

1967 • НАУКА О ЗЕМЛЕ • 1967

И.Г.СИТНИКОВ

Машины на службе метеоро- логии

5 НОВОЕ В
ЖИЗНИ

СЕРИЯ XIII



И. Г. Ситников,

*кандидат
физико-математических
наук*

МАШИНЫ НА СЛУЖБЕ МЕТЕОРОЛОГИИ

Издательство «Знание» Москва 1967

551.5
С41

ВВЕДЕНИЕ

Еще каких-нибудь двадцать лет назад никто из нас не имел, видимо, ни малейшего представления о таком «чуде техники», как электронная вычислительная машина (сокращенно ЭВМ). Однако именно в эти годы ученые приступили к созданию автоматических устройств, которые в минимальные сроки с незначительным вмешательством человека производили сложнейшую вычислительную работу огромных объемов. Мечты об этих машинах существовали давно, но только сейчас они воплотились в жизнь. Создание полупроводниковых схем привело к новому скачку в электронно-вычислительной технике, и в наше время никого уже не удивит сообщение о том, что новая модель машины способна производить сто тысяч арифметических действий ежесекундно, что электронный робот имитирует процессы, происходящие в человеческом мозге, занимается вопросами экономического планирования и переводит иностранные тексты. И уже во всяком случае очевидно, что не будь электронных вычислительных машин, не было бы исторических полетов космонавтов, запусков космических кораблей к Луне, Марсу, Венере, и т. д.

Несколько затерявшись среди столь «фантастических» достижений точных наук, наука о прогнозе погоды тоже продолжала развиваться, и, наверное, мало кто знает, что и здесь электронная вычислительная техника привела к значительному перевороту. Переворот этот заключается в том, что впервые за историю ее существования наука о прогнозе погоды стала или по крайней мере становится точной наукой.

Понятия погоды переводятся на язык формул и чисел, а эти числа перерабатываются электронной машиной. Разобраться в том, как все это происходит, и поможет наша брошюра, а разбираться придется в непростых вещах. Мы поведем пока разговор о том, в чем же состоит сам предмет исследования и расчета, поручаемого машине. Иными словами, мы постараемся выяснить, как можно описать погоду с помощью чисел—того единственного материала, который умеет «перерабатывать» электронная машина.

ПОГОДА НА ЯЗЫКЕ ЧИСЕЛ

Метеорологические элементы

...Лето. Человек лежит на траве и смотрит в небо. Перед его взором проносятся облака, порывы ветра сменяются затишьем; когда устанавливается тишина, заметно, как местами поднимаются вверх нагретые струйки воздуха, чувствуется, что воздух насыщен влагой, парит... вдали раздаются неторопливые раскаты грома — приближается гроза. Все эти явления природы и есть погода.

Температура воздуха, его влажность, атмосферное давление, сила и направление ветра — все это объединяется обычно понятием *метеорологические элементы*. По сути здесь, конечно, нет ничего общего с химическими элементами, но все перечисленные понятия — тоже те кирпичики, которые, сочетаясь, «соединяясь» между собой во всевозможных комбинациях, создают богатейшую гамму состояний атмосферы, ежедневно, ежеминутно ощущаемых нами. Сухой горячий воздух, пришедший в Москву из пустынь Средней Азии, и такой же теплый, но влажный воздух, перекочевавший из Средиземноморья, создают погоду совершенно различного свойства. Вести самолет в относительно спокойной атмосфере или навстречу «струе» воздуха, обладающей скоростью до 100 м/сек, — отнюдь не одно и то же. Подобных примеров множество.

А теперь давайте займемся числами. Одно из них мы уже привели: это величина скорости ветра.

Метеорологи измеряют скорость ветра обычно в км/час или в м/сек¹. Скорость до 5 м/сек — это слабый ветер, 5—8 м/сек — уже умеренный, выше 14 м/сек — сильный, 20—25 м/сек — шторм. При скорости, большей 30 м/сек, это уже ураган.

Скорости до 120 м/сек (или более 400 км/час) встречают-

¹ В ряде стран скорость измерения в узлах; 1 узел — это примерно 0,5 м/сек.

ся в тропических циклонах — ураганах и тайфунах — часто свирепствующих в некоторых районах тропических широт и опустошающих иногда берега Японии, Пакистана, США, Кубы и ряда других стран. На высотах от 5 до 16 км в атмосфере регулярно наблюдаются целые зоны, где ветер дует в одном каком-либо направлении (обычно в широтном) со скоростью до 100—200 м/сек. Это и есть так называемые *струиные течения*.

Говорить пространно о температуре воздуха вряд ли необходимо: с этим метеорологическим элементом чаще всего сталкиваются люди самых разнообразных профессий. Можно только сказать, что метеорологи никогда не измеряют температуру воздуха на солнце, поскольку в этом случае измеряется степень нагревания не столько воздуха, сколько стеклянных и металлических частей, из которых состоит термометр.

Самая высокая температура у поверхности земли была отмечена в Азии, близ Триполи, и в Южном Иране +58°C, а самая низкая — в Антарктиде, на станции Восток —88,3°C. На тех высотах, где обычно летают современные реактивные самолеты, она меняется в среднем от —25° до —60°C.

Мерой влажности воздуха служит относительное содержание в нем водяного пара. Часто используют понятие *удельной влажности*. Это — количество водяного пара (в граммах) в 1 кг влажного воздуха. В Москве средняя величина удельной влажности в разные сезоны и в разную погоду может колебаться от 0,7 до 15 г/кг. С увеличением высоты влажность, как правило, уменьшается.

Очень важный метеорологический элемент — атмосферное давление. С ним связано существование грандиозных атмосферных вихрей — циклонов (областей низкого давления) и антициклонов (областей высокого давления). Резкие изменения давления служат самым верным признаком ожидаемого изменения погоды¹.

Атмосферное давление у земли колеблется обычно в пределах от 1060 мб в сильных антициклонах и до 940 мб в глубоких, т. е. очень мощных циклонах. Лишь в тропических циклонах (ураганах, тайфунах) давление опускается еще ниже — иногда до 880 мб!

Будем надеяться, что читателю не наскучил этот перечень определений и цифр. Без него трудно было бы двигаться дальше. Между тем заключенные в систему сложных формул

¹ Метеорологи меряют давление или в миллиметрах ртутного столба (мм рт. ст.) или, чаще, в миллибарах (мб). Миллибар = $\frac{1}{1000}$ бара = $1000 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$; 1 мм рт. ст. = 1,333 мб.

и уравнений, эти цифры — значения метеорологических элементов, приуроченные к той или иной точке пространства — атмосферы — и к тому или иному моменту времени — и служат «пищей» для электронных машин-метеорологов.

Поля метеорологических элементов

Отдельные значения метеорологических элементов, взятые разрозненно, изолированно друг от друга, мало что могут сказать ученому, когда речь идет о погоде. Ведь даже интуитивно ясно, что погоду определяют атмосферные процессы, развертывающиеся на больших территориях. Допустим, теплая масса воздуха переместилась с Черного моря в Москву. Если бы день ото дня измеряли температуру только по данным наблюдений в Москве, то не могли бы предвидеть, что здесь произойдет потепление. В то же время, зная температуру на целой совокупности метеорологических станций, в том числе лежащих ближе к Черному морю, и зная, по каким-либо другим измерениям, куда движется воздух, мы могли бы предсказать ожидаемое изменение температуры в Москве и окружающих районах.

Это, конечно, очень упрощенный подход к задаче прогноза погоды, но из приведенного примера можно сделать вывод: для многих задач, которые ставит перед собой метеорология, и прежде всего для прогноза погоды, надо знать распределение значений элементов погоды, метеорологических элементов на больших пространствах, причем не только у поверхности земли, но и на высотах, обычно до 10—20 км.

Область пространства или плоскости, каждой точке которой отвечает число — значение какой-либо физической величины (или вектора), называют в физике *полем* этой величины (вектора). Так говорят об электрическом поле, или поле электрического заряда, т. е. о распределении заряда по той или иной области. Подобным же образом в метеорологии существуют поля давления, температуры, влажности, скорости ветра и т. п. Например, говорят: поле приземного давления на северном полушарии за такой-то срок, скажем, за 3 часа среднего гринвичского времени 5 июля 1966 г. В действительности, такое поле состоит из отдельных значений давления, измеренных на уровне земли в целой сети метеорологических станций, разбросанных по северному полушарию. При этом на картах точки с равными значениями давления соединяются плавными линиями, так называемыми *изолиниями*.

Так, когда речь идет о поле давления, линии равных значений давления называют *изобарами*. Если рассматривается температура, то линии ее равных значений называют *изотермами*; если изучается распределение скоростей ветра, то проводят линии равных значений скорости ветра — *изотакхи* и т. п.

Собственно говоря, наука о погоде, а тем более прогноз погоды и стали возможными только тогда, когда ученые смогли составлять поля метеорологических элементов по значительным районам земного шара. А возможность эта появилась с созданием сети метеорологических станций, на которых регулярно, в одни и те же сроки производились измерения температуры, давления, скорости и направления ветра и других метеорологических элементов. Такая сеть была создана сравнительно недавно — в XIX в. Сейчас только в северном полушарии Земли существует 4 тысячи метеорологических станций, ведущих приземные наблюдения, а количество станций, где с помощью специальных приборов — радиозондов — проводятся измерения и на различных (до 30—40 км) высотах (их называют аэрологическими), доходит до 700. Измеренные и обработанные данные срочно передаются по радио и телеграфу — в специальные метеорологические центры, и здесь уже ученые строят и изучают поля метеорологических элементов, рассказывающие им о состоянии атмосферы в какое-то определенное время. Это — первый, совершенно необходимый шаг к составлению прогноза погоды.

И снова давайте вернемся к электронным машинам. «Заложенные» в машину совокупности чисел — значений метеорологических элементов в большом ряде точек (а это и есть метеорологические поля) — являются для нее отправным пунктом, чтобы, действуя далее по предписанным ей человеком формулам, рассчитать будущие значения метеорологических полей, дать прогноз. Но по каким же формулам проводятся эти расчеты? И возможна ли вообще такая задача: опираясь на фактическое, исходное состояние атмосферы, предсказать ее будущее состояние? Для ответа на этот вопрос мы должны прежде всего обратиться к физике, к законам, которые управляют атмосферой, ее движениями.

Атмосфера и ее законы

Представим себе частицу воздуха, достаточно большую, чтобы можно было отвлекаться от чисто молекулярных взаимодействий внутри нее, но в то же время и достаточно малую по сравнению, скажем, с теми препят-

ствиями, которые приходится обтекать воздуху в своем движении. В газе, составленном из таких частиц, вещество можно считать распределенным равномерно, непрерывно.

Также непрерывным будет распределение и всех физических характеристик (давления, температуры и т. п.) этой, как говорят в механике, «сплошной» материальной среды. При таком подходе атмосферу можно изучать как газ или жидкость, пользуясь законами механики сплошной среды или гидромеханики (подобно тому, например, как изучают движение крыла самолета в воздушном потоке). Тогда мы вправе применить для изучения атмосферы постоянно действующие в природе законы сохранения массы, энергии и количества движения (импульса). При этом мы получаем возможность оперировать такими характеристиками положения воздушной частицы, как ее скорость, ускорение, и такими показателями ее состояния, как давление, плотность, температура.

При данном подходе и давление и температура воздуха — то, что мы ранее называли метеорологическими элементами, — уже перестают рассматриваться изолированно друг от друга. Они входят в систему уравнений, которая является математическим выражением самых общих законов физики и связывает эти элементы между собой.

Не будем голословными и покажем, как от наиболее общей формулировки закона сохранения количества движения можно подойти к тем уравнениям, которые будут уже близки к применяемым непосредственно в задачах прогноза погоды. Итак, закон: «количество движения в рассматриваемой среде должно оставаться неизменным». Эта формулировка известна еще из школьных курсов физики. Другим выражением этого закона, а точнее — его следствием, является второй закон Ньютона: «изменение скорости частицы жидкости во времени (т. е. ее ускорение) равно равнодействующей всех оказывающих на нее влияние сил».

Значит, чтобы идти дальше в рассуждениях, надо знать, какие же силы действуют на частицу воздуха в атмосфере. Этих сил довольно много: здесь и сила тяжести, и центробежная сила, возникающая из-за увлечения частицы вращением земного шара, и особая отклоняющая сила, действующая на любое тело, а значит, и частицу воздуха, движущуюся относительно вращающейся Земли (сила Кориолиса). Это так называемые *диссипативные*, т. е. рассеивающие силы, как, например, сила трения частичек, слоев воздуха о поверхность земли или сила турбулентного трения, вызванная хаотическими движениями частиц воздуха. И, наконец, это сила, связанная с различной степенью нагрева соседних слоев воздуха, с их разной плотностью. Она проявляется так: если рядом находятся два слоя воздуха, теплый и холодный, то

последний, как более тяжелый, будет давить на теплый, более легкий. Возникает перепад давления, как говорят — *градиент давления*, а отсюда и сила — сила градиента давления, или сила барического градиента.

Мы приходим к *уравнению движения*, называемому так потому, что, зная все силы, действующие на частицу, мы можем определить равнодействующую этих сил, а следовательно, и ускорение воздушной частицы. Обычно пишут три уравнения, для трех взаимно перпендикулярных осей: x , y по горизонтали и z — по вертикали, при этом векторы всех сил проектируются на соответствующие оси, и рассматриваются ускорения также по трем направлениям.

Эти уравнения иногда в том или ином модифицированном виде применяются (наряду с другими) в задачах численного прогноза погоды. Одна из основных трудностей в их эффективном применении связана с тем, что, как правило, невозможно досконально знать величины всех сил (а их много), участвующих в процессе, поэтому обычно ученые идут по пути упрощения уравнений, отбрасывая силы, менее существенные, менее значимые и оставляя лишь самые главные силы. Но об этом мы поговорим потом, в разделе об атмосферных моделях.

Аналогичная проблема существует и при применении закона сохранения энергии. «Количество энергии, получаемое в единицу времени единичным объемом жидкости (газа), расходуется на изменение температуры этого объема и работу, производимую давлением для уменьшения или увеличения объема газа». Эту формулировку закона легко облечь в математическую форму. Однако в составленном уравнении величина, определяющая приток количества энергии к изучаемому объему, состоит из таких компонентов, большинство которых, как правило, весьма трудно поддаются измерению. Ведь здесь должен быть и приток тепла непосредственно от Солнца, и приток тепла от излучения Земли и атмосферы, и перераспределение энергии, связанное с фазовыми переходами водяного пара или с диссипативными факторами.

В целом ряде задач гидромеханики, в том числе и в некоторых задачах прогноза погоды, исследователи не учитывают притоков энергии, притоков тепла (от Солнца, от подстилающей поверхности: земли, океана), считая данный объем теплоизолированным. Тепло в таком объеме может только перераспределяться, например, вследствие восходящих или нисходящих движений воздуха, но «втекать» и «вытекать» не может. Изучаемые при этом процессы, а вместе с ними и моделирующие эти процессы прогностические схемы, называют *адиабатическими*.

Все сказанное является лишь иллюстрацией. Мы ни в коей мере не хотели (да и не смогли бы) давать на страницах

этой брошюры исчерпывающий, полный разбор законов, по которым движутся массы воздуха и развиваются различные атмосферные процессы. Однако теперь читателю уже легче представить себе, что поведение атмосферы можно описать *системой уравнений*. Это сложные, дифференциальные уравнения, и нелишним будет сказать, что из всех задач, которые ставятся сейчас в гидромеханике, класс уравнений в задачах прогноза погоды — один из наиболее сложных и полных. Теперь дело за решением системы уравнений прогноза.

Атмосферные модели

Решить систему уравнений: здесь-то мы и подошли вплотную к ЭВМ, скажет читатель. Но нет, призывать ЭВМ еще рано. И дело не только в том, что мы, собственно, пока что не рассказывали о методах, с помощью которых решаются сложные прогностические уравнения, — а ведь машина не может сама придумать метод решения. Дело в том, что нельзя представить такой всеобъемлющей физической задачи прогноза, которая включала бы в себя все проявляющиеся в атмосфере силы, все источники энергии. А если бы мы и сформулировали такую задачу, то, записав ее в виде уравнений, заведомо не знали бы, как эту систему уравнений решить. Ведь уравнения прогноза — мы говорили об этом — очень сложные.

Поэтому наука пошла по пути возможного упрощения уравнений прогноза погоды. Задача эта не из легких. Нужно настолько хорошо изучить законы атмосферы и особенности описывающих их уравнений, чтобы выделить наиболее важное, наиболее существенное для описания погодообразующих процессов.

Приведем пример. В атмосфере существуют движения различнейших масштабов и форм. Перемещения больших масс воздуха (скажем, вторжение холода из Арктики, происходящее на пространстве в тысячи километров) и звуковые волны, вызванные, например, выстрелом или ударом, — все это движения в атмосфере. И каждое из таких движений должны описывать уравнения гидромеханики.

Однако распространение звуковых волн, обладающих очень малой длиной, не имеет ничего общего с движениями, формирующими погоду на больших пространствах. А значит, должна быть возможность так упростить наши уравнения, чтобы они не описывали поведение звуковых волн. Такие упрощения были найдены.

Выяснилось также, что в большом круге задач прогноза

погоды мы можем отфильтровать из уравнений и волны средних размеров (до 100 км). Для этого нужно ввести в уравнение гипотезу о *геострофичности* ветра. Что это значит?

Скорость и направление ветра в атмосфере определяются множеством факторов, учесть которые в уравнениях просто невозможно. Воображаемый же геострофический ветер определяется наличием только двух сил: силы Кориолиса и силы градиента давления, находящихся в равновесии. При этом «дует» геострофический ветер так, что область низкого давления в северном полушарии остается слева (в южном—справа). Исследования показали, что очень многие движения в атмосфере, связанные с погодой, можно с большой точностью описать, используя понятие геострофического ветра. А выгода получается немалая: уравнения до такой степени упрощаются, что для них может быть найден сравнительно легкий метод решения.

Это опять только пример. Но подобных упрощений для решения задач прогноза погоды приходится производить много. Тип упрощений меняется в зависимости от преследуемой цели. Так, мы уже говорили выше об адиабатических упрощениях, т. е. предположении об отсутствии притоков тепла к рассматриваемому объему воздуха. Задачу прогноза погоды в адиабатическом приближении имеет смысл ставить в том случае, когда надо дать прогноз на короткий срок, скажем, на сутки.

Допустим, например, холодная масса воздуха сместилась из Арктики на центральные районы нашей страны. За сутки она еще не успеет в достаточной мере прогреться, и поэтому температуры воздуха просто как бы «перенесутся» вместе с самой воздушной массой. Но, предположим, прошло трое, а то и пятеро суток. Воздух будет постепенно прогреваться от более теплой земли, а поэтому в соответствующей прогностической схеме пользоваться допущением об адиабатичности уже нельзя.

Система уравнений, полученных при помощи каких-либо конкретных допущений и упрощений, представляет *атмосферную модель*. Называют такие модели обычно по виду принятых допущений: бывают адиабатические модели, геострофические модели и тому подобные, может в одной модели сочетаться и несколько признаков. Каждая такая модель обычно отфильтровывает те движения и процессы, которые для данного типа задачи являются несущественными. А критерием успешности, ценности той или иной модели служит, естественно, практика, т. е. то, до какой степени рассчитанные по этой модели прогнозы, прогностические метеорологические поля совпадают с фактическими полями через одни сутки, двое, трое суток и т. д. от исходного срока.

В настоящее время учеными различных стран созданы десятки разнообразных моделей атмосферы для краткосрочного и долгосрочного прогнозов погоды. Советская метеорологическая наука занимает в этих исследованиях ведущее место. Члены-корреспонденты Академии наук СССР И. А. Кибель и Е. Н. Блинова заложили теоретические основы современных методов краткосрочного и долгосрочного прогнозов погоды. Несколько научно-исследовательских институтов в Москве, Ленинграде, Новосибирске и других городах успешно ведут сейчас работу по совершенствованию численных методов прогноза погоды.

Испытание атмосферных моделей, а в дальнейшем и практические, оперативные предвычисления по ним ведутся непосредственно на ЭВМ. И единственное, что нам осталось, чтобы «дойти» до самой работы машины, это рассказать о том, каковы же математические методы, которыми решаются уравнения той или иной атмосферной модели. При этом нам придется затронуть уже совсем иную область науки, так называемую *вычислительную математику*. Эта область математики особенно бурно развивается и применяется в последние десятилетия именно благодаря внедрению в практику электронных вычислительных машин. Но об этом говорится в следующем разделе.

Сотни миллионов арифметических действий

В высшей математике решают дифференциальные уравнения и их системы. Уравнения могут быть самого разнообразного типа. Иногда они решаются легко, иногда их решение имеет очень громоздкий вид, но тем не менее его можно найти, как говорят, *точно*, т. е. выражая через какие-либо известные функции, скажем, тригонометрические.

Но часто бывают случаи, когда дифференциальное уравнение или их система принципиально не имеет точного решения (или же это решение еще не удалось найти). И вот ученые предложили другой путь подхода к проблеме. Были развиты приближенные методы решения дифференциальных уравнений. Суть приближенных методов состоит в том, что сложные дифференциальные уравнения заменяются системами алгебраических уравнений, а решение этих уравнений сводится к чисто арифметическим операциям, выполняемым в предписанной тем или иным методом последовательности.

Все изучаемые функции рассматриваются в приближен-

ных методах не при непрерывном изменении аргументов, а в дискретном, конечном числе точек. Например, если мы описываем распределение приземного атмосферного давления по северному полушарию, то мы должны задать значения давления в отдельных точках карты, например в узлах пересечения основных параллелей и меридианов (градусная сеть точек). Если, пользуясь такой сетью точек, мы по какой-либо схеме рассчитываем прогноз поля давления, то прогностические значения давления мы также получим в отдельных точках сетки.

Для каждой точки-узла сетки записывается одно (или группа) алгебраическое уравнение, а всего таких групп будет столько, сколько узлов.

Велико ли количество узлов, для которых надо произвести расчеты в какой-либо типичной задаче прогноза погоды? И сколько для этого потребуется произвести арифметических действий? Не попадаем ли мы «из огня в полымя», придя к уравнениям в принципе простым, но требующим для решения столько времени, что задача будет выглядеть фантастической?

Будем исходить из того, что нам надо описать с помощью уравнений. Допустим, что мы опять интересуемся распределением атмосферного давления по северному полушарию. В поле давления существуют, как мы знаем, области пониженного и повышенного давления — циклоны и антициклоны. Их характерные размеры — 1—2 тыс. км. Поэтому, если мы хотим описать более или менее детально структуру поля давления в таком циклоне, мы должны опираться на сеть точек, расстояние между которыми, или, как говорят, шаг, имеет порядок сотен километров.

В задачах вычислительной математики предпочитают иметь дело с правильными, регулярными, сетками точек (т. е. сетками с равномерно отстоящими друг от друга узлами). Примером регулярной сетки, часто применяемой в задачах численного прогноза, служит квадратная сетка точек, наложенная на карту северного полушария или какой-либо его части (рис. 1). В такой сетке величина ее шага составляет обычно 250—500 км¹.

Если изучается распределение метеорологических элементов не на одном уровне (скажем, уровне моря), а на нескольких, то сетка превращается уже в пространственную решетку, поскольку в задачах прогноза погоды применяют обычно вертикальное деление атмосферы на ряд уровней. Иногда при

¹ Задача пересчета значений метеорологических элементов с метеостанций в узлы какой-либо регулярной сетки точек — так называемый объективный анализ метеорологических полей — будет рассмотрена позднее (см. стр. 32).

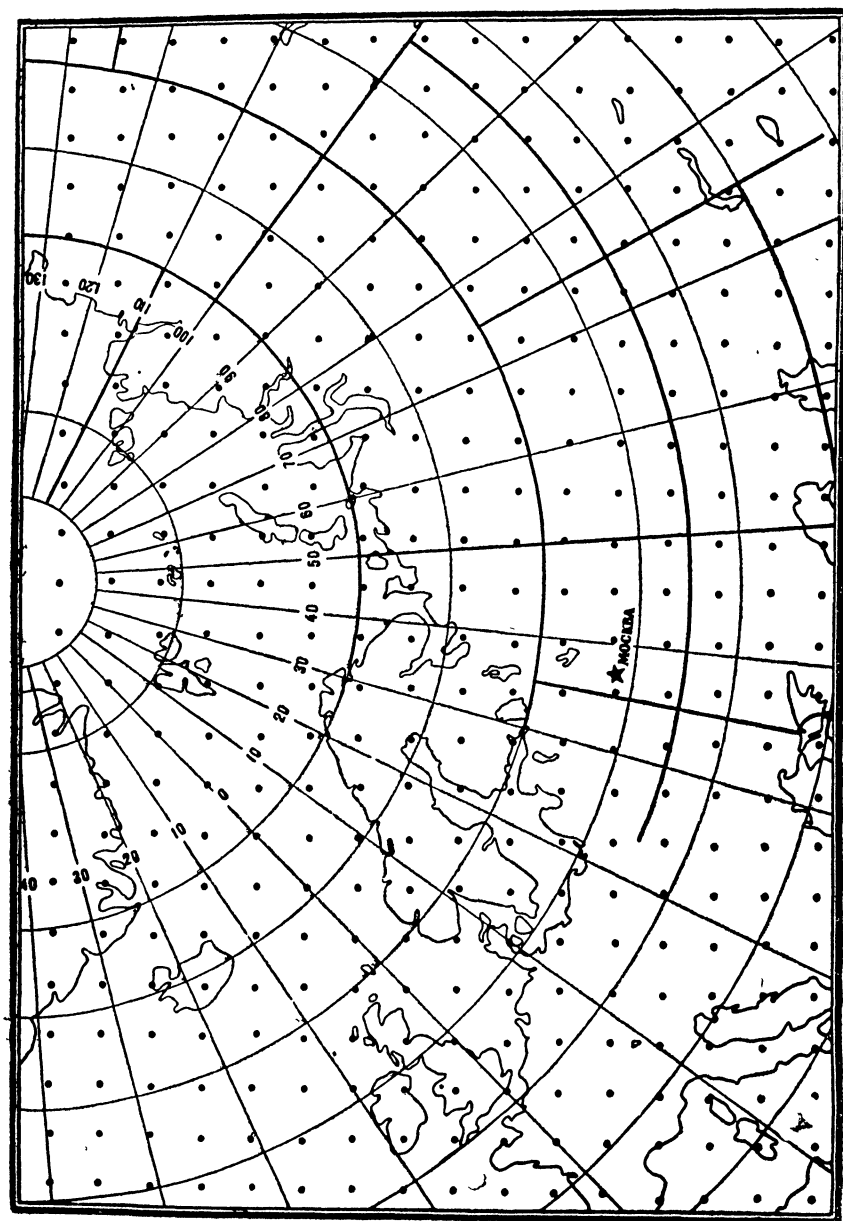


Рис. 1. Пример сетки для решения уравнений прогноза метеорологических полей.

изучении процессов на высотах до 10—15 км число таких уровней достигает 5 или даже 10¹. Чем больше число уровней и чем больше число предсказываемых метеорологических элементов, тем сложнее атмосферная модель, тем больше объем расчетов при решении ее уравнений.

Займемся, наконец, числовыми подсчетами.

Пусть мы хотим рассчитать прогноз одного метеорологического элемента — давления — на одном уровне атмосферы, скажем, на уровне около 5 км по северному полушарию². Как показывает теория, прогноз в этом случае сводится к решению одного дифференциального уравнения, которое позволяет по исходному полю давления определить его будущее распределение. Если шаг сетки выбрать равным 400 км, то количество ее узлов по всему полушарию превысит 2 тыс. Записывая дифференциальное уравнение модели в приближенной форме для каждого из узлов нашей сетки, придем к системе алгебраических уравнений, количество которых совпадает с количеством узлов сетки. Будем решать систему этих 2 тыс.³ уравнений каким-либо из разработанных в вычислительной математике методов последовательных приближений⁴.

Количество арифметических действий, которое нужно выполнить в первом (и любом другом) приближении при расчетах в одном узле, близко к 10. Таким образом, для однократного проведения расчетов по всей сетке (одно приближение) потребуется около 20 тыс. действий. Поскольку, однако, наш метод решения исходного дифференциального уравнения состоит в последовательных приближениях, то все расчеты (для всей сетки) надо повторить и не один раз. Практика показывает, что для достижения необходимой точности приходится выполнять иногда до 50 приближений. В итоге мы имеем уже 1 млн. арифметических действий!

Здесь мы упомянем еще об одном обстоятельстве, диктуемом законами вычислительной математики. Если мы хотим, чтобы приближенное решение системы алгебраических уравнений как можно меньше отличалось от теоретически точного решения дифференциального уравнения, мы должны прово-

¹ В таких случаях говорят: пятиуровневая или соответственно десятиуровневая атмосферная модель.

² Этот уровень называют обычно «средним уровнем» тропосферы, слоя атмосферы, лежащего между поверхностью земли и высотой 8—12 км.

³ Из-за того, что масштаб карты меняется с шириной, величина шага сетки (в километрах), как нетрудно видеть из рис. 1, будет несколько меняться от полюса к экватору.

⁴ В методах последовательных приближений решение уравнения (или системы уравнений) состоит из нескольких этапов: сначала получают первое приближение, отличающееся еще сравнительно небольшой точностью, потом второе — более точное и т. д., пока не приходят к последнему приближению, удовлетворяющему требуемой точности, которая задается заранее и определяется, в частности, физическим смыслом решаемой задачи.

дить решение «ступеньками», шагами по времени. Это означает, что даже в том случае, когда нас интересует прогноз, скажем, на 24 часа вперед, мы обязаны сначала дать прогноз всего на один час вперед. Иными словами, после того как машина рассчитает прогностическую карту на один час вперед, она «держит» ее в своей памяти, и по ней рассчитывается прогностическая карта еще на один час вперед и т. д. Практически же используются расчеты только на 24 часа вперед. Правила вычислительной математики определяют, что величина этого шага должна зависеть от другого шага — шага сетки — и при избираемом обычно шаге сетки в 250—500 км будет составлять, как правило, 1—2 часа.

Вернемся к нашему примеру. Допустим, что надо дать прогноз на трое суток вперед. Пусть величина шага по времени составляет 1,5 часа. Всего, таким образом, мы должны выполнить за сутки 16, а за трое суток $16 \times 3 = 48$ шагов. Поскольку, по нашим предположениям, на каждом шаге требуется произвести 1 млн. арифметических действий, за 48 шагов их число будет около 50 млн. А если решается более сложная задача? Если надо предсказать, скажем, значения не одного, а трех метеорологических элементов, и не на одном, а на пяти уровнях? Даже если предположить, что количество вычислений просто увеличится соответственно в три и еще в пять раз, то будем иметь уже 750 млн. операций. Но ведь в подобных задачах и сами уравнения делаются сложнее, поэтому объем вычислений увеличится до 1 млрд. операций и более¹.

Естественно, что до появления электронных вычислительных машин не могло быть никакой речи о возможном решении подобных задач. Да никто тогда и не ставил такие задачи, поскольку и сами прогностические модели, физические и математические их аспекты, удалось разработать только, пользуясь появившейся электронной техникой. А единичные примеры, известные в истории метеорологии, лишней раз убедительно показывали, насколько нереальным является решение задачи численного прогноза «вручную».

Так, стал уже классическим пример английского ученого Ричардсона, который в 1922 г. задумал дать прогноз погоды, исходя из наиболее полной системы уравнений гидромеханики. Прежде всего, он не смог должным образом упростить эту систему и не отфильтровывал, как это делают теперь, ненужные для прогноза погоды явления типа звуковых волн. Задача, таким образом, была поставлена неточно, и когда она

¹ По подсчетам американских ученых, для наиболее сложных проблем гидромеханики, сводящихся к решению систем уравнений шагами по времени, число требуемых операций может возрасти до 1000 млрд. К числу этих проблем относятся и некоторые метеорологические проблемы.

все-таки была решена, оказалось, что рассчитанные метеорологические поля не имеют ничего общего с настоящим прогнозом погоды. Но самое главное это то, что для расчета прогноза на сутки вперед Ричардсону понадобился чуть ли не целый год! А ведь нельзя забывать, что даже расчетное время, равное одним суткам, для прогноза на одни сутки делает этот прогноз никому не нужным. Поэтому даже средства «малой автоматизации», типа арифмометров или малых электрических машин, не в силах были бы сдвинуть задачу о численном прогнозе погоды с мертвой точки.

...И вот в начале 50-х годов появились электронные вычислительные машины. Мы прервем на время разговор о метеорологии и прогнозе погоды, чтобы сообщить читателю краткие сведения об устройстве и технических показателях современных электронных машин.

КАК РАБОТАЕТ ЭЛЕКТРОННАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАШИНА

Электронная цифровая вычислительная машина — это сложное автоматическое устройство, работающее на электронной и радиотехнической аппаратуре. Ее назначение — выполнять самые разнообразные операции над числами по заранее составленной программе. ЭВМ наиболее полезны, а иногда и просто незаменимы там, где работа связана с большим объемом вычислений и сложным логическим выбором решений.

Прообразом ЭВМ может служить обыкновенный арифмометр. Однако этот прибор, построенный на чисто механическом принципе, работает очень медленно и к тому же способен выполнять только арифметические действия над числами. При этом «программа», т. е. порядок, последовательность выполнения действий, результаты подсчетов должны запоминаться человеком (либо записываться). Что касается ЭВМ, то их неотъемлемым элементом является именно принцип автоматического, программного управления. В сочетании с громадной скоростью работы и способностью хранить и обрабатывать огромное количество чисел это придает ЭВМ необычайную универсальность, т. е. возможность решать самый широкий круг задач.

Составные элементы ЭВМ. Их назначение

Для осуществления расчетов в запоминающее устройство, или, как говорят, «память» ЭВМ, вводится *программа*. Программа состоит из *команд*, расположенных в строго определенной последовательности друг за другом. Каждая команда предписывает, какую именно опе-

рацию и над какими числами следует выполнять. Это могут быть и четыре арифметических действия и так называемые логические операции¹, например операция сравнения двух чисел, операция определения знака числа (плюс или минус), операция выделения какой-либо его части (допустим, старших десятичных разрядов или целой части) и др. Имеются и такие команды, как команды передачи управления в то или иное место программы, т. е. к той или иной стадии расчетов, иногда в зависимости от результатов предыдущих расчетов (скажем, по схеме: если $A+B=C>0$, то уйти к участку программы K_1 , а если $A+B=C\leq 0$, то уйти к участку K_2). Существуют также команды пересылки чисел из одного места памяти в другое, команды ввода чисел в память машины (допустим, с перфокарт) и вывода результатов из машины (допустим, с печатью или перфорацией этих чисел или записью их на магнитную ленту), команда «Стоп» — прекращения расчетов и др.

Каждая модель ЭВМ имеет свой набор команд, определяемый ее конструктивными особенностями.

Одним из важнейших элементов программ являются *циклы*. Цикл — это определенная группа команд, которая выполняется многократно, но иногда с изменением одного или нескольких расчетных параметров или группы чисел, над которыми в данный момент производятся действия.

Для решения каждой конкретной задачи на ЭВМ данного типа составляется своя программа. Например, говорят: «Запрограммировать для машины БЭСМ-2 задачу прогноза поля давления у поверхности земли на северном полушарии». При этом, естественно, предполагается, что сама совокупность, последовательность этапов расчета, так же как и все расчетные формулы, известны². Запрограммировать задачу — это значит перевести задачу на язык команд, понятный машине.

Каждая модель ЭВМ обладает внешними запоминающими устройствами, обычно расположенными на магнитных барабанах или магнитных лентах.

В отличие от внешней памяти ту память, о которой говорилось выше, называют иногда внутренней, или оперативной. Процесс выборки чисел и команд из внутренней памяти происходит намного быстрее, чем из внешней. Зато внешняя память позволяет хранить намного больше чисел. Поэтому оперативная память является как бы «живой» памятью, так как над числами, которые находятся в ней, машина непосред-

¹ С помощью логических операций обычно и производится автоматический выбор путей решения и последовательность выполнения операций.

² Иными словами, известен алгоритм задачи. Под алгоритмом понимается предписание, определяющее содержание и последовательность операций, переводящих исходные данные в искомый результат.

ственно производит различные операции. С помощью же внешней памяти можно только хранить числа. Прежде чем выполнить над ними расчеты, необходимо «вызвать» их в оперативную память.

Современные ЭВМ и их возможности

Какого же уровня достигла современная вычислительная техника? Важнейшими показателями работы ЭВМ являются ее быстродействие и объем памяти. Одна из первых серийных советских ЭВМ «Стрела», выпущенная в 1953 г., могла выполнять 2—3 тыс. операций в секунду. Демонстрировавшаяся на международной выставке «Интероргтехника-66» отечественная машина БЭСМ-4 способна совершать уже около 20 тыс. операций в секунду. Электронная вычислительная машина ИБМ-7094, используемая в настоящее время в оперативной прогностической работе Бюро погоды США, производит около 200 тыс. операций в секунду. У машины БЭСМ-6 эта скорость доходит до грандиозной цифры 1 млн., а у машины СДС-6600—до 1,5 млн. операций в секунду.

Внутренняя (оперативная) память современных ЭВМ вмещает обычно тысячи или десятки тысяч ячеек.

Так, на машине «Урал-11» во «внутренней памяти» может храниться до 16 384 24-разрядных чисел. Внешние же устройства этой машины позволяют хранить: на магнитных барабанах до 400 тыс., а на магнитных лентах до 8 млн. чисел.

Посмотрим теперь, насколько быстрее современная ЭВМ будет справляться с порученными ей прогностическими задачами. Допустим, решается сравнительно простая задача о прогнозе поля давления на одном уровне атмосферы по северному полушарию. Мы уже выяснили ранее (см. стр. 16), что для ее выполнения требуется, ориентировочно, 50 млн. операций. Если наша ЭВМ обладает быстродействием 20 тыс. операций в секунду, она затратит на расчет прогноза $5 \cdot 10^7 : 2 \cdot 10^4 = 2,5 \cdot 10^3$ сек., т. е. около 40 мин. Что ж, дать прогноз на 3 суток в течение менее чем часа — это уже вполне реальная и своевременно выполняемая задача. Правда, если говорить о более сложных задачах, время расчета становится менее приемлемым. Помните, для прогноза по трехуровневой модели, как мы подсчитали, надо выполнить около 750 млн. арифметических действий. Машина, выполняющая ежесекундно 20 тыс. операций, потратит на такую задачу уже более 15 часов! Иными словами, для решения подобных задач нужны ЭВМ с большим быстродействием.

В особенности большие требования предъявляют к ЭВМ задачи долгосрочного численного прогноза. Необходимость хранить большое число различных метеорологических полей и вести расчет на длительные сроки влечет за собой повышенные требования как к надежности, устойчивости работы ЭВМ, так и к ее скоростным и емкостным показателям. Одна только начальная информация, вводимая в этом случае в ЭВМ, потребует не менее 20 тыс. ячеек. Уже сейчас необходимы машины, обладающие объемом памяти в сотни тысяч ячеек и с быстродействием в сотни тысяч операций в секунду. При дальнейшем же развитии методов краткосрочных и долгосрочных прогнозов в самое ближайшее время понадобятся машины, способные выполнять до 1—3 млн. операций в секунду.

...И дело не только в прогнозе. Применение ЭВМ в метеорологии не ограничивается расчетом задач прогностического содержания. Машины нужны и для многого другого.

КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ

Что нужно автоматизировать?

Для того чтобы ответить на этот вопрос, проследим за тем путем, который должна пройти метеорологическая информация с момента наблюдения и до того, как машина начнет считать прогноз. Перенесемся лет на 10 назад, когда прогнозы с помощью ЭВМ еще только начинали рассчитывать, и вся структура метеорологической службы была приспособлена исключительно к нуждам синоптиков.

Итак, начнем с наблюдений. Несколько раз в сутки, в одни и те же часы, с аэрологических станций в воздух взмывают радиозонды. Около тысячи поднимается их одновременно по всему земному шару. Радиозонды приносят сведения о температуре, давлении, влажности в атмосфере до высот 25—30 (редко до 42) км. В то же время на метеостанциях производят измерение метеорологических элементов у поверхности земли. После предварительной обработки все эти данные пересылаются в Центры сбора метеорологической информации, многочисленные Бюро погоды, где по ним должен составляться прогноз.

Передают метеорологические данные обычно по радио или телеграфу. Для этого их кодируют, объединяя в телеграммы. Каждая метеорологическая телеграмма несет информацию о номере станции, ее географическом районе, точных координатах, а затем — в строго определенном порядке — уже сами сведения о погоде на той или иной станции за данный срок.

По мере поступления телеграмм в Центр сбора данных их раскодируют, и значения метеорологических элементов переносят на географические карты. После нанесения данных с большого числа станций, карты обычно расчерчивают, соединяя в изолинии точки с равными значениями того или иного метеорологического элемента. Так появляются карты распределения по земному шару (или какой-либо его части)

температуры, давления, осадков и пр. Это — уже почти готовый исходный материал для составления прогноза погоды.

Если прогноз дается численным методом и считается на ЭВМ, то, как мы знаем из главы I, значения исходных полей метеорологических элементов должны быть известны в узлах регулярной сетки точек, а не на отдельных станциях, неравномерно распределенных по земному шару. Данные необходимо «снять» с расчерченной карты, наложив на нее регулярную сетку точек, и выписать их на специальные бланки, где все числа — значения метеорологических элементов в узлах сетки — будут иметь уже такой вид, в котором они после пробивки на перфокарты или перфоленту могут быть введены в ЭВМ. Теперь все готово для расчета прогноза, и эстафетная палочка передается, наконец, в «руки» вычислительной машине (рис. 2 на стр. 27).

Все было бы хорошо, но ...если подсчитать, сколько времени требуется для выполнения всех перечисленных процедур, то получится, что на все эти предварительные действия затрачивается около 9 час., а к прогнозу еще не приступили!

Конечно, мы привели довольно приближенное время. В какой-то мере быстрота выполнения всех предшествующих прогнозу процедур зависела от организации всей работы в данном Бюро погоды или, скажем, от числа людей, занятых на различных стадиях обработки. Но большого выигрыша во времени получить невозможно. Конечно, если не ориентироваться на более простые прогностические схемы, для которых исходные данные требуются не на пяти уровнях, а на одном или двух, и не по всему северному полушарию, а, скажем, по территории Европы и окружающих морей.

По такому пути, собственно, и вынуждены были идти «первооткрыватели» в численных методах прогноза погоды.

В переходе к более сложным прогностическим схемам их связывали не только трудности принципиального, физико-математического характера, не только значительное время, которое тратили бы на расчеты по подобным схемам еще сравнительно медленно работающие машины, — но и в большой степени ручная система предварительной обработки метеорологической информации на ее пути к машине. Ведь прогноз на сутки, рассчитанный с опозданием чуть ли не в 10 часов, представляет уже гораздо меньшую ценность!¹

И почти парадоксальным выглядит тот факт, что центральное звено всего процесса составления прогноза — непосредственный расчет прогноза на ЭВМ — занимает ничтожно

¹ Не надо забывать, что после того как расчет прогноза на ЭВМ закончен, определенное время уходит еще на расчерчивание прогностических карт.

малое время по сравнению с подготовительными этапами, как правило, от 5 до 30 мин. для предсказания прогноза на сутки.

А нельзя ли автоматизировать весь процесс подготовки исходных данных для численного прогноза? Можно. Однако практически до появления ЭВМ говорить об этом было бессмысленно. В наше время на пути комплексной автоматизации метеорологической службы сделаны уже значительные успехи. О них мы сейчас и расскажем.

Автоматизация сбора и передача метеорологической информации

Как происходил сбор информации на станциях наблюдения и передача ее по каналам связи вплоть до недавнего времени, мы уже говорили.

Заметим, что подавляющее число процессов, предшествующих передаче, выполнялось вручную!¹ «На глазок» считывались показания приборов, регистрирующих приземное давление, температуру, влажность, на слух принимались сигналы радиозондов, вручную или с помощью самых примитивных вычислительных средств осуществлялся перевод этих сигналов в числовые значения тех или иных метеорологических элементов, вручную, наконец, кодировались метеорологические телеграммы. Все эти операции занимали очень много времени и, кроме того, часто приводили к ошибкам. Неправильно принял или расшифровал наблюдатель сигналы радиозонда, ошибся при кодировании телеграммы, — в результате в Гидрометцентр и Бюро погоды поступала искаженная телеграмма.

В то же время, как мы видели выше, все операции, сопутствующие сбору и передаче метеорологических данных, вполне стандартны и поэтому поддаются автоматизации. Ученые считают, что ее внедрение должно происходить по следующим основным направлениям.

Автоматические метеостанции. Такие станции уже внедряются в практику. Они автоматически регистрируют показания приборов (например, радиозондов), с помощью небольшой вычислительной машины выбирают нужные для дальнейшей передачи величины, обнаруживают ошибки измерений и ошибки, возникающие из-за помех при приеме радиосигна-

¹ Ручной характер сбора и первичной обработки метеорологической информации частично сохраняется и в настоящее время.

лов. «Очищенные» данные наблюдений автоматически группируются в радиogramмы и передаются по телеграфу или радио в Центр сбора данных.

Автоматические метеостанции не только устраняют мало-производительный труд людей, помогают освободить человека от черновой работы, но и позволяют расширить сеть наблюдений за атмосферой. Ведь такую станцию можно установить в труднодоступных горных районах, в тундре, среди льдов Заполярья. Эти станции могут находиться и на плавучих буйах в безбрежных океанских просторах. Посредине Мексиканского залива есть такая стационарная автоматическая станция. Она оказывает большую помощь особенно в тех случаях, когда к южному побережью США приближается разрушительный ураган.

Искусственные спутники Земли. Это, во-первых, спутники, передающие метеорологическую информацию (типа запущенного в СССР в июне 1966 г. спутника «Космос-122» или американских спутников серии «Тирос», «Нимбус» и «Эсса») и, во-вторых, спутники связи (типа советских спутников серии «Молния-1»). Метеорологические спутники наблюдают за облачностью, измеряют потоки излучения, идущие от Солнца и отраженные Землей и атмосферой. В результате на Землю передается огромная информация. Однако развитие наблюдений со спутников требует совершенствования способов анализа полученных данных на электронно-вычислительных машинах. В дальнейшем электронно-вычислительные машины должны будут отыскивать в огромной массе принимаемого материала сведения о наиболее важных, и прежде всего об опасных явлениях погоды, и быстро выдавать материалы об ураганах в океане, о штормах, грозах. Только полная автоматизация всех этапов переработки информации, вплоть до вычерчивания карт облачности, поля температуры, земной поверхности, поля излучения по всему земному шару, позволит должным образом использовать обильный материал.

Спутники связи могут собирать данные измерений с метеорологических спутников и также передавать их на Землю. Такие спутники должны быть «повешены» на большом удалении от Земли, чтобы они «видели» все метеорологические спутники, наблюдающие за отдельными «полосами» атмосферы.

Учеными планируется также организация «опроса» спутниками радиозондов. В этом «опросе» примут участие как метеорологические спутники, так и спутники связи.

В результате на Землю одновременно будет передаваться и спутниковая, и радиозондовая информация. Спутник связи может установить контакт и с автоматической метеостанцией. Пролетая над ней, он «запросит» данные измерений температуры, давления и влажности, примет их и запишет. Ока-

завшись над станцией приема, спутник включит передатчик и пошлет эти сведения на Землю.

Машина автоматически вводит и обрабатывает метеорологические телеграммы

Перенесемся теперь в Центр сбора метеорологических данных и посмотрим, какие же процессы проходит информация, поступающая туда по различным каналам связи.

Так ли просто рассортировать и обработать эту информацию? Так ли просто привести ее к такому виду, который позволит наносить данные на карты, производить анализ этих карт и, наконец, составлять по ним прогнозы погоды?

Оказывается, что это весьма нелегкая задача, требующая при ручной обработке огромной затраты времени и большого числа людей. Ведь в течение суток в Центр сбора данных приходит более 10 тыс. синоптических, аэрологических, морских и гидрологических сообщений¹. Если перевести общее количество поступающей информации в десятичные сообщения, то таких знаков, приходящих за сутки, будет примерно 1,5 млн. К этому надо добавить информацию, которая приходит не ежедневно, а по декадам и месяцам. Таковы, например, климатические данные, а также агрометеорологические сообщения². На основе полученной информации можно сделать вывод, что суммарное число десятичных знаков, поступающих в Центр сбора данных, в иные дни подходит к 2 миллионам!

К тому же вся эта информация поступает в течение суток неравномерно. «Пики» приходятся на периоды времени, отстоящие на 2—3 часа от основных сроков наблюдений.

Процесс сортировки, обработки и хранения метеорологических данных, поступающих в Центр сбора, необходимо было автоматизировать, и здесь в первую очередь на помощь человеку пришли электронные вычислительные машины.

Что это значит — автоматическая обработка метеорологи-

¹ Морская информация поступает с «кораблей погоды» и береговых станций и несет сведения о температуре воздуха и воды, атмосферном давлении, о состоянии поверхности моря, о солености воды и т. п.

Гидрологическая информация содержит сведения о состоянии рек и озер, т. е. об уровнях воды и расходах воды, о ее температуре, о толщине льда, а также данные о снегосъемках.

² Агрометеорологическая информация — это сведения о состоянии почв: ее температуре, влажности, о влагообеспеченности для произрастания тех или иных культур и т. п.

ческой информации? Данные с каналов связи — через тот или иной преобразователь — вводятся непосредственно в ЭВМ. Машина автоматически опознает род введенных в нее телеграмм, выбирает среди них нужные (например, аэрологические), раскодирует их и формирует в своей памяти как бы «машинную» географическую карту, причем метеорологические данные по каждой станции хранятся в одной или нескольких последовательных ячейках памяти. По этой «машинной карте» автоматически производится *интерполяция* (пересчет) значений нужных метеорологических элементов в узлы регулярной сетки точек, т. е. проводится, как говорят метеорологи, ее *объективный анализ*. По проанализированной карте уже можно рассчитывать численный прогноз.

а) *Раскодирование телеграмм, поступивших с каналов связи, и нанесение данных на карты*

б) *Ввод метеорологических телеграмм с каналов связи непосредственно в ЭВМ*

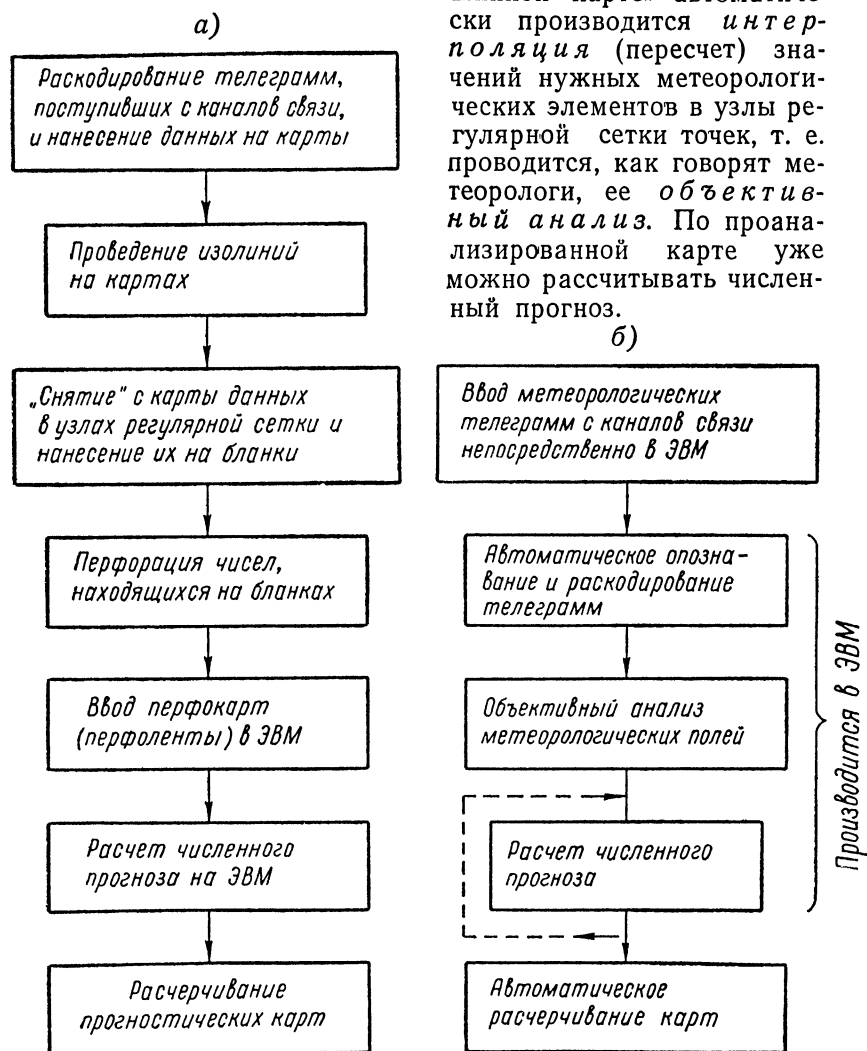


Рис. 2. а — такой путь должна была пройти раньше метеорологическая информация при расчете прогноза на ЭВМ; б — такой путь она проходит теперь.

При такой последовательности процессов, предшествующих составлению прогноза погоды, нанесение раскодированных данных на карты, их расчерчивание, «снятие» данных в узлах регулярной сетки точек и их перфорация вообще делаются не нужными (см. рис. 2).

Раскодирование телеграмм переходит к машине, а исходным материалом для прогноза служат непосредственно телеграммы, поступающие по каналам связи из различных мест земного шара.

Остановимся кратко на основных этапах автоматической обработки метеорологической информации.

Автоматический ввод данных в ЭВМ. Устройство, осуществляющее автоматический ввод данных в ЭВМ, должно преобразовать тот код, который используется при составлении метеорологических телеграмм, в набор символов, понятных для ЭВМ. Таким устройством может служить, например, специальный прибор, работающий по принципу фотоэлемента, — «фотоввод». Через фотоввод пропускается бумажная перфолента телетайпа¹. Совокупность пробитых отверстий на этой ленте представляет собой закодированный текст метеорологической телеграммы.

На пути бумажной ленты оказывается пучок света. Когда этот пучок встречает в той или иной позиции ленты отверстие, вырабатывается электрический импульс (если отверстия в этой позиции нет, импульс отсутствует). Электрические импульсы после их усиления могут быть либо непосредственно введены в оперативную память ЭВМ, либо записаны на магнитную ленту. В последнем случае ввод данных в оперативную память происходит уже с магнитной ленты с помощью простой и короткой программы. Управление работой самого фотоввода также осуществляется программным путем.

Для того чтобы ввести всю необходимую для прогноза начальную информацию, требуется обычно не более минуты.

Однако устройство типа фотоввода в работе часто оказывается довольно ненадежным. Дело в том, что на бумажной ленте телетайпа могут иметься грубые склейки, нечеткие пробивки, небольшие разрывы, и вводимая информация искажается. Поэтому ввод данных в машину с бумажной телеграфной ленты нельзя считать наиболее совершенным способом автоматизации ввода. Более того, использование телетайпа в качестве одного из звеньев в цепи комплексной автоматизации обработки метеорологической информации вообще малооправдано. Ведь этот прибор, действующий по механическому принципу пишущей машинки, работает довольно

¹ Телетайп представляет собой автоматическую пишущую машинку, работающую от электрических импульсов, передаваемых по проводам или по радио.

медленно: для отпечатки 1 тыс. знаков ему требуется целых 10 минут!

Более надежным, бесспорно, является ввод данных в ЭВМ непосредственно с каналов связи.

В этом случае электрические импульсы, передаваемые, скажем, по телеграфу, сразу поступают на какой-либо накопитель, связанный с ЭВМ (например, магнитную ленту).

Работы в этом направлении ведутся сейчас в СССР и США. В нашей стране для этой цели должно применяться так называемое буферное оперативное запоминающее устройство (БОЗУ). К нему могут быть подключены сразу 16 телеграфных каналов. Информация, накопленная на БОЗУ, попадает далее на магнитную ленту, которая уже непосредственно используется при работе машины. Ввод в эксплуатацию такого «безмеханического» устройства ввода намного ускорит автоматическую обработку метеорологических данных и сделает эти данные более достоверными.

Автоматическое опознавание и раскодирование метеорологических телеграмм. Итак, метеорологические телеграммы — тем или иным путем — введены в машину. Теперь необходимо их раскодировать. Однако прежде чем добраться до этого, машине приходится провести немалую подготовительную работу.

Во-первых, каждую введенную в машину телеграмму надо разбить на группы, соответствующие тем, на которые ее подразделяли ранее, — при закодировании (каждая группа содержит сведения либо о местоположении данной станции, либо о результатах наблюдений). Для этого служит специальный признак-сигнал. После разбивки одна группа телеграммы занимает обычно отдельную ячейку машинной памяти.

Казалось бы, теперь можно приступить к раскодированию телеграмм? Но этому мешает еще одно обстоятельство. Дело в том, что метеорологические телеграммы разного назначения (аэрологические, гидрологические и т. п.) кодируются по-разному. Поэтому и программы, служащие в ЭВМ для автоматического раскодирования телеграмм, также должны быть разными. Пока машина не опознала вида телеграммы, она «не знает», какой именно программой ей следует пользоваться для раскодирования. Отсюда рождается и очередная задача — *опознавание* вида телеграммы.

Для опознавания телеграмм машина использует наличие в них специальных групп — так называемых идентификаторов начала (т. е. групп, служащих признаком начала телеграммы), либо производит логическую работу по выявлению внутренней структуры телеграммы.

После опознавания телеграммы начинается (в случае необходимости) ее *раскодирование*. Рассмотрим аэрологические телеграммы. В процессе раскодирования такой те-

леграммы в памяти ЭВМ формируется ее «макет». В макете все результаты наблюдений сгруппированы по уровням атмосферы, т. е. сначала идут данные о давлении, температуре, ветре и т. п. на более низком уровне, потом на следующем по высоте и т. п. Указывается в макете и индекс станции, т. е. официально присваиваемый ей номер, однозначно фиксирующий ее географическое положение. Если индекс станции машиной почему-либо не найден, телеграмма выбывает из дальнейшей обработки.

Совокупность макетов, т. е. все опознанные и декодированные телеграммы, образует в памяти ЭВМ как бы «машинную карту», в которой собраны все данные, необходимые для дальнейшего анализа и прогноза.

Автоматическая обработка метеорологических телеграмм — процесс весьма трудоемкий. Ведь в память ЭВМ нужно ввести громадное количество информации — иногда более сотни тысяч кодов. Поэтому не всякая ЭВМ пригодна для такой работы. Программирование задач по автоматической обработке телеграмм также сопряжено с немалыми трудностями. Эти трудности вызываются главным образом тем, что приходится предвидеть (и отражать в программах) наличие на практике большого количества всякого рода отклонений от предписываемых метеорологическими кодами норм.

Например, среди просматриваемых телеграмм машине могут встретиться такие, у которых нет идентификатора начала, т. е. специальных кодовых групп, утвержденных для официальных кодов. В этом случае программа опознавания и декодирования должна предусмотреть возможность определить вид телеграммы, ее начало, ее длину и т. п. при помощи некоторых других признаков (например, по ее внутренней структуре). В противном случае телеграмма так и останется необработанной.

Возможны также неточности и искажения при кодировании телеграмм на станциях и передаче их по каналам связи. Так, одни группы ни с того ни с сего пропадают, в другие могут вклиниться совершенно посторонние знаки и т. п. Иногда ошибочными оказываются чуть ли не 20% всех телеграмм. Поэтому любая программа автоматической обработки телеграмм никогда не сможет обеспечить их полное (100%-ное) декодирование. Некоторые же ограничения приходится налагать на программу сознательно, чтобы в оперативных условиях ее работа не занимала слишком много времени.

Существующие оперативные программы позволяют, однако, автоматически декодировать до 96% обрабатываемых аэрологических телеграмм. Всю обработку машина выполняет за несколько минут. Хотя это и не так много, но объем ин-

формации, поступающей в Центр сбора данных, непрерывно увеличивается, и единственным выходом из положения служит дальнейшее сокращение времени, требуемого на автоматическую обработку телеграмм.

Путь к этому лежит прежде всего через усовершенствование сложившейся системы кодирования и передачи метеорологических сообщений.

Приведем некоторые требования по улучшению кодов:

1) целесообразно передавать по каналам связи в первую очередь сообщения, необходимые для численного анализа и прогноза, т. е. сведения о значениях давления, ветра, температуры, влажности и т. п. на нескольких уровнях атмосферы; 2) должно быть строго оговорено место каждой группы в сообщении; 3) в случае отсутствия какой-либо группы недопустим просто переход в тексте телеграммы к следующей группе. Специальные признаки должны указывать на отсутствие данных.

Трудности по переработке существующих метеорологических кодов в большой степени связаны с тем, что ими пользуются в международном масштабе. Это своеобразный язык, на котором «разговаривают» десятки тысяч связистов и метеорологов. Он сложился давно и давно вошел «в привычку» причастных к нему людей. Поэтому изменения в этом языке надо вводить очень осторожно и так, чтобы практически любой работник, составляющий или раскодирующий телеграммы, был знаком с этими изменениями и привык к ним в своей повседневной оперативной работе. Конечно, придет время, когда вся работа по кодированию и раскодированию метеорологических телеграмм будет целиком выполняться машинами, но пока этого нет, любые изменения в языке-коде должны стать такой же «азбукой», как и сам код.

Нам осталось осветить еще один вопрос, относящийся к автоматической обработке метеорологической информации. После раскодирования телеграмм порядок их следования в памяти машины довольно произволен и определяется прежде всего расписанием поступления данных с каналов связи. Чтобы упорядочить хранимую в ЭВМ информацию, надо провести ее дополнительную обработку. Подобная задача в применении к аэрологическим и синоптическим станциям северного полушария была выполнена в Советском Союзе. Теперь имеется возможность достаточно эффективно выделять с помощью ЭВМ нужную информацию практически на любой области северного полушария. Это позволяет обеспечить наиболее скорый расчет анализа (и прогноза) для любой части полушария. Решение данной задачи полезно для организации оперативного обслуживания информацией самолетов, летящих вдоль заданных авиатрасс, кораблей, следующих определенным курсом, и т. п.

Машина проводит «объективный анализ» метеорологических полей

Предположим теперь, что нам надо рассчитать численный прогноз элементов погоды, скажем, над Европой и севером Атлантического океана. Метеорологические телеграммы уже опознаны, раскодированы и хранятся в памяти машины. Специальная программа выдает нам всю информацию о погоде на станциях, лежащих в пределах интересующего нас географического района. Что делать дальше? Ведь сразу рассчитывать прогноз погоды нельзя: для этого исходные данные должны быть известны в узлах регулярной сетки точек, а отнюдь не на станциях, чрезвычайно неравномерно распределенных по земному шару.

Отсюда рождается еще одна, «подсобная» задача: произвести пересчет всех числовых значений интересующих нас метеорологических элементов со станций на узлы сетки. Это и есть в обычном понимании *объективный анализ* метеорологических полей. Называя проведение такого анализа подсобной задачей, мы просто имеем в виду, что анализ этот нужен не сам по себе, а для численного прогноза. Но дело не всегда обстоит именно так. Объективный анализ может иметь и самостоятельную ценность, помогая синоптикам разобраться в текущей погоде — погоде сегодняшнего дня.

Синоптики в своей повседневной работе тоже проводят анализ различных метеорологических полей. Имея данные на станциях, они соединяют изолиниями точки с одинаковыми значениями того или иного метеорологического элемента, строят карты распределения давления, температуры, ветра и т. п. по земному шару.

Почему же такой анализ не называют объективным? Дело в том, что синоптики руководствуются в своей работе лично накопленным опытом, профессиональными навыками. А отсюда рождается отличие как самих анализов друг от друга, так и прогнозов, основанных на этих субъективно проведенных анализах.

Было подсчитано, что прогностические карты, построенные на 3 суток вперед по данным различных анализов, могут быть абсолютно непохожими друг на друга! А это совершенно недопустимо. Нежелательна также и медлительность синоптических методов анализа: если нужно проанализировать большую серию карт погоды у поверхности земли и на нескольких высотах, на это уходит обычно 2—3 часа и более.

Вот почему развитие методов объективного, численного, анализа не только стало необходимым звеном в цепи комплексной автоматизации службы погоды, но и приобрело самостоятельный интерес. На чем же основан объективный анализ метеорологических полей?

Рассмотрим такой пример. Допустим, что 20 января 1967 г. по огромной акватории Северной Атлантики сведения об атмосферном давлении дали только несколько станций. Как восстановить поле давления в узлах квадратной сетки точек, отстоящих друг от друга на сравнительно малое — около 300 км — расстояние?

Предположим, что среди пришедших сообщений не было ни одного, где бы значение давления было больше P_{max} и меньше P_{min} . С помощью сравнительно простых формул можно произвести пересчет значений давления с наших станций на узлы сетки, положив в основу расстояние каждого узла от той или иной станции. Чем ближе узел к станции, тем ближе и значение давления в нем будет к значению давления на станции. Очевидно, при этом, что ни в одном из узлов не окажется давление больше P_{max} и меньше P_{min} .

Это довольно формальный подход к задаче, но он часто дает неплохие результаты. Другой возможный подход основан на знании статистических закономерностей в свойствах метеорологических полей.

Один раз установив такие закономерности, скажем, для поля давления, мы можем применять их к каждой конкретной ситуации, так же как и в предыдущем методе, пользуясь строгими формулами. Подобный метод, разработанный у нас в стране доктором физико-математических наук Л. С. Гандиным, успешно применяется в оперативной прогностической службе.

Оказывают помощь исследователю и сведения о многолетнем, климатическом распределении давления над различными областями земного шара. Учесть «климат» при расчетах можно также на основе формул. В нашем случае, например, мы можем использовать климатические данные о распределении атмосферного давления над Северной Атлантикой в январе месяце. Очень «доверять» климату, однако, нельзя, так как погода каждого дня может значительно от него отличаться. И этот факт находит отражение в формулах.

Допустим, наконец, что 19 января, т. е. днем раньше, сообщения об атмосферном давлении над Северной Атлантикой поступили с большего числа станций. Рассчитав численный прогноз на сутки, мы получим ожидаемое, вполне достоверное распределение давления на 20 января. Это распределение также может войти составной частью в искомый анализ поля давления над Северной Атлантикой 20 января.

Совокупность формальных признаков, средних, статисти-

ческих закономерностей, которые отражают структуру метеорологических полей, а также дополнительных влияний, выражающихся строго с помощью определенных формул, обычно и входит в понятие того, что объединяют под названием объективный анализ.

Существует несколько методов, несколько подходов к задаче объективного анализа, и в каждом случае соотношение перечисленных факторов может быть различным.

Для нас важно одно, а именно, что любой метод объективного анализа предполагает расчет по совершенно определенным, известным заранее формулам, а поэтому лишен какого бы то ни было субъективизма. Конечно, многолетний опыт синоптиков и то, что они в своей работе используют зачастую такие факторы и взаимосвязи, которые еще не поддаются точному математическому учету, может приводить и к лучшим результатам. Однако общепризнано, что методы объективного анализа метеорологических полей не уступают субъективным, синоптическим методам. Поэтому они все больше входят в повседневную оперативную практику.

Кроме пересчета (интерполяции) значений метеорологических элементов со станций в узлы регулярной сетки, объективный анализ включает в себя и такую важную задачу, как согласование полей различных метеорологических элементов. Она возникает потому, что в природе эти поля сильно связаны между собой, влияют друг на друга. И наконец, еще одна часть объективного анализа — это обнаружение, отбраковка и исправление ошибочных данных наблюдений, содержащихся в метеорологических телеграммах.

Все эти задачи также решаются машиной по строго определенным формулам; только когда они будут выполнены, можно начинать расчет численного прогноза.

Для каких районов земного шара объективный анализ оказывается наименее удачным? Естественно, для тех, откуда поступает мало метеорологической информации, т. е. для труднодоступных горных районов, для океанов и малонаселенных пунктов.

Конечно, полеты метеорологических спутников в скором времени несколько прояснят картину. Но и этих наблюдений все равно будет недостаточно. Необходимо способствовать расширению сети метеорологических станций.

К проблеме размещения новых станций наблюдения по земному шару можно подойти теоретическим путем. И на помощь здесь снова приходят электронные вычислительные машины. Один из таких теоретических методов, предложенный доктором физико-математических наук С. А. Машковым, заключается в следующем.

Прежде всего машиной рассчитывается распределение средних теоретических ошибок объективного анализа по зем-

ному шару и строится карта этих ошибок. Она отражает степень неравномерности существующей в настоящее время сети станций: где меньше станций, там величина ошибки в среднем больше. В тех точках карты, где ошибки анализа максимальны, машина условно расставляет новые станции. После этого опять рассчитывается карта ошибок, но уже с учетом вновь «поставленных» станций наблюдения. На этой новой карте в точках с наибольшими значениями ошибки машина опять «расставляет» новые станции. Такие «туры» расстановки все новых и новых станций продолжают до тех пор, пока средняя по всей карте теоретическая ошибка или максимальная теоретическая ошибка не станет меньше допустимых значений, например, окажется близко к приборной ошибке наблюдений.

Расчеты показали, что для удовлетворения запросов анализа и прогноза погоды по северному полушарию надо расставить около 150 новых станций наблюдения.

Так с помощью ЭВМ удастся подойти к этому важнейшему для всей метеорологии вопросу, причем подойти, по сути дела, кибернетическим путем. Машина сама определяет, как облегчить задачу по расчету анализа и прогноза метеорологических полей, которую ей впоследствии придется выполнять.

Машина рассчитывает прогноз метеорологических полей

Наконец, все этапы, предшествующие составлению прогноза, пройдены. Мы подошли к основному звену в той цепи, по которой движется метеорологическая информация, — к *оперативному численному прогнозу*. Здесь нет необходимости описывать теоретические модели, которые кладутся в основу оперативных численных прогнозов, или расчетные схемы, применяющиеся для решения прогностических задач. Обо всем этом уже говорилось в первой главе. Нам осталось рассказать об организационной стороне дела, о тех процедурах, которые приходится выполнять при непосредственной реализации оперативного прогноза на ЭВМ. Здесь же мы коротко расскажем о состоянии оперативной службы численных прогнозов метеорологических полей в разных странах земного шара.

Прежде всего, подытожим, к чему же сводится реализация численного прогноза в оперативных условиях при разной

степени автоматизации подготовительных процессов в обработке метеорологической информации.

I стадия автоматизации. Автоматической обработки телеграмм, поступающих в Центр сбора данных по каналам связи, еще не производится. Объективный анализ метеорологических полей также отсутствует. Эту стадию автоматизации можно назвать наинизшей. Собственно автоматически рассчитывается только сам прогноз метеорологических полей. Все предварительные этапы подготовки данных для прогноза выполняются «вручную».

Во всех прогностических центрах мира автоматизация началась именно с расчетов самих прогнозов, а не с автоматической обработки поступающей первичной информации. В ряде прогностических учреждений работа по составлению оперативных численных прогнозов пока так и не выходит за рамки этого этапа.

При данной степени автоматизации реальную оперативную ценность имеет расчет по сравнительно простым прогностическим схемам и к тому же для очень небольшой территории. Таким может быть, например, прогноз давления на среднем уровне тропосферы для Северной Атлантики, Европы и европейской части СССР. Давать же оперативный прогноз на нескольких уровнях и для всего северного полушария (и тем более всего земного шара) здесь с точки зрения расходуемого времени просто невозможно. Это особенно важно, если прогноз дается не более чем на одни сутки: тогда при подготовке дорог буквально каждый час.

II стадия автоматизации. Хотя автоматической обработки данных по-прежнему нет, но уже производится объективный анализ метеорологических полей. В связи с этим время подготовки к оперативному расчету прогноза значительно уменьшается. Теперь уже не надо ждать расчерченных вручную карт. Получив телеграммы, отпечатанные в виде метеорологических кодов, выписывают из них в определенном порядке необходимые для прогноза исходные данные (т. е. фактически раскодируют вручную не все и не всю телеграмму, а только ту ее часть, которая потребуется для прогноза), перфорируют их и вводят в ЭВМ. По этим данным, представляющим собой совокупность значений метеорологических элементов на станциях, машина сама получает данные в узлах регулярной сетки точек, а попутно контролирует их и согласует между собой (т. е. проводит объективный анализ).

В некоторых прогностических центрах автоматизация подготовки данных для расчета оперативных численных прогнозов достигла именно этой стадии.

III стадия автоматизации. В эксплуатацию введена не только программа объективного анализа, но и программа автоматической обработки телеграмм. В этом случае телеграм-

мы вводятся непосредственно в ЭВМ (например, через фото-ввод). Все остальное делает машина.

В Советском Союзе, США и ряде других стран элементы этой «наивысшей» к настоящему времени автоматизации уже введены в действие. По сравнению с первым из перечисленных здесь этапов время подготовки данных к прогнозу сокращается на 4—5 часов.

Как только выполнены все подготовительные операции, машина приступает уже непосредственно к расчету прогноза.

Перед вами большой просторный зал. В разных концах его разместились металлические шкафы: это «питание» машины, сложные автоматические приборы, преобразующие напряжения, подаваемые из внешней сети, в те, что нужны машине. В других шкафах — основное хранилище информации, оперативная память машины. Рядом — внешние накопители: магнитные барабаны и ленты. Посредине зала — пульт управления машиной. К нему подведено множество переключателей; десятки лампочек сигнализируют о работе машины. Управляет расчетами один человек (оператор). Он свободно «читает» на пульте все, что интересует его в таинственном для постороннего перемигивании лампочек. Он видит, к какому этапу расчетов приступила машина, знает, сколько времени ей еще остается считать.

Для облегчения работы оператора на управляющий пульт с помощью набора клавиш можно вывести содержимое какой-либо ячейки оперативной памяти машины. Это позволяет контролировать ход всей работы. Припомним: численный прогноз всегда считается шагами по времени, на 1 час вперед, потом на 2, на 3 часа и т. д. Так вот, обычно на пульт выводится счетчик числа шагов по времени. Оператор следит за ним: через равномерные промежутки времени на счетчике загораются новые комбинации лампочек. Это последовательные числа 1; 2; 3 и т. д. Прекратилось нарастание чисел на счетчике — значит, что-то не так. Если это случайный сбой в работе машины, оператору достаточно нажать на пульте одну-две кнопки, и счет возобновится уже в нормальном режиме.

Но бывают и другие, более тревожные признаки. Вдруг мигание лампочек на пульте полностью прекращается и загорается специальная контрольная лампочка. Это сигнал аварии. Иногда он свидетельствует о серьезных неполадках в машине. Не исключены случаи, когда на некоторое время машина вообще выбывает из строя. Что же тогда делать?

Не нужно, конечно, думать, что «серьезные неполадки» означают что-то ужасное: скажем, что развалился на части магнитный барабан или произошло какое-то страшное замыкание. Нет, для остановки машины достаточно иногда, чтобы

вышла из строя одна-единственная ячейка памяти! Но и это — недопустимая вещь. Ведь прогноз рассчитывается оперативно, он должен быть вручен потребителю точно в срок.

В подобных случаях в крупных прогностических центрах обычно предусматривается возможность дублирования счета на другой машине. Так, в США в аварийных случаях, когда основная машина, находящаяся в Национальном метеорологическом центре в Вашингтоне, отказывает, расчет оперативного прогноза производится на арендуемой машине Бюро стандартов США, причем для передачи нужных для прогноза данных на эту машину из Национального метеорологического центра и обратно используется автоматическая радиорелейная линия.

Если же машина полностью исправна и расчет прогноза протекает нормально, от оператора требуется только следить за работой машины. Оперативные программы обычно построены так, чтобы все переходы между различными этапами расчета производились автоматически. Как правило, в большинстве случаев расчет прогноза происходит без всяких сбоев и аварий.

Современные методы численного прогноза погоды внедрены (или внедряются) в оперативную практику уже более двух десятков стран. Среди них СССР, США, Швеция, Япония, Англия, Франция, Норвегия, Чехословакия, Польша и др.

В США оперативная работа ведется как в Национальном метеорологическом центре Бюро погоды США (НМЦ), так и в метеорологических службах военно-воздушных сил, военно-морского флота и гражданской авиации. Между НМЦ и Военно-морским метеорологическим центром имеется быстродействующая линия связи, по которой метеорологическая информация, поступившая в НМЦ к началу расчета оперативного прогноза, передается в порядке обмена в Военно-морской центр. В НМЦ установлена одна из наиболее совершенных серийных машин — ИБМ-7094 (200 тыс. операций в секунду). С учетом разветвленной системы автоматической обработки метеорологической информации машина позволяет получать прогнозы в довольно короткие сроки. Так, прогнозы для северного полушария бывают готовы для использования через 7 часов после срока наблюдений, а прогнозы для территории США — уже через 2,5 часа.

Большая оперативная работа по численным прогнозам ведется в Швеции. Здесь она сосредоточена в двух центрах: в Шведском гидрометеорологическом институте в Стокгольме и в Военном метеорологическом центре.

Развертывается оперативная работа и в Японии, где в апреле 1959 г. при Японском метеорологическом агентстве был основан Вычислительный центр. Серьезное внимание в своих

прогнозах японцы уделяют грозным атмосферным вихрям— тайфунам.

В нашей стране первое применение численных методов к прогнозам погоды (долгосрочным) относится еще к 1947—1949 гг. Опытные расчеты краткосрочных численных прогнозов начались в 1961 г. С 1963 г. в бывшем Центральном институте прогнозов полностью отменили составление целого ряда прогностических карт синоптическим методом. Их расчет стал производиться на ЭВМ Мирового метеорологического центра.

В 1966 г. Центральный институт прогнозов и Мировой метеорологический центр были объединены в одну организацию — Гидрометеорологический научно-исследовательский центр СССР (Гидрометцентр СССР).

Одно из важнейших направлений работы Гидрометцентра — численные методы прогноза. За последние годы в оперативную практику Гидрометцентра было внедрено более десятка схем численных долгосрочных и краткосрочных прогнозов. Только по краткосрочным прогнозам ежедневно рассчитывается до 50 различных карт.

Численные прогнозы, рассчитываемые в Гидрометцентре СССР, оказывают неоценимую услугу как синоптикам, так и людям разнообразнейших специальностей, чья работа как-то связана с погодой. Например, численные прогнозы атмосферного давления на уровне моря для всего северного полушария используются для выдачи рекомендованных курсов нашим торговым судам, пересекающим Атлантический океан. Благодаря этим прогнозам уже сейчас достигнута экономия времени (5%) при следовании кораблей к берегам Америки.

С 1964 г. Гидрометцентр СССР проводит регулярный обмен оперативной метеорологической информацией по прямой связи между Москвой и Вашингтоном. В том и другом направлении за сутки передается около 20 прогностических карт.

Численные методы активно применяются в работе Вычислительного центра Сибирского отделения Академии наук СССР, где разработан новый интересный метод математического решения гидродинамических уравнений погоды.

Теоретическими исследованиями по динамике атмосферы и численным методам прогноза занимаются коллективы ученых Института физики атмосферы Академии наук СССР и Главной геофизической обсерватории.

Оперативная работа по численным прогнозам ведется у нас в стране во многих метеорологических центрах: в Ленинграде, Ташкенте, Ростове-на-Дону. Дальнейшее оснащение метеоцентров современными электронными вычислительными машинами еще более расширит круг исследователей по численным методам прогноза и приведет к улучшению качества оперативных прогнозов.

Автоматическое построение прогностических карт

Наш разговор о комплексной автоматизации метеорологической службы нельзя кончить прогнозом. Ведь после того как машина произвела расчет прогноза метеорологических полей, получившиеся результаты нужно представить в удобном для дальнейшей работы виде, иными словами, в виде прогностических карт. Однако вплоть до последнего времени результаты расчета — значения метеорологических элементов в узлах регулярной сетки точек — просто печатались в виде строк чисел на бумажных лентах или на перфолентах.

Конечно, современные ЭВМ позволяют быстро печатать числа (до 1000 с лишним в минуту), так что для получения всех результатов требуется, как правило, не более 1—2 мин. Но ведь значения метеорологических элементов в узлах сетки — это еще не поля этих элементов, не карты. Карты по нанесенным в узлах числам приходилось расчерчивать вручную. На это затрачивался иногда целый час, а то и более, что в оперативных условиях совершенно недопустимо.

Поэтому за последнее время усилия ученых и инженеров сосредоточиваются и на проблеме автоматического расчерчивания прогностических карт. Решать эту задачу помогает сама ЭВМ. Так, сравнительно несложным оказалось сконструировать двухкоординатное печатающее устройство, выдающее результаты не в виде колонки расположенных друг над другом чисел, а в виде двумерной таблицы чисел, построенной в соответствии с расположением узлов регулярной сетки. Например, левое верхнее число таблицы соответствовало точке, которая и на карте должна находиться в левом верхнем углу. Это устройство, хотя и было шагом вперед, расчерчивание карты, т. е. проведение изолиний, должен был делать все же синоптик.

В настоящее время в ряде стран уже создано несколько устройств, которые автоматически строят и карту. Независимо от конструкции прибора, автоматическое построение карт непременно включает в себя два этапа. Первый этап: расчет координат точек, через которые впоследствии будут проведены изолинии исследуемого метеорологического элемента. Этот этап выполняется программным путем самой машиной. Второй этап: собственно расчерчивание карты. На этом этапе значения координат отдельных точек преобразуются обычно в значения электрических напряжений, а эти напряжения уже непосредственно используются для расчерчивания.

Расскажем теперь о самих приборах.

1. *Автоматическое печатающее устройство*, работающее по принципу пишущей машинки. Допустим, нужно отпечатать карту поля давления. После расчета координат точек, через которые пройдут изобары — линии постоянного давления, — в узлах довольно мелкой сетки проводится опробование сравнительных числовых значений в соседних точках каждой строки. Например, если в данной точке значение давления P лежит в пределах между 1000 и 1004 (миллибар), на соответствующем месте карты печатается условный знак «1». Если, далее, в следующей точке значение P находится между 1004 и 1008, на карте не печатается ничего. Если в какой-либо точке $1008 < p < 1012$, то печатается знак «2», если $1012 < p < 1016$, не печатается ничего; если $1016 < p < 1020$, печатается «3» и т. д. Так устройство печатает строку за строкой. В результате на карте появляются темные — заполненные одинаковыми знаками, например, «двойками» — полосы и светлые полосы, лишенные знаков. Изобарам будут, очевидно, соответствовать границы между темными и светлыми полосами.

Эта методика автоматического построения карт обладает двумя наиболее существенными недостатками: во-первых, карта строится довольно медленно из-за наличия механического печатающего устройства, а, во-вторых, «разрешающая способность» такой карты будет невелика из-за того, что расстояние между точками не может быть сделано достаточно малым (ведь печатаемые знаки — цифры имеют определенный размер!).

Оба этих недостатка устраняются в *двухкоординатном электронном самописце*. Этот прибор по принципу своего действия аналогичен станку с программным управлением. По рассчитанным ЭВМ значениям координат изолиний, после их преобразования в значении электрического напряжения, самописец чертит сами изолинии. Это осуществляется с помощью наносящей головки, управляемой двумя электрическими напряжениями (создающими ход головки вдоль двух взаимно перпендикулярных осей). При движении головки вдоль неподвижной карты и образуются линии. Кроме того, самописец в нужных местах может проставлять буквенные и цифровые символы: например, подписывать изолинии или обозначать буквами «Н» (низкое) и «В» (высокое) центры циклонов и антициклонов.

Карта северного полушария масштаба 1:30 000 000 расчерчивается таким устройством за несколько минут.

В числе автоматических устройств, строящих карты изолиний, может быть назван прибор, дающий возможность получать карту на экране *катодно-лучевой трубки*. Предположим, мы рассчитываем прогноз шагами по времени, равными 30 мин. Выдавая результаты расчета в виде карт на экран

трубки и фотографируя возникающие изображения, можно затем сделать из них «прогностический фильм», воссоздающий довольно гладкую картину изменения метеорологических полей во времени.

В последнее время для получения карт стали использовать следующую систему: так же как и в других описанных здесь устройствах, ЭВМ «поставляет» набор цифр — значений метеорологических полей в узлах достаточно мелкой сетки, а специальный прибор превращает их на сей раз в совокупность темных и светлых «пятен», наносимых на фотографическую бумагу. После соответствующей химической обработки карта готова.

Итак, комплексная автоматическая обработка метеорологической информации окончена. Прогностические карты начерчены и могут быть разосланы потребителям.

На этом можно было бы и закончить разговор о комплексной автоматизации метеорологической службы — сложной системы взаимосвязанных процедур, в которой столь важное место занимают электронные вычислительные машины. Можно было бы подвести черту и под всем нашим рассказом о машинах-метеорологах, но давайте заглянем в недалекое будущее метеорологии, посмотрим, как будет выглядеть Служба погоды на всем земном шаре через какие-нибудь 10—15 лет и какое место будет отведено в ней вычислительным машинам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За Всемирную службу погоды!

...Представим себе, что в Индийский океан, к берегам далекой Австралии, снаряжается экспедиция ученых из разных стран мира. И каждая страна, посылая свой корабль, хочет иметь подробные сведения о климате этих далеких мест, и о том, какая погода там стоит сейчас, а какая ожидается через несколько дней. И конечно, сам океан интересуется ученых: температура его вод, степень волнения в разных его участках и многое, многое другое. Как получить все эти сведения?

Если бы этот вопрос был задан сейчас, то, увы, мы не могли бы надеяться на исчерпывающий ответ. По крайней мере, если эту информацию в разных концах земного шара хотят иметь в кратчайшие сроки. Но не забывайте: мы перенеслись с вами почти на несколько десятков лет вперед. Каждая страна располагает своим Национальным метеорологическим центром. В пределах каждого континента имеется, кроме того, межнациональная организация: Региональный метеорологический центр. И наконец, в трех пунктах земного шара существуют «межконтинентальные» — Мировые — метеорологические центры. Это Москва, Вашингтон и Мельбурн. Все три Мировых метеоцентра связаны между собой скоростной магистральной линией телесвязи. По этой линии, образующей на поверхности земного шара как бы треугольник, в любом направлении могут передаваться данные наблюдений, бюллетени погоды и другая буквенно-цифровая информация; по ней с помощью факсимильных передач можно обмениваться уже готовыми синоптическими картами, а передача данных по точкам координатной сетки обеспечит обмен данными между электронными вычислительными машинами.

Все Национальные и Региональные центры также подключены к глобальной системе телесвязи. Поэтому любая страна через свой Национальный или Региональный центр связана с ближайшим Мировым центром, например, все страны Европы — с Москвой, а следовательно, и с Мировым центром в Мельбурне. В определенный час по скоростной линии связи из Мельбурна будет послана стандартная метеорологическая

информация и через короткое время ею будут располагать все страны, подключенные к общей сети. Экспедицию можно снаряжать. Ведь если каких-либо интересующих ученых сведений в стандартной информации и не окажется, их всегда можно будет получить по специальному запросу.

То, что мы рассказали, не утопия. «Ступенчатая» система метеорологических центров обработки и ретрансляции метеорологических данных действительно подготавливается сейчас Всемирной метеорологической организацией — постоянно действующим международным органом, объединяющим метеорологические службы многих государств. Вместе с целым рядом других мероприятий эта система метеоцентров и образует Всемирную службу погоды (ВСП).

Первый этап создания ВСП должен быть завершен к 1971 г., но отдельные звенья этой глобальной системы имеются уже сейчас. Несколько лет существуют Мировые метеорологические центры в Москве и Вашингтоне¹. Как уже говорилось, с 1964 г. они обмениваются наиболее ценной метеорологической информацией по каналу прямой связи. По этому каналу передаются, в частности, и прогностические карты, рассчитанные численными методами с помощью ЭВМ.

Намечается создание в Мельбурне третьего Мирового метеорологического центра для южного полушария.

Организация глобальной системы наблюдений за состоянием атмосферы и гидросферы (при обязательной стандартизации методов наблюдений), оперативный сбор и распространение данных наблюдений, оперативная обработка полученной информации с помощью автоматизированных средств, анализ данных и составление прогнозов — все эти важнейшие задачи и будут выполняться Всемирной службой погоды. Она возьмет на вооружение все новейшие достижения космической техники связи, обработки данных и метеорологической аппаратуры.

Метеорологические ракеты и спутники, спутники связи, автоматические станции наблюдения, океанические площадки наблюдения на буях, суда, самолеты, радиозонды для вертикального зондирования и уравновешенные шары для горизонтального зондирования атмосфер² — вся эта техника

¹ В Москве функции Мирового метеорологического центра выполняет Гидрометцентр СССР. Здесь составляются все виды прогнозов: метеорологические (численные и синоптические), гидрологические (речные и морские) и агрометеорологические.

² Уравновешенные шары — это специальные шары-зонды, которые могут дрейфовать вдоль поверхностей постоянной плотности атмосферы. Перемещение уравновешенных шаров дает возможность определить средний ветер за период времени между их зафиксированными положениями, а также температуру, давление и влажность на больших расстояниях.

будет включена в общую систему и станет поставлять науке бесценный материал.

И конечно же, создание столь многогранной глобальной системы, призванной поставлять все необходимые данные в кратчайшие, оперативные, сроки, немыслимо без электронных вычислительных машин.

Краткосрочный и долгосрочный прогноз для различных областей земного шара, численные эксперименты по моделированию отдельных явлений погоды и системы общей циркуляции атмосферы, объективный анализ метеорологических полей, анализ данных метеорологических спутников, вопросы автоматической обработки и компактного хранения климатической и другой объемистой информации с возможностью ее оперативной выборки — эти и немало других задач выполняют (и уже выполняют сейчас) электронные вычислительные машины. Многие важные открытия в науке об атмосфере обязаны своим возникновением этим верным помощникам ученых — метеорологов, математиков, физиков — в их трудной и благородной работе по разгадке тайн воздушного океана.

ЛИТЕРАТУРА

Гандин Л. С. Машина предсказывает погоду. Л., Гидрометеиздат, 1965.

Гандин Л. С. Объективный анализ метеорологических полей. Л., Гидрометеиздат, 1963.

Кибель И. А. Введение в гидродинамические методы краткосрочного прогноза погоды. М., Гостехиздат, 1957.

Китов А. И., Криницкий Н. А. Электронные вычислительные машины. М., «Наука», 1965.

Мельников В. А. Миллион в секунду (об электронной вычислительной машине БЭСМ-6). «Наука и жизнь», № 10, 1966.

Орр Клайд. Между Землей и космосом. Л., Гидрометеиздат, 1964.

Погосян Х. П. Новое в изучении атмосферы. М., «Знание», 1966.

Погосян Х. П., Ситников И. Г. Какая погода будет завтра. М., Воениздат, 1967.

Прейфер Ф. Погода интересует всех. Л., Гидрометеиздат, 1966.

Томпсон Ф. Д. Анализ и прогноз погоды численными методами. М., Изд. иностр. литературы, 1962.

Человек и стихия. Настольный гидрометеорол. календарь. Л., Гидрометеиздат, 1966.

Юдин М. И. Новые методы и проблемы краткосрочного прогноза погоды. Л., Гидрометеиздат, 1963.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	3
Глава I	
ПОГОДА НА ЯЗЫКЕ ЧИСЕЛ	4
Метеорологические элементы	4
Поля метеорологических элементов	6
Атмосфера и ее законы	7
Атмосферные модели	10
Сотни миллионов арифметических действий	12
Глава II	
КАК РАБОТАЕТ ЭЛЕКТРОННАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАШИНА	18
Составные элементы ЭВМ. Их назначение	18
Современные ЭВМ и их возможности . . .	20
Глава III	
КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТЕОРОЛОГИ- ЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ	22
Что нужно автоматизировать?	22
Автоматизация сбора и передача метеороло- гической информации	24
Машина автоматически вводит и обрабаты- вает метеорологические телеграммы	26
Машина проводит «объективный анализ» ме- теорологических полей	32
Машина рассчитывает прогноз метеорологи- ческих полей	35
Автоматическое построение прогностических карт	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	43
За Всемирную службу погоды!	43
ЛИТЕРАТУРА	46

С и т н и к о в Игорь Георгиевич

МАШИНЫ НА СЛУЖБЕ МЕТЕОРОЛОГИИ

Редактор Н. КОСАКОВСКАЯ

Худож. редактор Т. ДОБРОВОЛЬНОВА

Техн. редактор Л. ДОРОДНОВА

Корректор Н. МЕЛЕШКИНА

Обложка Н. КОНСТАНТИНОВОЙ

А 02075. Сдано в набор 13/III 1967 г. Подписано к печати 12/IV 1967 г. Формат бумаги 60×90/16. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,5. Печ. л. 3,0. Уч.-изд. л. 2,49. Тираж 23 000 экз. Издательство «Знание». Москва, Центр. Новая пл., д. 3/4. Заказ 953. Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 9 коп.

Если вы хотите
проследить славный путь развития советской индустрии,
познакомиться с достижениями важнейших отраслей
народного хозяйства, получить новейшую информацию
в области технического прогресса,

выписывайте
серии научно-популярных брошюр
«НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ»

Серия
«Промышленность»

Индекс 70097

В 1967 году выйдут следующие работы:

Братченко Б. Ф., министр угольной промышленности СССР. Топливо — хлеб промышленности; Диспетчерская служба и автоматизация предприятий; *Трапезников В. А.*, академик. Научная информация и производство; *Степлов В. Ю.*, инженер. Электрификация: итоги и перспективы; *Раковский М. Е.*, зам. председателя Госплана СССР. Новые средства контроля и измерения; *Буданцев Ю. Ю.*, канд. техн. наук. Техническая эстетика и НОТ и др.

Серия
«Техника»

Индекс 70067

В 1967 году выйдут следующие работы:

Веников В. А., д-р техн. наук, *Астахов Ю. П.*, канд. техн. наук. Развитие энергетики и кибернетика; *Балкуль В. Н.*, д-р техн. наук. Работающие алмазы; *Ощепков П. К.*, д-р техн. наук, *Меркулов А. П.*, инженер. Интроскопия; *Фотеев Н. К.*, канд. техн. наук. Искра обрабатывает металл; *Прокопович А. Е.*, профессор. Технический прогресс в станкостроении; *Сажин Н. П.*, академик. Редкие металлы; *Грикутис Э. Я.*, инженер. Бытовые аэрозоли и др.

Кроме этих серий, издательство выпускает по науке и технике следующие серии популярных брошюр:

«Математика, кибернетика», «Физика, астрономия», «Химия», «Наука о Земле», «Радиоэлектроника и связь», «Транспорт», «Строительство и архитектура».

По каждой серии выходит одна брошюра в месяц средним объемом 48 стр.

Подписная плата на полугодие 54 коп.

Подписка принимается без ограничения.

Издательство «Знание»