по стационарным наблюдениям, и дают ин-

формацию об облачности по территории, относительно которой нет данных метеостанций.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 04-05-96043 и 04-05-97503).

### Библиографический список

1. *Бедрицкий А.И.* Обеспечение гидрометеорологической безопасности жизнедеятельности России: / А.И. Бедрицкий, А.А. Коршунов, Л.А. Хандожко, М.З. Шаймарданов // Тез. докл. науч.-практ. конф. «Гидрометеорологические прогнозы и гидрометеорологическая безопасность». М., 2004.
2. *Бочарников Н.В.* Диагноз шквалов по данным МРЛ / Н.В. Бочарников, Г.Б. Брылев, М.Р. Ватиашвили // Радиолокационная метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 64–67.
3. *Брылев Г.Б.* Радиолокационные характеристики облаков и осадков / Г.Б. Брылев, С.Б. Гашина, Г.Л. Низдойминова. Л.: Гидрометеиздат, 1986.
4. *Итоги работы сетевых АМРК «Метеоячейка» за 1996 – 2002 гг. по отдельным показателям работы: Информ. письмо / ИРАМ. М., 2002.*
5. *Калинин Н.А.* Исследование атмосферы с помощью импульсных метеорологических радиолокаторов / Н.А. Калинин; Перм. ун-т, Пермь, 2000.
6. *Калинин Н.А.* Совместное использование данных радиолокационных и стационарных наблюдений для анализа облачных полей / Н.А. Калинин, А.А. Смирнова // Метеорология и гидрология. 2002. № 8. С. 53–60.
7. *Калинин Н.А.* Численный анализ данных радиолокационных и стационарных измерений облачности / Н.А. Калинин, А.А. Смирнова // Там же. 2003. № 7. С. 31–39.
8. *Калинин Н.А.* Исследование радиолокационных характеристик распознавания опасных явлений погоды, связанных с кучево-дождевой облачностью / Н.А. Калинин, А.А. Смирнова // Там же. 2005. № 1. С. 84–95.
9. *Калинин Н.А.* Радиометеорология / Н.А. Калинин, Н.И. Толмачева; Перм. ун-т. Пермь, 2002.
10. РД 52.04.320–91. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ–1, МРЛ–2, МРЛ–5. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 360 с.
11. *Смирнова А.А.* Двухмерное поле облачности / А.А. Смирнова. М.: ВНИИЦ, 2004. № гос. рег. 50200400311.
12. *Смирнова А.А.* Объективный анализ облачности и опасных явлений погоды по данным радиолокационных и стационарных наблюдений / А.А. Смирнова. Пермь: Изд-во Перм. ун-та. 2005.
13. *Alberoni P.P. et al.* The Italian radar network: current status and future developments / P.P. Alberoni et al. // Proceedings of ERAD (2002), Copernicus GmbH, Delft, Netherlands, 2002. P. 339–344.
14. *Atlas D.* Advances in Radar Meteorology, in H.E. Landsberg and J. Van Mieghem (eds) / D. Atlas // «Advances in Geophysics», Academic Press Inc. 1964. Vol. 10, N.Y. P. 318–468.
15. *Collier C.G.* United Kingdom weather radar status report. Measurement of precipitation by radar / C.G. Collier // COST Project 72 – Proceeding of a final seminar. Madrid, 1985.
16. *Malkomes M.* The new radar data processing software for the German Weather Radar Network / M. Malkomes, M. Toussiant, T. Mammert // Proc. of ERAD (2002), Copernicus GmbH, Delft, Netherlands, 2002. P. 335–338.
17. *Serafin R.J., Wilson J.W.* Operational weather radar in the U.S.: Progress and opportunity. COST 75. / R.J. Serafin, J.W. Wilson. Madrid, 1998. P. 35–61.
18. *Yoshino F. et al.* Overview of radar networking by MOC. Japan and its data dissemination system (FRJCS). COST 73. / F. Yoshino et al. 1989. P. 123–132.



