

А. А. ВАСИЛЬЕВ,
Р. М. ВИЛЬФАНД

ПРОГНОЗ ПОГОДЫ



РОСГИДРОМЕТ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации

А. А. Васильев, Р. М. Вильфанд

ПРОГНОЗ ПОГОДЫ

Москва
2008

Основная цель данного издания — ознакомить широкий круг читателей со сложнейшими задачами, связанными с созданием и использованием технологии получения прогнозов погоды. Памятуя известную рекомендацию Козьмы Пруtkова, авторы не пытались объять необъятное и в научно-популярной форме постарались изложить основные этапы прогностической деятельности: от репрезентативной установки метеорологического прибора до интегрирования сложных систем уравнений гидродинамики, называемых моделями общей циркуляции атмосферы. Решение этих уравнений, «отредактированное» интеллектом синоптика, и есть прогноз погоды.

Авторы при изложении обсуждаемых вопросов полностью отказались от применения математического аппарата и приведения детальных сведений о количественных связях между описываемыми явлениями. Такая структура текста делает его наиболее понимаемым и простым.

Содержание книги может представлять интерес как для специалистов метеорологов, так и для читателей, которых занимают вопросы: какова точность гидрометеорологических прогнозов? на какой период времени возможно составлять прогнозы погоды? действительно ли, что «у природы нет плохой погоды»? каков эффект правильного предсказания опасных явлений погоды?

Ответы на эти и другие вопросы можно найти на страницах предлагаемой книги.

МОНОГРАФИЯ

А. А. Васильев,
Р. М. Вильфанд

ПРОГНОЗ ПОГОДЫ

Редактор *Л. К. Сурыгина*. Корректор *Г. Н. Римант*.
Компьютерная верстка *М. В. Дукальская*.

Подписано в печать 18.04.2008. Формат 70 × 100/16. Печать офсетная. Печ. л. 3,75.
Тираж 500 экз.

Российский государственный музей Арктики и Антарктики. 191040, Санкт-Петербург, ул. Марата, д. 24а.
Типография «Моби Дик». 191119, Санкт-Петербург, ул. Достоевского, 44.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Природа, погода и прогноз погоды	7
Атмосфера — безбрежный воздушный океан планеты Земля	7
Погода и погодные системы	10
Прогноз погоды	14
<i>Немного истории</i>	14
<i>Успехи XX в. и нерешенные проблемы</i>	18
<i>Виды метеорологических прогнозов</i>	18
Прогностическая индустрия	21
Метеорологические центры	21
Всемирная служба погоды	24
Гидродинамические модели общей циркуляции	27
<i>Общая характеристика</i>	27
<i>Динамическая часть</i>	29
<i>Физическая часть</i>	30
Основные функции автоматизированной технологии численного прогноза	32
<i>Технологические линии</i>	32
<i>Сбор данных</i>	32
<i>Формирование базы данных</i>	32
<i>Усвоение данных и объективный анализ</i>	33
<i>Прогноз и заключительная обработка продукции</i>	34
Технология подготовки локального прогноза погоды	35
Оперативные прогностические организации	35

Определение характера синоптических процессов	36
<i>Мониторинг метеорологических условий</i>	36
<i>Анализ карт погоды</i>	36
<i>Аэрологический анализ</i>	37
<i>Анализ данных с искусственных спутников Земли</i>	37
<i>Анализ данных радиолокационных наблюдений</i>	38
<i>Анализ данных дополнительных автоматизированных систем наблюдений</i>	39
<i>Анализ климатических данных</i>	40
Определение значений метеорологических величин и явлений погоды	40
<i>Существующие возможности и ограничения</i>	40
<i>Синоптическая интерпретация</i>	41
<i>Статистическая интерпретация</i>	41
<i>Физико-статистические (объективные) методы прогноза</i>	42
<i>Гидродинамические расчеты</i>	43
<i>Концептуальные модели</i>	44
Использование автоматизированных рабочих мест прогнозиста	44
Прогноз и предупреждение об опасных гидрометеорологических явлениях	47
Долгосрочные прогнозы	51
Качество прогнозов	53
Перспективы	57
Список литературы	59

ПРЕДИСЛОВИЕ

Каждый день миллионы людей в мире смотрят телевизор, слушают радио, читают газеты, чтобы узнать о погоде.

Зависимость человека от погоды отражена в древних легендах, сказках, летописях. Первый научный трактат о погоде написан Аристотелем в IV в. до нашей эры!

Что же изменилось с тех пор?

Парадоксально, но зависимость людей от погоды и важность ее предсказания увеличились. С одной стороны, научно-технический прогресс способствует уменьшению нашей зависимости от погоды, но, с другой стороны, сложная современная техника и коммуникации весьма чувствительны к неблагоприятной погоде, и даже кратковременный выход их из строя может отрицательно сказаться на работе не только многих предприятий, но и целых отраслей народного хозяйства. Например, до появления авиации не было необходимости в прогнозировании ветра и температуры воздуха на больших высотах, турбулентности, низкой облачности. В настоящее время, когда авиация стала важной отраслью экономики, точность информации о ветре по маршруту полета и специализированных прогнозов погоды по аэ-

родрому является одним из факторов, существенно влияющих на экономическую эффективность воздушно-транспортных перевозок.

Погода оказывает значительное влияние и на деятельность морского флота. Штормовые ветры, льды и айсберги, туман увеличивают вероятность повреждения судов, задержки их в пути, дополнительного расхода горючего.

Сельское хозяйство особенно чувствительно к изменениям погоды. Формирование урожая и его сбор в значительной степени зависят от метеорологических факторов. Во многих странах колебания собираемого урожая в зависимости от погоды достигают 30 % и более. Избежать существенных потерь урожая вследствие засух или избыточного увлажнения, выпадения града, заморозков и т. п. возможно благодаря прогнозам погоды. При правильном их учете можно определить оптимальное время сева и уборки сельскохозяйственных культур, своевременно провести обработку пестицидами, изменить режим орошения и т. п.

Значительный экономический эффект дает учет прогнозов температуры воздуха для определения начала и конца отопительного периода и его режи-

мов (экономия топлива и электроэнергии).

Однако наибольшее значение прогнозы погоды имеют для обеспечения безопасности людей. Тропические циклоны, ураганные ветры, смерчи, град, сильные снегопады, наводнения не только причиняют огромный экономический ущерб, но и уносят человеческие жизни. В атмосфере ежегодно в среднем возникает примерно 80 тропических циклонов, которые приводят к гибели почти 20 тысяч человек, а причиняемый ими экономический ущерб исчисляется 7 млрд. долларов США.

Влиять на развитие опасных атмосферных (погодных) явлений человек пока еще не научился, и единственная возможность снизить ущерб от их разрушительного воздействия — это создание системы, позволяющей осуществлять постоянное наблюдение за состоянием атмосферы, изучать природу возникновения опасных явлений и прогнозировать их. Опыт показывает, что предупреждение о возникновении опасного явления за несколько часов до его начала позволяет принять меры по сохранению жизни людей и предотвращению ущерба.

Вместе с тем прогнозы погоды помогают не только снизить ущерб от плохой погоды, но и повысить прибыль при правильном использовании прогнозов хорошей погоды. Например, сведения о прогнозируемой сухой погоде в период уборки урожая можно использовать для быстрого ее завершения. Правильное использование прогнозов теплой погоды зимой дает значительную экономию топлива и т. д.

Важным также является то обстоятельство, что одна и та же погода может способствовать экономической выгоде для одного вида хозяйственной деятельности и, наоборот, быть весьма невыгодной для другого. Например, дождь может быть очень необходим в сельском хозяйстве и в то же время может препятствовать перевозке грузов, проведению строительных работ, массовых мероприятий, отдыху и т. п.

В будущем, по мере развития различных видов транспорта, индустрии, энергетики, потребности в прогнозах погоды еще более расширятся. Уже сейчас нужны прогнозы условий загрязнения воздуха, включая перенос опасного загрязнения на большие расстояния. Кроме того, как свидетельствуют исследования, количество опасных погодных явлений на планете в связи с глобальным потеплением климата увеличивается, что является серьезным фактором, влияющим на безопасность населения и устойчивое развитие экономики.

Иначе говоря, роль прогноза погоды как природного ресурса возрастает, и тот, кто сможет точнее предсказывать состояние атмосферы, будет эффективнее использовать этот ресурс для развития экономики, защиты населения и собственности от опасных его проявлений. Это особенно относится к таким странам, как Россия, территория которых расположена в различных климатических зонах и подвержена частым и резким изменениям погоды.

Основная цель данной книги состоит в предоставлении широкому кругу читателей сведений о современной системе прогнозирования погоды.

ПРИРОДА, ПОГОДА И ПРОГНОЗ ПОГОДЫ

Атмосфера — безбрежный воздушный океан планеты Земля

Атмосфера — неотъемлемая часть природной среды планеты Земля. Она окружает весь земной шар и состоит из смеси различных газов, называемой воздухом. В воздухе находятся также частицы пыли, капли воды, кристаллы льда и другие включения, называемые обычно аэрозолями. Они попадают в атмосферу как естественным образом (вследствие ветровой эрозии, извержения вулканов), так и в результате деятельности человека. Газы, входящие в состав атмосферы, имеют определенную плотность и поэтому оказывают на каждый квадратный сантиметр земной поверхности давление, равное массе воздуха. Именно поэтому человек физически ощущает на себе изменение давления, связанное с изменением погоды.

По мере удаления от поверхности Земли атмосферное давление понижается. Благодаря сжимаемости воздуха понижение давления с высотой происходит неравномерно. Так, в слое до высоты 5 км находится примерно половина массы атмосферы, а до высоты 10 км — около 3/4.

Из-за уменьшения плотности воздуха с высотой атмосфера не имеет четкой верхней границы и постепенно переходит в межпланетное пространство. Следы некоторых легких газов обнаружены даже на высоте несколько тысяч километров!

В газовый состав атмосферы входят главным образом азот (~ 78 %) и кислород (~ 21 %). Доля остальных газов (углекислый газ, аргон, неон, радон, гелий, криптон, ксенон, водород, метан, окись азота и озон) составляет примерно 1 %. Если бы атмосфера была неподвижной, то наиболее тяжелые газы и аэрозоли размещались бы ближе к земной поверхности, а наиболее легкие — выше. Однако непрерывное движение воздуха в атмосфере способствует перемешиванию газов и постоянству его состава, кроме самых верхних слоев. Из-за постоянного движения воздуха (циркуляция атмосферы) его можно считать международной собственностью, в отличие от воздушного пространства — собственности национальной.

Жизнь и деятельность человека проходит на дне воздушного океана, в самом нижнем его слое — тропосфере, простирающейся в среднем до высот 9—12 км. Тропосфера формируется

благодаря нагреву солнечными лучами поверхности Земли (часто называемой в метеорологии подстилающей поверхностью), от которой нагревается воздух. Образно говоря, нагрев жизненно важного слоя атмосферы в основном происходит снизу, подобно тому, как происходит нагрев воды в кастрюле на электрической плите. Именно поэтому температура воздуха в тропосфере с высотой понижается примерно на $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}$ на каждые 100 м. Однако не вся тепловая энергия солнечных лучей (солнечная радиация) идет на нагрев поверхности Земли или, точнее, поглощается ею, а только 46 %. Примерно 20 % тепловой энергии поглощается самой атмосферой, а остальные 34 % отражаются и в конечном счете уходят в космическое пространство (рис. 1). В тех местах поверхности Земли, где воздух нагревается больше, он расширяется, становится легче окружающего его воз-

духа и поднимается вверх, а на его место опускается более холодный. После нагрева он также поднимается и вновь замещается холодным. Такое круговое движение теплого и холодного воздуха получило название конвекции.

На экваторе наша планета получает гораздо больше тепла, чем на полюсах. Поэтому теплый воздух над экватором постоянно поднимается, а на его место приходит более холодный с севера и с юга от него. Теплый воздух, поднявшись, начинает двигаться по направлению к полюсам, а холодный перемещается на его место. По мере движения к полюсу теплый воздух остывает, а став холодным, опускается и движется к экватору.

Такая довольно простая конвективная циркуляция действительно имела бы место в атмосфере, если бы подстилающая поверхность Земли была однородной и Земля не вращалась вокруг своей оси и вокруг Солнца. Наличие расположенных в различных широтах континентов, океанов, морей, горных массивов и пустынь, рек и долин, лугов, лесов и пастбищ делает нагрев подстилающей поверхности неравномерным, а следовательно, приводит к развитию конвективных движений различного масштаба. Отметим, что нагрев нижнего слоя атмосферы подобен нагреву бесчисленного количества электрических плит различных размеров и мощности. Вращение Земли еще больше усложняет движение воздуха и делает его труднопредсказуемым.

Выше тропосферы расположена стратосфера, простирающаяся в среднем до высоты 50 км. В стратосфере



Рис. 1. Схема отражения, поглощения и собственного излучения энергии на Земле.

имеется еще одна поверхность нагрева воздуха — слой озона. Озон концентрируется в стратосфере в слое 15—25 км и поглощает ультрафиолетовое излучение Солнца. Поэтому температура в стратосфере с высотой вначале остается почти постоянной, а затем даже повышается. Поглощая ультрафиолетовое излучение, озоновый слой не только нагревает стратосферу, но и одновременно защищает людей, животных и растительный мир от его вредного воздействия. Это излучение повреждает иммунную систему и вызывает тяжелые заболевания. В стратосфере отсутствуют конвекция и другие значительные формы вертикальных движений, нет облаков и всегда светит солнце. Если построить башню высотой всего 12—14 км, то на ее верхнем этаже всегда будет солнечная погода.

Плотность воздуха стратосферы гораздо меньше плотности воздуха тропосферы, погода здесь всегда солнечная, поэтому предпочтительны полеты пассажирских лайнеров, транспортных и других видов самолетов в стратосфере.

Выше стратосферы расположены мезосфера и термосфера — слои, почти не оказывающие влияния на погоду из-за небольшой массы воздуха, содержащегося в них. Между перечисленными сферами существуют тонкие переходные слои, называемые тропопаузой, стратопаузой и мезопаузой.

Для прогностической метеорологии наиболее интересна тропопауза, формально отделяющая тропосферу от стратосферы. Когда-то ученые полагали, что тропопауза опоясывает тропо-

сферу сплошным слоем, постепенно понижаясь от экватора к полюсам, поскольку конвективные движения на экваторе гораздо больше, чем в полярных районах. Однако оказалось, что тропопауза в значительной степени расслоена по горизонтали и между этими слоями тропопауза подвержена разрывам — резким изменениям по высоте (рис. 2). Один из таких разрывов существует на линии соприкосновения тропического и субтропического воздуха, а другой — между субтропическим и полярным воздухом. Вдоль таких разрывов, между холодным воздухом стратосферы и теплым тропосферы создаются большие контрасты (градиенты) температуры, что приводит к образованию струйных течений — сильных, узких потоков с почти горизонтальной осью и с максимальной скоростью ветра более 100 км/ч. Толщина струйных течений составляет несколько километров, а длина — тысячи километров. Часто струйное течение опоясывает почти весь земной шар!

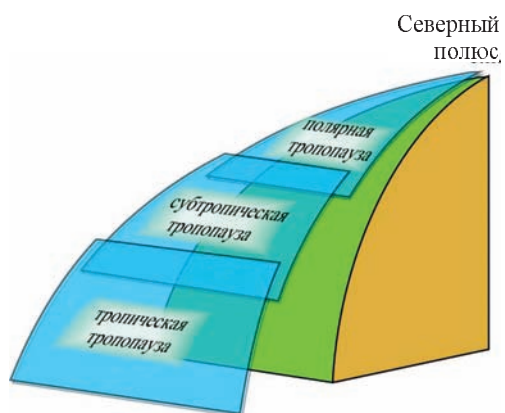


Рис. 2. Разрывы тропопаузы на границах воздушных масс.

Над полюсами тропосфера иногда исчезает вообще и холодный стратосферный воздух практически соприкасается с подстилающей поверхностью. Наиболее часто это происходит в Антарктиде в конце полярной ночи вследствие большой высоты ледяного континента над уровнем моря. Логично предположить, что именно в местах разрыва тропопаузы и над полюсами при ее исчезновении и происходит основной обмен между тропосферой и стратосферой.

Погода и погодные системы

Погодой принято называть состояние атмосферы, оказывающее воздействие главным образом на жизнь и деятельность людей. Оценить это состояние в заданной точке пространства можно путем измерения метеорологических величин (температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, направления и скорости ветра и др.), а также наличием или отсутствием явлений погоды (дождь, снегопад, гроза, туман и т. д.). Широко известно, что погода изменчива, хотя иногда одна и та же погода может продержаться довольно долго.

Причиной изменчивости погоды являются воздушные массы, формирующиеся над континентами и океанами и перемещающиеся под влиянием циркуляции атмосферы и крупных атмосферных вихрей — циклонов и антициклонов.

Воздушная масса — это обширная область тропосферного воздуха, зани-

мающая площадь сотни тысяч квадратных километров, в которой погода примерно одинакова. Занимаемая воздушной массой площадь сравнима с частями материков и океанов, над которыми она образуется. Воздушные массы по их термическим характеристикам подразделяют на теплые и холодные, а по географическому расположению очагов формирования — на арктические, умеренных широт, тропические, экваториальные. Различают также континентальные и морские воздушные массы. Суша и вода нагреваются солнцем по-разному. Для повышения температуры воды требуется гораздо больше солнечного тепла. Поверхность суши в течение нескольких суток прогревается всего на десятки сантиметров в глубину, в то время как океан вследствие прозрачности воды прогревается до глубины 20—25 м. Поэтому океаны нагреваются и остывают медленнее континентов. Из-за этого морские воздушные массы летом холоднее континентальных, а зимой, наоборот, теплее. Можно сказать, что зимой океаны обогревают сушу.

Воздушные массы отделяются друг от друга атмосферными фронтами, при пересечении которых погода меняется. Если воздушные массы малоподвижны, то можно пересечь атмосферный фронт на самолете, автомобиле или поезде и быстро попасть из одной погоды в другую. Однако воздушные массы под влиянием общей циркуляции атмосферы перемещаются в различном направлении и чаще приходят к нам в «гости», меняя хорошую погоду на плохую и наоборот. Особенно часто

смена погоды происходит в умеренных широтах Северного и Южного полушарий, поскольку именно в этих широтах проходит граница между холодным полярным воздухом и воздухом субтропиков, получившая название высотной фронтальной зоны. Обычно в этой зоне преобладает перенос воздуха с запада на восток, т. е. западный перенос. Однако в ряде случаев этот зональный поток деформируется, в нем образуются обширные волны, вызывающие меридиональное перемещение холодного воздуха в южные широты, а теплого в северные. Благодаря большому масштабу и глобальному охвату они получили название планетарных волн. У поверхности Земли при этом развиваются циклоны (области низкого давления) и

антициклоны (области высокого давления). В циклонах Северного полушария воздух вращается против часовой стрелки, а в циклонах Южного, наоборот, по часовой стрелке. В антициклонах вращение воздуха обратное циклонам. Наличие вращательных движений в циклонах и антициклонах при одновременном их перемещении в горизонтальном направлении под влиянием ветра на высотах приводит к выравниванию контрастов температуры между воздушными массами.

На рис. 3 схематически показаны стадии развития циклона умеренных широт и перемещения в нем атмосферных фронтов: 1 — холодная и теплая воздушные массы разделены стационарной линией фронта; 2 — холодный

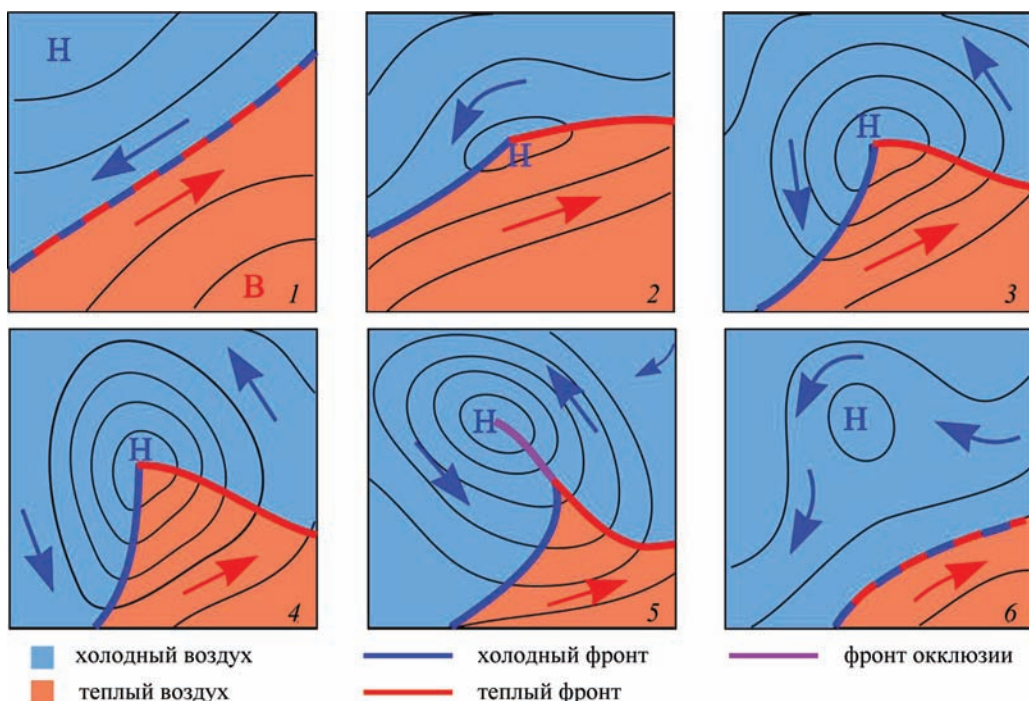


Рис. 3. Стадии развития циклона умеренных широт.

воздух надвигается на теплую воздушную массу, в точке пониженного давления формируется волна; 3 — холодный воздух продолжает движение к теплому воздуху, подтекая под него, поэтому теплый и потому более легкий воздух перед холодным воздухом поднимается вверх и заполняет центр низкого давления взамен ушедшего холодного, давление в центре циклона понижается (циклон углубляется); 4 — холодный воздух, как более тяжелый, перемещается примерно в два раза быстрее теплого, поэтому холодный фронт постепенно догоняет теплый, а теплый воздух перед теплым фронтом еще более «углубляет» циклон (циклон достигает максимального развития); 5 — холодный фронт догоняет теплый, вытесняя полностью теплый воздух от земной поверхности в более высокие слои; фронты смыкаются и образуется так называемый фронт окклюзии; 6 — у поверхности земли остается только заполненный холодным воздухом циклон, вращающийся по инерции против часовой стрелки, а после его исчезновения снова образуется поверхность раздела между холодной и теплой воздушными массами, но с гораздо меньшими горизонтальными градиентами температуры.

Вертикальная структура холодного и теплого фронтов показана на рис. 4.

Прохождение каждого фронта характеризуется определенной сменой погоды. Так, перед теплым фронтом, на расстоянии до 300 км до него, образуются перистые облака, затем высокослоистые и, наконец, слоисто-дожде-

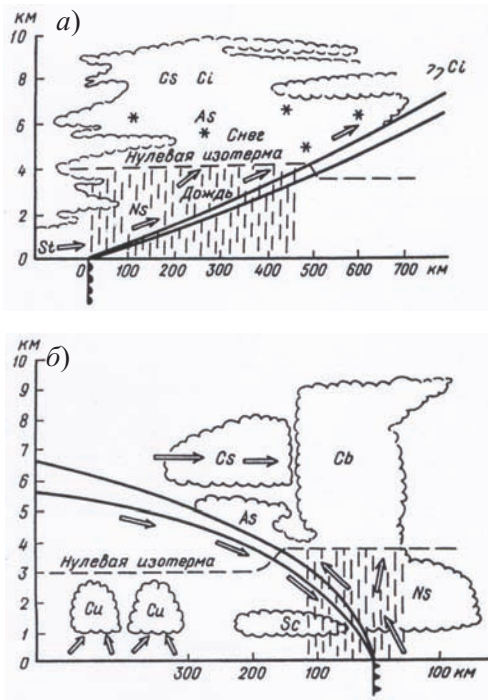


Рис. 4. Теплый (а) и холодный (б) фронты (вертикальный разрез).

Ci — перистые облака (обозначение от латинского названия Cirrus), Cs — перисто-слоистые (Cirrostratus), As — высокослоистые (Altostratus), St — слоистые (Stratus), Ns — слоисто-дождевые (Nimbostratus), Cb — кучево-дождевые (Cumulonimbus), Cu — кучевые (Cumulus), Sc — слоисто-кучевые (Stratocumulus).

вые, из которых выпадают обложные осадки. Прохождение холодного фронта характеризуется развитием мощных кучево-дождевых облаков, грозами, ливнями и шквалами. В тропической зоне как к северу, так и к югу от экватора образуются тропические циклоны, или тайфуны. Так же как и внетропические циклоны, это вихри с низким давлением, но в отличие от них развивающиеся не на фронтах, а над теплыми водными массами в океанах. Эти циклоны намного мощнее фронталь-

ных циклонов и имеют огромную разрушительную силу — скорость ветра в них достигает 100 км/ч и более. При перемещении циклонов на сушу сильные ветер и ливни, нагоны морской воды причиняют большой экономический ущерб и приводят к человеческим жертвам.

На рис. 5 показаны места зарождения и траектории перемещения тропических циклонов — они перемещаются к континентам, где, натворив бед, быстро заполняются.

Явления погоды и погодные системы, как мы видим, отличаются друг от друга по своим масштабам (размерам). Всемирная метеорологическая организация (ВМО) приняла следующую классификацию горизонтальных масштабов метеорологических явлений:

а) мелкий масштаб (менее 100 км) — грозы, смерчи, местные ветры;

б) мезомасштаб (от 100 до 1000 км) — атмосферные фронты, скопления облаков;

в) крупный (синоптический) масштаб — циклоны, антициклоны;

г) планетарный масштаб (более 5000 км) — длинные (планетарные) волны в верхней тропосфере.

Существует также классификация явлений погоды по степени их опасности для деятельности человека. Некоторые явления, например смерч или, как его часто называют, торнадо, по масштабу невелики, но обладают большой разрушительной силой. Новороссийская бора (рис. 6) относится к категории местных ветров, но причиняет огромный материальный ущерб хозяйству. Полет самолета в грозовом облаке приводит его к гибели, хотя диаметр облака составляет всего 20—30 км.

В целях получения надежных данных о метеорологических величинах

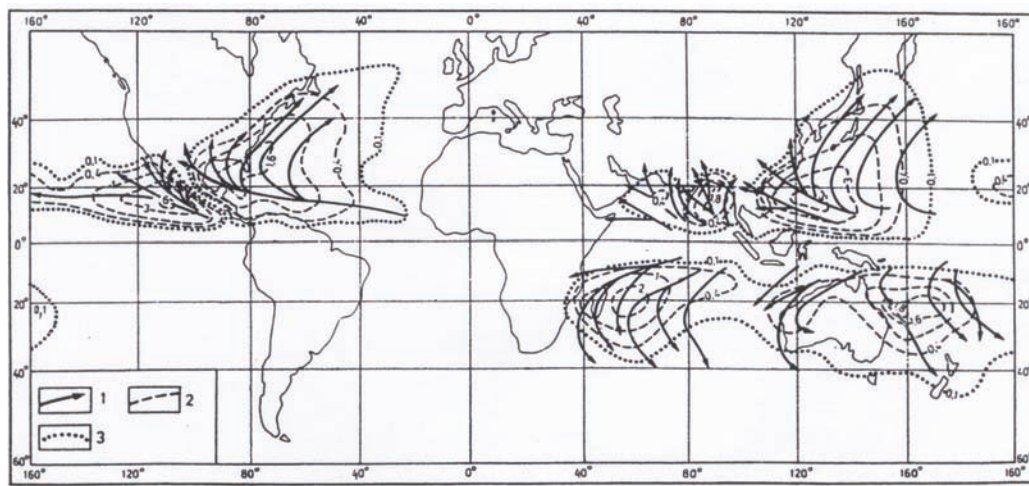


Рис. 5. Основные пути и районы распространения тропических циклонов.

1 — основные направления перемещения, 2 — среднее годовое число в пятиградусных квадратах, 3 — граница районов возникновения.



Рис. 6. В ноябре 1993 г. жестокий шторм при низкой температуре воздуха, продолжавшийся 6 ч, повредил несколько судов в порту Новороссийска, Россия (фото: ИТАР-ТАСС).

нах и явлениях погоды, которые можно использовать для обеспечения оперативной деятельности, зависящей от погоды, а также для изучения атмосферы и подготовки прогнозов, существует государственная сеть гидрометеорологических станций, на которых проводятся инструментальные и визуальные наблюдения по стандартным практикам и процедурам, принятым Всемирной метеорологической организацией. Плотность (или разрежение) наблюдательных станций определяется с учетом пространственного масштаба атмосферного явления и его продолжительности, которые должны быть «пойманы» наблюдательной сетью. Например, данные синоптических наблюдений должны отражать состояние атмосферы в радиусе до 100 км вокруг станции, чтобы можно было правильно оценить синоптические процессы. Для мелко-масштабных явлений размер соответствующей территории может составлять 10 км и менее.

Прогноз погоды

Немного истории

Поскольку человек постоянно ощущает изменения погоды, то и попытки предсказать погоду предпринимались давно. Объяснять и предсказывать поведение атмосферы требовала практическая деятельность людей. Пожалуй, первым метеорологом можно считать библейского Иосифа, правильно истолковавшего сон фараона о семи тучных и семи худых коровах. «И сказал Иосиф фараону: „...семь коров тощих — это семь лет голода”» (Библия, Бытие, гл. 42). Кроме того, он продемонстрировал отличный пример правильного использования прогноза, посоветовав фараону запастись зерном в урожайные годы. Этот пример весьма поучителен для современных метеорологов, поскольку, кроме подготовки прогноза, они должны стремиться к тому, чтобы прогноз был правильно использован лицами, принимающими решения.

Книга Аристотеля «Метеорология» (IV в. до нашей эры) была большим достижением в изучении атмосферы и способствовала повороту от мифологии к реальности (рис. 7). В этой работе объясняется и казуистическое происхождение слова «метеорология», принятое с тех пор. Русские летописные источники также содержат немало сведений о чрезвычайных метеорологических явлениях и попытках их предсказаний. Многолетний опыт землепашцев, пастухов, моряков обобщался народами в виде различных примет, позволявших иногда «угадать» погоду. Но прогресс был



Рис. 7. Титульный лист книги Аристотеля по метеорологии, изданной на латинском языке в Венеции в 1560 г.

очень медленным. Пожалуй, трудно найти в какой-либо области знаний больше суеверий и даже откровенного шарлатанства, чем в предсказании погоды. Кажется невероятным, но до сих пор некоторые люди уверены в том, что могут предсказывать погоду без необходимого уровня знаний и использования современных технологий. Время от времени их прогнозы оправдываются (случайно!), что поддерживает в них эту уверенность до тех пор, пока она не исчезнет благодаря объективным фактам.

Попытки научно обоснованного прогноза погоды начались лишь в XVIII в. после изобретения измерительных приборов и открытия физи-

ческих законов, определяющих поведение газов. В середине XIX столетия ученые поняли, что движения в атмосфере могут иметь упорядоченный характер и что существуют крупные синоптические системы, перемещение и развитие которых определяют погоду в определенной точке.

В 1888 г. Г. Гельмгольц сформулировал фундаментальные законы движения воздуха, необходимые для описания атмосферных процессов. Эти математические законы представляли собой систему гидродинамических и термодинамических уравнений. В конце XIX в. В. Бьеркнес высказал идею, что погода может быть предвычислена количественно с помощью этих уравнений на основе тщательного анализа первоначального состояния атмосферы. Идея Бьеркнеса вдохновила известного математика и метеоролога Л. Ричардсона, и он предпринял попытку предвычислить погоду с помощью уравнений. Результаты его трудов были опубликованы в 1922 г. На основании этих результатов был сделан вывод о бесперспективности предвычисления погоды и не столько из-за плохого их качества, сколько из-за необходимости производства огромного объема вычислений. Ричардсон подсчитал, что для получения одного прогноза на сутки потребуется 64 тысячи человек! Вследствие такой бесперспективности численного прогнозирования развитие прогностической метеорологии в 20 – 30-е годы прошлого столетия пошло главным образом по пути создания физических моделей, описывающих структуру и эволюцию погодных

систем, и установления закономерностей в общей циркуляции атмосферы. Крупный вклад в решение проблемы прогноза погоды внесли известные ученые Норвежской школы Бьеркнес, Сульберг и Бергерон, а в России — С. П. Хромов. Ими был разработан фронтологический метод синоптических прогнозов. Созданные к этому времени во многих странах сети метеорологических наблюдений позволили метеорологам постоянно следить за состоянием погоды, составлять синоптические карты (карты погоды) (рис. 8), выделять на них циклоны и антициклоны, определять границы воздушных масс и, используя установленные к тому времени научные закономерности, составлять прогнозы.

В 1930 г. в России в г. Павловске под Ленинградом был произведен первый в мире запуск радиозонда, изобретенного П. А. Молчановым (рис. 9). Метеорологи получили третье измерение метеорологических величин в пространстве — высоту, что стимулировало как синоптические исследования, так и разработку гидродинамических моделей общей циркуляции атмосферы. Первый практически приемлемый подход к решению проблемы гидродинамического прогноза был реализован в СССР в 1940 г. И. А. Кибелем. Однако применять в оперативной практике гидродинамические модели и развивать их стало возможным только после появления электронно-вычислительных машин. Первой и наиболее распро-

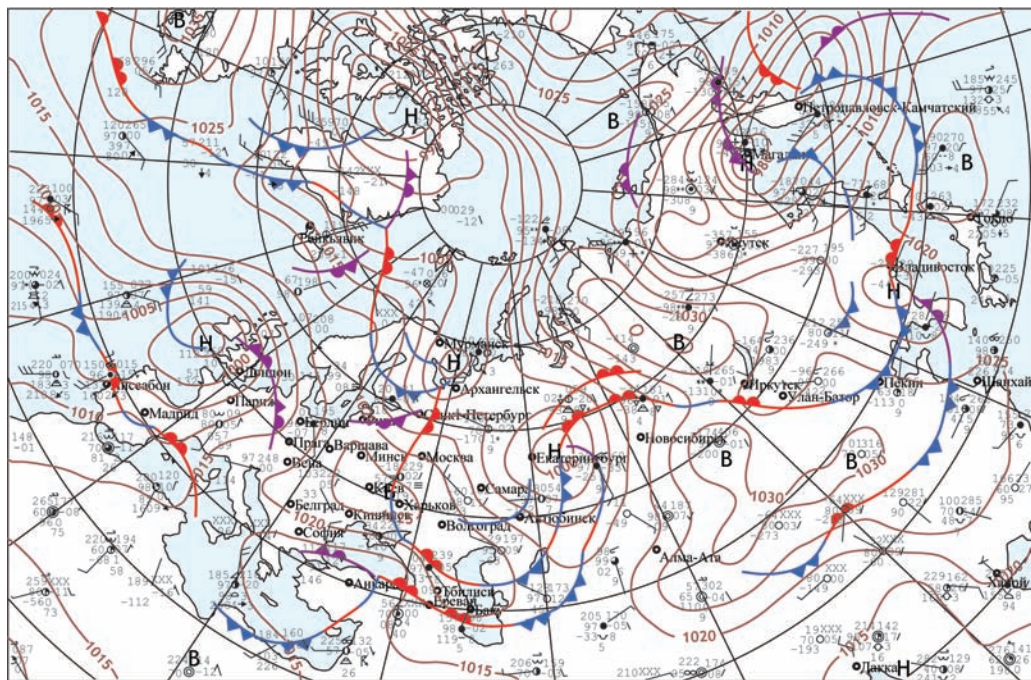


Рис. 8. Синоптическая карта (карта погоды).

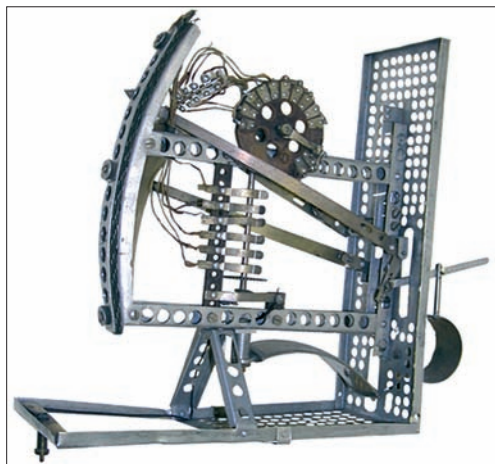


Рис. 9. Блок датчиков первого в мире радиозонда, разработанного П. А. Молчановым.

страненной моделью была баротропная (однослойная) модель. Основным недостатком баротропной модели заключается в ее неспособности предсказывать важные процессы циклогенеза, т. е. возникновение новых циклонов, с которыми, как правило, и связано изменение погоды. Реальная атмосфера является бароклининой (многослойной) средой, в которой плотность изменяется в зависимости от давления воздуха и его температуры. Поэтому в дальнейшем стали разрабатывать многоуровневые модели, благодаря чему бароклининость в атмосфере может быть учтена с достаточной степенью точности. При использовании многоуровневой модели также легче учитываются различные физические воздействия, оказывающие существенное влияние на характер циркуляции атмосферы. К ним относятся трение, неровности подстилающей поверхности (рельеф мест-

ности) и эффекты, обусловленные процессами испарения, конденсации водяного пара и теплообменом между океаном и атмосферой.

Современные гидродинамические модели позволяют с достаточной степенью точности прогнозировать поля многих метеорологических величин и дают в точках регулярной географической сетки значения давления, температуры, ветра и облачности. Прогноз конкретных значений метеорологических величин в конкретном месте (городе или районе) готовят с помощью синоптики, руководствуясь выходными данными численных моделей и используя метеорологические данные и методики, учитывающие развитие мезомасштабных и локальных процессов. Существенное улучшение прогнозирования связано с широким использованием данных, поступающих с искусственных спутников Земли. Эта информация внесла огромный вклад как в более глубокое понимание погодообразующих факторов, так и в значительное повышение информативности о текущем состоянии атмосферы, особенно в районах, где данные наблюдений редки или отсутствуют вообще. Совместное усвоение обычной и спутниковой информации гидродинамическими моделями способствовало повышению качества прогнозов.

Таким образом, трудами многих поколений ученых и международными усилиями удалось значительно продвинуться вперед в развитии прогностической метеорологии.

Успехи XX в. и нерешенные проблемы

К концу XX столетия мировое метеорологическое сообщество достигло выдающихся успехов в краткосрочном и среднесрочном прогнозировании погоды. К таким успехам относятся:

— научные достижения в понимании глобальных атмосферных процессов и динамики атмосферы, в математическом описании трансформации поступающей от Солнца радиации, переноса, отражения, поглощения коротковолнового и длинноволнового излучения, процессов конденсации и испарения, таяния/замерзания осадков, механизмов перемешивания воздушных масс, включая конвекцию и турбулентность, процессов взаимодействия с сушей и океаном;

— разработка в ряде стран глобальных, региональных и мезомасштабных гидродинамических численных моделей общей циркуляции атмосферы. Эти модели позволяют прогнозировать поля метеорологических элементов на 5—7 суток с приемлемой для многих потребителей точностью;

— создание в крупных метеорологических центрах, оснащенных мощной вычислительной техникой, уникальных технологий, позволяющих внедрить эти модели в оперативную практику;

— создание и организация непрерывного функционирования глобальных международных систем наблюдений, телесвязи и обработки данных, позволяющих осуществлять наблюдение за погодой, передачу данных наблюдений в метеорологические центры и рас-

пространение продукции в прогностические центры национальных метеорологических служб.

Вместе с тем важно отметить, что большой прогресс в численном моделировании относится главным образом к крупномасштабным погодным системам. Прогнозы локальной погоды все еще связаны с некоторой неопределенностью в отношении конкретного местоположения, времени и интенсивности метеорологических явлений. Долгосрочные прогнозы на месяц и сезон все еще являются малонадежными. Однако имеющиеся достижения доказали, что скептицизм, высказываемый даже некоторыми учеными в отношении прогностической метеорологии, был неоправдан и несправедлив. В этой связи уместно напомнить слова А. Эйнштейна о том, что «наиболее непонятным обстоятельством в этом мире является то, что он понимаем». Эти слова позволяют верить как в дальнейший прогресс, так и в то, что новые исследования расширят пределы предсказуемости погоды и климата.

Виды метеорологических прогнозов

В современном понимании прогноз погоды представляет собой описание ожидаемого состояния атмосферы в определенный момент или период времени для определенного района. Вследствие большой изменчивости метеорологических величин в пространстве и во времени конкретное значение любой указанной в прогнозе величины следует рассматривать как наиболее вероятное значение, которое данная величина может иметь в период действия прогно-

за. Время возникновения какого-либо явления следует также понимать как наиболее вероятный период. Такое определение прогноза погоды принято Всемирной метеорологической организацией (ВМО). Конкретные требования к точности прогноза, перечню прогнозируемых величин и явлений разрабатываются пользователями прогнозов совместно с метеорологами.

В зависимости от требований и описании ожидаемого состояния атмосферы может быть разным, более об-

щим или более детальным, с указанием метеорологических величин, необходимых для принятия того или иного решения. При разработке таких требований важно учитывать возможности прогнозирования на данном этапе развития науки и технологии, чтобы требования не были заранее невыполнимыми. Прогнозы погоды принято делить на *прогнозы общего назначения*, ориентированные на широкий круг пользователей, главным образом на население, и на *специализированные прогнозы* (рис. 10), со-

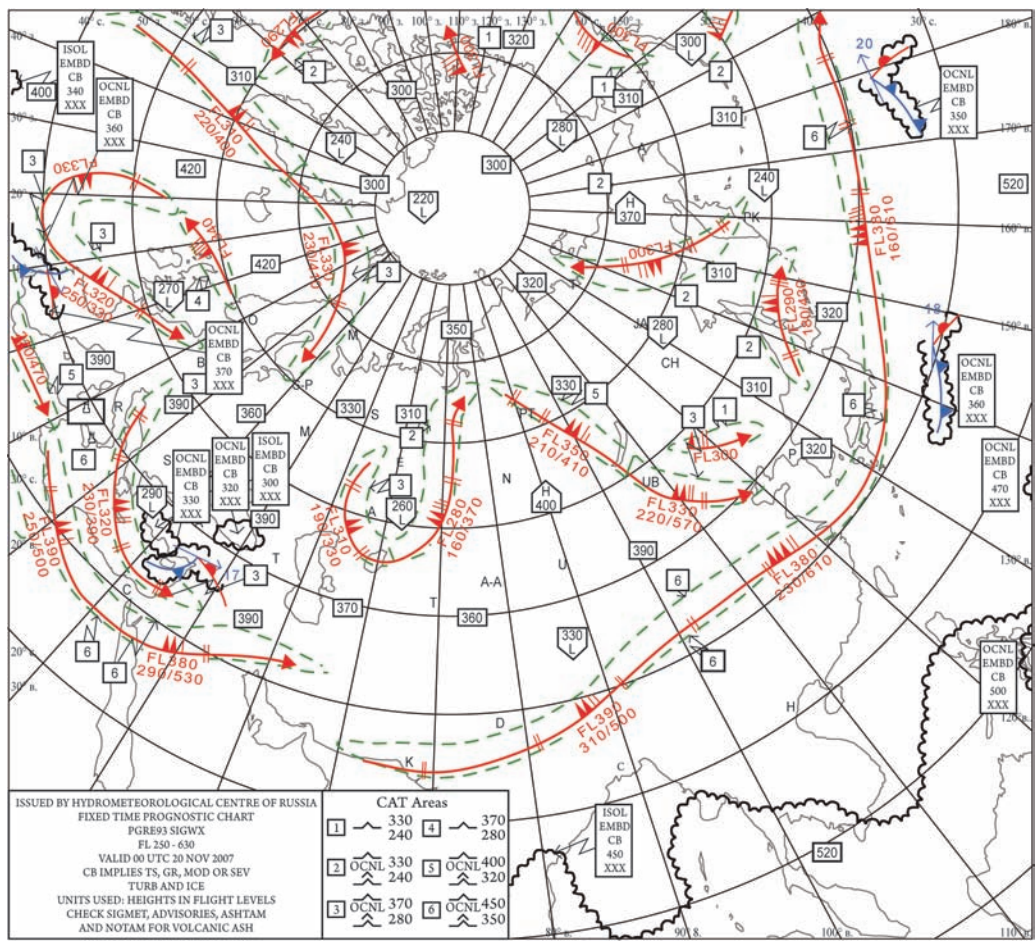


Рис. 10. Карта прогноза опасных явлений для авиации.

ставляемые с учетом специфики деятельности различных отраслей экономики (например, авиационные, морские, для наземного транспорта, лесного хозяйства, строительства, топливно-энергетического комплекса, нефтяной и газовой промышленности и др.). В целом трудно найти вид оперативной деятельности, в котором прогнозы погоды были бы не нужны. Даже при проведении спортивных мероприятий необходимы прогнозы погоды, поскольку метеорологические условия влияют на спортивное оборудование, спортивные сооружения, а также на состояние самих спортсменов. Составление специализированных прогнозов основывается на методах, применяемых в прогнозах общего назначения, но в них включается дополнительный перечень величин и явлений погоды, важных для той или иной отрасли. Например, для авиации представляет опасность обледенение самолетов на уровне полета, при взлете и посадке, при этом необходимы данные о высоте нижней границы облачности, ат-

мосферной турбулентности, видимости в тумане. Для автотранспорта важны сведения о будущих снегопадах, ливнях, гололедных явлениях, сильных морозах, для строительства и связи — сведения о порывах ветра более 15 м/с и т. д.

Некоторые прогнозы не относятся напрямую к категории метеорологических, но используют в качестве основы метеорологические прогнозы. Так, прогноз перемещения и эволюции вредных выбросов в атмосферу базируется на траекториях перемещения воздуха, предвычисленных по моделям общей циркуляции атмосферы, рекомендованные курсы для морских судов определяются на основе прогноза поля давления у поверхности Земли. Планирование полетов воздушных судов осуществляется по прогнозам ветра на высотах.

Существует также классификация прогнозов в зависимости от их заблаговременности. Такая классификация, принятая ВМО, приведена в таблице.

Классификация метеорологических прогнозов в зависимости от их заблаговременности

№ пп	Вид прогноза погоды	Заблаговременность прогноза погоды
1	Текущий	От 0 до 2 ч
2	Сверхкраткосрочный	До 12 ч
3	Краткосрочный	От 12 до 72 ч
4	Среднесрочный	от 72 до 240 ч
5	Увеличенной заблаговременности	От 10 до 30 сут
6	Долгосрочный	От 30 сут до 3 лет

ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ

Метеорологические центры

Успехи в численном (гидродинамическом) моделировании атмосферы привели к существенному изменению в технологии подготовки прогноза погоды. Крупные метеорологические центры, оснащенные мощной вычислительной техникой, ежедневно на основе глобальных моделей общей циркуляции атмосферы производят расчет на 5—7 сут полей давления, высот изобарических поверхностей, полей ветра и температуры и другой продукции и автоматически, в кодированном виде, распространяют ее в оперативные прогностические организации (рис. 11).

Расчеты производятся на каждые сутки, поэтому, переведя цифровую информацию на карты, можно последовательно проследить прогностическое развитие и перемещение циклонов и антициклонов, траектории воздушных масс, изменение температуры воздуха у поверхности Земли и на различных уровнях в атмосфере и т. д.

Имея постоянный доступ к такой продукции, синоптики многочисленных оперативных прогностических организаций составляют локальные прогнозы погоды, т. е. определяют конкретные значения метеорологических величин и развитие явлений погоды для заданного пункта или территории

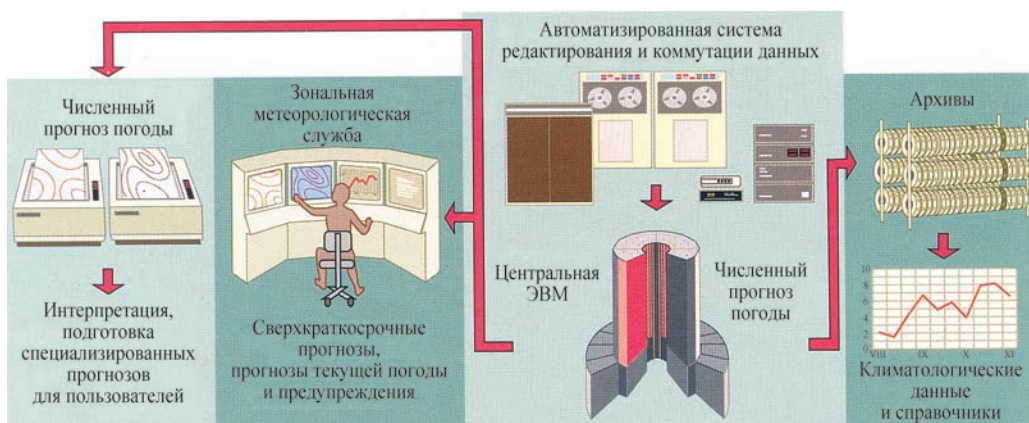


Рис. 11. Оперативные функции метеорологического центра.

на каждый конкретный день. Иначе говоря, произошел переход от децентрализованной системы прогнозирования к централизации ее основы – прогноза метеорологических полей. А поскольку эти прогнозы рассчитываются по глобальным моделям общей циркуляции атмосферы, то такую централизацию можно назвать также и глобализацией. Слова «глобализация» в данном случае бояться не следует, так как создание таких глобальных метеорологических центров под силу многим странам, хотя для их постоянного функционирования и требуются значительные затраты и наличие высококвалифицированных специалистов. Такие метеорологические центры, подобно промышленным комбинатам, выпускают продукцию, используемую более мелкими организациями, так же как, к примеру, продукцию металлургического комбината используют для изготовления каких-либо изделий на заводах и фабриках. Поэтому выражение «прогностическая индустрия» вполне соответствует действительности. Конечно, такие центры существуют только в развитых странах (США, Австралия, Англия, Франция, Россия, Япония, Китай, Германия) или же финансируются совместными усилиями ряда стран на кооперативной основе, например Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды в Рединге (Англия). В России функции такого центра выполняет Гидрометцентр России совместно с Главным радиометцентром и Главным вычислительным центром Росгидромета (рис. 12—14).

Естественно, что, как и промышленным комбинатам, метеорологичес-



Рис. 12. Здание Гидрометцентра России.

ким центрам нужно «сырье» для выпуска продукции. Сырьем в данном случае являются данные круглосуточных метеорологических наблюдений за погодой и о вертикальном строении тропосферы и стратосферы. Численное прогнозирование доказало на практике, что для предвычисления погодообразующих процессов на срок более 2—3 дней необходимо иметь данные



Рис. 13. Директор Гидрометцентра России Р. М. Вильфанд.



Рис. 14. Проф. А. А. Васильев (слева) на конференции метеорологов.

наблюдений со всего земного шара. Дело в том, что из-за постоянного движения атмосферы изменения погоды, происходящие в день прогноза даже в сильно отдаленной точке планеты, на четвертые или пятые сутки могут оказать влияние на состояние погоды, например, в Москве или Вашингтоне. Именно по этой причине ученые и создавали глобальные модели общей циркуляции атмосферы.

Даже при составлении прогноза на сутки необходимы данные наблюдений по крайней мере в радиусе 1,5—2 тысячи километров. Практически метеорологическая служба любой страны для составления прогноза ежедневно использует данные наблюдений не только над своей территорией, но и над территорией других стран: поистине «погода не знает границ». Этим и определяется столь длительное и успешное международное сотрудничество в области метеорологии. Благодаря этому сотрудничеству в прогностические

«комбинаты» непрерывным потоком поступает метеорологическое «сырье», в результате переработки которого любая страна получает необходимую ей продукцию для составления прогнозов по своей территории. При этом обмен осуществляется бесплатно!

Процесс сбора огромного объема данных наблюдений и обмен этими данными и продукцией первого уровня происходит с использованием современных средств телекоммуникации, а наблюдения проводятся по единым стандартам и в единые сроки.

Центры «прогностической индустрии» обладают, как правило, также мощным научным потенциалом, что позволяет постоянно совершенствовать модели, разрабатывать новые методы прогнозирования и после проведения испытаний быстро внедрять их в производственный процесс. Кроме того, эти центры одновременно могут выполнять функции региональной и национальной оперативной прогностической организации, осуществлять централизованное обеспечение информацией и прогнозами органы исполнительной власти и т. д.

Так, в Гидрометцентре России, головной организации Росгидромета в сфере прогнозирования погоды, выполняются как научные исследования, так и весь оперативный цикл подготовки прогнозов (рис. 15). Это подготовка численных прогнозов по глобальной модели общей циркуляции атмосферы на суперЭВМ, функционирование технологических линий по составлению прогнозов для полетов воздушных судов по трассам, по обеспечению морской деятельности, составлению агро-

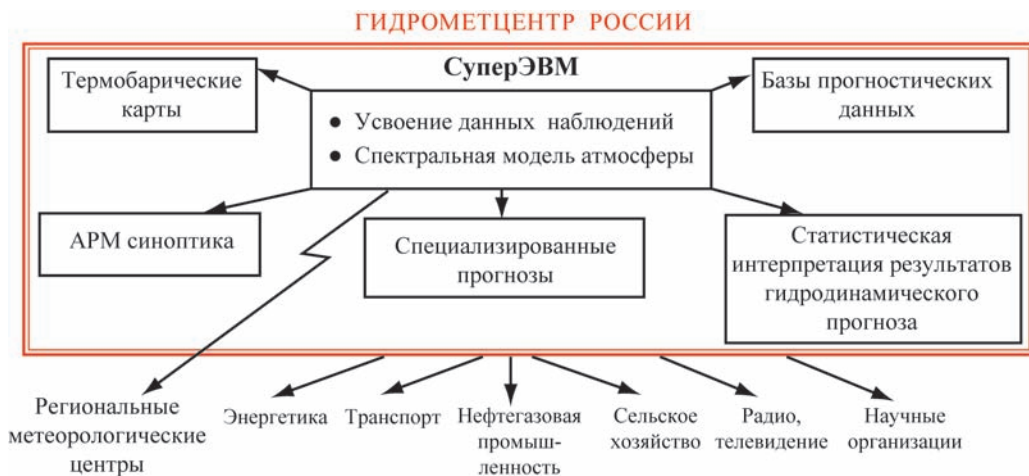


Рис. 15. Оперативный цикл подготовки прогнозов в Гидрометцентре России.

метеорологических и гидрологических прогнозов, прогнозов зон опасных явлений погоды и др.

Всемирная служба погоды

Вполне понятно, что оперативное функционирование такой сложной международной и вместе с тем национальной прогностической инфраструктуры требует серьезной координации ее деятельности. Такая координация осуществляется с помощью программы «Всемирная служба погоды» (ВСП). Именно ВСП обеспечивает взаимодействие между национальными метеорологическими центрами стран, входящих в состав ВМО. Программа ВСП была принята в 1963 г. на 4-м Всемирном метеорологическом конгрессе. Ее проект был подготовлен по поручению Генеральной Ассамблеи ООН и связан с мирным использованием космического пространства. Разработку программы осуществляла группа экспертов из стран, имевших в то

время на орбите искусственные спутники Земли, — СССР и США. В группу входили академик В. А. Бугаев, доктор Г. Векслер и его помощник М. А. Алака. Программа предусматривала организацию трех мировых и ряда региональных метеорологических центров, в обязанности которых входило предоставление данных наблюдений и карт погоды любой национальной метеорологической службе. Мировые метеорологические центры были созданы в Москве, Вашингтоне и Мельбурне. В программе были отмечены три области, требующие обеспечения постоянного функционирования и развития для выполнения задач ВСП:

1) Глобальная система наблюдений (ГСН) (рис. 16, 17), состоящая из наземной и космической подсистем;

2) Глобальная система обработки данных (ГСОД), позволяющая осуществлять и развивать прогнозирование погоды с использованием высокоскоростной вычислительной техники;

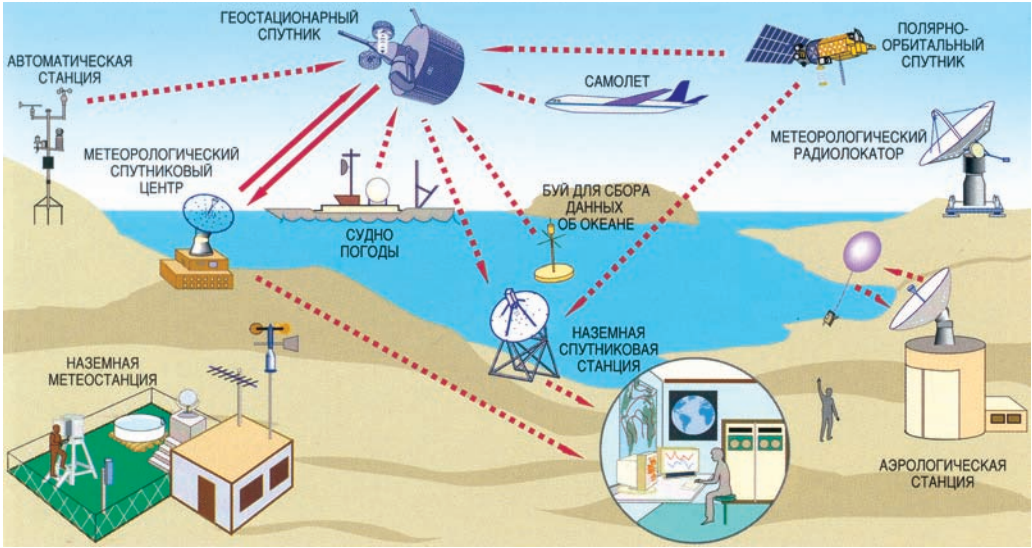


Рис. 16. Глобальная система наблюдений ВМО.

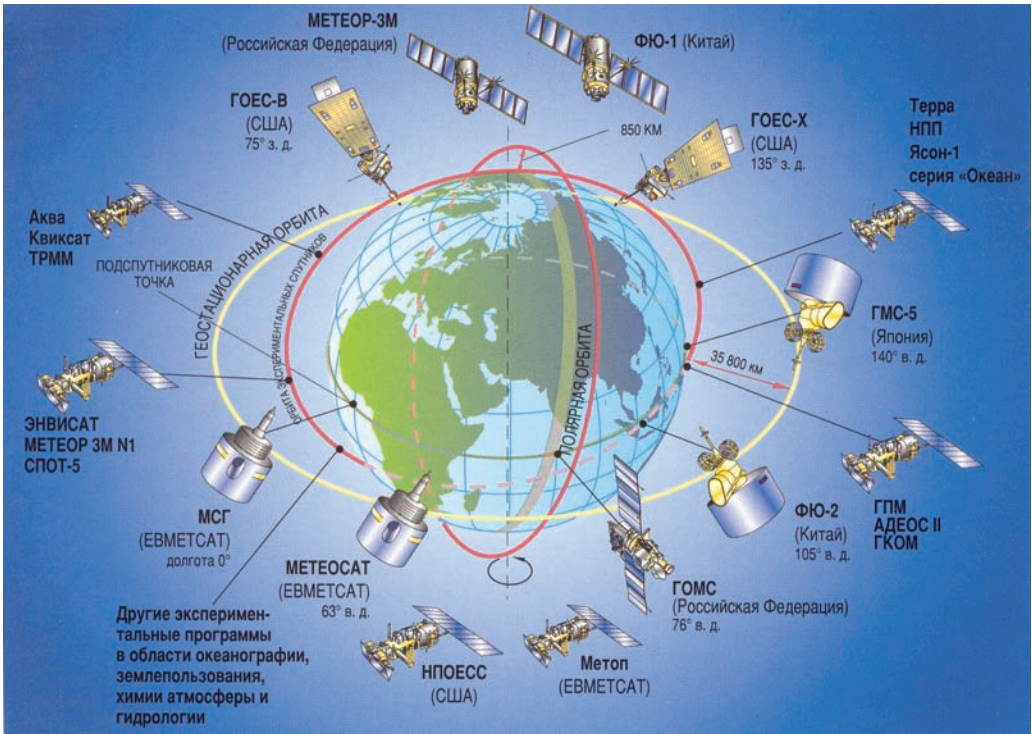


Рис. 17. Космические компоненты Глобальной системы наблюдений ВМО.

3) Глобальная система телесвязи (ГСТ) (рис. 18), обеспечивающая быстрый обмен данными наблюдений, анализами и прогнозами погоды по каналам связи.

Жизнеспособность Всемирной службы погоды доказала правильность научного и политического предвидения ее основателей. Развитие указанных систем шло необычайно быстро, с использованием новейших достижений в различных сферах науки и технологий.

Глобальная система наблюдений стала комплексной. Метеорологические спутники, принадлежащие теперь уже не двум, а многим странам, отслеживают явления погоды, изменения в растительном покрове, пространственное распределение льда и снега, водяного пара, измеряют температуру

и ветер. Наземная подсистема наблюдений получила новые средства непрерывного слежения за погодой — метеорологические радиолокаторы, морские буи, автоматизированные устройства для измерения температуры и ветра на рейсовых самолетах, профиломеры и др. Современная технология, а также Интернет позволяют обеспечивать более быстрое распространение данных наблюдений, прогнозов и предупреждений по ГСТ.

Глобальная система обработки данных (в настоящее время Глобальная система обработки данных и прогнозирования) включает в себя гораздо больше региональных, а также специализированных центров, отвечающих за подготовку отдельных видов прогнозов. Глобальные прогнозы крупных погодных систем составляются не только в

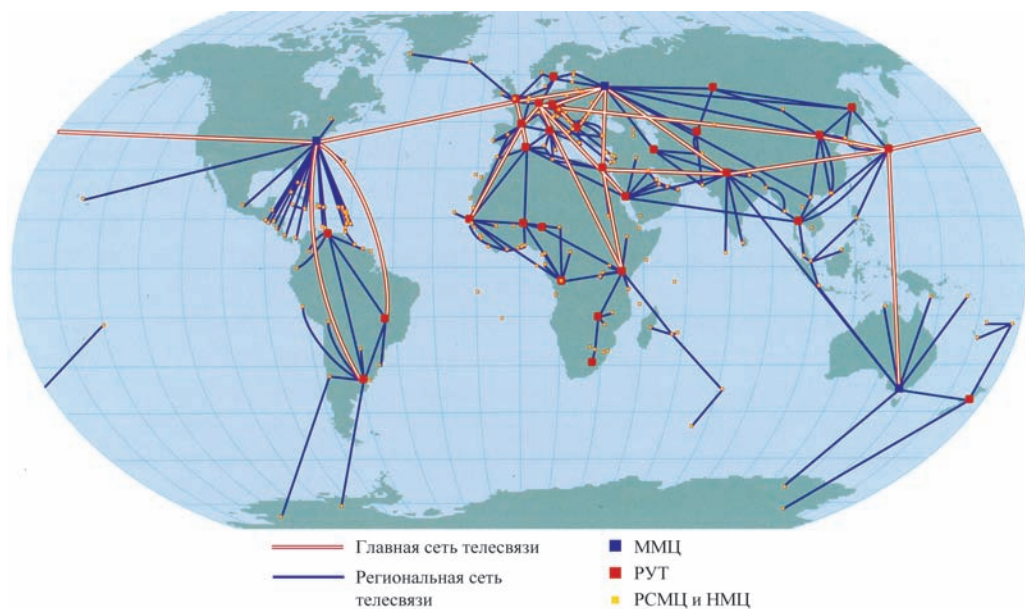


Рис. 18. Глобальная система телесвязи ВМО.

ММЦ — Мировой метеорологический центр, РУТ — Региональный узел телесвязи, РСМЦ — Региональный специализированный метеорологический центр, НМЦ — Национальный метеорологический центр.



Рис. 19. Руководитель Росгидромета А. И. Бедрицкий (президент ВМО) открывает Международную конференцию по проблемам гидрометеорологической безопасности, Москва, 26—29 октября 2006 г.

мировых метеорологических центрах, но и в ряде других.

Вполне естественно, что на пути этого развития встречались и встречаются проблемы. Одной из таких проблем, влияющих на деятельность почти каждой национальной метеорологической службы, является возможное ограничение бесплатного обмена данными и продукцией. Коммерциализация составления прогнозов, т. е. выпуск их негосударственными структурами на основе продукции прогностической индустрии, также время от времени вызывает дискуссию. Однако все эти проблемы успешно преодолеваются. ВСП по-прежнему обеспечивает свободный и неограниченный обмен основными метеорологическими и сопутствующими им данными об окружающей среде и прогностической продукцией, необходимой для обслуживания экономики и безопасности населения на национальном, региональном и глобальном уровнях.

Российские ученые внесли весомый вклад в развитие как ВСП, так и

ВМО в целом. Мы не будем перечислять их имена, такое перечисление заняло бы слишком много места. Отметим лишь, что вторым президентом Международной метеорологической организации был избран в 1879 г. профессор Г. И. Вильд — директор Главной физической обсерватории в г. Санкт-Петербурге. Вице-президентами ВМО неоднократно избирались академики Е. К. Федоров и Ю. А. Израэль, а в 2003 и 2007 гг. на пост президента ВМО был избран Руководитель Росгидромета А. И. Бедрицкий (рис. 19).

Гидродинамические модели общей циркуляции

Общая характеристика

Как известно, впервые подход к решению проблемы гидродинамического прогноза был реализован в СССР в 1940 г. И. А. Кибелем. Однако оперативно применять гидродинамические модели стало возможным только после появления электронно-вычислитель-

ных машин. В 1946 г. Д. Нейман предложил использовать простейшую из всех моделей — однослойную, или баротропную модель. Первый эксперимент с этой моделью дал неплохие результаты. Однако такая модель оказалась неспособной предсказывать образование новых циклонов, с которыми, как правило, и связаны резкие изменения погоды. Реальная атмосфера, как уже упоминалось, является бароклиникой (многослойной) средой. Поэтому в дальнейшем, по мере увеличения быстродействия ЭВМ, стали разрабатываться многоуровневые (по высоте) модели.

Оперативные модели различаются по своим характеристикам, по применяемым численным процедурам и выходным параметрам. В зависимости от горизонтальных размеров области прогноза их делят на глобальные, полусферные, региональные и модели по ограниченной территории (или мезомасштабные). Модели также имеют неодинаковое разрешение по высоте и различаются видом численного интегрирования. Поля метеорологических величин для составления прогнозов рассчитываются в точках регулярной сетки либо используется спектральное представление некоторых величин. При спектральном представлении атмосферные волны вокруг земного шара делятся на серии составляющих волн различной длины.

В современных глобальных моделях расстояние между точками регулярной сетки — до 60 км и менее, а спектральные модели используют от 80 до 1000 волн для описания процессов в ат-

мосфере. По вертикали используют 30 и более уровней, вблизи земной поверхности уровни располагаются чаще, что позволяет более точно воспроизводить суточный ход температуры воздуха.

В качестве вертикальной координаты используют высоту над средним уровнем моря, давление или так называемую сигма-координату, представляющую собой отношение давления на данном уровне к давлению у поверхности Земли. Сигма-координата позволяет хорошо отображать рельеф поверхности. В некоторых моделях применяется также смешанная координата (гибридная), когда в тропосфере используется сигма-координата, а выше, где влияние рельефа незначительно, координата давления. Региональные и мезомасштабные модели имеют гораздо большее разрешение и в качестве граничных условий на краях сетки используют результаты, полученные по глобальной модели.

Каждая модель состоит из двух основных частей: динамической (решения уравнений) и физической, заключающейся в так называемой параметризации, т. е. в приближенном описании процессов, которые не могут быть точно математически воспроизведены. Крупные метеорологические центры имеют в своем арсенале обычно несколько моделей, как оперативных, так и исследовательских. Прежде чем внедрить модель в оперативную практику, она проходит испытания на качество и надежность.

Для решения сложных систем математических уравнений при гидродинамическом моделировании атмосферы

ры требуются самые мощные вычислительные машины, имеющие большие скорость и объем памяти (рис. 20).

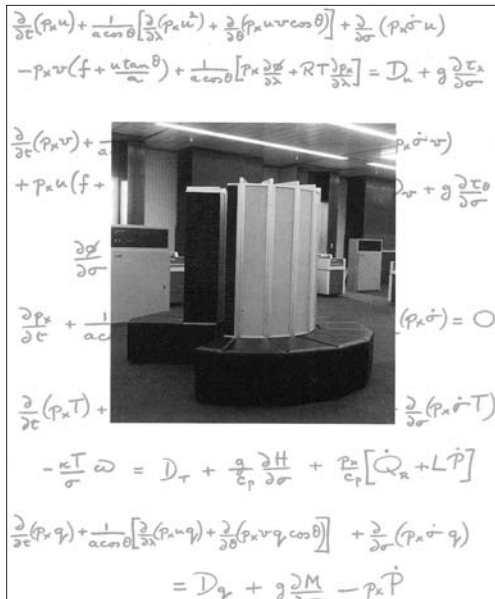


Рис. 20. Для решения сложных систем математических уравнений требуются мощные ЭВМ.

Динамическая часть

Система уравнений, определяющая поведение атмосферы, очень сложна и нелинейна. Для расчета прогноза необходимо решить следующие основные уравнения:

— состояния сухого воздуха, определяющего соотношение между давлением, плотностью и температурой воздуха;

— горизонтального движения воздуха, определяющего характер изменения ветра в зависимости от градиента давления, силы трения и силы Кориолиса, связанной со скоростью враще-

ния поверхности Земли и влияющей на атмосферу;

— гидростатики, описывающее соотношение между плотностью воздуха и изменением давления с высотой;

— термодинамики, которое определяет изменение температуры в поднимающемся воздухе, нагрев солнечной радиацией, турбулентный обмен и др.;

— непрерывности для сухого воздуха, позволяющее определить вертикальную скорость и изменения давления у поверхности Земли;

— непрерывности для влажности, которое учитывает, что содержание влаги в объеме воздуха остается постоянным, за исключением потери ее вследствие выпадения осадков и конденсации.

Поскольку не существует общепринятых аналитических методов решения нелинейной системы уравнений, используются численные, т. е. приближенные методы, обычно метод конечных разностей во времени и в пространстве. Иначе говоря, модель вычисляет тенденцию прогнозируемых величин на основе введенного в модель текущего состояния атмосферы, полученного на основании анализа данных метеорологических наблюдений. Эта тенденция или прогностические значения величин вычисляются через достаточно короткий промежуток времени, например через 10 мин.

Полученные новые значения величин используются для расчета на следующий 10-минутный интервал. Такая процедура повторяется до тех пор, пока

не будут получены значения прогнозируемых величин на весь срок прогноза. Чем больше выбранный временной интервал (шаг по времени), тем меньше количество расчетных процедур и меньше времени (машинного) затрачивается на вычисления. Однако при слишком больших шагах по времени появляется нестабильность в расчетах. Теоретически шаг по времени должен быть меньше времени перемещения воздуха от одной точки расчета до другой.

Физическая часть

Глобальные и региональные модели общей циркуляции должны прежде всего правильно воспроизводить крупномасштабные процессы, существующие длительное время. В то же время физические процессы более мелкого масштаба также очень важны. Однако учет таких процессов, масштаб которых меньше шага сетки, значительно усложняет расчеты и требует очень много машинного времени. Во избежание этого такие процессы учитываются с помощью процедуры, получившей название параметризации, когда значения величин процессов мелкого масштаба используются только в точках сетки, где эти значения известны.

Современные численные модели обычно включают в себя параметризацию следующих наиболее важных процессов.

1. Планетарный пограничный слой. Это самый низкий слой атмосферы (1—1,5 км), играющий фундаментальную роль в системе Земля—

атмосфера. Он нагревает атмосферу, насыщает ее влагой. Воздух в нем перемещается над неровными поверхностями суши или над ровными, но влажными поверхностями морей и океанов. Для определения параметров пограничного слоя используются значения ветра, температуры и влажности в предположении, что перенос турбулентности, тепла и влаги происходит пропорционально их вертикальным градиентам.

2. Характеристики подстилающей поверхности. Растительность, снежный покров, морские льды, отражательная способность и шероховатость поверхности оказывают значительное влияние на потоки тепла и влаги. Их учет осуществляется на основании данных о плотности снежного покрова, температуре и влажности почвы.

3. Орография. Рельеф земной поверхности, особенно горные препятствия, вызывает деформацию потока, а также ее термический нагрев. Осреднение высоты рельефа между точками сетки может привести к большим ошибкам при прогнозе. В моделях учитывается рельеф с разрешением примерно 1 км.

4. Температура поверхности моря. Анализ температуры поверхности моря базируется на данных измерений морских судов, буев и спутниковых наблюдений. Обычно этот анализ достаточно точный, однако в некоторых частях Мирового океана в холодные сезоны происходят быстрые изменения температуры. Кроме того, во многих частях океана данные наблюдений отсутствуют. Вследствие этого в моде-

ли атмосферы желательны вводить обновленные данные.

5. Конвекция. При конвективных процессах тепло и влага от поверхности Земли переносятся в атмосферу. Для учета конвективных движений определяется степень устойчивости воздуха в каждой точке сетки. Существует целый ряд методов, позволяющих учесть степень развития конвективных явлений.

6. Облачность. В любой период наблюдения примерно половина земной поверхности покрыта облаками. Они отражают примерно 20 % солнечной радиации, поступающей к Земле, и поглощают 2—3 %. Значительная часть тепла, излучаемого поверхностью Земли, не может проникнуть сквозь облачность и поглощается ею.

Поэтому очень важно учесть воздействие облачности на процесс излучения. Радиационные характеристики облачности зависят от количества и типа облаков. Поэтому во многих моделях для учета процессов, связанных с облачностью, в каждой точке определяется количество облаков и их оптическая толщина с использованием количества и типа сконденсированной влаги. В других случаях параметры облачности определяют с помощью эмпирических связей. В некоторых моделях параметризуется также гидрологический цикл, влияние морского льда, солнечной радиации и др. На рис. 21 схематично показаны физические процессы, обычно параметризуемые в глобальной гидродинамической модели.

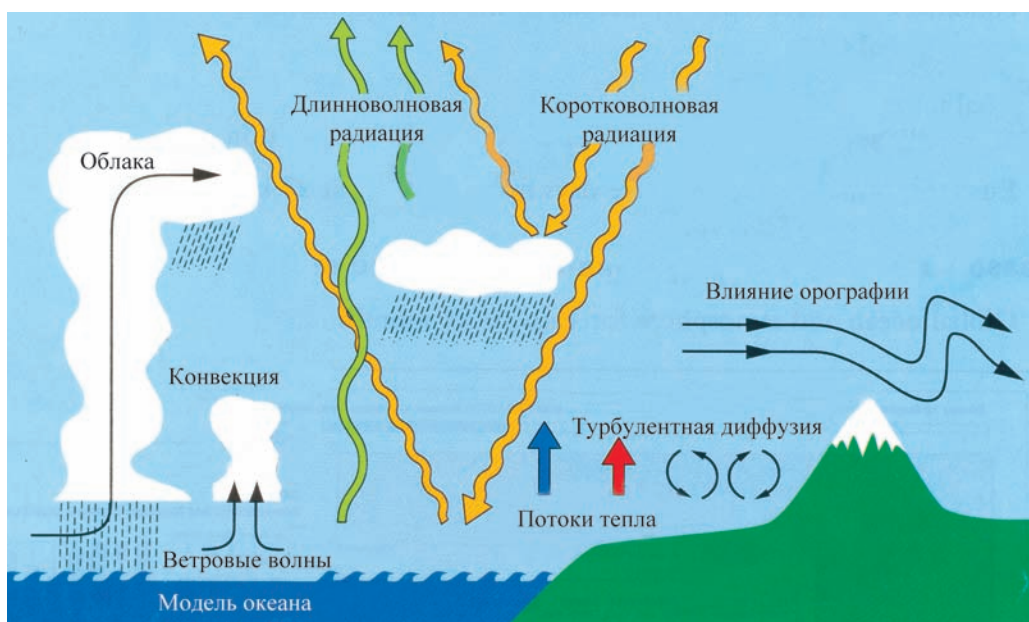


Рис. 21. Физические процессы, учитываемые современными глобальными моделями (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды — ЕЦСПП).

Основные функции автоматизированной технологии численного прогноза

Технологические линии

Оперативные технологические линии численного прогноза уникальны. Их нельзя купить на рынке, их нужно создать. Они зависят от особенностей используемых моделей, их математической сложности, информационного и программного обеспечения, а также конфигурации и мощности вычислительной техники. Поэтому в каждом метеорологическом центре существует своя технология выпуска прогнозов.

Вместе с тем в любой автоматизированной системе численного прогноза можно выделить функции, свойственные всем существующим системам (рис. 22). К этим функциям относятся:

- сбор данных наблюдений — распознавание метеорологических сводок и архивация;
- формирование базы данных — декодирование сводок, контроль их качества и подготовка для проведения анализа;

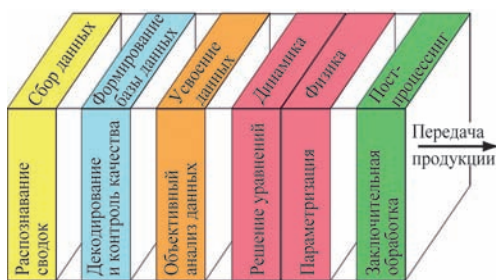


Рис. 22. Технологические циклы гидродинамической модели.

— усвоение данных, включая их объективный анализ;

— прогноз с помощью гидродинамической модели;

— заключительная обработка выходной прогностической продукции — постпроцессинг.

Сбор данных

Система сбора данных наблюдений обеспечивает информационным сырьем оперативную деятельность метеорологических центров по подготовке анализов текущего состояния атмосферы и ее прогноза, проведение оперативных испытаний моделей и их развитие, а также архивацию данных для различных целей. Метеорологические центры, выполняющие функции мировых и региональных центров, должны иметь автоматизированную систему сбора данных. Такая система представляет собой непрерывный процесс, в котором определены область сбора данных, время их поступления и отсекация. После отсекация поступившие данные используются в последующих циклах усвоения.

Формирование базы данных

Процедуры подготовки базы данных включают в себя сбор метеорологических сводок. Поскольку эти сводки содержат данные, закодированные в различные кодовые формы, осуществляют их раскодирование. Проводится также контроль качества данных и исправление ошибок, а также сортировка и сведение их в специальные форматы. Конечной продукцией этого процесса является база скорректированных дан-

ных наблюдений за определенный синоптический срок или за определенный период, например в течение нескольких часов до и после установленного ВМО срока наблюдений. В ЭВМ эти данные формируются в группы в соответствии с целями и масштабом деятельности центра объективного анализа за данных.

Усвоение данных и объективный анализ

Как уже отмечалось, для точного прогноза очень важно знать точную погоду над всем земным шаром. Огромное число данных, поступающих в метеорологический центр, периодически или непрерывно усваивается моделью и преобразуется в трехмерную структуру, отображающую реальное состояние атмосферы, называемое анализом. Такой автоматизированный анализ, в отличие от ручного, или субъективного, анализа, выполняемого ранее, называют объективным. В результате объективного анализа метеорологические данные, полученные от различных наблюдательных систем, преобразуются в данные в узлах (точках) регулярной сетки и используются в дальнейшем как для анализа текущих метеорологи-

ческих условий, так и в качестве начальных данных для предвычисления погоды (прогноза). Процесс проведения объективного анализа очень сложен, поскольку в мире много мест, где метеорологические наблюдения отсутствуют (океаны, тропические и полярные области). Кроме того, точность данных наблюдений, получаемых из различных источников, неодинакова.

В первых схемах объективного анализа использовались только данные непосредственных измерений, а там, где они отсутствовали, проводилась их интерполяция с помощью различных методик. В современных моделях используется метод анализа, получивший название вариационного. Суть этого метода состоит в совместном использовании данных, предвычисленных моделью на срок анализа, и результатов фактических наблюдений.

Практически анализ осуществляется посредством регулярной коррекции краткосрочного прогноза за счет вновь полученных данных (рис. 23). В этом случае в тех районах, в которых данные отсутствуют, пустые места заполняются прогностическими данными. Вариационное усвоение данных включает в себя два этапа. На первом

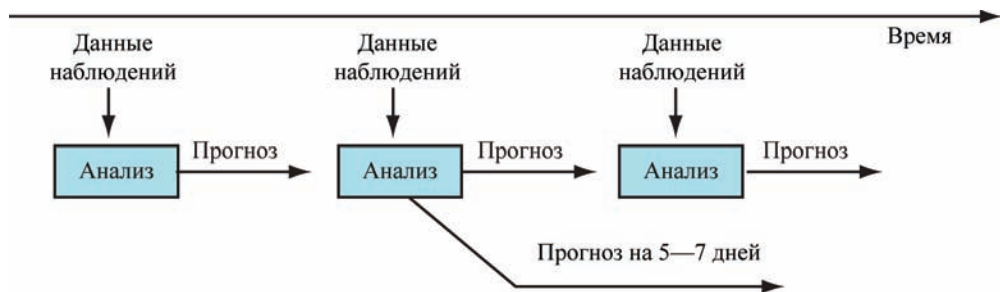


Рис. 23. Схема объективного анализа данных метеорологических наблюдений.

этапе вычисляются прогностические значения метеорологических величин для каждой станции, которая проводит наблюдения (например, для станции, осуществляющей радиозондирование атмосферы). После этого вычисляются разности между спрогнозированными и фактически наблюдаемыми на станциях значениями величины. Затем эти разности (отклонения) сравниваются с заранее установленной точностью модельных данных и данных наблюдений. Этот, второй, этап называется вариационным. Если, например, заранее известно, что какая-либо станция имеет большие ошибки, ей придается меньший вес, и для анализа принимаются данные, предвычисленные моделью. Если известно, что наблюдения надежны и репрезентативны, за основу берутся данные наблюдений на станции. Такой анализ позволяет более точно отображать фактическое состояние атмосферы в тех районах, в которых наблюдения отсутствуют, а также оценивать качество данных наблюдений и ошибки в прогнозе полей первого приближения.

Усвоение данных при вариационном анализе может быть трехмерным и четырехмерным. При трехмерном усвоении данные анализируются с учетом пространства (широты, долготы и высоты) в фиксированное время, обычно до начала счета на модели. Четырехмерный анализ учитывает изменение метеоро-

величин не только в пространстве, но и во времени, т. е. данные в модель могут вводиться в любое время по мере их поступления.

Прогноз и заключительная обработка продукции

После предвычисления моделью метеорологических полей осуществляется заключительная обработка полученных данных, называемых выходными данными модели. Она включает в себя подготовку и выдачу данных объективного анализа и прогноза в цифровой (в виде бюллетеней) или графической (в виде карт) форме. В крупных метеорологических центрах ежедневно составляется несколько тысяч бюллетеней в сутки. Эти бюллетени обычно кодируются в центральном процессоре и затем поступают на передачу и хранение в компьютер связи. При обмене данными используются различные коды, принятые ВМО. В соответствии со стандартными процедурами ВМО процесс преобразования выходной продукции численных моделей из цифровой формы в графическую должен осуществляться в национальных метеорологических центрах (НМЦ). В тех случаях, когда национальный центр не имеет соответствующего оборудования, это должен делать региональный метеорологический центр (РМЦ) и передавать результаты в национальный.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ ЛОКАЛЬНОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ

Оперативные прогностические организации

Локальный прогноз погоды составляется специалистами — синоптиками оперативных прогностических организаций (в России — специалистами Росгидромета), расположенных в городах и районах, где необходимо обслуживать различные отрасли экономики (аэродромы, морские порты и т. д.).

Успехи в численном прогнозировании сказались на увеличении качества и заблаговременности локальных прогнозов. Этому способствовало также внедрение новых средств наблюдений за явлениями погоды и измерений метеорологических переменных, современных средств связи и разработка более совершенных методов анализа и прогноза погоды. Все это привело к тому, что в настоящее время локальные прогнозы на третьи сутки успешнее, чем прогнозы на сутки 30 — 40 лет назад.

Прогностические организации имеют в той или иной форме постоянный доступ к выходной продукции метеорологических центров или по крайней мере одного из них. Основываясь на этой продукции и используя дополнительную информацию о состоянии

атмосферы, разработанные методики прогноза, а также свои теоретические знания и опыт, специалисты составляют прогноз погоды и обслуживают потребителей.

Технология подготовки таких прогнозов схематически представлена на рис. 24.



Рис. 24. Технологическая схема подготовки прогноза погоды по пункту, району, территории.

Из рисунка видно, что она включает в себя два основных этапа:

1) определение характера синоптических процессов на период прогноза;

2) определение значений метеорологических величин и явлений погоды.

Рассмотрим их более подробно.

Определение характера синоптических процессов

Мониторинг метеорологических условий

Непрерывное слежение за метеорологическими условиями (мониторинг) над территорией прогноза необходимо для определения каких-либо признаков изменения погоды и особенно признаков развития опасных явлений погоды. Процесс мониторинга включает в себя постоянный комплексный обзор всей информации, поступающей как от средств наблюдений, так и от других прогностических подразделений. Оперативный мониторинг явлений погоды и оценку возможности их дальнейшего развития часто называют прогнозом текущей погоды. Такой прогноз подразумевает наличие в районе прогноза более плотной сети наблюдений или специальных наблюдательных систем, используемых в дополнение к общим метеорологическим данным.

Анализ карт погоды

Анализ приземных карт погоды включает в себя построение поля давления и проведение атмосферных фронтов (рис. 25). Построение поля давления осуществляется путем проведения ли-

ний равного давления (изобар) с последующим выделением синоптических образований (циклонов, антициклонов, гребней, ложбин и др.). Проведение фронтов связывается со свойствами воздушных масс. Большое значение при анализе фронтов имеют температура воздуха, температура точки росы, облачность и видимость. Полезным является анализ поля относительной барической топографии слоя 500—1000 гПа, поскольку он выявляет среднюю температуру атмосферы ниже 500 гПа (рис. 26). В ходе анализа используются несколько последовательных карт погоды, относящихся к предыдущим срокам. Для определения факта прохождения фронта через конкретную синоптичес-

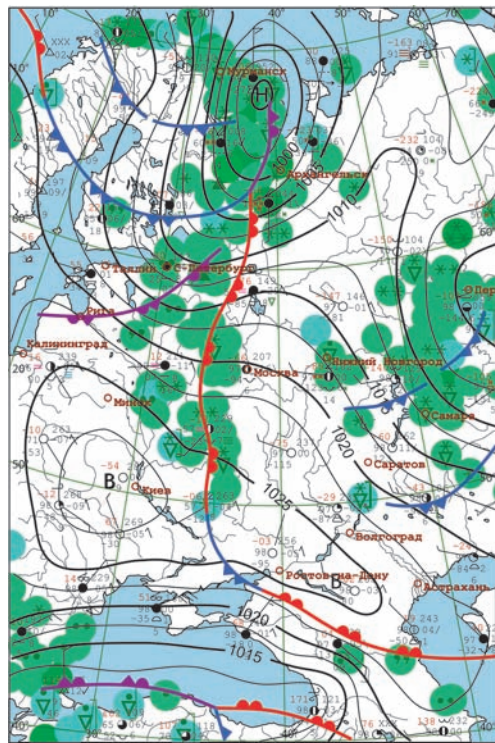


Рис. 25. Приземная карта погоды за 19 ноября 2007 г.

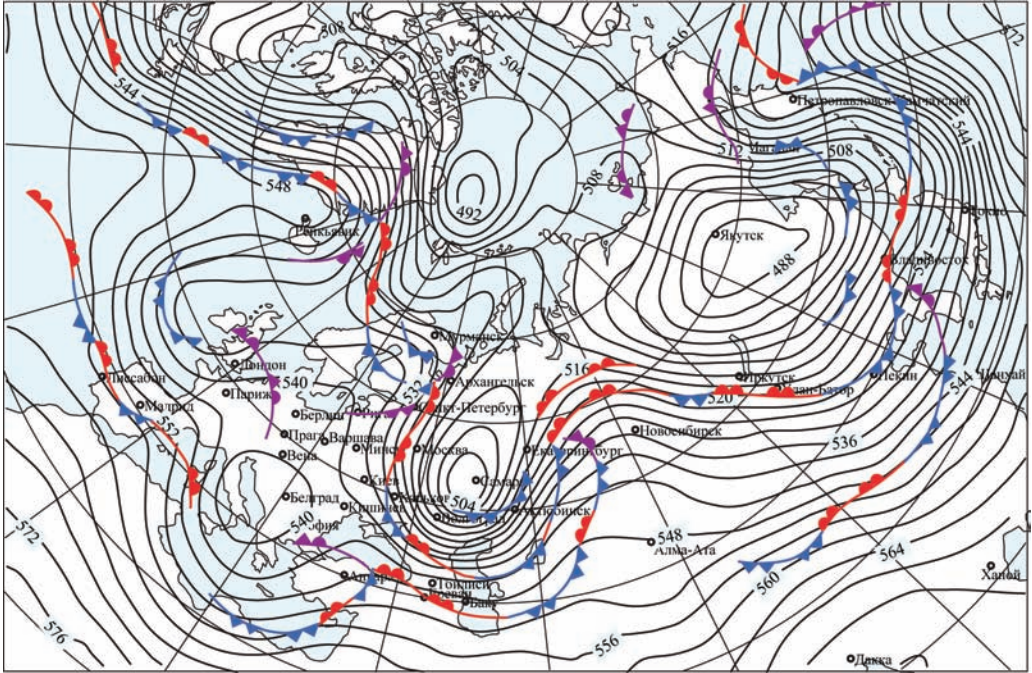


Рис. 26. Карта относительной барической топографии слоя 500—1000 гПа.

кую станцию полезно сопоставлять наблюдения через 24 ч — в этом случае устраняется влияние суточного хода.

При необходимости строится прогностическая карта погоды на основании предвычисленного поля давления, полученного из метеорологического центра.

Аэрологический анализ

Аэрологический анализ основывается на объективном анализе полей геопотенциала, ветра, температуры и влажности на картах барической топографии, получаемых в результате работы системы усвоения данных и передаваемых из метеорологических центров. В случаях, когда такие данные отсутствуют, можно проводить ручной анализ.

Важным видом аэрологического анализа является анализ струйных течений и карт тропопаузы, а также анализ данных радиозондирования, нанесенных на аэрологическую диаграмму. Используется также построение траекторий воздушных частиц и другие виды операций.

Анализ данных с искусственных спутников Земли

Со спутников поступает значительное количество информации, и ее анализ является неотъемлемой частью любых методик прогноза. Спутниковые данные позволяют следить за перемещением и развитием фронтальных систем, скоплений облаков, зон тумана, за подветренными волнами и другими опасными явлениями.

Существует два типа спутников, формирующих космическую подсистему наблюдений, — полярно-орбитальные и геостационарные (см. рис. 17).

Полярно-орбитальные спутники совершают оборот вокруг земного шара примерно за 100 мин на высоте около 800 км. Они проходят над одним и тем же пунктом у поверхности Земли лишь два раза в сутки, но охватывают экваториальные и полярные районы с одинаковым разрешением.

Геостационарные спутники висят над одной и той же точкой на высоте 36 000 км и каждые 30 мин передают обновленные изображения. Недостаток их заключается в том, что они дают искаженное изображение районов, находящихся к северу и к югу от субтропиков. Эти спутники часто используются

в качестве ретранслятора для сбора и передачи данных наблюдений.

Спутники обеспечивают получение изображений облачности в видимом (0,4—1,1 мкм) и инфракрасном диапазонах (рис. 27). Комплексное рассмотрение двух типов снимков позволяет получить трехмерную структуру облаков. По спутниковым снимкам удается воссоздать общую картину пространственного распределения облачности и по ее характерным структурным особенностям определить довольно большое количество возмущений различного масштаба.

Анализ данных радиолокационных наблюдений

Информация, поступающая от метеорологических радиолокаторов, являет-

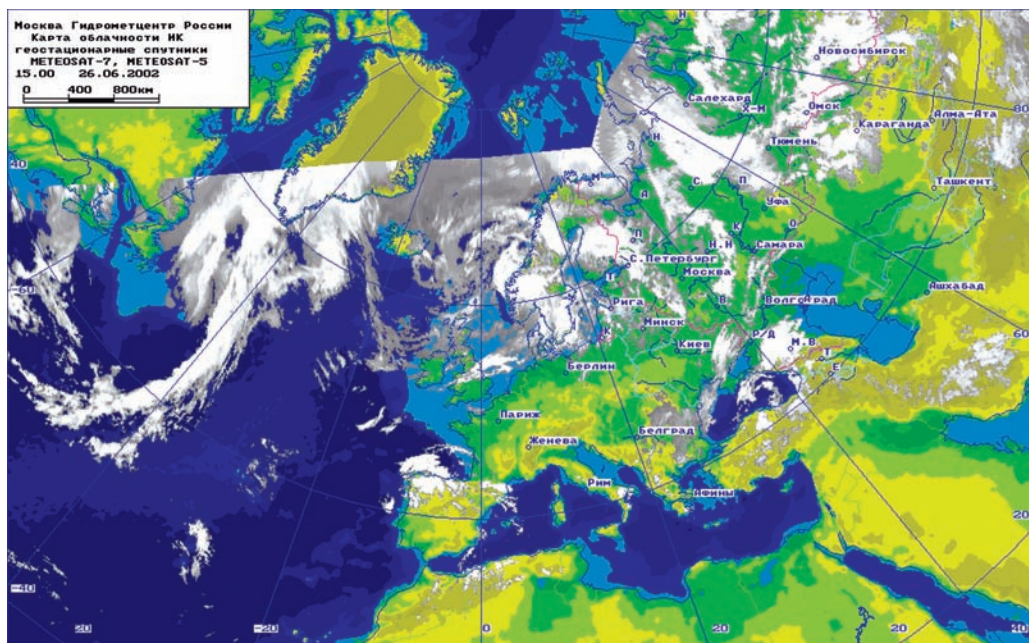


Рис. 27. Карта облачности в инфракрасном диапазоне (15 ч, 26 июня 2002 г.) (фото с геостационарных спутников МЕТЕОСАТ-7 и МЕТЕОСАТ-5).

ся важным дополнением к наблюдениям, осуществляемым на синоптической и аэрологической сетях, и предоставляет метеорологу возможность «заглянуть» за видимый горизонт. Радиолокационные измерения облачности и определение осадков основаны на отражении электромагнитных волн частицами, находящимися в воздухе. Мощность обратного отражения зависит от размеров частиц и веществ, из которых они состоят. Степень отражательной способности частиц, из которых состоят облака и осадки, характеризуется коэффициентом отражения. По величине радиолокационного эхосигнала, которая пропорциональна диаметру водяных капель и кристаллов льда, определяется тип облачности. Так, грозовые облака, которые содержат большие водяные капли, дают более яркое радиоэхо, чем слоистые, состоящие из капель сравнительно небольшого размера. Дождь обычно дает более яркий сигнал, чем снег. Таким образом, по величине радиоэха идентифицируются осадки, их интенсивность, грозы и другие явления.

С конца 70-х годов прошлого столетия для расширения зоны охвата используются сети радиолокаторов с автоматизированной обработкой данных на компьютерах. Такие системы позволяют создавать составные цветные изображения по результатам наблюдений, поступающим от нескольких радиолокаторов, а также объединять радиолокационные данные с информацией других типов, например со спутниковой.

Так, для обеспечения данными наблюдений системы сверхкраткосроч-

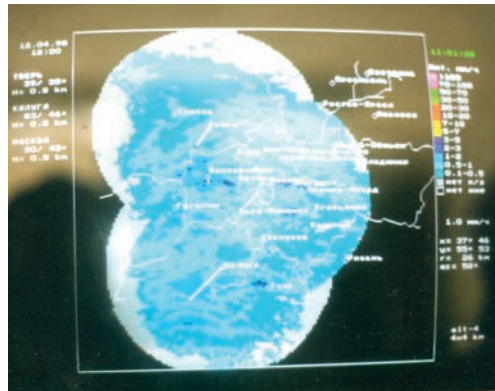


Рис. 28. Общий вид поля осадков, полученного с помощью системы АКСОПРИ в Московском регионе.

ного прогноза для Москвы и Московской области в Московском гидрометбюро используются автоматизированные комплексы сбора, обработки и передачи радиолокационной информации (АКСОПРИ), расположенные в Москве, Калуге, Твери, Нижнем Новгороде и Смоленске. Работа этих комплексов позволяет каждые 10 мин получать и анализировать поля облачности, осадков, а также связанные с ними явления погоды (рис. 28). В настоящее время устанавливаются метеорологические радиолокаторы с доплеровской приставкой, позволяющей определять ветровые характеристики.

Анализ данных дополнительных автоматизированных систем наблюдений

Кроме традиционных наблюдений, существуют данные измерений, поступающие от автоматизированных или экспериментальных систем наблюдений. К ним относятся, например, данные наблюдений, полученные с бортов рейс-

вых самолетов, грозоотметчиков, профиломеров и др. Если такие данные имеются в зоне ответственности прогностической организации, то они также привлекаются для анализа состояния атмосферы, но при этом тщательно проверяются в случае их использования при составлении прогноза. Особый интерес представляют наблюдения с воздушных судов за грозами и другими опасными явлениями погоды.

Анализ климатических данных

Анализ климатических данных позволяет определить вероятность развития явления, степень отклонения значений метеорологических величин от нормы, экстремальные пределы, выход за которые маловероятен, а также степень влияния местных условий на формирование мезомасштабных явлений погоды. Для прогнозирования представляют интерес данные о повторяемости осадков, гроз, туманов, скорости и направления ветра в различное время суток. Климатическая информация может использоваться также для контроля данных наблюдений.

Определение значений метеорологических величин и явлений погоды

Существующие возможности и ограничения

Проанализировав текущие синоптические процессы и зная из прогностических карт, полученных из метеорологического центра, тенденцию их дальнейшего развития, синоптик приступает непосредственно к прогнозу погоды.

Этот этап является самым трудным и ответственным. Трудность его обусловлена сложностью и многообразием причин, влияющих на процесс формирования того или иного явления и его интенсивность. Несмотря на большое количество прогностических методик, многие явления еще плохо изучены, а некоторые настолько небольшие по масштабу, что существующая сеть наблюдений их не фиксирует, хотя они развиваются и перемещаются между станциями. Кроме того, большинство рекомендованных к использованию методов не позволяют точно спрогнозировать время и место возникновения ряда атмосферных явлений. Они дают возможность определить лишь зоны, потенциально опасные для развития явлений погоды. В силу этих обстоятельств качество локального прогноза погоды определяется не только новыми научными и технологическими возможностями, но и знаниями, профессиональным опытом прогнозиста. Большое значение имеет коллективное обсуждение прогноза для достижения консенсуса в оценке текущих и будущих метеорологических условий.

В целом для определения конкретных значений метеорологических переменных и явлений погоды используются следующие прогностические технологии:

- синоптическая интерпретация развития атмосферных процессов;
- статистическая интерпретация выходных данных численных прогнозов;
- физико-статистические (объективные) методы прогноза;
- гидродинамические расчеты;

— концептуальные модели.

Как правило, для окончательной формулировки прогноза результаты, полученные по каждой из технологий, используются в комплексе, что позволяет свести к минимуму ошибку.

Синоптическая интерпретация

Под синоптической интерпретацией обычно понимают определение прогнозистом погоды в заданном пункте на основе комплексного анализа прогностического материала, анализа данных наблюдений и учета процессов, обуславливающих местные изменения погоды. Естественно, что точность прогнозирования при синоптической интерпретации зависит как от объективных факторов (полнота и качество имеющегося в распоряжении синоптика материала), так и от субъективных.

Тем не менее иногда такая интерпретация является единственно возможной для подготовки прогноза. В этой связи большое значение придается изучению прогнозистами региональных и локальных условий, влияющих на погоду. К ним относятся:

— влияние орографии на изменение ветра, облаков и осадков;

— суточные изменения ветра и температуры воздуха;

— развитие бризовой циркуляции и горно-долинных ветров;

— изменение интенсивности турбулентности и вертикального градиента температуры в зависимости от времени суток;

— усиление ветра над морем по сравнению с ветром над сушей при одном и том же барическом градиенте;

— понижение температуры воздуха и высоты нижней границы облачности по мере увеличения высоты над уровнем моря;

— тенденция развития гроз над определенными районами;

— увеличение повторяемости тумана в долинах рек и гор;

— влияние состояния почвы на развитие туманов и др.

Для правильного учета местных изменений погоды обычно устанавливают связи между характером синоптического процесса и соответствующими локальными изменениями метеорологических величин или явлений.

Статистическая интерпретация

Статистическая интерпретация основывается на определении статистических зависимостей между метеорологической величиной и параметрами, которые можно уверенно спрогнозировать с помощью численных моделей. При этом различают метод совершенного прогноза, в котором для определения коэффициентов схемы интерпретации используются фактические наблюдения, а продукция численных моделей полагается идеальной, и метод выходных данных моделей, когда уравнение интерпретации связывает результаты интегрирования моделей с фактическими метеорологическими величинами. При использовании этого метода исправляются систематические ошибки модели, однако при внесении крупных изменений в модель возникает необходимость обновления архива данных.

Статистическая обработка начинается с формирования комплекта данных наблюдений. Количественные связи между предикторами и элементами погоды сначала определяются на климатических данных, которые часто называют зависимой выборкой. Затем полученные уравнения проверяют на другом комплекте данных, называемом независимой выборкой. Эта процедура необходима, поскольку статистические методы всегда имеют лучшую оценку, если проверяются на комплекте данных, по которому они разработаны. Проверка на независимых данных дает более объективную оценку, соответствующую оперативному использованию метода. При этом очень важную роль играет величина выборки, поскольку использование небольшой выборки дает неустойчивый результат. Для метеорологических целей желательно, чтобы в каждой выборке было более 250 случаев. Использование климатических данных является как преимуществом, так и недостатком статистических методов. Преимущество заключается в использовании длинных рядов и устранении неточности модельных данных. Недостаток состоит в том, что полученные уравнения относятся к конкретному месту, в котором проводились наблюдения, поэтому их сложно применять для явлений, охватывающих большие пространства.

В целом при разработке статистического метода интерпретации проводятся следующие процедуры:

— определяется элемент погоды, для которого разрабатывается метод;

— определяется вид полей предикторов (фактические или прогностические), метод статистического анализа и производится выборка данных;

— определяются статистические зависимости;

— проверяются полученные уравнения на зависимых и независимых данных и на анализе отдельных случаев.

Выбор метода статистического анализа во многом определяется прогнозируемой метеорологической величиной. Наиболее распространен регрессивный анализ, который можно использовать для большинства метеорологических величин. Для прогноза явлений погоды более удобен дискриминантный анализ. Метод многовариантной линейной регрессии дает хорошие результаты при прогнозировании непрерывных метеорологических величин.

Методы статистической интерпретации выходных данных численных моделей широко используются для прогноза различных метеорологических величин. В Гидрометцентре России на основе таких методов осуществляется прогноз температуры воздуха и вероятности осадков для различных пунктов, а также прогноз зон активной конвекции для построения карт опасных для авиации явлений погоды.

Физико-статистические (объективные) методы прогноза

В распоряжении прогнозиста имеется целый набор объективных расчетных методов прогноза метеорологических величин и явлений погоды, позволяю-

ших провести расчеты либо самому, либо на персональной ЭВМ. Эти методы наряду с закономерностями развития атмосферных процессов учитывают региональные и даже локальные особенности. В настоящее время на основе расчетных методов осуществляется прогнозирование большей части явлений погоды с заблаговременностью 24—36 ч. Физические основы и порядок составления прогноза по каждому из них изложены в регламентирующих документах Росгидромета.

Гидродинамические расчеты

Гидродинамический прогноз локальной погоды требует применения мезомасштабных моделей атмосферы (моделей по ограниченной территории) (рис. 29). Как уже указывалось, физи-

ческая основа таких моделей подобна глобальным и региональным моделям, однако они имеют более высокие пространственные и временные разрешения и более детальные схемы параметризации. Важная роль при этом принадлежит качеству и детализации первоначальных данных наблюдений, а также качеству граничных данных, которые обычно берутся на основании расчетов, полученных по моделям более крупного масштаба. В настоящее время в оперативной практике ряда стран используются модели с шагом сетки от 10 до 50 км.

Гидродинамический прогноз локальной погоды в более крупном масштабе также возможен либо на основе интерполяции глобальных (региональных) прогностических полей метеоро-

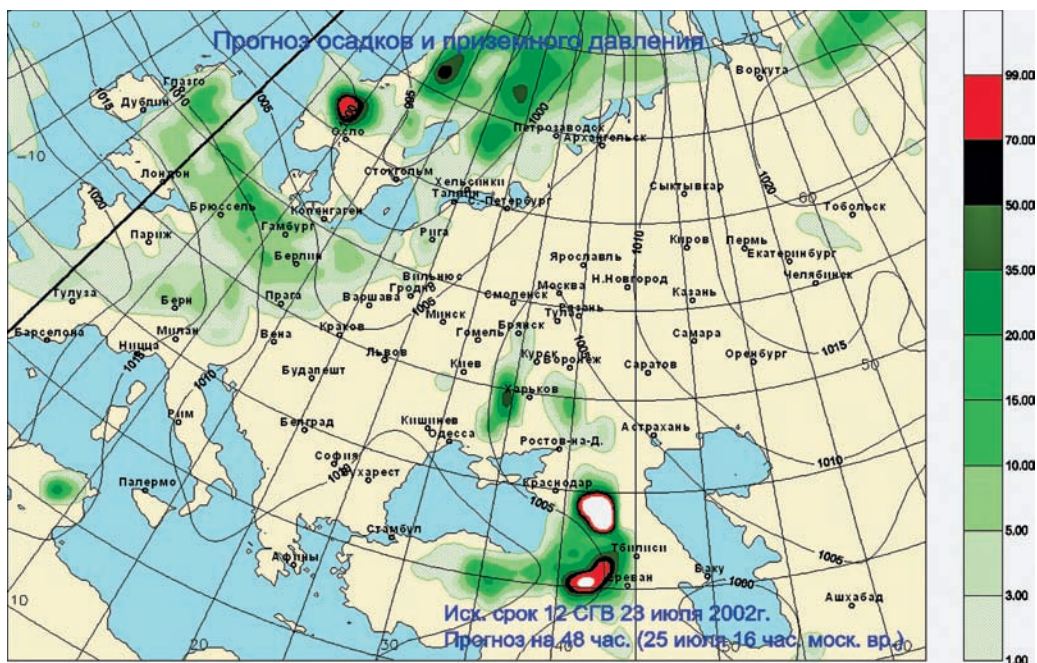


Рис. 29. Прогноз осадков и приземного давления на 48 ч, подготовленный на основании расчетов по численной модели Лосева.

логических величин, либо при использовании таких полей в сочетании с расчетами, произведенными на основе модели атмосферного пограничного слоя.

Концептуальные модели

Для определения вероятности развития опасных явлений, особенно тех, математическое моделирование которых на данном этапе развития науки невозможно, используются так называемые концептуальные модели, основанные на знании механизма образования, структуры и жизненного цикла прогнозируемого явления. Концептуальные модели формируются на основании комплексного изучения явления — экспериментальных, эмпирических данных и теоретических предположений. Так, знание концептуальной модели развития кучево-дождевого (грозового) облака (рис. 30), особенностей распределения вертикальных движений внутри облака и под ним, его жизненного цикла помогает правильно спрогнозировать

вероятность возникновения ливней и шквалов. При этом анализ дополнительной информации, в частности радиолокационных данных, позволяет уточнить развитие событий.

Рекомендуется также обобщать и систематизировать различные прогностические признаки, учитывающие местные климатические особенности. Например, траектория движения очень опасного явления — смерча — зависит от рельефа, наличия водоемов и других особенностей.

Хотя прогнозирование локальной погоды основывается на научном понимании атмосферы, оно не должно сводиться к академизму.

Использование автоматизированных рабочих мест прогнозиста

Автоматизация прогноза погоды часто воспринимается как средство замены человека в деятельности оперативной прогностической организации. Однако

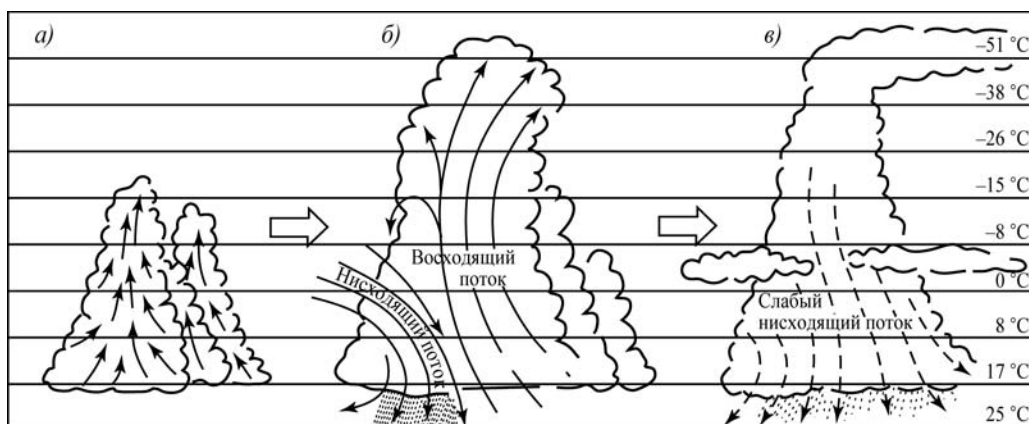


Рис. 30. Концептуальная модель жизненного цикла грозового облака.

а) стадия развития, б) стадия зрелости, в) стадия распада.

опыт показывает, что человек и машина вместе могут достигнуть гораздо лучших результатов, чем каждый в отдельности. Роль человека в современных технологиях прогнозирования зависит от типа прогностического центра и объема выпускаемой им прогностической продукции. В крупном метеорологическом центре, каким, например, является Гидрометцентр России, выполняется весь технологический цикл оперативной подготовки прогнозов, начиная от численного прогноза на суперЭВМ и заканчивая подготовкой специализированных прогнозов.

В небольших прогностических организациях, где основная часть информации приходит из крупных метеорологических центров, задача сводится к анализу метеорологических условий и составлению прогноза погоды. При этом предполагается комплексное использование анализов, численных прогнозов и различных прогностических методик для воссоздания реальной картины будущего развития атмосферных процессов. Очевидно, что такой объем информации трудно усвоить без автоматизации и применения компьютерных технологий.

Для эффективного использования информации прогнозист должен иметь возможность свободно оперировать ею, визуализировать ее на дисплее в виде, удобном для решения локальных прогностических задач. В этой связи в метеорологических службах ряда стран разработаны соответствующие программные средства для персональных ЭВМ, которые позволяют кроме комплексного анализа данных рассчиты-

вать различные параметры динамики и эволюции атмосферных процессов и явлений. Такие программные средства дают возможность построить вертикальные и временные разрезы любого параметра, что может помочь при прогнозе сложных ситуаций. Системы интерактивной метеорологической визуализации позволяют прогнозисту выполнять и более сложные математические расчеты, такие как вычисление адвекции температуры, вихря, потока влаги, дивергенции скорости, и определять различные индексы и диагностические параметры, необходимые для прогноза погоды.

В оперативных прогностических организациях Росгидромета для составления локальных прогнозов погоды получила широкое распространение геоинформационная система «Метео» (ГИС «Метео») — программный комплекс, выполняющий прием, обработку и отображение метеорологической информации (рис. 31). Географическая основа этой системы — вид всего земного шара с высоким и средним разрешением. Это позволяет создавать банки карт любого масштаба.

В последние годы интенсивно развивается созданный в Гидрометцентре России визуализационный комплекс «Изограф». Базы данных могут формироваться непосредственно в прогностической организации на персональной ЭВМ, выполняющей функцию приема данных и прогнозов в кодах ВМО, либо копироваться из ближайшего центра, оснащенного теми же программными средствами. Наиболее полными по составу информации являются база Ми-

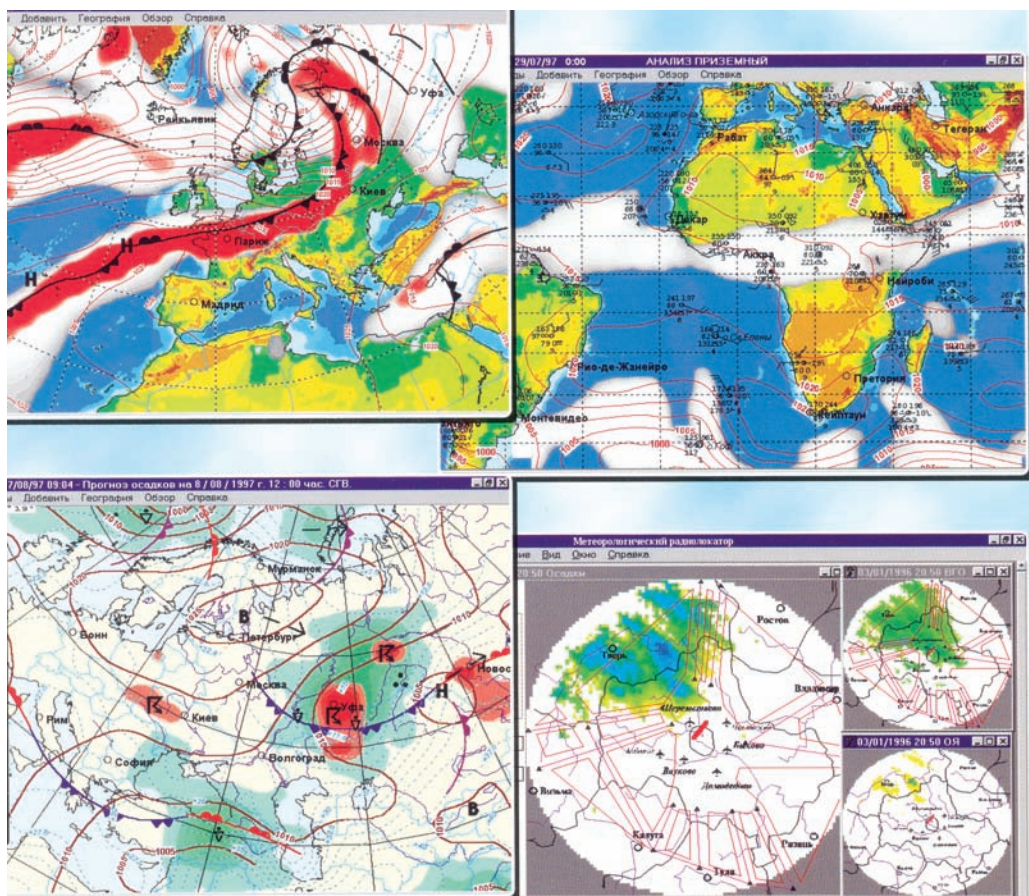


Рис. 31. Образцы продукции, предоставляемой ГИС «Метео».

рового центра данных (г. Обнинск) и совместная база Гидрометцентра России и Главного вычислительного центра Росгидромета. В последние годы стало возможным привлекать данные из сети Интернет. Метеорологические карты формируются как в интерактивном, так и в автоматическом режиме и представляют собой многослойные объекты. Каждый слой обеспечивает отображение на карте метеорологических величин в виде цифровых значений и символов, изолиний или контуров, разноцветных штриховок и заливок. На

один бланк карты можно поместить любое количество слоев. Все слои по их функциональному назначению делятся на три группы:

1) компоненты для отображения на выбранном бланке карты информационных слоев с данными оперативных наблюдений, а также полей анализов и прогнозов метеорологических величин, поступающих из метеорологических центров;

2) компоненты для выполнения обработки карты в интерактивном режиме и записи результатов такой обра-

ботки в базе (рисование линий фронтов, текстовых надписей, нанесение специальной символики и т. д.). Фронтальный анализ, выполненный синоптиками на электронной карте за текущий срок с помощью инструмента, фиксирующего географические координаты и типы фронтов, записывается в базу в векторной форме. Поэтому он может быть считан из базы и нарисован на электронной карте любого масштаба на любом компьютере, подключенном к базе;

3) компоненты вычислительного уровня, позволяющие получать результаты прогноза метеорологических величин, фронтальных и облачных систем, траекторий частиц или объектов и т. д. Эти компоненты имеют встроенные алгоритмы расчета различных метеорологических величин и явлений погоды.

Результаты этих расчетов служат ориентировочной информацией для подготовки прогнозов синоптиками. В ходе дальнейшего развития технологии ГИС «Метео» предполагается совершенствовать и обновлять алгоритмы на основе новых методик прогнозов метеорологических величин и явлений погоды.

Прогноз и предупреждение об опасных гидрометеорологических явлениях

Система подготовки прогнозов и предупреждений об опасных явлениях погоды, а также и о других гидрометеорологических явлениях (гидрологичес-

ких, морских гидрологических, агрометеорологических) полностью интегрирована с общей прогностической деятельностью, осуществляемой Росгидрометом. Круглосуточное функционирование государственной наблюдательной сети, учреждений и организаций, имеющих прогностические функции, позволяет своевременно обнаружить опасное явление, оценить степень его воздействия и осуществлять его прогноз и раннее предупреждение.

Все организационные структуры Росгидромета, проводящие непрерывные наблюдения и имеющие непрерывно функционирующие средства связи, обязательно привлекаются к передаче оповещений об опасных явлениях. Оповещение передается немедленно при достижении гидрометеорологическим явлением пороговых критериев, установленных на местном уровне и согласованных с соответствующими организациями. Телеграмма составляется открытым текстом, исключаям неопределенность толкования. Оформление телеграмм определяется правилами и инструкциями Министерства связи РФ.

По окончании опасного гидрометеорологического явления силами специалистов Росгидромета на местах совместно с заинтересованными организациями (сельскохозяйственными, энергетическими, автодорожными, жилищно-коммунальными и др.) проводятся обследования в районе распространения явления и оценивается степень его воздействия на хозяйственную деятельность, различные сооружения и состояние посевов сельскохозяйствен-

ных культур. В конце каждого месяца составляется технический отчет о наблюдавшихся явлениях.

В настоящее время осуществляется оперативное составление прогнозов зон потенциально опасной погоды по территории России на срок до 5 суток. Важно отметить, что чем больше период действия прогноза, тем с меньшей степенью детализации возможно описать прогнозируемые опасные явления. Связано это не только с ограниченными научными и техническими возможностями, но и с различным масштабом синоптических систем, обуславливающих гидрометеорологические явления.

Такие опасные явления, как сильные снегопады, шквалы, смерчи, ливни, кратковременны. Они возникают почти мгновенно, существуют в течение нескольких часов, и методы их прогноза требуют учета совсем иных проявлений атмосферных процессов, а также объема и качества данных по сравнению с теми, которые используются при среднесрочном и долгосрочном прогнозах. В то же время предупреждения о возникновении опасного явления за несколько часов до его нача-

ла бывает достаточно для принятия необходимых мер по сохранению жизни и предотвращению возможного ущерба.

Система подготовки прогнозов и предупреждений Росгидромета о стихийных гидрометеорологических явлениях учитывает все эти факторы. Схематически эта система показана на рис. 32.

Гидрометцентр России, выполняющий функции федерального центра, осуществляет прогноз зон потенциально опасных явлений по территории страны. Региональные центры уточняют размеры зон опасных явлений на основе региональных моделей и данных наблюдений. Территориальные центры учитывают вероятность возникновения явлений на основе локальных методик. Оперативные прогностические центры уточняют прогноз с учетом текущей синоптической ситуации на основе данных, полученных с искусственных спутников Земли, радиолокаторов и традиционных наблюдений на метеорологических станциях.

Важной задачей всех прогностических подразделений является не только составление прогнозов и преду-

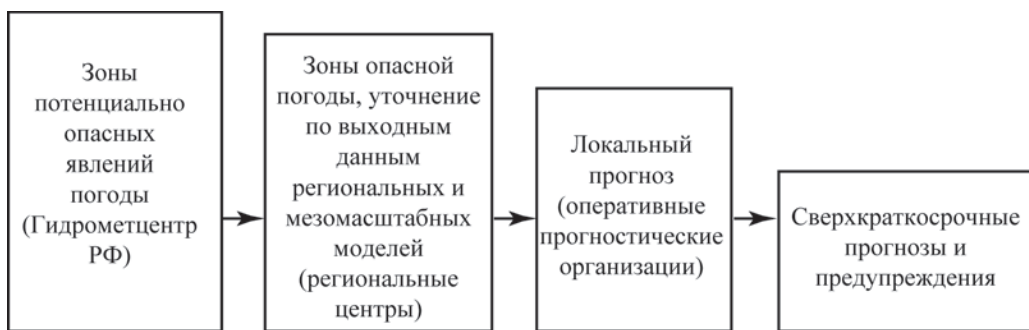


Рис. 32. Схема подготовки прогнозов опасных явлений погоды.

преждений о возникновении опасных явлений, но и доведение их до народно-хозяйственных организаций и населения с максимально возможной заблаговременностью. При этом предусматривается взаимное согласование предупреждений между периферийными прогностическими центрами и федеральным центром (Гидрометцентром России).

Право окончательного решения о необходимости выпуска предупреждения остается за местными прогностическими организациями. Однако прогнозисты федерального центра имеют право сообщать свое мнение и оспаривать мнение периферийного прогнозиста.

Федеральный центр несет ответственность (по поручению Росгидромета) за доведение информации до центральных органов исполнительной власти об ожидаемых опасных гидрометеорологических явлениях на территории всей страны.

В большинстве стран, часто подвергающихся ударам стихии гидрометеорологического характера, так же как и в России, существуют системы предупреждения об опасных явлениях. В полном объеме эта система включает в себя следующие элементы:

- сбор данных;
- обнаружение опасных явлений (включая определение условий, благоприятных для их формирования);
- прогноз опасных явлений;
- наблюдение за развитием явления и формулировку оповещения;
- распространение информации;
- общественную реакцию и обратную связь;

— обеспечение данными в период ликвидации последствий стихийного бедствия.

Все системы предупреждения требуют наличия сложных средств для обработки данных и эффективных сетей связи, с тем чтобы дать возможность специалистам проанализировать информацию и быстро довести ее до широких слоев населения.

Мероприятия по координации и распространению прогнозов и предупреждений, аналогичные вышеуказанным, осуществляются также и для обеспечения морской деятельности. Морские и авиационные предупреждения основываются на критериях, согласованных на национальном или международном уровне.

Кроме того, существуют процедуры для скоординированного на международном уровне предоставления информации о воздушном переносе загрязняющих веществ во время таких чрезвычайных ситуаций, как ядерные и химические аварии.

Важность наличия эффективных и хорошо скоординированных на международном уровне систем предупреждения об опасной погоде и других стихийных бедствиях была подчеркнута на Генеральной Ассамблее Организации Объединенных Наций. В декабре 1994 г. Генеральная Ассамблея приняла специальную резолюцию относительно «возможностей системы ООН в области раннего предупреждения о стихийных бедствиях». В этом документе придается большое значение развитию внутренних возможностей национальных метеорологических и

гидрометеорологических служб по предоставлению своевременных и точных предупреждений об опасных явлениях. В равной степени он также подтверждает необходимость в эффективной координации между национальными метеорологическими службами и другими агентствами, участвующими в планировании и осуществлении реагирования в чрезвычайных ситуациях.

В контексте международного обмена самую большую обеспокоенность вызывают обычно явления, связанные с подвижными погодными системами, перемещающимися из одной страны в другую, либо явления, вызывающие такие обширные разрушения, при которых необходима мобилизация международных усилий по оказанию помощи.

В целях обеспечения безопасности населения и повышения эффективности борьбы с последствиями опасных явлений рекомендуется составлять план реагирования в случае стихийного бедствия или чрезвычайной ситуации. В плане определяются ответственные

руководители, координаторы и/или представители по связям со средствами массовой информации. Устанавливаются резервные обязанности отдельных подразделений и процедуры связи в случае чрезвычайной ситуации. Определяются приоритеты выпуска продукции и услуг, а также контакты с другими агентствами и другие подробности.

План гидрометеорологической службы координируется с соответствующими планами агентств, ответственных за реагирование в случае чрезвычайных ситуаций.

В Российской Федерации деятельность по прогнозированию, предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций как природного, так и техногенного характера согласуется с Министерством по чрезвычайным ситуациям и регламентируется специальными документами. Общую координацию деятельности осуществляет Межведомственная комиссия по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

ДОЛГОСРОЧНЫЕ ПРОГНОЗЫ

Детализированные прогнозы метеорологических величин и явлений погоды или погодных систем на месяц и сезон являются ненадежными. Сложный характер движений в атмосфере и ошибки в начальных данных определяют основной предел предсказуемости таких прогнозов — 2—3 недели. Однако предел предсказуемости средних аномалий температуры и осадков может составлять и более длительный период. При этом физические процессы, которые не считаются важными в моделях общей циркуляции атмосферы при прогнозе на средние сроки, становятся определяющими при долгосрочном прогнозе. Особенно это относится к крупномасштабному взаимодействию между атмосферой и океаном, а также между поверхностью суши и снежно-ледяным покровом. Вместе с тем океан изучен мало по сравнению с атмосферой. Тем не менее существующие совместные модели «атмосфера — океан» используются в некоторых центрах для прогноза аномалий температуры и осадков. Положительные результаты дает учет в моделях естественной изменчивости атмосферы, а также явлений Эль-Ниньо—Южного колебания (ЭНЮК), Североатлантического и

Арктического колебания. За последние 15 лет существенно повысилось качество долгосрочного прогноза погоды в экваториальных и тропических регионах за счет учета в гидродинамических моделях влияния ЭНЮК на макропроцессы в низких широтах. Дальнейший прогресс в долгосрочном прогнозировании метеорологических величин и явлений погоды связан с активизацией исследований глобальных и региональных процессов в атмосфере и океане.

Потенциал применения долгосрочных прогнозов огромен, поэтому синоптические исследования по разработке методов долгосрочных прогнозов в нашей стране были начаты еще в 1913 г. в Главной физической обсерватории под руководством Б. П. Мультановского. Предложенные им и его последователями понятия естественного синоптического периода, естественного синоптического сезона, естественного синоптического района, фазы макропроцессов, ритмичной деятельности атмосферы сохраняют свое значение до настоящего времени. Важным шагом в объективизации методов, как, впрочем, и в изучении общей циркуляции атмосферы вообще, стало использование индексов зональной и меридиональной

циркуляции планетарного масштаба. Индексы А. Л. Каца и Е. Н. Блиновой ежемесячно рассчитываются в Гидрометцентре России и широко используются для изучения общей циркуляции атмосферы.

Под руководством Г. Я. Вангенгейма, а позднее А. А. Гирса развивался метод долгосрочного прогноза для метеорологического обеспечения навигации на Северном морском пути. Этот метод основывался на анализе форм атмосферной циркуляции по наземным и высотным синоптическим картам Северного полушария. На основе закономерностей преобразования циркуляционных механизмов из одной формы в другую, а также аналогов, подобранных к процессам исходного периода, составлялись прогнозы на месяц и сезон.

В последующем в результате развития этих школ было создано много синоптических и синоптико-статистических методов. Все они в той или иной степени основаны на закономерностях общей циркуляции атмосферы и специфике проявления их в конкретных физико-географических условиях. Статистические методы используют кор-

реляционные связи между динамикой метеорологических величин и элементов циркуляции в настоящем и прошлом и прогнозируемой аномалией температуры или осадков в интересующем районе в будущем. С появлением ЭВМ технология поиска таких связей усовершенствована, расширен и набор предсказателей, применяемый для составления прогноза. В статистических методах широко используется и прогнозирование по аналогам. Эти методы основываются на предположении, что за сходной последовательностью атмосферных процессов в текущем месяце или сезоне и когда-либо существовавшей в прошлом последует сходное развитие погоды в будущем. Трудности в применении этого физического принципа заключены в объективизации и обосновании выбора критериев аналогичности. Даже небольшие различия в начальных условиях могут совершенно изменить весь ход процессов, определяющих погоду в будущем.

В настоящее время в системе Росгидромета долгосрочные прогнозы составляются на месяц и при необходимости на сезон.

КАЧЕСТВО ПРОГНОЗОВ

Существует много причин и целей для проведения оценки качества, или успешности, прогнозов как с точки зрения тех, кто составляет прогнозы, так и тех, кто их использует.

С научной точки зрения очень важно выяснить недостаток того или иного метода или иной модели. Например, выбор того или иного способа параметризации модели в конечном счете сказывается на степени адекватности моделирования. С помощью оценки спрогнозированных метеорологических полей можно установить систематические ошибки в вычислении и тем самым устранить их. Важно также знать, над какой территорией прогнозы оправдываются лучше, а над какой хуже, каким образом на конечном результате сказывается качество и вид наблюдений, методика объективного анализа и т. д.

Представляет интерес также сравнение моделей между собой. На рис. 33 показана оценка качества модельных прогнозов высоты изобарической поверхности 1000 гПа на 3-й день (выполненная в виде стандартного отклонения, в метрах) в различных метеорологических центрах. Эта оценка проведена ВМО за 1979—1989 гг. Из ри-

сунка видно, что модель Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды показала лучший результат по сравнению с другими центрами.

Существует много способов и различных критериев оценки, выбор которых зависит от ее цели.

С точки зрения потребителя прогноза даже самый научно обоснованный метод прогноза представляет интерес лишь в том случае, если он приносит определенную пользу. Вполне естественно, что независимо от математически и физически обоснованных критериев каждый пользователь прогнозов и даже каждый человек в отдельности имеет собственное мнение о качестве прогнозов и исходит из тех

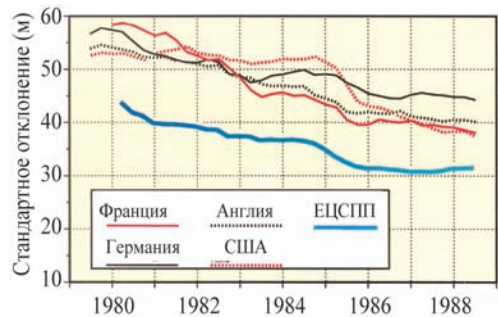


Рис. 33. Качество краткосрочных прогнозов высоты изобарической поверхности 1000 гПа в различных метеорологических центрах.

требований, которые он предъявляет к прогнозу. Например, если человек собирается отдыхать в выходной день, то прежде всего его интересует прогноз осадков. В прогнозе же указываются не только наличие или отсутствие осадков, но и температура воздуха, направление и скорость ветра, количество облачности. В случае если прогноз по осадкам не оправдался, то такой человек считает прогноз полностью неоправдавшимся, хотя все остальные элементы, кстати, также труднопрогнозируемые, соответствовали действительности. Дождь тоже может выпасть лишь в том месте, где находится этот человек, а на расстоянии 5—10 км от этого места его может и не быть. Поэтому 90 % населения этот же прогноз считает полностью оправдавшимся. Во избежание таких недоразумений и существуют специальные, стандартные критерии. Кроме этого, существуют периоды устойчивости и неустойчивости погоды, районы, где погода в течение длительного времени мало меняется, и районы с большой ее изменчивостью. Поэтому для определения информатив-

ных факторов, вносящих вклад в качество прогноза, методические прогнозы принято сравнивать с инерционными и климатическими. Если по климатическим данным известно, что в интересующем нас пункте, например на юге Индии, в любой день июля вероятность осадков 98 %, то дождь можно спрогнозировать на любой день июля с большой точностью за год или даже за несколько лет. Из этого, однако, не следует, что мы создали метод прогноза осадков.

В Росгидромете систематически производится оценка всех видов прогнозов погоды по утвержденным критериям во всех оперативных прогностических организациях. Такая оценка учитывается при определении производственных показателей организации. Кроме того, она позволяет установить рост успешности тех или иных прогнозов. На рис. 34 показана успешность суточных прогнозов погоды по Москве за период с 1937 по 1989 г. Из рисунка видно, что с 1946 по 1953 г. уровень оправдываемости прогнозов быстро повышался. Следующий рост наблю-



Рис. 34. Оправдываемость суточных прогнозов погоды по Москве (%).

дался с 1962 по 1965 г., сравнительно небольшой рост — в 1967 г., а устойчивый рост — с 1985 по 1987 г. Все это свидетельствует о больших научных и технических достижениях в гидрометеорологической службе.

В период с 1946 по 1953 г. интенсивно развивалась сеть метеорологических и аэрологических наблюдений и, кроме того, появилось большое число метеорологов, накопивших опыт составления прогнозов в период Великой Отечественной войны.

В 1962—1965 гг. происходило внедрение в оперативную работу гидрометеорологических моделей с использованием вычислительной техники. В 1967 г. появился новый тип наблюдений — информация с метеорологических искусственных спутников Земли. Небольшой спад оправдываемости в 1978 г. объясняется вводом в действие новых, более жестких критериев оценки. Наконец, стабильное увеличение оправдываемости прогнозов с 1985 по 1987 г. связано с внедрением сложных многоуровневых гидродинамических моделей и появлением нового поколения ЭВМ. Важно подчеркнуть, что наряду с увеличением точности прогнозов постоянно происходит расширение объема (перечня) прогнозируемых величин и явлений погоды. Вместе с тем приходится констатировать, что, несмотря на достигнутые успехи, прогнозы еще не в полной мере отвечают запросам практики. К сожалению, имеются опасные явления, которые не поддаются прогнозированию вообще. Иначе говоря, разрыв между требованиями к прогнозу и воз-

можностями прогнозирования хотя и уменьшается, но по-прежнему существует. Особенно это относится к долгосрочным прогнозам погоды. В настоящее время средняя успешность прогнозов на сутки составляет 95—96 %, на вторые сутки 90—92 %, на третьи сутки 88—90 %, на четвертые и пятые сутки — примерно 85 %.

Основная причина такого разрыва состоит в неполном знании физических процессов в атмосфере и в трудности их математического описания. Современные гидродинамические модели, несмотря на их сложность, еще не учитывают всех факторов, влияющих на погоду. Следующей по важности причиной можно считать недостаточную плотность и частоту наблюдений за погодой. Численные методы прогноза требуют детального и точного знания состояния атмосферы в начале прогнозируемого периода. К сожалению, существующая сеть наблюдений не соответствует этим требованиям. Достаточно вспомнить, что огромные пространства на земном шаре (пустыни, океаны, некоторые горные районы) вообще недоступны с точки зрения получения информации. Поэтому ошибки вводятся в модель уже с начальными данными. В процессе расчета они суммируются с ошибками модели и возрастают со временем. Наступает период, когда они становятся настолько большими, что дальнейший прогноз не имеет смысла. Этот период называют пределом предсказуемости. Даже для лучших исследовательских моделей в настоящее время практический предел предсказуемости при прогнозе барического поля

не превышает 10 дней, а для метеорологических величин и явлений погоды — 5—7 дней.

Оперативное использование сложных моделей атмосферы зачастую ограничивается недостаточным быстродействием ЭВМ, вследствие чего прогноз рассчитывается длительное время, и в оперативной работе применять такие модели нельзя. Поэтому иногда приходится сознательно упрощать модели в целях ускорения подготовки прогноза.

В заключение необходимо обратить внимание и на то обстоятельство, что эффективность прогнозов зависит не только от их качества, но и от умения использовать их для принятия того или иного решения, о чем уже говорилось при упоминании о правильном истолковании сна библейским Иосифом.

Нужно помнить, что повышение качества прогнозов требует значительных затрат прежде всего на расширение системы наблюдений, телесвязи и

обработки данных, поэтому необходимо искать экономически оптимальный путь решения проблемы. Одним из таких путей является использование прогнозов в вероятностной форме. Однако большинство потребителей отказывается от вероятностных прогнозов, вынуждая гидрометеорологов самостоятельно принимать решения. В этом случае они принимают решения за хозяйственников, зачастую не зная конкретной, сложившейся в той или иной отрасли экономики обстановки.

Вместе с тем потребитель не обладает столь обширной информацией, которая имеется в распоряжении прогнозиста. В дальнейшем, по мере автоматизации средств связи и компьютеризации, появится возможность более тесного, интерактивного взаимодействия прогнозиста с потребителем. Прежде всего это относится к специализированному гидрометеорологическому обслуживанию, осуществляемому на договорной основе.

ПЕРСПЕКТИВЫ

Развитие численных гидродинамических моделей атмосферы было и остается ключевым фактором улучшения прогностических методов. Результаты осуществления международной Программы исследований глобальных атмосферных процессов показали, что практически значимые прогнозы на основании численных моделей могут быть получены на период до двух недель. Самые последние научные исследования дают основание полагать, что такие модели можно использовать для общего описания поведения атмосферы на месяц и сезон.

Наиболее важные улучшения прогностических моделей ожидаются вследствие использования физической параметризации, включая структуру пограничного слоя атмосферы, облачность и радиацию, вертикальный обмен, влияние орографии. При применении моделей для долгосрочного прогнозирования потребуются глобальный учет взаимодействия океана и атмосферы, ледяного и снежного покровов, влажности почвы и других факторов. Наряду с этим будут развиваться и эмпирические методы долгосрочного прогноза, основанные, в частности, на учете аномалий температуры океана,

особенно его энергоактивных зон, взаимосвязи процессов над различными районами, аналогичности и цикличности циркуляционных процессов, взаимодействия процессов в тропосфере и стратосфере и др.

Для развития сверхкраткосрочного прогноза будут совершенствоваться мезомасштабные модели с горизонтальным разрешением 1—3 км и менее. Важной задачей ближайшего десятилетия является исследование условий развития и повышения надежности краткосрочного прогноза опасных явлений погоды. Необходимо, однако, еще раз подчеркнуть, что для улучшения прогнозов и увеличения периода предсказуемости одного физического обогащения моделей недостаточно. Даже самая совершенная прогностическая модель будет бесполезна при отсутствии правильного описания исходного состояния атмосферы. В дальнейшем необходимо развивать и совершенствовать систему наблюдений, в которой будут широко применяться новые способы измерения параметров атмосферы. Постоянно улучшается качество данных, получаемых с искусственных спутников Земли. Многие численные модели уже сейчас опера-

тивно усваивают данные спутниковых наблюдений. Сохранится тенденция увеличения разрешающей способности глобальных моделей и улучшения системы усвоения данных. Новые системы позволят усваивать измерения непосредственно от различных источников, без перевода их в метеорологические величины. Постепенно глобальные модели по своим характеристикам будут приближаться к региональным и мезомасштабным, и необходимость иметь различные виды моделей отпадет.

Есть основания полагать, что в будущем получит развитие моделирование процессов для одного пункта — так называемых точечных моделей. Такие модели будут сопряжены с мезомасштабными или региональными моделями и будут более детально воспроизводить взаимодействие подстилающей поверхности с атмосферой в конкретном пункте прогноза. Прогноз погоды будет составляться с указанием уровня его вероятности. Этого можно добиться, применяя различные способы, но наиболее обещающим в этом отношении является метод ансамблевого прогноза. В этом случае используются либо одни и те же начальные условия для расчета по различным моделям атмосферы, либо, наоборот, расчет производится по одной и той же модели, но при различных, хотя и мало отличающихся, начальных условиях, так как неопределенность присуща не только методам прогноза, но и степени оценки текущего состояния атмосферы. Таким образом, ансамбль прогнозов охваты-

вает ряд возможных результатов. Если для интересующей нас территории прогностические результаты по всем членам ансамбля схожие, то уровень уверенности высокий, если результаты расходятся, уровень уверенности небольшой. Таким образом, по ансамблю прогнозов можно автоматически получить величину вероятности применительно к требованиям потребителей прогноза. Опыт показывает, что использование ансамблевых прогнозов дает положительный результат при среднесрочных и долгосрочных прогнозах.

Увеличение мощности и быстродействия ЭВМ, а также совершенствование системы приема и передачи данных позволит оперативным прогностическим организациям для составления локальных прогнозов погоды иметь максимально возможный доступ к выходной продукции крупных метеорологических центров. Кроме прогностических полей метеорологических величин эти центры будут передавать в оперативные организации специализированную продукцию, которая окажет значительную помощь синоптику при составлении прогноза погоды. Взаимодействие синоптика с ЭВМ и новыми средствами наблюдений позволит значительно повысить эффективность его работы. Но для этого потребуются серьезные усилия в организации и проведении научных исследований и внедрение в практику результатов постоянно развивающихся технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бедрицкий А. И., Коршунов А. А., Шаймарданов М. З.* Опасные гидрометеорологические явления и их влияние на экономику России. — Обнинск: Изд-во ВНИИГМИ—МЦД, 2001. 36 с.
- Бедрицкий А. И.* Национальная метеорологическая служба // Бюллетень ВМО, 1999, т. 48, № 2.
- Бедрицкий А. И.* Экономическая эффективность гидрометеорологического обеспечения потребителей Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с учетом экономических преобразований в стране. В сб.: Новые тенденции в гидрометеорологии. 1995. Вып. 1.
- Белов П. Н., Борисенков Е. П., Панин Б. Д.* Численные методы прогноза погоды. — Л.: Гидрометеоиздат. 1989. 376 с.
- Васильев А. А., Переведенцев Ю. П.* Технология прогнозирования метеорологических условий. — Изд-во Казанского гос. ун-та. 2007.
- Вильфанд Р. М.* и др. Усовершенствованные методики прогнозирования по ансамблю приземной температуры воздуха в течение месяца. В сб.: Фундаментальные и прикладные исследования. — СПб: Гидрометеоиздат. 2003.
- Воробьев В. И.* Синоптическая метеорология. — Л.: Гидрометеоиздат. 1991. 616 с.
- Гирс А. А., Кондратович К. В.* Методы долгосрочных прогнозов погоды. — Л.: Гидрометеоиздат. 1978.
- Груза Г. В., Ранькова Э. Я.* Вероятностные метеорологические прогнозы. — Л.: Гидрометеоиздат. 1983.
- Голицын Г. С.* Динамика природных явлений: климат, планетные атмосферы, конвекция, волновые и случайные процессы. — М.: Физматгиздат. 2004. 342 с.
- Зверев А. С.* Синоптическая метеорология. — Л.: Гидрометеоиздат. 1977.
- Исаев А. А.* Атмосферные осадки. Часть I. Изменчивость характеристик осадков на территории России и сопредельных стран. — М.: Изд-во МГУ. 2002. 192 с.
- Кислов А. В.* Климат в прошлом, настоящем и будущем. — М.: МАИК Наука/Интерпериодика. 2001. 352 с.
- Курбаткин Г. П., Дегтярев А. И., Фролов А. В.* Спектральная модель атмосферы, инициализация и база данных для численного прогноза погоды. — СПб: Гидрометеоиздат. 1994.
- Логинов В. Ф.* Кто делает погоду? — Минск: Тоник. 2005.
- Марчук Г. И.* Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и океана. 1984.
- Матвеев Л. Т.* Физика атмосферы. — СПб.: Гидрометеоиздат. 2000. 778 с.
- Муравьев А. В.* и др. Технология экспериментальных долгосрочных метеорологических прогнозов динамико-статистическими методами // Труды Гидрометцентра России. 2006. Вып. 334.
- Погода, климат, вода в информационную эру.* ВМО—№ 970. Женева. 2004.
- Природные опасности России.* Гидрометеорологические опасности. Т. 5. Под ред. Г. С. Голицына, А. А. Васильева. — М.: Издательская фирма «Крук». 295 с.
- Руководство по глобальной системе обработки данных.* ВМО — № 305. Женева. 2002.
- Справочник потребителя спутниковой метеорологии.* Под ред. В. В. Асмуса,

О. Е. Милехина. — СПб: Гидрометеиздат. 2005.

Фролов А. В., Важник А. И., Свиренко П. И., Цветков В. И. Глобальная система усвоения данных наблюдений о состоянии атмосферы. — СПб: Гидрометеиздат. 2000. 187 с.

Хандошко Л. А. Экономическая метеорология. — СПб: Гидрометеиздат. 2005. 490 с.

Хромов С. П., Петросянц М. А. Метеорология и климатология. — М.: Изд-во МГУ. 1994. 519 с.

Шукла Дж. Предсказуемость. В сб.: Динамика погоды. Под ред. С. Манабе. — Л.: Гидрометеиздат. 1988.

Forty years of progress and achievement. A historical review of WMO. Edited by sir Artur Davies, Secretary-General Emeritus of WMO. WMO — No. 721. Geneva. Switzerland. 1990. P. 205.

The first twenty-five years... European Centre for Medium-Range Weather Forecast. ECMWF, Reading, United Kingdom, September. 2000. P. 100.

Methods of interpreting numerical weather prediction output for aeronautical meteorology. CA Working Group on Advanced techniques applied to aeronautical meteorology. Second edition. WMO — No. 770, Geneva. Switzerland. P. 123.

