

Применение активных радиолокационных систем в мониторинге опасных метеорологических явлений

Г.Г. Щукин¹, В.В. Булкин², Р.В. Первушин²

¹Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13, E-mail: ggshchukin@mail.ru

²Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Муром, ул. Орловская, 23

Радиолокационные средства давно вошли в практику метеорологических служб в разных странах мира. Их применение было обусловлено тем, что уже в первые годы практического применения радиолокационных станций стало ясно, что состояние окружающей среды и протекающие в ней процессы оказывают влияние на характер принимаемого (отражённого от цели) сигнала.

Применение радиолокации в метеорологии основано на рассеянии радиоволн микроволнового диапазона частицами облаков и осадков в виде капель дождя, градин, кристаллов, снежинок и их различных комбинаций. Радиолокационная отражаемость облаков и осадков связана с основными их характеристиками – водностью облаков и интенсивностью осадков. Это обусловлено тем, что оба этих параметра зависят от размеров частиц и закона их распределения по размерам.

Активные радиолокационные средства применяются в метеорологии для решения большого круга задач, связанных с обеспечением безопасности в чрезвычайных обстоятельствах: получения количественной информации о жидких и твёрдых осадках, исследования облаков, изучения атмосферной турбулентности, гроз, шквалов, ветра, оценки эффективности активных воздействий на облачные образования, обеспечения безопасности полётов самолётов и т.п.

В лекции рассмотрены возможности применения метеорологических радиолокаторов для решения некоторых из перечисленных задач. Приведены сведения по истории развития метеорадиолокации. Лекция предназначена для студентов направлений подготовки «Метеорология специального назначения», «Техносферная безопасность», «Гидрометеорология», «Экология и природопользование», а также направлений, связанных с разработкой радиолокационных средств («Радиотехника», «Приборостроение» и т.п.).

Введение

Состояние окружающей среды и протекающие в ней процессы оказывают большое влияние на все области деятельности и повседневную жизнь человека. Метеорологические условия оказывают значительное влияние на все виды транспорта, работу сельскохозяйственного, строительного и энергетического комплексов, на повседневную жизнь людей. Стремление обеспечить надёжное прогнозирование метеорологической обстановки на разных этапах развития человечества решалось самыми разнообразными методами. Переход к началу техногенного этапа позволил наладить сначала редкие, осуществлявшиеся отдельными энтузиастами, а затем систематические метеорологические наблюдения и измерения.

В XVII-XVIII в.в. уже была сформирована достаточно единообразная система наблюдений, использующая известные к тому времени средства. С конца XIX в. в метеорологию стали проникать сначала электрические, а затем и электронные методы, и устройства. Этот естественный процесс обусловлен, с одной стороны – использованием новых метеорологических характеристик, которые невозможно или нерационально измерять традиционными средствами, а с другой – развитием электротехники и особенно электроники.

Большинство сформировавшихся к настоящему времени методов дистанционного наблюдения исследования атмосферы основаны на использовании радиотехнических принципов локации, и потому объединяются общим названием «радиометеорология» [7, 8, 13]. Их широкое применение обусловлено тем, что в отличие от классических измерителей (плювиограф, барометр и т.п.) они позволяют проводить измерения интегральных характеристик метеообстановки на больших пространствах с одновременной обработкой полученных результатов и представлением в удобном для потребителя виде.

В целом дистанционные радиометеорологические локационные системы можно разделить на два вида: активные и пассивные. Активные основаны на излучении зондирующего сигнала, приёме отражённых эхо-сигналов с последующим их анализом, и применяются для получения количественной информации о жидких и твёрдых осадках, исследования облаков, изучения атмосферной турбулентности, гроз, шквалов, ветра, оценки эффективности активных воздействий на облачные образования, обеспечения безопасности полётов самолётов и т.п. [7, 8, 11, 13, 19, 21 и т.д.].

1. Общие положения

Под мониторингом окружающей среды понимают систему наблюдений и контроля, направленных на анализ состояния окружающей среды, происходящих в ней процессов и своевременного выявления тенденций её изменения [14]. Не последнее место занимает мониторинг опасных метеорологических явлений, по которым понимают природные процессы и явления, возникающие в атмосфере под действием различных природных факторов или их сочетаний, оказывающие или могущие оказать поражающее воздействие на людей, сельскохозяйственных животных и растения, объекты экономики и окружающую природную среду (сильный ветер, вихрь, ураган, тропический циклон, продолжительный дождь, гроза, ливень, град, гололёд, сильный снегопад и т.д.) [13].

Влияние перечисленных и других метеорологических явлений на все стороны жизни человека, безусловно. Независимые исследования [4, 33, 34 и т.д.], проведённые в различных странах, позволили выявить корреляцию между атмосферными условиями различного временного масштаба и обострением (вплоть до летальных исходов) вялотекущих болезней. Кроме того, к гибели людей приводит и непосредственное воздействие таких нестационарных природных явлений, как ураганы, удары молнии, шквалы и т.п.

Ещё одним опасным явлением, влияющим на многие стороны жизни людей и общества, является град. От градобития страдают сельскохозяйственные посевы, технические объекты, люди. Так, общая площадь градобоя на территории Ставропольского края 10 мая 2007 г. составила более 11 тысяч га. Ущерб от градобоя составил более 390 миллионов рублей, в том числе по сельскому хозяйству – на 330 миллионов рублей.

Значительное влияние метеорологические условия оказывают на все виды транспорта [4, 9, 32, 33]. Анализ статистической информации о лётных происшествиях с самолётами, проведённый по данным различных источников (включая отчеты ICAO, FAA и GRA, Inc. (США)) показывает, что причины 24% авиационных происшествий связаны с метеорологическими условиями.

Большую опасность для социальной и техногенной сфер представляют грозы. Так, по данным [33] ежегодные потери экономики США от грозовой активности составляют не менее 125 млн. долл.

С целью минимизации социального или экономического ущерба от грозовой атмосферной активности в 60 – 70-е годы в СССР получили развитие специализированные

наблюдения за грозовыми облаками и молниями с помощью радиолокационных станций (РЛС). Измерение параметров эхо-сигналов молний и их электромагнитного излучения (ЭМИ) позволило в сопоставлении с радиоэхо облаков и осадков изучать закономерности грозовой активности этих облаков.

В Ленинградской области комплексные радиотехнические исследования гроз были начаты под руководством В.Д. Степаненко в ВКА им. А.Ф. Можайского и имели своей целью, в частности, изучение радиолокационных характеристик грозовых разрядов в метровом и дециметровом диапазонах, параметров ЭМИ грозовых разрядов (ГР) в КВ, СВ и СДВ диапазонах распространения радиоволн; определение параметров радиоэхо кучево-дождевых облаков в сантиметровом и дециметровом диапазонах радиоволн [30].

В восточной Грузии (Алазанской долине) и в Ставропольском крае (в районе Ессентуков) Российским государственным гидрометеорологическим университетом (РГГМУ) под руководством Л.Г. Качурина и ВГИ под руководством М.И. Медалиева были организованы радиолокационные комплексы в горных районах, отличающихся интенсивной грозовой деятельностью. Впоследствии исследования гроз были продолжены ВГИ на полигонах в Республике Кабардино-Балкария [20, 23].

От метеоусловий в существенной степени зависит эффективность функционирования строительных и энергетических хозяйственных структур.

2. Классификация видов метеорологического мониторинга

Общие требования к составу и содержанию работ по мониторингу и прогнозированию опасных метеорологических явлений и процессов определены ГОСТ Р 22.1.07-99 [15]. Стандартный мониторинг метеорологических явлений и процессов определяется как система регулярных наблюдений и контроля за развитием природных метеорологических явлений и процессов в окружающей природной среде, за обуславливающими их формирование и развитие факторами, проводимых по единой программе, определённой нормативными документами.

Мониторинг опасных метеорологических явлений и процессов включает:

- регулярные наблюдения за состоянием метеорологических явлений и процессов, их количественными и качественными показателями;
- сбор, хранение и обработку данных наблюдений;
- создание и ведение банков данных.

История зарождения систематических наблюдений за атмосферными процессами относится ещё к древнему миру. В XX веке мониторинг приобрёл глобальный характер, получив в качестве мощного инструментария сначала радиоэлектронные средства, а затем спутниковые системы и возможности сетевого обмена данными.

Во время Второй мировой войны широкое применение радиолокаторов дало много очень ценных наблюдений и выводов. В частности, всеми было признано, что условия распространения радиоволн зависят от метеорологических условий, что отражение их происходит и от слоев инверсий, от облачных и пылевых масс и т. д. В результате, созданные для военных целей специальные радиолокационные установки начали широко применяться во всех странах и для метеорологических целей.

Основным радиометеорологическим средством становятся специальные метеорологические локаторы, обеспечивающие наблюдение и контроль скорости и направления ветра, развития облаков, циклонов, атмосферных фронтов, вертикального

развития кучевой облачности, атмосферных осадков (включая снег и град) и их интенсивности, молниевой активности.

Учитывая большое разнообразие метеорологических параметров, за которыми должны вестись наблюдения, и различие требований к ним в отношении точности и частоты измерения, временных периодов и объёмов осреднения и т.д., современную систему метеорологических наблюдений условно можно разделить на три группы подсистем:

- общеметеорологическая группа, осуществляющая получение информации об основных метеорологических элементах и их параметрах;
- специализированная группа, осуществляющая получение информации о радиационных характеристиках, атмосферном электричестве, тепловом балансе подстилающей поверхности, озоне, загрязнении атмосферы и т.д.;
- специальная группа, осуществляющая получение информации, необходимой для обеспечения конкретных отраслей народного хозяйства (авиации, морского транспорта, сельского хозяйства, медицины и др.).

В состав общеметеорологических и специализированных групп входят службы наземных и морских метеорологических, радиолокационных и актинометрических наблюдений; теплосбалансных наблюдений; наблюдений за атмосферным электричеством и общим содержанием озона.

Общие принципы проведения контрольных мероприятий в рамках Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), а также при проведении экологического мониторинга различными государственными или негосударственными организациями изложены в Положении о государственной наблюдательной сети [25], других аналогичных руководящих документах.

3. Активная метеорологическая радиолокация

3.1. История становления

Истоки отечественной метеорологической радиолокации связаны с работами сотрудников Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО), Главной геофизической обсерватории (ГГО) и Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского (ВКА) (В.В. Костарев, Н.Ф. Котов, П.Н. Николаев, А.В. Беляков, В.Д. Степаненко) по созданию и проведению в конце 40-х и начале 50-х годов в нескольких пунктах СССР систематических радиолокационных наблюдений с помощью модернизированных самолетных 3-х сантиметровых РЛС «Кобальт» с целью штормоповещения о ливнях и грозах [29].

В 1949-1952 гг. К.С. Шифриным был проведён подробный анализ существующей приближенной теории радиолокации облаков и осадков, указан ряд недостатков этой теории. Было показано, что основное соотношение метеорадиолокации - формулу Рэля - можно применять при рабочей длине волны $\lambda = 10$ см для всех дождей, кроме ливней; при $\lambda = 3$ см только для слабых дождей. Важным является также вывод, что при рабочих длительностях импульса современных метеорадиолокаторов (МРЛ) можно пренебречь многократным рассеянием радиоволн на частицах облаков и осадков.

Организацией-разработчиком первого отечественного метеорологического радиолокатора МРЛ-1 ($\lambda = 0,8$ см и 3,2 см), разработанного по заказу военно-воздушных сил СССР, был Всесоюзный научно-исследовательский институт радиоаппаратуры (ВНИИРА) (Г.Ф. Шевела, С.И. Ваксенбург). В разработке, испытаниях и внедрении активно участвовали В.В. Костарев (ЦАО), Е.М. Сальман (ГГО), В.Д. Степаненко и С.М. Гальперин (ВКА). Разработка МРЛ-1 была завершена в 1961-1962 гг. Затем были разработаны МРЛ-2

(1968 г., $\lambda = 3,2$ см) и МРЛ-5 (1975 г., $\lambda = 3,2$ см и 10 см), заказчиком которых являлась Гидрометслужба СССР. В разработке и внедрении этих МРЛ также принимали участие специалисты ГГО, ЦАО, Высокоторного геофизического института (ВГИ).

Радиолокационные станции метеорологического назначения имеют много общего с РЛС, используемыми для других целей. Однако существуют специфические требования, предъявляемые к РЛС метеорологического назначения, которые обусловлены особенностями метеорологических объектов. К ним, прежде всего, относятся:

а) исключительно большой диапазон эффективных отражающих поверхностей с метеорологических объектов, достигающий более 100 дБ, причем большое число таких атмосферных образований, как неплотные мелкокапельные облака, термики или туманы характеризуются весьма малыми значениями размеров составляющих их элементов, создающими очень слабые эхосигналы;

б) значительные горизонтальные и вертикальные размеры метеорологических объектов, как правило, превышающие геометрические размеры зондирующего импульса;

в) относительно малая скорость движения метеорологических объектов;

г) большая пространственно-временная изменчивость физических параметров метеорологических объектов, обусловленная постоянным перемещением элементарных отражателей, составляющих облачную систему.

В связи с этим МРЛ должны были не только обладать максимально возможным энергетическим потенциалом с тем, чтобы обнаруживать опасные погодные явления (грозы, ливни, град, шквалы, смерчи) на больших расстояниях, но и быть дистанционной измерительной информационной системой, решающей задачи распознавания и количественного определения параметров метеорологических объектов.

Необходимо отметить, что созданные МРЛ, в особенности МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6, по точности определения местоположения метеорологических объектов и геометрических размеров, мощности эхосигналов, радиусу действия, энергетическому потенциалу, рабочему ресурсу, удобству для операторов, превышали действовавшие тогда требования Всемирной метеорологической организации (ВМО) к метеорадарам, не уступали и даже превосходили параметры некогерентных МРЛ Omega (Франция), Mitsubishi (Япония), Selenik (Италия), Plessy (Англия), Retheon Enterprise (США) [31].

3.2. Принципы метеорадиолокации

Применение радиолокации в метеорологии основано на рассеянии радиоволн микроволнового диапазона частицами облаков и осадков в виде капель дождя, градин, кристаллов, снежинок и их различных комбинаций.

Количество энергии, отражаемое частицей, характеризуется эффективной площадью рассеяния (ЭПР). Для малых частиц сферической формы ЭПР описывается формулой Релея [28]:

$$\eta = \frac{\pi^5 d^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2, \quad (1)$$

где λ - рабочая длина волны;

d - диаметр капли;

m - комплексный коэффициент преломления вещества частиц.

Коэффициент $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|$ в рассматриваемом диапазоне длин волн для воды приблизительно равен 0,9; а для льда 0,2; т.е. ЭПР водяной сферической частицы почти в пять раз больше, чем у ледяной сферической частицы таких же размеров.

Эффективная площадь рассеяния единицы объёма имеет вид:

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \sum_d N(d) d^6 \left[\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right]^2,$$

или

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} Z, \quad (2)$$

где Z - радиолокационная отражаемость, чаще всего выражаемая в $\text{мм}^6/\text{м}^3$ и записываемая в виде:

$$Z = \int_0^{\infty} N(d) d^6 dd. \quad (3)$$

Радиолокационная отражаемость облаков и осадков связана с основными их характеристиками – водностью облаков $w_{об}$ и интенсивностью осадков I . Это обусловлено тем, что оба этих параметра зависят от размеров частиц и закона их распределения по размерам.

Взаимосвязь Z с I и $w_{об}$ в большинстве случаев имеет вид:

$$Z = BI^{\beta_1}, \quad Z = Aw_{об}^{\beta_2}, \quad (4)$$

где A, B, β_1, β_2 – непостоянные параметры, зависящие от функции распределения частиц по размерам и скорости падения, и имеющие региональный характер. Эти зависимости и положены в основу радиометеорологического измерения водности облаков и интенсивности осадков.

Уравнение радиолокации атмосферных образований связывает технические параметры с отражающими характеристиками объемов, занятых частицами облаков и осадков, их удалением от МРЛ, величиной ослабления на трассе распространения радиоволн:

$$\bar{P}_r = \frac{0,28\lambda^2 P_t G^2 h \theta_\Gamma \theta_B \eta k k_3}{|4\pi|^3 R^2}, \quad (5)$$

где P_r - минимально обнаруживаемая мощность (Вт);

P_t - мощность передатчика (Вт);

R - максимальное расстояние обнаружения атмосферных образований (м);

G - коэффициент усиления антенны;

θ_Γ, θ_B - ширина диаграммы направленности по точкам половинной мощности (по уровню 3 дБ) в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях (рад);

k_3 - коэффициент заполнения объёма импульса атмосферными частицами;

k - множитель ослабления или ослабление радиоволн в газах, облаках и осадках при их распространении на пути $2R$ («туда и обратно»).

Если объединить все технические параметры МРЛ, то мощность принимаемого сигнала, приходящего с расстояния R , соответствующего заднему фронту зондирующего импульса, будет:

$$\bar{P}_r = \frac{Ck_3 e^{-2 \int_0^R \alpha(R) dR}}{R^2 2\alpha} \eta [1 - \exp(-ac\tau_{\text{и}})] \quad (6)$$

где α - коэффициент ослабления радиоволн;

c - скорость света;

$\tau_{\text{и}}$ - длительность зондирующего импульса передатчика.

$$C = \frac{0,56 P_t G^2 \theta_r \theta_v}{(4\pi)^2} \quad (7)$$

Ослабление радиоволн определяется атмосферными газами (кислород, водяной пар) и частицами облаков и осадков.

4. Активный метеорологический мониторинг

Как уже отмечалось, радиолокационная отражаемость облаков и осадков связана с водностью облаков и интенсивностью осадков. Данные зависимости представляются следующими выражениями

$$I = \frac{\pi \rho}{6} \int_0^{\infty} N(d) d^3 V(d) dd, \quad (8)$$

$$w_{\text{об}} = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} N(d) d^3 dd, \quad (9)$$

где ρ - плотность воды (льда);

$V(d)$ - закон распределения скоростей падения капель (определяемый их размерами).

Взаимосвязь Z с I и $w_{\text{об}}$ выявляется по соотношениям (4):

$$Z = BI^{\beta_1}, \quad Z = Aw_{\text{об}}^{\beta_2}.$$

Многочисленные экспериментальные данные результатов одновременных измерений интенсивности дождей и спектров дождевых капель, водности облачных структур, позволили однозначно установить, что между средними значениями коэффициентов A , B , β_1 и β_2 нет взаимной связи, и даже внутри отдельных периодов роста или распада облака, периодов выпадения осадков, они могут изменяться в широких пределах.

В настоящее время накоплено большое количество данных о значениях параметров в различных районах земного шара [22, 24, 28 и др.]. Так в [22] рекомендуется для всех случаев выпадения осадков использовать соотношение

$$Z = 275I^{1,4}, \quad (10)$$

а в [24, 28] приводятся зависимости для умеренных широт, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными данными:

- для дождя

$$Z = 200I^{1,6}; \quad (11)$$

- для снега

$$Z = 2000I^2; \quad (12)$$

- для облаков с $d \leq 29$ мкм и $w = 1,3$ г/м³

$$Z = 0,048w_{об}^2. \quad (13)$$

Сложность выявления изменчивости параметров соотношений (4) может быть объяснена тем, что параметры функции распределения частиц по размерам зависят также от микроструктуры облаков, расположенных ниже нулевой изотермы; от свойств подоблачного пространства; от расстояний, которые проходят частицы в облаке и под облаком.

Результаты анализа принятых отражённых сигналов обычно представляются на экране монитора, в качестве которого используется индикатор кругового обзора (ИКО), выполняемый в виде специального индикаторного блока или моделируемый на экране монитора ЭВМ. В первом случае даётся круговая развёртка с километровыми метками, во втором – моделируется карта местности.

В качестве примера на рис. 1 приведён вид индикаторного блока самолётной метеонавигационной радиолокационной станции (МНРЛС) «Контур». На экране отображается метеообстановка в полярных координатах «азимут-дальность» относительно оси полёта самолёта. Используется следующая цветовая кодировка:

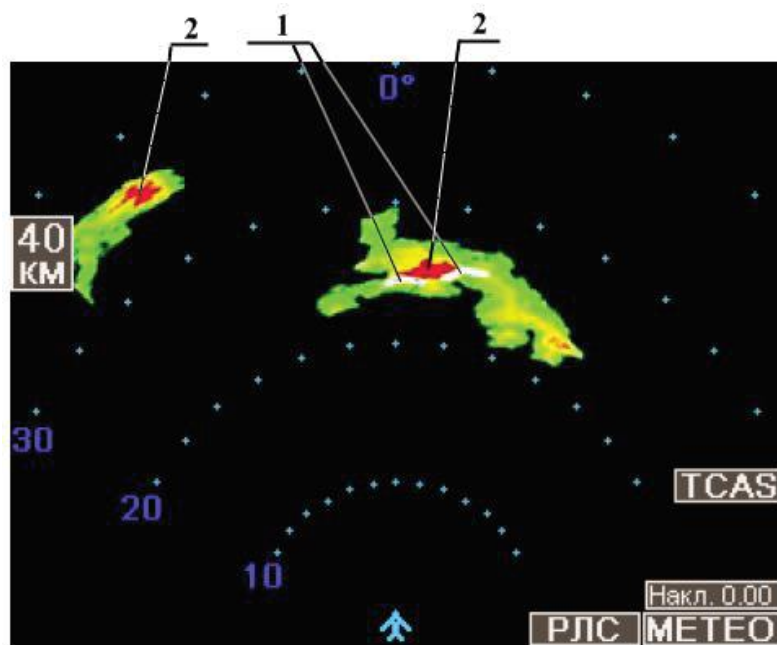
- зелёный - слабый дождь с интенсивностью 1-4 мм/час;
- жёлтый - осадки с интенсивностью 4-12 мм/час, возможно наличие гроз;
- красный - осадки с интенсивностью 12-50 мм/час, грозы;
- пурпурный - осадки с интенсивностью более 50 мм/час, грозы;
- белый – сильная турбулентность атмосферы.



**1 – индикация режима максимальной дальности;
2 – изображение гидрометеообъекта;
3 – радиальные метки дальности;
4-9 – технические метки и рабочие клавиши блока.**
Рис.1. Блок индикатора МНРЛС «Контур»

На рис. 2 показан экран ИКО МНРЛС «Контур» и выявленные метеообразования в виде двух зон осадков: одна расположена в зоне дальности от 21 до 29,5 км в секторе

азимутальных углов (примерно) от 345 до 40 градусов (отсчёт азимута осуществляется по часовой стрелке от направления, принятого за нулевое); другая - в зоне дальности от 32 до 37,5 км в секторе азимутальных углов (примерно) от 315 до 335 градусов. Хорошо просматривается изменение интенсивности дождя внутри каждой из зон осадков и две зоны с повышенной турбулентностью атмосферы, причём одна из них расположена прямо по курсу самолёта.



1 – зоны опасной турбулентности;
 2 – зоны ливневых осадков и гроз.
 Рис. 2. Экран ИКО МНРЛС «Контур»

Моделирование карты местности и выявленных метеобъектов осуществляется при использовании в качестве системы отображения информации монитора спецвычислителя. В качестве примера на рис. 3 представлена радиолокационная карта облаков и связанных с ними явлений, полученная с помощью автоматизированного метеорологического радиолокационного комплекса (АМРК) «Метеоячейка-С2», основанного на МРЛ-5 [31].

Правая часть рисунка представляет собой модель карты местности с центром в точке установки локатора (пос. Воейково, Ленинградская область) – т.н. «окно явлений», на которой показаны контуры С. Петербурга, Финского залива и Онежского озера. Выявленные метеообразования обозначены с использованием цветной кодировки, расшифровка которой показана в окне «параметров отображения» (слева вверху). Зоны повышенного осадкообразования и, возможно, гроз, наблюдаются в пределах 60 км на юго-юго-запад, а также в пределах 180 км на запад-юго-запад. Последний объект выбран для более детального изучения и представлен в соответствующем окне в верхней части рисунка. Вертикальный профиль радиолокационной отражаемости в сечении выбранного облака отображён в окне «вертикальных параметров», в котором, также, показаны некоторые параметры и выявленные критерии: уровень нулевой изотермы ($t=0^{\circ}\text{C}$), граница области формирования града и др. Радиальные пунктирные линии – метки дальности (в данном случае – 100, 200 и 300 км). Выделенные пунктирными линиями ячейки имеют размер 60x60 км.

В результате радиолокационного зондирования атмосферы может быть получена информация о пространственно-временном распределении параметров, таких, как высота радиоэха, водозапас и водность облаков и осадков.

В качестве примера на рис. 4 представлены результаты контроля суточного хода высоты радиоэха конвективных ячеек без осадков, с ливнем, грозой и градом на территории Пермского края (17.06.2006). Количество зафиксированных конвективных ячеек составляло: 3289 случаев без осадков, 1206 – для ячеек с ливнем, 1088 – с грозой, 36 – с градом [18].

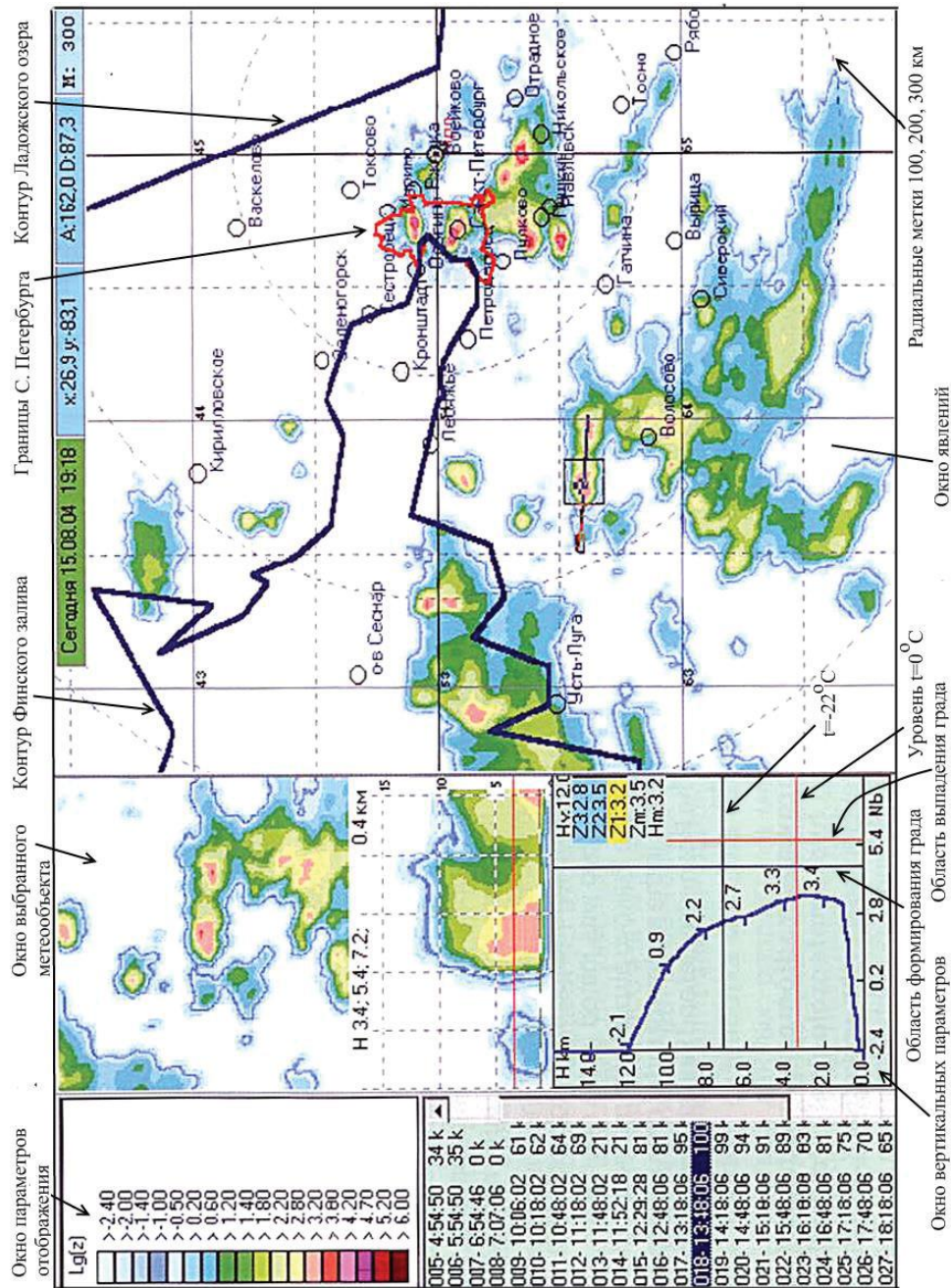
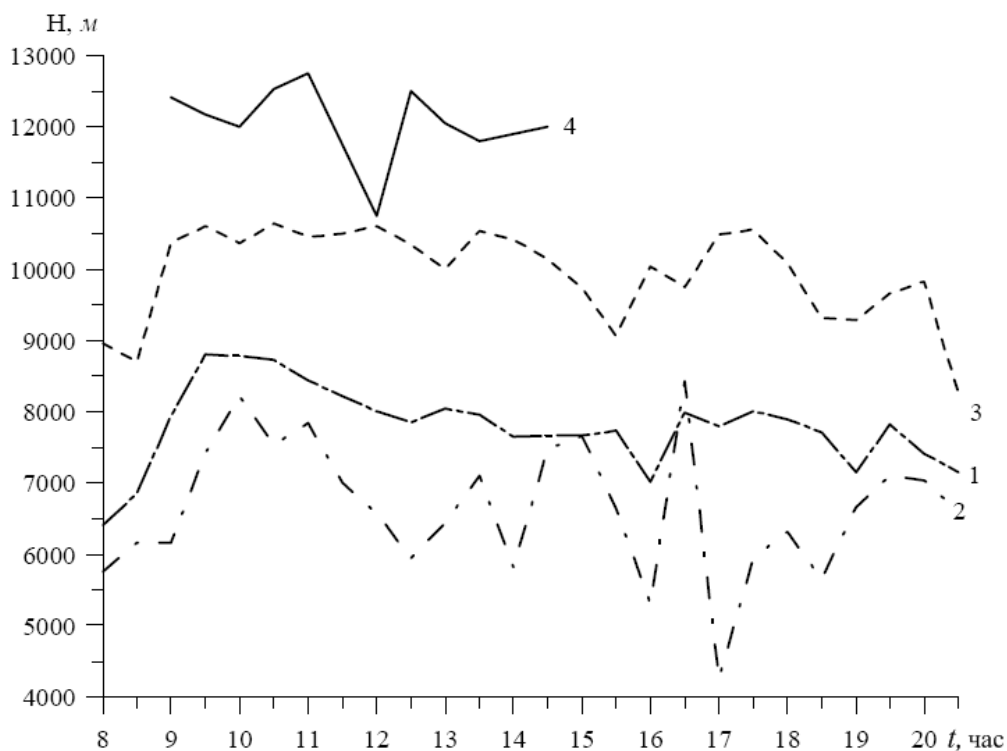


Рис. 3. Радиолокационная карта облаков и явлений

Из представленных данных видно, что конвективные ячейки с ливнями практически на протяжении всего периода исследования имели меньшую высоту радиоэха, чем ячейки с конвективной облачностью без осадков. Поскольку известна зависимость высоты радиоэха конвективной ячейки от стадии развития кучево-дождевой облачности, то можно отметить периоды развития и распада облака как чередование максимумов и минимумов на графике хода высоты радиоэха. При этом следует отметить, что представленные кривые передают средние характеристики отражаемости, т.е. лишь общую тенденцию эволюции конвективной облачности.



**Рис. 4. Суточный ход высоты радиоэха конвективных ячеек:
1- без осадков, 2- с ливнями, 3- с грозой, 4- с градом**

Характер изменения водозапаса рассматриваемых конвективных ячеек представлен на рис. 5.

Среднее значение водозапаса для конвективных ячеек без осадков составляет 0,23, с ливнями – 0,48, с грозами – 2,86 и с градом – 16,3 кг/м². При этом можно отметить, что суточный ход водозапаса в конвективных облаках без осадков равномерный, без резких изменений. В конвективных ячейках с ливнями отмечается несколько локальных максимумов и минимумов, само значение водозапаса изменяется в более широких пределах - от 0,13 до 0,78 кг/м². Ход водозапаса в грозо- и градоопасных кучево-дождевых облаках очень неравномерен, и в зависимости от стадии развития облака изменяется от 1,64 до 5,01 кг/м² в ячейках с грозой и от 3,86 до 21,14 кг/м² в ячейках с градом.

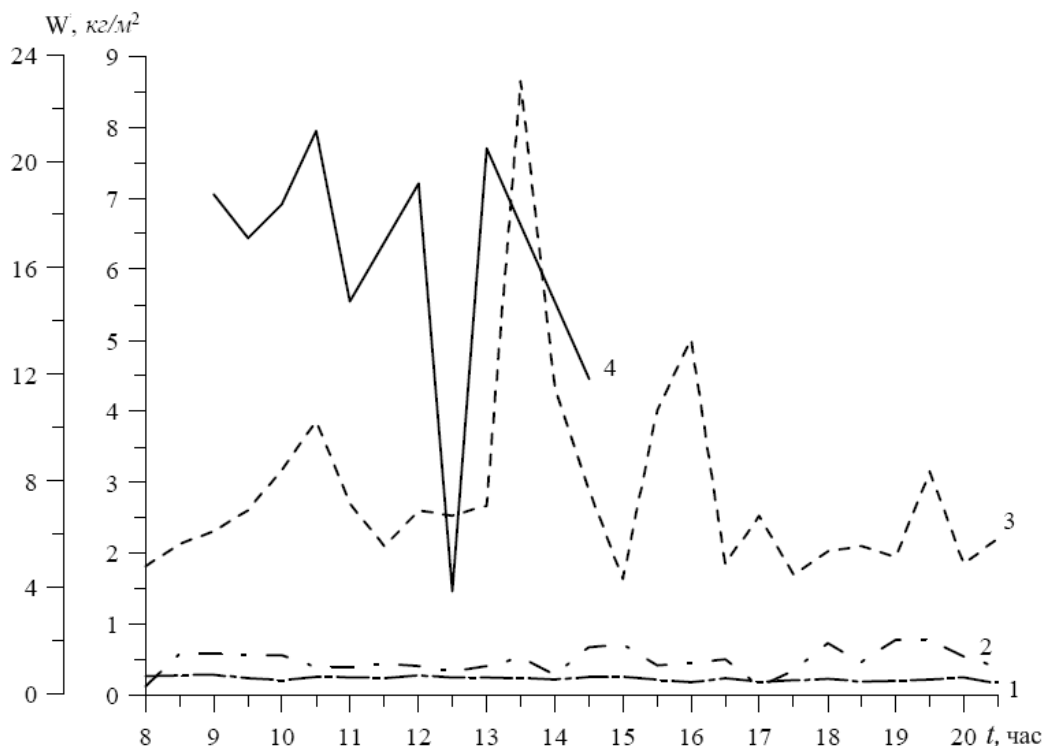


Рис. 5. Суточный ход осреднённых значений водозапаса конвективных ячеек: 1- без осадков, 2 - с ливнями, 3 - с грозой, 4 - с градом (шкала 0...24 кг/м²)

5. Прикладные задачи активного метеорологического мониторинга

Активные радиометеорологические средства применяются для решения большого круга задач, связанных с обеспечением безопасности в чрезвычайных обстоятельствах: получения количественной информации о жидких и твёрдых осадках, исследования облаков, изучения атмосферной турбулентности, гроз, шквалов, ветра, оценки эффективности активных воздействий на облачные образования, обеспечения безопасности полётов самолётов и т.п. [2, 7, 5, 6, 12, 16, 20, 23, 24, 28, и др.]

Рассмотрим возможности применения МРЛ для решения некоторых из перечисленных задач.

5.1. Применение активной метеорадиолокации для выявления осадко- и грозоопасных явлений

Для распознавания опасных метеорологических явлений (ОЯ) выделяют однозначные и комплексные критерии [6]. К однозначным критериям относится величина отражаемости в S_b с явлением на высоте изотерм 0 и -22°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 определённой 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 **Сб**. Так, возникновение гроз и града происходит после превышения радиоэхом **Сб** уровня изотермы -22°C . Интенсивность явления зависит от мощности переохлаждённой части облака ($\Delta H = H_{\max} - H_{-22^{\circ}\text{C}}$).

Считается, что развитие облаков по вертикали происходит до уровня тропопаузы (переходный слой - поверхность разрыва - между тропосферой и стратосферой), 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 [6]. Критерий грозоопасности Y определяется следующим образом:

$$Y = H * \lg Z_3. \quad (14)$$

При резкой смене погоды рекомендуется проводить ежедневную корректировку критерия грозоопасности по высоте изотермы -22°C ($Y_{\text{кр}}$) [26]:

$$Y_{\text{кр}} = H_{-22^{\circ}\text{C}} * \lg Z_{\min}, \quad (15)$$

где $\lg Z_{\min}$ – минимальное значение $\lg Z_3$ в грозах.

При $Y < Y_{\text{кр}}$ – фиксируется ливень.

В зависимости от физико-географических широт диапазон значений критерия $9 < Y \leq 25$ может явиться основанием для выдачи управляющих команд на эвакуацию людей из зоны грозы или на организацию активных воздействий на грозоопасное облако. В случае $Y > 25$ обеспечивается 90%-я достоверность распознавания грозовых ливней и необходимость выдачи соответствующих управляющих команд становится актуальной.

Выявить границу между грозами и ливнями можно также на основе построения дискриминантной функции u (H_{\max} , $\lg Z_3$, $H_{-22^{\circ}\text{C}}$)

$$u = 0,0548 H_{\max} + 0,325 \lg Z_3 + 0,08 H_{-22^{\circ}\text{C}} - 1,23. \quad (16)$$

Объединённые в функцию три радиолокационные характеристики - H_{\max} , $\lg Z_3$ и $H_{-22^{\circ}\text{C}}$ – являются наиболее информативными предикторами. Пример разделения ливней и гроз с помощью дискриминантной функции для территории центральной и южной части Пермского края приведён на рис. 6. При $u > 0$ фиксируются грозы, при $u < 0$ — ливни.

Шквалистых усиления 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 [5].

Вероятность распознавания конвективных явлений с использованием дискриминантной функции (16) - до 96% [16].

В некоторых случаях к перечисленным параметрам добавляют ещё и значение водности облаков и осадков, которая с учётом микрофизических процессов коагуляции и конденсации может быть выражена соотношением [10, 31]

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dH} = & -\frac{9}{4}kw + \frac{8}{9} \frac{1}{V} \left(\frac{dw}{dt} \right)_{\text{коаг}} + \frac{8}{9} \frac{1}{V} \left(\frac{dw}{dt} \right)_{\text{конд}} = \\ = & -0,444 \cdot 10^{-4} w - 0,16 \cdot 10^{-4} E_{w_{\text{кан}}} N_0^{1/4} w^{3/4} - \\ & - 4,45 \cdot 10^{-3} N_0^{0,475} w^{0,525} \frac{\sigma_{\text{неп}}}{f_8(T, P)} \exp\left(-\frac{kH}{2}\right) \end{aligned} \quad (17)$$

где - w — абсолютная водность осадков, выраженная в единицах массы [21];

t — время;
 V - средневзвешенная по объемам скорость падения частиц;
 $\sigma_{пер}$ - относительное пересыщение;
 H — высота;
 N_o - эмпирический множитель;
 E — коэффициент коагуляции;
 $w_{кап}$ — абсолютная водность облачных капель;
 k — множитель, характеризующий влияние изменения плотности воздуха с высотой на скорость падения частиц.

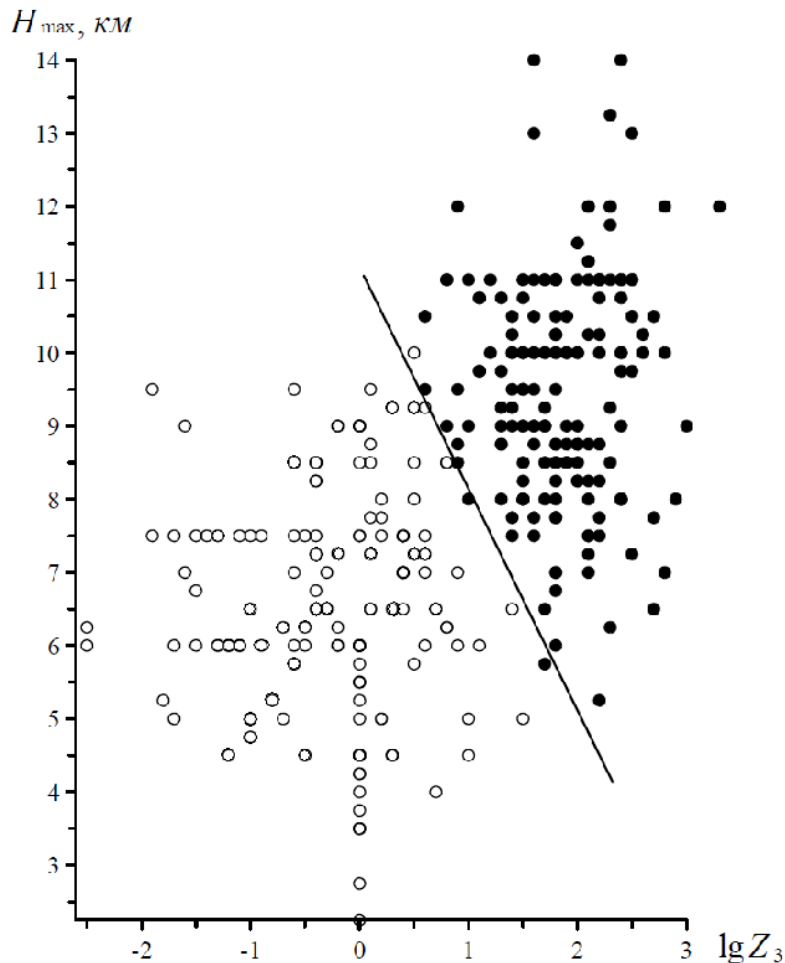


Рис. 6. - Распределение ливней и гроз по дискриминантной функции.
 ○ — ливень; ● — гроза

Множитель k считается величиной постоянной и принимается $k=10^{-4} \text{ м}^{-1}$, N_o изменяется мало, поэтому в соответствии с эмпирическими данными можно принять $N_o = 8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-4}$.

В выражении (17) $f_6(T, P)$ представляет собой функцию температуры и давления, входящую в уравнение конденсационного роста частицы.

Физический смысл слагаемых в правой части (17) заключается в следующем. Слагаемое, пропорциональное w , описывает влияние сжимаемости атмосферы на водность

осадков; слагаемые, пропорциональные $w^{3/4}$ и $w^{0,525}$, описывают, соответственно, влияние коагуляции и конденсации (испарения).

Граничным условием для уравнения (17) служит значение водности w при $H=0$. Это значение определяется по известной интенсивности осадков I (мм/ч) у поверхности земли из соотношения [21]

$$I_0 = 3,6wV. \quad (18)$$

В уравнение (17) входит ряд параметров, одни из которых являются константами, а другие зависят от высоты. Одним из наиболее важных параметров является водность облачных капель $w_{кан}$ которая определяет скорость коагуляционного роста частиц осадков. Значение $w_{кан}$ в облаках может быть получено с учётом средних вертикальных профилей температуры при наличии обложных осадков для разных сезонов года и местностей. Комбинация этих зависимостей позволяет определить $w_{кан}$ как функцию высоты. Ниже основания облака водность облачных капель полагалась равной нулю.

Примеры полученных в результате расчётов вертикальных профилей характеристик осадков приведены на рис. 7. На рисунке выделяются три слоя атмосферы, в которых эволюция осадков происходит по-разному: слой испарения осадков под основанием облака, слой относительно медленного роста жидких осадков и слой более быстрого роста осадков в форме снега. Учёт спектра частиц осадков позволяет по непосредственно рассчитываемой величине w вычислить другие параметры, характеризующие осадки.

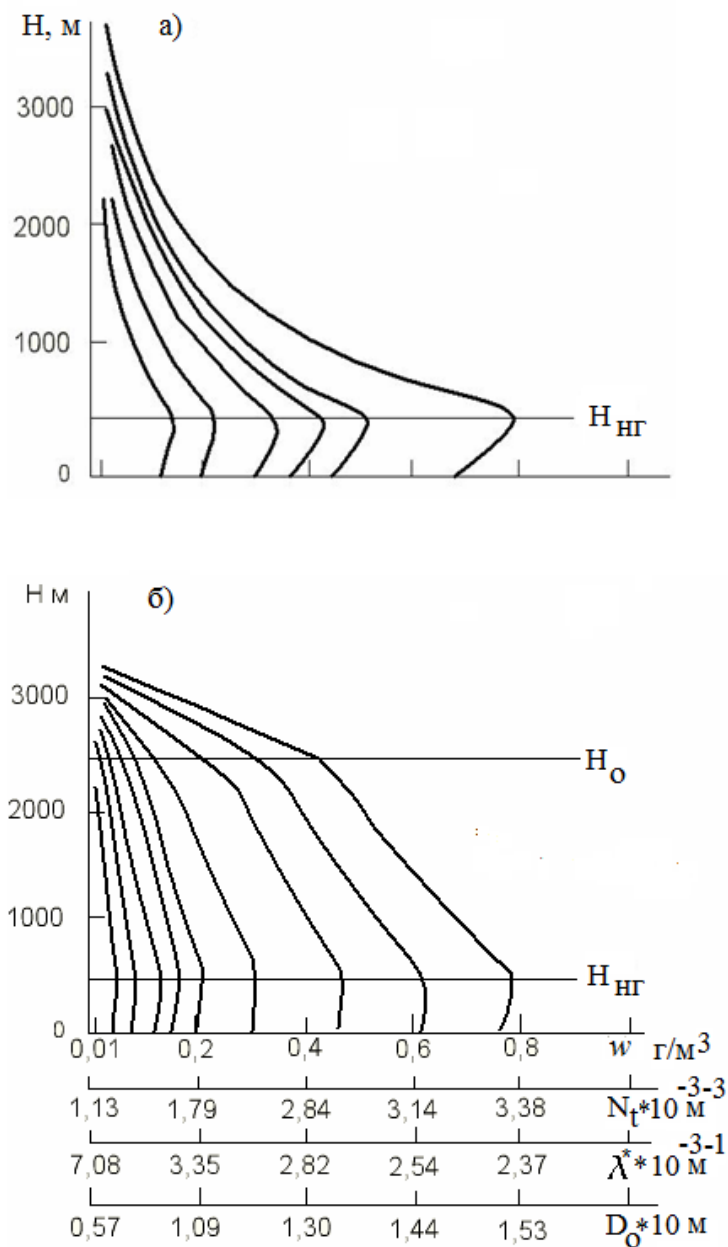
Таким образом, располагая сведениями о пространственно-временной структуре полей осадков у поверхности Земли и состоянии атмосферы, можно восстановить вертикальную структуру этих полей на исследуемой территории и, соответственно, решить задачу получения априорной информации о состоянии облачной атмосферы.

Ещё одним надёжным критерием выделения районов с ОЯ может быть вертикально проинтегрированная водность (w^*), определяемая через отражаемость и высоту радиоэха облачности и позволяющая оценить массу воды на единицу площади по всей вертикальной протяжённости **Сб**. Поскольку отражаемость зависит от размера облачных частиц, а они различны для ливней, грозовых облаков и града, то полученные значения w^* позволяют судить о виде явления.

На рис. 8 приведены распределения уточнённых радиолокационных критериев (H_{max} , средней отражаемости в конвективном облаке на высоте 3-6 км \bar{Z}_{max} , $\lg Z_3$, Y и w^*) за 26.07.2000. в радиусе 100 км от МРЛ (установленной в точке в с координатами $x = 100$; $y = 100$) на территории Пермского края. На рис. 8а, приведена карта метеоявлений, обнаруженных радиолокатором и распознанных в соответствии с радиолокационными критериями АМРК «Метеоячейка». Из рис. 8б, 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 , w^* (рис. 8в – е), поскольку эти критерии позволяют с наименьшей погрешностью выделять явления.

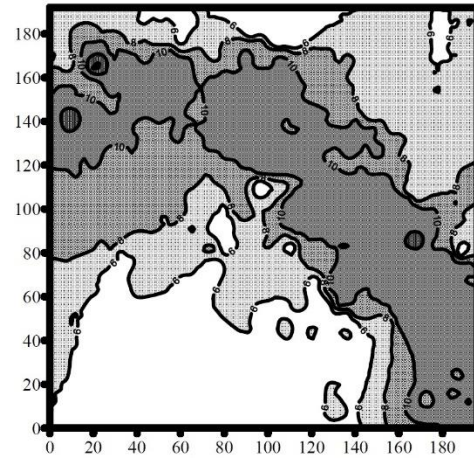
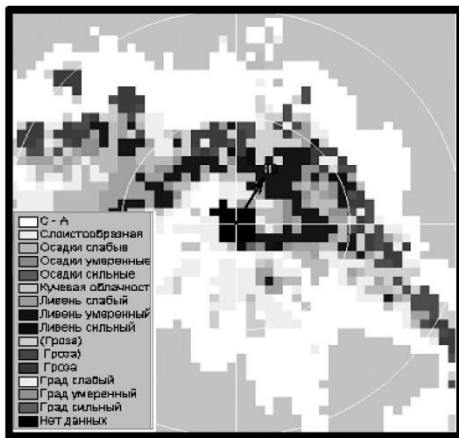
В силу того, что максимальная отражаемость в ливнях отмечается вблизи изотермы 0°C и часто наблюдается вблизи поверхности земли, что связано с выпадением осадков, критерий \bar{Z}_{max} не даёт возможности безошибочно распознать ливень. Согласно результатам анализа, ливни наиболее хорошо определяются по критериям H_{max} и w^* (рис.

8б,е). Таким образом, для диагноза опасных явлений погоды наиболее продуктивно использовать весь комплекс приведённых радиолокационных характеристик [17].



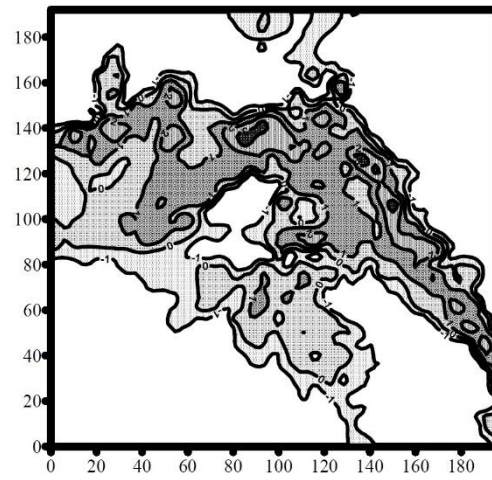
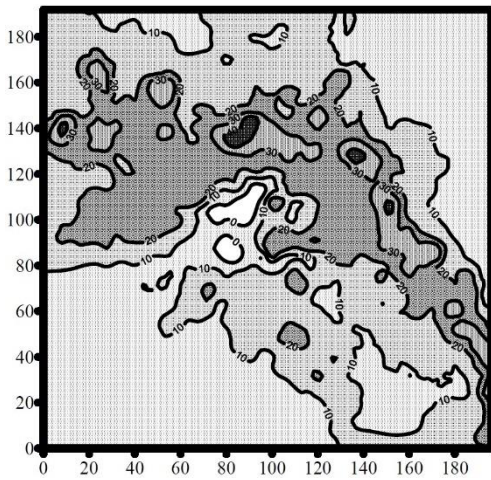
w^* – водность, N_t — общая концентрация частиц осадков, λ^* — множитель в показателе экспоненты формулы Маршалла — Пальмера,
 D_0 — диаметр частицы медианного объёма.
a — январь, Арктика; *б* — июль, умеренные широты.

Рис. 7. Вертикальные профили характеристик обложных осадков



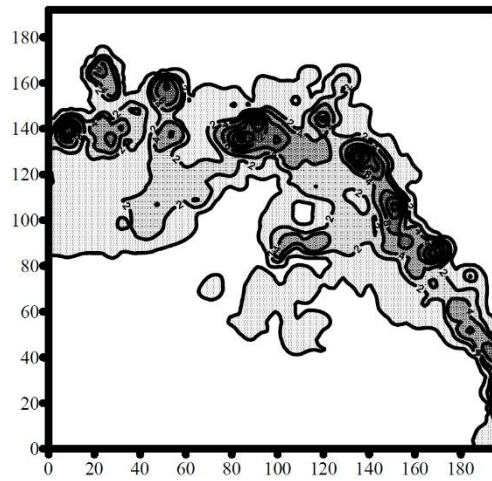
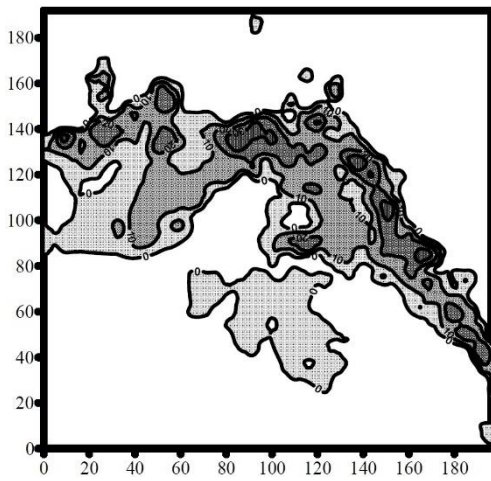
а

б



в

г



д

е

Рис. 8. Радиолокационные характеристики облачности и опасных явлений погоды в радиусе 100 км от МРЛ за 26.07.2000 г. (7ч47м МСК): а) карта метеоявлений МРЛ; б) высота радиозаха облачности H_{max} ; в) отражаемость \bar{Z}_{max} ; г) lgZ_3 ; д) критерий грозоопасности Y ; е) вертикально проинтегрированная водность w^*

По дискриминантной функции, аналогичной (16), может определяться и вероятность возникновения шквала [12]

$$u_{ш} = 0,2 \lg Z_3 + 1,1(H_B - H_{тр}) - 0,08T_B - 4,7, \quad (19)$$

где T_B – температура на верхней границе кучево-дождевого облака;

H_B – высота верхней границы кучево-дождевого облака;

$H_{тр}$ – высота нижней границы тропосферы.

Шквал более 20 м/с отмечается, если при $u_{ш} > 0$ в сроки, близкие к моменту развития кучево-дождевой облачности имеется одно из двух синоптических условий

$$\Delta p = (-5 \text{ [гПа]/3 [ч]})/500 \text{ [км]} \quad \text{или} \quad \Delta T \geq 10^\circ (1^\circ/500 \text{ [км]}), \quad (20)$$

где $\Delta p = [(\Delta p_2 - \Delta p_1)]/3 / 500 \text{ [(гПа/ч)/км]}$;

$\Delta T = (T_2 - T_1)/500$.

Индексы «1» и «2» относятся, соответственно, к холодной и тёплой воздушным массам.

5.2. Восстановление профиля облачности

Одной из проблем применения практической радиометеорологии является различие в информации об облачности, полученной на метеостанциях и с помощью МРЛ. В первом случае это количество облаков, характеризующее степень покрытия облачностью небосвода, во втором – радиозо облаков (его отражаемость и конфигурация). Устранение указанного различия возможно посредством сопоставления стационарных и радиолокационных данных с разбивкой на ячейки (квадраты) по M -балльной шкале как доля площади квадрата, занятая облачностью. Размеры квадрата определяются исходя из преобладающей высоты нижней границы облачности и угла обзора облачности наблюдателем, т.е. условиями местности. 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. Такой анализ может строиться на основе соотношения

$$J(M) = \iint_G \left[a(M - M_1)^2 + b \left(\left(\frac{\partial M}{\partial x} - \frac{\partial M_0}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y} - \frac{\partial M_0}{\partial y} \right)^2 \right) \right] dx dy \rightarrow \min \quad (21)$$

где M – искомое поле облачности;

G – область анализа;

a и b – постоянные весовые коэффициенты;

M_0 – поля нулевого приближения, сформированные посредством перевода радиолокационного изображения в балл облачности;

M_1 – поля первого приближения, полученные путём корректировки стационарных данных методом весовых коэффициентов.

Пример решение функционала, позволившего получить матрицу значений балла облачности (по 10-балльной шкале) в узлах сетки 25*25 км на территории Пермского края приведён в [17]. При незначительной облачности, когда радиолокационный метод даёт большую погрешность, точность полей численного анализа близка к точности полей

станционных данных. При сложных метеоусловиях абсолютная ошибка анализа облачности составляет не более 1,3 балла.

Поля распределения облачности, построенные по результатам проведённого анализа, представлены на рис. 9. 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 по данным МРЛ приведена на рис. 8а). Контрольное поле анализа, построенное по станционным данным, показано на рис. 9а, поля распределения облачности, используемые для построения анализа представлены на рис. 9б, в, а на рис. 9г, показано окончательное поле, построенное на основе вариационного согласования полей радиолокационных и станционных наблюдений.

Очевидно, что радиолокационные данные дополняют картину распределения облачности, полученную по станционным наблюдениям, и дают информацию об облачности по территории, относительно которой нет данных метеостанций.

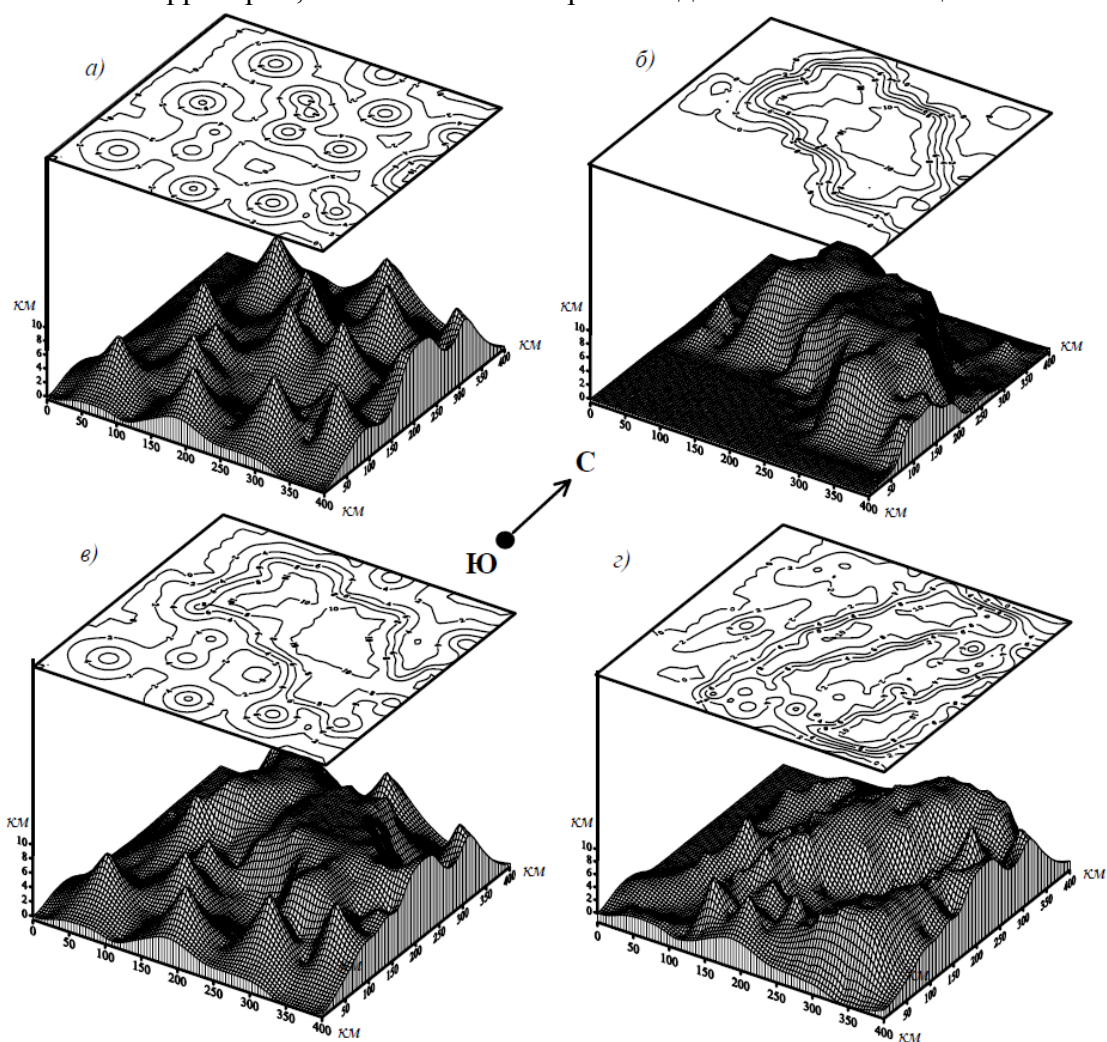


Рис. 9. Поля распределения количества облачности, используемые при проведении анализа, за 26.07.2000. (время 7ч47м):

- а)** контрольное поле анализа, построенное по станционным данным;
- б)** поле анализа, построенное по данным радиолокационных наблюдений (M_0); **в)** поле анализа, используемое в качестве поля первого приближения (M_1); **г)** окончательное поле анализа (M)

5.3. Применение активной радиолокации при выявлении и организации защиты от процессов в переохлаждённых зонах облаков

Ещё одним фактором опасности климатического (метеорологического) характера являются переохлаждённые зоны облаков. Наличие зон переохлаждённой воды в атмосфере приводит к усилению процесса градообразования или представляет собой угрозу для авиации, поскольку стимулирует обледенение самолётов.

Распознавание градовых облаков основано на распознавании образов по измеренным метеорологическим параметрам: водность, вертикальная протяженность, расположение области повышенной водности на уровнях выше нулевой изотермы. Наличие условий градообразования по результатам измерения комплекса параметров характеризуется дискриминантной функцией, которая может иметь различные формы записи.

Одна из простейших методик, требующих минимального применения РЛС, выражается в виде следующей формы [27]

$$F_{zp} = 0,52H_g - 0,12T_g - 4,73, \quad (22)$$

где H_g - высота верхней границы радиоэхо;

T_g - температура верхней границы радиоэхо.

При $F_{zp} \geq 0$ следует ожидать град.

Ещё одна форма дискриминантной функции имеет вид [2]

$$F_{zp} = 0,9638H_g + 0,4080H_m + 0,5071\Delta H_o + 1,2226Z_{10}, \quad (23)$$

где H_m - высота точки максимального радиоэхо;

ΔH_o - протяжённость зоны заданной отражаемости над уровнем нулевой изотермы;

Z_{10} - модуль отражаемости на длине волны $\lambda=10$ см.

При значении $F_{zp} > 14,0$ выпадение града происходит с вероятностью ложной тревоги 4,3 %.

Размер града в облаке определяют по формуле

$$R_{gp} = \frac{\varphi(H_g \lg Z_{max})^2 10^4}{\gamma^2}, \quad (24)$$

где $\varphi = 0,25 * 10^{-1} \text{ см}^{-1}$,

$\gamma = 2,6 * 10^3$.

Радиолокационные средства для контроля зон возможного градообразования активно применяются на территории Северного Кавказа. В данном регионе происходит треть всех чрезвычайных ситуаций природного характера в стране. Поскольку основная часть территории региона расположена в зоне рискованного земледелия, грозоградные процессы считаются особо опасными и сельское хозяйство несёт большие потери от их воздействия. Применение специальных средств воздействия (противоградных ракет «Алазань» с кристаллизующим реагентом на основе AgI) требует использования контрольных средств для выявления потенциально опасных зон и контроля их в процессе воздействия. В качестве таких средств используются метеорадиолокаторы МРЛ-5 с длинами волн $\lambda=3,2$ и 10 см, сопряжённые с автоматизированной радиолокационной системой «МЕРКОМ» [26].

В качестве примера зарегистрированного грозоградного процесса и его изменения в результате воздействия рассмотрим прохождение холодного северо-западного фронта

24.06.2007. Скорость движения фронта 30 км/час, максимальный прогрев воздуха у поверхности земли 32-34 °С. Высота нулевой изотермы $H_0=4000$ м, изотермы -6 °С $H_{-6^{\circ}\text{C}}=5000$ м. Основные параметры **Сб** облачности по результатам радиозондирования характерны для многоячейкового неупорядоченного градового процесса.

Результаты радиолокационных наблюдений представлены на рис. 10 [3]. Наблюдение за развитием кучево-дождевых облаков началось после 18 часов. В 18ч40м наблюдалась фронтальная полоса грозových ячеек, ориентированная с СВ на ЮЗ. Характеристики наиболее интенсивной ячейки: высота верхней границы - 12,5км (H_{Z15}); высота верхней границы объёма с $Z_{10} = 35$ dBZ (H_{Z35}) - 11,0 км высота максимума радиоэхо (H_{Zm} - 7,0 км; максимальная отражаемость ОВ на длине волны 10 см составляла - 59 dBZ . Отмечалось выпадение мелкого града (рис.10а). На облако с 18ч31м до 18ч51м проводилось воздействие. В 19ч40м в облачном поле нескольких грозových ячеек развилось градовое облако с новой грозовой ячейкой (рис. 10б). В 19ч51м происходит слияние (объединение радиоэха) исследуемых облаков, которое приводит к формированию мощного облака, на которое в 19ч52м начато воздействие. В это время севернее от исследуемого облака формируется новая ячейка. Облако продолжает развиваться и смещается на ВЮВ. Радиолокационные характеристики облака в 20ч02м достигли следующих значений: высота верхней границы радиоэха H_{Z15} - 12 км; высота области повышенной водности (лёдности) H_{Z35} - 10,6 км; максимальная радиолокационная отражаемость Z_{max} – 58 dBZ. Из облака начал выпадать град размером до 1 см. Выпадение града сопровождалось ураганным ветром.

К 20 часам образовался навес радиоэха глубиной 6 км, ориентированный на ЮВ (рис. 10в). В 20ч12м: H_{Z15} - 12,8 км; H_{Z35} - 11,2 км; Z_{max} – 61 dBZ (рис. 10г). А к 20ч26м выпал ранее образовавшийся мелкий град, облако начало разрушаться, исчез навес радиоэха, происходило деление облачной массы на ячейки (рис. 10д). Завершение процесса активного воздействия и выход облачной структуры из стационарного состояния показан на рис. 10е.

Таким образом, применение метеородиолокатора позволяет решить проблему обеспечения безопасности в зоне активного градообразования или, по крайней мере, существенно снизить вероятность нанесения ущерба здоровью людей, материальным объектам, сельскохозяйственным посадкам.

Существенную угрозу безопасности полётов может представлять обледенение самолёта. По статистике международной организации гражданской авиации (ИКАО), из-за обледенения ежегодно происходит около 7% всех авиационных катастроф, связанных с метеорологическими условиями. Обычно они происходят при полёте в облаках, мокром снеге, переохлаждённом дожде, тумане и мороси, а также в условиях повышенной влажности воздуха, как при отрицательных, так и при небольших положительных температурах наружного воздуха.

В случае использования метеорологической РЛС для обнаружения опасной зоны осуществляется критерийная обработка на основе соотношения [1, 4]

$$F = -0,0017 H_n - 0,488 T_n + 0,875, \quad (25)$$

где H_n - высота нижней границы облака;

T_n - температура нижней зоны облаков.

Координата H_n измеряется РЛС, параметр T_n – с помощью регулярно запускаемых зондов или на основе статистических данных. При $F \geq 0$ принимается решение о средней

или высокой степени возможности обледенения планера, при $F < 0$ – о низкой степени возможности обледенения.

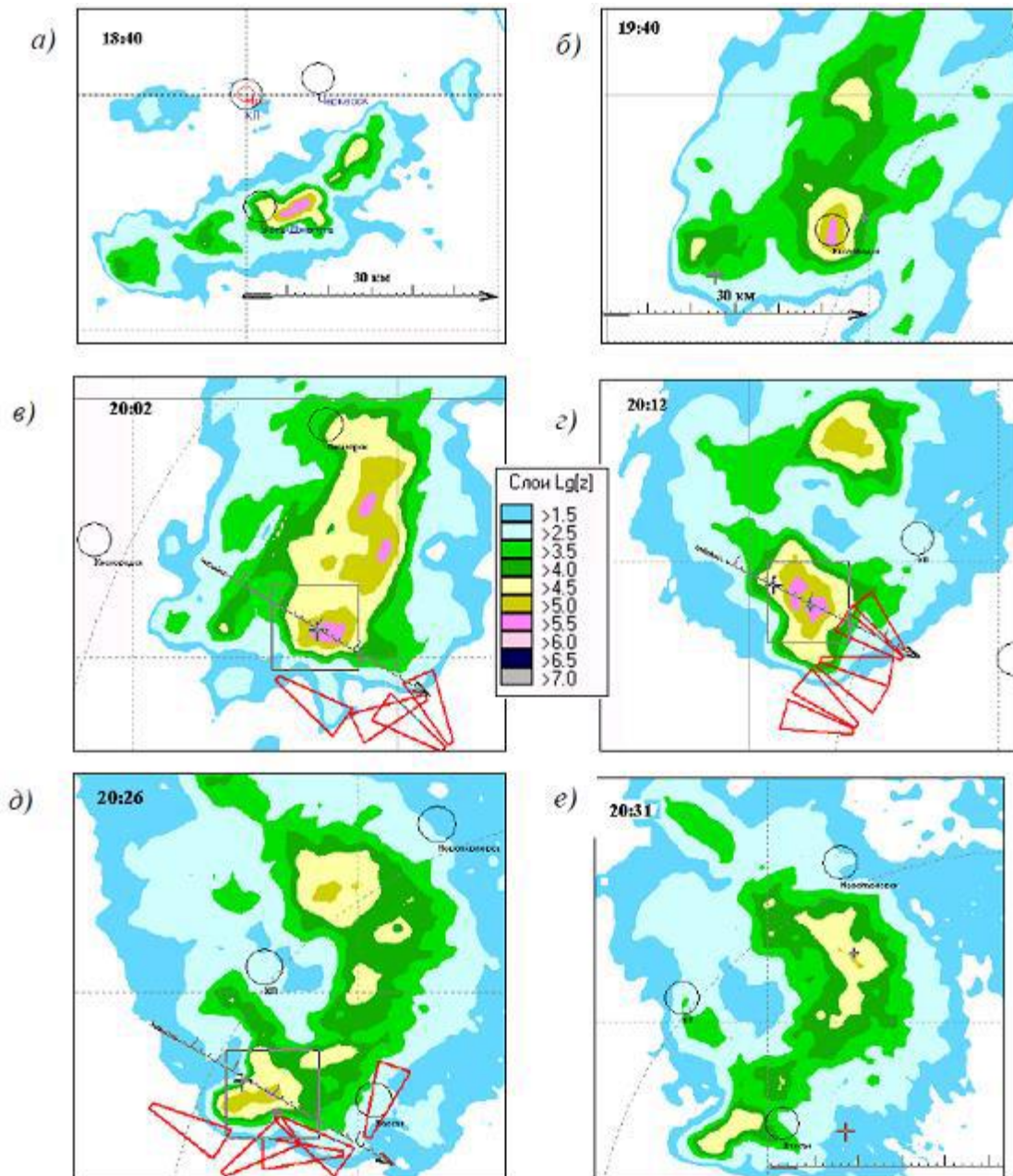


Рис.4.5. Проекция максимальных значений отражаемости облака (дБZ) на подстилающую поверхность. Горизонтальное сечение выполнено на высоте 7км.

Другой критерий опирается на водность облака w и температуру в слое обледенения T и строится на основе использования двух дискриминантных функций

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= -1,420w + 0,007T + 0,219, \\ F_2 &= -2,295w + 0,015T + 0,454. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

При $F_1 < 0$ прогнозируемое обледенение слабое, при $F_2 > 0$ – сильное, а в промежутке – умеренное.

Температура определяется аналогично (25). Определение величины водности может осуществляться через значение радиолокационной отражаемости Z по формуле (4)

$$Z = Aw_{06}^{\beta_2}.$$

Заключение

История зарождения и развития радиометеорологических систем насчитывает всего несколько десятков лет. Однако за этот период получила развитие теория их функционирования и применения, осуществлена практическая реализация построения систем с получением реальных экспериментальных данных.

Разработаны физические основы зондирования атмосферы, позволяющие активно использовать радиометеорологические системы в структуре мониторинга среды обитания, в системах управления метеозависимыми процессами, в процедурах воздействия на потенциально опасные метеоявления. В первую очередь среди таких явлений следует отметить зоны с переохлаждённой жидкокапельной влагой в облаках выше нулевой изотермы, потенциально опасные с точки зрения градообразования и обледенения летательных аппаратов, выявления зон повышенной гроопасности, а также предупреждения о ливневых осадках и шквалах.

Непрерывный мониторинг пространственно-временного изменения водозапаса облаков позволяет обеспечить прогнозирование опасных явлений погоды, принять заблаговременное управляющее решение.

Ведущиеся в настоящее время работы по развитию радиометеорологических систем, совершенствованию методик измерений, позволят повысить эффективность научных исследований в данной области знаний и, как следствие, качество прогнозирования опасных метеорологических явлений.

Более подробно вопросы становления, развития и практического применения метеорологической радиолокации рассмотрены в [28, 29, 31, 35 и др.]

Литература

1. Абрамович К.Г., Васильева Г.В., Прохорова В.М. О прогнозе количественных характеристик обледенения самолетов: Труды Гидрометеоцентра СССР, вып. 176. -М.: Гидрометеоиздат, 1977. -С.76-85.
2. Абшаев М.Т. Комплексные радиолокационные исследования структуры и динамики развития градовых облаков / Пятое Всесоюзное совещание по радиометеорологии. - М.: Гидрометеоиздат, 1981. -С.94-100.
3. Аджиева А.А., Шаповалов В.А., Машуков И.Х. Опасные конвективные процессы на территории Северного Кавказа // Экологические проблемы современности / 18 международная научно-практическая конференция, Майкоп, 21-24 ноября 2011 г. –Режим доступа: http://mkgtu.ru/docs/KONF_SEM/adgjieva_shapovalov_mashukov.pdf
4. Баранов А.М. Облака и безопасность полётов. -Л.: Гидрометеоиздат, 1983. -321 с.
5. Бочарников Н.В., Брылёв Г.Б., Ватиашвили М.Р. Диагноз шквалов по данным МРЛ / Радиолокационная метеорология. -Л.: Гидрометеоиздат, 1989. -С. 64–67.
6. Брылёв Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминова Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. -Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 234 с.

7. Булкин В.В., Калинин М.В. Мониторинг среды обитания: Уч. пособие. В 2 ч. Ч. 1. / Под ред. В.В. Булкина. –Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2011. -121 с.
8. Булкин В.В., Первушин Р.В., Фалин В.В., Киселев Н.Ф. Интерпретация результатов пассивно-активного зондирования облаков и осадков / Методы и устройства передачи и обработки информации: Межвузовский сборник научных трудов. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. -С.85-89.
9. Булкин В.В., Костров В.В., Фалин В.В., Гинеотис С.П., Первушин Р.В. Методы и устройства пассивно-активной радиолокации в структуре управления воздушным движением / Электромагнитные волны и электронные системы, 2002. -№1. -С.60-69.
10. Васищева М.А., Щукин Г.Г. Экспериментальные исследования водности облаков. / Статистические модели атмосферы: Обзор. Сер. «Метеорология». — Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1977. -94 с.
11. Вимберг Г.П., Тарабукин И.А., Щукин Г.Г. Оценка эффективности пассивно-активного радиолокационного метода определения средней водности переохлажденных зон облаков для использования в прогнозе возможного обледенения самолетов / Труды ГГО, вып. 526, 1988. -С.49-55.
12. Глушкова Н.И., Лапчева В.Ф., Песков Б.Е. Использование данных метеорологических радиолокаторов для определения количества осадков, гроз, града и шквалов / Радиометеорология: Труды VII Всесоюзного совещания. - Л.: Гидрометеоиздат, 1989. - С.105-107.
13. ГОСТ Р 22.0.03-95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения. -М.: ИПК «Издательство стандартов». 1996. -11 с.
14. ГОСТ Р 22.1.02-95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование. Термины и определения. -М.: ИПК «Издательство стандартов». 1996. -10 с.
15. ГОСТ Р 22.1.07-99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование опасных метеорологических явлений и процессов. Термины и определения. -М.: ИПК «Издательство стандартов». 1999. -10 с.
16. Калинин Н.А., Толмачева Н.И. Исследование радиолокационных характеристик распознавания опасных явлений погоды, связанных с кучево-дождевой облачностью / Метеорология и гидрология, 2005. № 1. -С. 84–95.
17. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Численный анализ данных радиолокационных и станционных измерений облачности / Метеорология и гидрология, 2003. № 7. -С.31–39.
18. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Методика расчёта водности и водозапаса кучево-дождевой облачности / Вестник удмуртского университета: Биология. Науки о земле. – Ижевск: УдГУ, 2008, вып. 1. –С.59-72.
19. Кармов Х.Н. Некоторые результаты экспериментальных исследований активной и пассивной радиолокации градовых и дождевых облаков / Труды ВГИ, 1978, вып. 41. -С. 76-82.
20. Качурин Л.Г., Карцивадзе А.И., Дивинский Л.И., Мазур В.Д. Радиолокационные наблюдения за грозовыми очагами в кучево-дождевых облаках / Труды ЛГМИ, 1975, вып. 54. -С. 9-20.
21. Красюк И.П., Коблов В.Л., Красюк В.И. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС. -М.: Радио и связь, 1988. -216с.
22. Литвинов И.В. Осадки в атмосфере и на поверхности земли. -Л.: Гидрометеоиздат, 1980. -208с.

23. Медалиев Х.Х., Сижажев С.М. Изучение степени грозоопасности облаков и определение времени и места каналов молний / Труды ВГИ, 1979, вып. 29. -С.3-11.
24. Павлов Н.Ф. Аэрология, радиометеорология и техника безопасности. -Л.: Гидрометеоиздат, 1980. -432с.
25. РД 52.04.567-2003. Руководящий документ. Положение о государственной наблюдательной сети. –Л.: Гидрометеоиздат, 2003. -44 с.
26. Руководящий документ. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2 и МРЛ-5 / РД 52.04.320-91. -СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. -359с.
27. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации / Под ред. К.Г. Абрамович, А.А. Васильева. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. –301 с.
28. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. -Л.: Гидрометеоиздат, 1973. -343 с.
29. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г. Современные исследования Главной геофизической обсерватории. Ч.2. –СПб: Гидрометеоиздат, 1999. - 163 с.
30. Шифрин К.С., Рабинович Ю.И., Щукин Г.Г. Применение радиотеплолокации в метеорологии / Метеорология и гидрология, №6, 1969. -С. 10-18.
31. Federal Aviation Administration. Incident Data System Database. 1998.
32. Smit K. Principles of Applied Climatology. -McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, London, 1975.
33. Stasenko V.N., Galperin S.M., Frolov V.I., Shchukin G.G., Tarabukin I.A. Investgation of Electric and Microphysic Properties of a Thundercloud Using Active-Passive Multiwave Radar System / Proc., 10th Intern. Conf. on Atmospheric Electricity, Osaka, 1996. -pp. 200-203.
34. Tromp S.W., Sargent F. A survey of human biometeorology / W.M.O. Tech. Note 65, Geneva. 1964. -113 p.
35. Щукин Г.Г. Радиолокационный мониторинг опасных метеорологических явлений: Учеб. пособие. / Г.Г. Щукин, В.В. Булкин, Р.В. Первушин; под ред. В.В. Булкина. – М.: Издательство «Перо», 2016. – 98 с.