

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

И. Н. РУСИН

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

*Утверждено ученым советом института
в качестве учебного пособия*

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени М. И. КАЛИНИНА

ЛЕНИНГРАД
1987

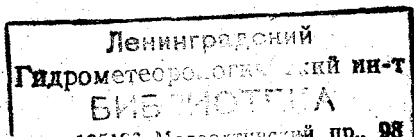
Русин И. Н. Современные методы метеорологических прогнозов. Учебное пособие. Л., изд. ЛПИ, 1987, 96 с. (ЛГМИ).

Учебное пособие знакомит инженеров-метеорологов с основами современной технологии численных прогнозов погоды. Освещаются вопросы сбора метеорологической информации и ее обработки для получения прогностических карт, вопросы автоматического оценивания качества прогноза, а также существующие методы автоматизации доведения фоновых прогнозов до уровня локальных с помощью диалога человек — ЭВМ.

Материал, излагаемый в учебном пособии, доступен и полезен студентам-метеорологам, а также всем специалистам, желающим ознакомиться с современным состоянием вопроса о внедрении численных методов в практику численных прогнозов.

Табл. 23. Ил. 23. Библ. 14.

Рецензенты: кафедра гидрометеорологического обеспечения ВИКИ имени А. Ф. Можайского; Л. Н. Магазенков, канд. физ.-мат. наук (ГГО имени А. И. Воейкова).



СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Глава 1. Организация сбора и обмена метеорологической информацией для прогноза погоды	5
Глава 2. Понятие о технологии автоматизированной подготовки информации для численных прогнозов	14
Глава 3. Точность метеорологической информации, используемой для прогноза погоды. Современный анализ метеорологической информации	22
Глава 4. Описание погодообразующих взаимосвязей метеорологических полей на базе моделей численного прогноза	33
Глава 5. Сведения об источниках ошибок при численной реализации моделей прогноза погоды	44
Глава 6. Автоматическое оценивание качества прогнозов	55
Глава 7. Характеристика ошибок современных краткосрочных численных прогнозов	63
Глава 8. Использование численных прогнозов в оперативной синоптической практике	73
Глава 9. Автоматизация рабочего места синоптика: технология и проблемы	84
Литература	95

РУСИН ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

Учебное пособие

Редактор *О. С. Крайнова*

Корректор *Л. В. Ломакина*

Обложка художника *Р. П. Костылева*

Сдано в набор 13.03.87. Подписано в печать 30.11.87. М-20635. Печ. л. 6.
 Уч.-изд. л. 5,0. Тираж 1000 экз. Темплан 1987 г., поз. 254. Зак. 284. Цена 40 коп.
 ЛПИ им. М. И. Калинина, 195251, Ленинград, Политехническая ул., 29.

Типография ВСОК ВМФ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Интенсификация народного хозяйства нашей страны и совершенствование технического оснащения метеорологической службы ставят на повестку дня вопрос о получении все более точных прогнозов погоды. Современная технология прогноза погоды, основанная на переработке огромного объема информации, немыслима без применения вычислительной техники. Однако повышение уровня автоматизации отдельных видов прогнозирования и даже внедрение единых программно-технологических линий автоматизированной генерации вариантов прогноза погоды не снимают с инженера-синоптика ответственности за окончательный прогноз, передаваемый потребителям. Более того, с ростом себестоимости прогноза ответственность прогнозиста за его качество растет. Естественно, усиливается желание полностью использовать информацию разнообразных численных прогнозов. Это возможно только тогда, когда человек хорошо знает достоинства и недостатки поступающей информации — численный прогноз, как и всякий прогноз, не может быть совершенно достоверен. Возрастает необходимость правильно понимать физические основы численных прогнозов и имеющиеся в них ограничения, особенности технологии их разработки и методику применения материалов, рассчитанных на ЭВМ, которые получает инженер-синоптик на своем рабочем месте.

Автоматизация отдельных видов прогнозов создает и новые предпосылки для развития теории синоптического метода прогноза. Как показывает опыт, человек может свободно синтезировать необходимую ему информацию, опираясь на разные источники. Но синоптическая метеорология сегодняшнего дня еще не дает надежных и научно обоснованных рекомендаций, как оптимально использовать информацию, заложенную в численных прогнозах. Между численным и синоптическим методами нет противоречий. Основой современного синоптического метода прогноза является фронтологический анализ, опирающийся на численный прогноз карт барической топографии. Процедура согласования мнения синоптика с результатами численных прогнозов может рассматриваться как видоизменение традиционных синоптических приемов. По мнению автора, хорошее представление инженеров-синоптиков о процедуре разработки численных прогнозов будет способствовать осознанному творческому их применению, накоплению опыта

взаимодействия и, в конечном счете, совершенствованию синоптического метода прогноза на базе численных прогнозов.

Основной материал, вошедший в учебное пособие, излагается в курсе лекций «Современные методы прогнозов погоды» на факультете повышения квалификации инженеров-синоптиков при Ленинградском гидрометеорологическом институте. Цель лекций — создать у имеющего опыт прогнозирования специалиста-метеоролога единую картину взаимодействия идей, методик, технологий, в результате которого создается современный численный прогноз развития основных синоптических процессов. При этом нельзя не остановиться на оценке погрешностей этих прогнозов, а также на возможностях детализации их и доведения до уровня локальных прогнозов погоды.

Учебное пособие состоит из двух частей. В первой части (главы 1—5) рассматриваются особенности организации, методики и технологии численного прогнозирования фоновых синоптических процессов, во второй (главы 6—9) — возникновения погрешностей при численном прогнозе, характер погрешностей и способы их учета при составлении локальных прогнозов погоды.

Содержащийся в учебном пособии материал адресован в первую очередь инженерам-синоптикам, но будет доступен и полезен студентам соответствующих специальностей, а также всем желающим ознакомиться с современным состоянием вопроса о введении численного прогноза в практику службы погоды.



Глава 1.

ОРГАНИЗАЦИЯ СБОРА И ОБМЕНА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ

Разработка прогнозов погоды базируется на результатах метеорологических наблюдений, производимых в различных географических пунктах в определенные сроки. Методика и порядок метеорологических наблюдений изучаются в вузах и техникумах. Значительно менее известен вопрос о том, каким образом результаты наблюдений собираются в местах подготовки анализов и прогнозов погоды.

После производства метеорологических наблюдений специалист-метеоролог производит кодирование полученной информации и подготавливает ее для передачи по линиям связи в виде телеграмм. Напомним, что основным отличием метеорологических телеграмм от обычных является отсутствие у метеорологических телеграмм адресной части. Адресуются только нерегулярные сообщения, для регулярных указывается только индекс станции — адрес отправителя.

Метеорологическая телеграмма в зависимости от технической оснащенности метеостанции либо сразу отправляется в тракт телеграфной связи по телетайпу, либо передается в местный узел связи, имеющий телеграфный аппарат. Тракт телеграфной связи — это совокупность технических средств, обеспечивающих обмен между оконечными телеграфными аппаратами. Обеспечение функционирования необходимых для метеослужбы телеграфных трактов осуществляется сетью телеграфной связи СССР, у которой арендуется нужное количество телеграфных каналов. Организация передачи сообщений по телеграфным трактам происходит путем автоматической коммутации сообщения. Она производится в Центрах коммутации сообщений (ЦКС). В каждом ЦКС сообщение запоминается вместе с адресом и вновь передается по маршруту либо немедленно, если канал нужного направления свободен, либо после некоторого ожидания, в случае занятости канала. От оконечного телеграфного аппарата информация передается в ближайший ЦКС, затем в следующий ЦКС и так далее до передачи в конечный пункт.

ЦКС строятся на основе цифровых вычислительных машин, используемых для накопления, запоминания и управления распре-

делением сообщений. Для повышения надежности работы используется не одна ЭВМ, а вычислительный комплекс из двух ЭВМ. Универсальный характер ЭВМ обеспечивает большую пропускную способность ЦКС, возможности подключения к ней разнотипных оконечных устройств, взаимодействующих через разнотипные телеграфные станции сети СССР. Большинство местных телеграфных линий передает информацию со скоростью 50 бит/с. Такая скорость достаточна для передачи отдельных телеграмм в заданное время. ЦКС, расположенные в территориальных гидрометеорологических центрах (ТГМЦ), производят комплектацию нескольких телеграмм в сводки, которые передают в ЦКС ближайших региональных метеорологических центров (РМЦ) со скоростью 1200 бит/с. И наконец, РМЦ передает эту информацию в Мировые метеорологические центры (ММЦ) со скоростью 4800 бит/с, используя для этого сети передачи данных.

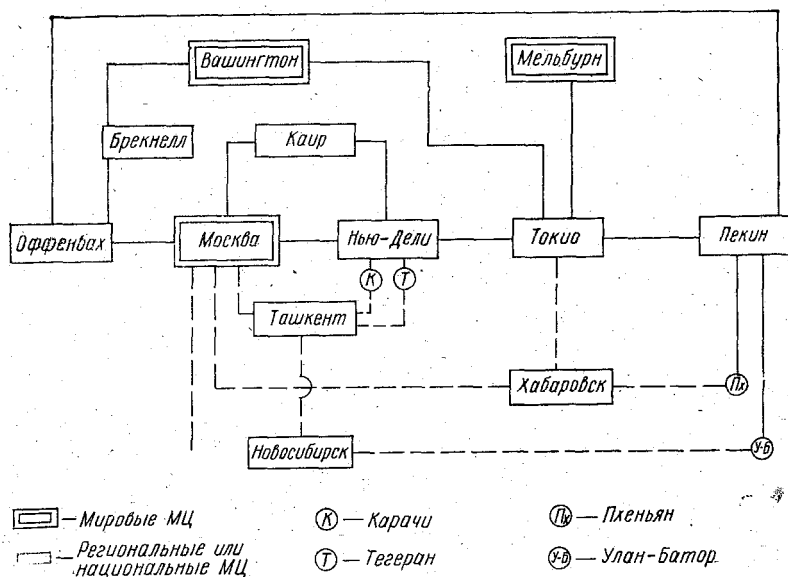


Рис. 1.1. Схема главной магистрали глобальной сети телесвязи с частью вторичных линий, обеспечивающих информацией региональные гидрометеорологические центры СССР.

Для того чтобы метеорологические телеграммы безошибочно доставлялись в центры обработки информации, организована специализированная система передачи информации. Эта система функционирует под эгидой Всемирной Метеорологической организации (ВМО) и входит в состав Всемирной службы погоды (ВСП). Она называется Глобальной Системой Телесвязи (ГСТ).

ГСТ имеет трехуровневую организацию: основная сеть телесвязи, региональная сеть, национальная сеть. Такая организация обеспечивается узлами связи, находящимися в Мировых метеорологических центрах (ММЦ), Региональных метеорологических центрах (РМЦ), Национальных метеорологических (НМЦ) или центрах межгосударственных или внутригосударственных с аналогичными функциями. Все основные узлы связи соединены линиями связи и оснащены аппаратурой приема и передачи информации. Ввиду большой сложности общей схемы основной сети телесвязи на рис. 1.1 выделена часть системы связи, обеспечивающая передачу информации в региональные центры СССР.

Наличие в каналах связи ожиданий приводит к замедлению сбора информации. Поэтому не все данные наблюдений, выполняемых в различных странах и собираемые ТГМЦ или ММЦ, поступают в региональную и тем более основную сети телесвязи. Для обязательной и немедленной (не позднее 35 мин с момента получения) передачи в РМЦ и далее в ММЦ отбираются только данные некоторых метеостанций, входящих в так называемую опорную сеть. Эта сеть для сухопутных синоптических станций состоит из всех станций первого разряда и лишь отдельных второго. В нее включены все аэрологические и радиоветровые станции.

Глобальная система телесвязи (ГСТ) используется не только для сбора информации метеорологических наблюдений. По ее линиям бюро погоды получают необходимую прогностическую и диагностическую информацию из НМЦ, РМЦ или ММЦ, которая, так же как и информация наблюдений, циркулирует в виде цифровых сводок, но в специальном коде GRID. Обмен информацией происходит в строгом соответствии с планом распространения. С помощью ГСТ различные центры дополняют друг друга в своей прогностической деятельности. Например, НМЦ разрабатывают краткосрочные прогнозы для ограниченных территорий, а РМЦ — для больших вплоть до полушария. В свою очередь РМЦ получают от ММЦ прогнозы на сроки, превышающие 2 или 3 сут. Схема такого обмена информацией представлена на рис. 1.2.

С помощью ГСТ распространяются метеорологические данные не только от сети сухопутных метеорологических станций. В нее поступают ежедневно более 3000 сводок метеорологических телеграмм с морских судов и более 2500 сообщений самолетов. В странах — членах ВМО создано более 200 наземных станций для приема спутниковых снимков облачности, а также данных спутниковых наблюдений, которые после обработки используют для получения значений физических параметров атмосферы. Эти данные также распространяются с помощью ГСТ.

Объем информации, проходящий через ГСТ, очень велик, через отдельные ее участки проходит до 10 миллионов знаков в сутки.

Объем этой информации непрерывно возрастает. В связи с этим остро стоит вопрос о совершенствовании системы передачи информации и увеличении пропускной способности каналов связи. Если бы все линии ГСТ были телетайпными и обладали скоростью передачи 50 бит/с, то на передачу одной сводки затрачивалось бы около трех минут. При такой скорости передачи и приема в одном центре практически не собрать метеорологическую информацию за время между стандартными сроками. Для приема 6000 синоптических и 800 аэрологических телеграмм, скомплектованных в 680 сводок, понадобится 34 ч.

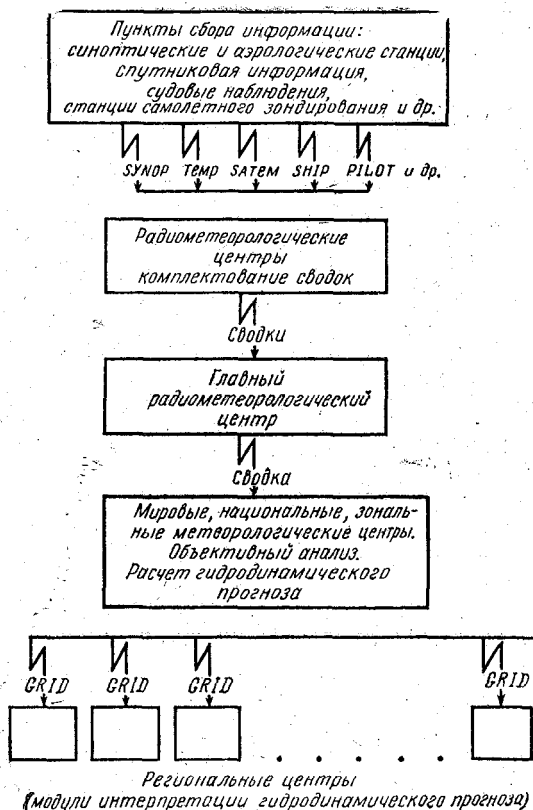


Рис. 1.2. Структура последовательного преобразования информации от метеорологических наблюдений до прогностических полей в коде GRID

Для того чтобы повысить скорость сбора метеорологической информации, в настоящее время применяется высокоскоростная приемно-передающая аппаратура. Более 30 линий ГСТ оснащены

техническими средствами для передачи информации со скоростью 1200 бит/с. С помощью специальных средств кодирования можно передавать по одной и той же линии связи одновременно факсимильную и буквенно-цифровую информацию, что повышает скорость передачи до 4800 бит/с. Однако в ГСТ до сих пор значительное число линий работает медленно, и для обеспечения своевременного сбора информации приходится применять организационные мероприятия. Главным из них является использование циркулярной системы передач. Суть ее заключается в регламентации зон сбора информации и адресатов для ее распространения в каждом конкретном центре. Информация, не входящая в план распространения для данного центра, в оперативном режиме не может быть ему доступна. Только ММЦ, располагающие высокоскоростной двухсторонней связью, успевают собрать практически всю метеорологическую информацию за промежуток времени между стандартными сроками (12 ч). Фактическое время сбора при этом достигает 10 ч.

Особую трудность для распространения представляет картографическая информация. Известно, что создание непрерывного для восприятия человеком изображения требует размер элемента изображения $0,25 \times 0,25$ мм². Это означает, что для передачи 1 см² изображения требуется снять информацию в 1600 точках. Если в каждой точке необходимо передать информацию для черно-белого изображения без полутонов, то передача карты размером листа 20×30 см² требует передачи 10^6 бит. На это уйдет около 10 мин даже при скорости передачи 1200 бит/с. Однако в настоящее время все шире распространяется практика передачи карт в виде цифровых сводок. В пункте приема цифровая сводка с помощью специальной декодирующей аппаратуры расчерчивается. Практика метеорологической службы США показала, что при этом скорость передачи картографической информации возрастает в 40 раз по сравнению с факсимильной передачей. Передача ведется со скоростью 4800 бит/с.

Использование новых технических средств на линиях связи в сочетании с широким распространением цифрового кодирования всех видов метеорологической информации позволит ГСТ и в дальнейшем успешно выполнять свои функции. Для практически работающего инженера-прогнозиста ГСТ представляет интерес в первую очередь потому, что она является источником всей исходной метеорологической информации. Действительно, ни один РМЦ, тем более ТГМЦ, без ГСТ не в состоянии обеспечить своих инженеров-синоптиков всей необходимой информацией. ТГМЦ имеет в подчинении несколько десятков синоптических станций и, в лучшем случае, около десятка аэрологических. РМЦ имеет в своем подчинении несколько десятков аэрологических станций и около сотни синоптических. Тогда как для построения региональных карт барической топографии необходимо около

двухсот аэрологических наблюдений и примерно 600—700 синоптических. Таким образом, только функционирование ГСТ обеспечивает работу синоптиков-прогнозистов каждого прогностического подразделения, хотя для прогноза локальной погоды синоптик располагает обширной и очень важной местной метеорологической информацией, причем последняя зачастую не доступна для РМЦ или ММЦ, так как местные станции не входят в опорную сеть ВМО.

Таблица 1.1

Краткий перечень гидрометеорологических параметров
в кодовых формах

Параметры	SYNOP	SHIP	DRIBU	BATHY	TESAC
Атмосферное давление	+	+	+		
Температура воздуха	+	+	*		
Направление ветра	+	+	*	*	*
Скорость ветра	+	+	*	*	*
Точка росы	+	+			
Величина барической тенденции	+	+			
Горизонтальная дальность видимости	+	+			
Погода в срок наблюдения	+	+			
Общее количество облаков	+	+			
Типы облаков трех ярусов	+				
Высота основания облаков	+	+			
Количество облаков	+	+			
Особые явления погоды	+				
Температура воды на поверхности		+	*	+	+
Период ветрового давления и зыби		+			
Высота ветрового давления и зыби		+			
Температура воды на разных глубинах			*	+	+
Скорость течения					*
Направление течения					*
Соленость				+	

Примечание. «+» — регулярное получение параметров, «*» — возможность получения параметра.

После того как по системе ГСТ материалы метеорологических наблюдений поступили в РМЦ или ММЦ, они подвергаются первичной обработке. Каналы связи, по которым поступает информация из ЦКС, находятся под контролем ЭВМ, задачей которой

является организация декодирования данных, хранения и обеспечения их доступности для программ, осуществляющих различную обработку. При решении этой задачи возникает большое число трудностей. Например, в табл. 1.1 и 1.2. приведены перечни данных, получаемых с приземных станций, плавучих наблюдательных платформ, аэрологических, самолетных и спутниковых телеграмм после их декодирования. Таблицы позволяют понять, что если даже очень сложная задача идентификация телеграмм и их декодировки решена, то необходимо еще выработать единообразную форму записи и хранения этих данных. Трудности усугубляются тем, что даже внутри одинаковых по происхождению телеграмм имеется значительное разнообразие форм. Например, аэрологические телеграммы состоят из четырех частей: А, В, С, Д. В частях А и С содержатся данные на стандартных уровнях, на уровне тропопаузы и на уровне максимального ветра, а части В и Д содержат данные на уровнях особых точек. Количество данных в частях А и С стабильно, а в частях В и Д оно существенно зависит от состояния атмосферы в момент наблюдения. Части аэрологических телеграмм поступают в центры не одновременно, и для одного аэрологического наблюдения они должны быть состыкованы.

Таблица 1.2

Краткий перечень гидрометеорологических параметров, сообщаемых в официальных кодовых формах

Кодовая форма	Приземные данные	Стандартные уровни давления	Уровень тропопаузы	Уровни особых точек	Изолированные уровни
TEMP	P, T, D, d, f	H, T, D, d, f	P, T, D, d, f	P, T, D или P, d, f	P, T, d, f
PILOT		d, f		P, d, f	P, d, f
AIREP					P, T, d, f
COLBA					P, T, d, f
SATEM	T_w	t_1, W_1			
SATOV	T_w				

Примечание. P — атмосферное давление, T — температура воздуха, D — дефицит точки росы, d — направление ветра, f — скорость ветра, T_w — температура воды, t_1 — толщина слоя, W_1 — количество осаждающейся воды в слое, H — геопотенциал.

Поступление из разных каналов связи метеорологических телеграмм может привести к дублированию. В них могут быть грубые ошибки. Все это вместе порождает необходимость разработки целого комплекса программ, который называется информационно-логическим обслуживанием (ИЛО).

Технические характеристики каналов связи не совпадают с аналогичными характеристиками каналов связи ЭВМ. Поэтому подключение ЭВМ к системе сбора информации осуществляется через устройство сопряжения, называемое модемом передачи данных. Работа ЭВМ с несколькими каналами связи требует устройства, концентрирующего сообщения и позволяющего подавать их в ЭВМ по одной линии связи. Такие устройства называются мультиплексорами передачи данных. Синхронизация работ всех элементов системы получения в РМЦ метеорологической информации потребовала разработки специальной аппаратуры и целого ряда программ. Все эти средства сбора информации получили название программно-аппаратный комплекс (ПАК).

С помощью ПАК решается не только задача автоматического ввода информации в ЭВМ из аппаратуры приема. Дополнительно решается ряд вопросов ИЛО, а также происходит обновление оперативного банка данных. Банк данных ГМЦ СССР является техническим воплощением идеи централизации информационного обеспечения различных задач прогноза погоды и изучения общей циркуляции атмосферы. Эта идея была высказана еще в 60-х годах, однако получила распространение только в 70-е годы. Под банком данных подразумевается совокупность технических средств, организационной структуры, языков программирования и программ, предназначенных для централизованного накопления и коллективного многоаспектного использования данных.

Все данные, содержащиеся в банке, называются фондом банка. Фонд данных состоит из баз данных, размещаемых на магнитных дисках, и архивов данных, размещаемых на магнитных лентах. В соответствии со свойствами накопителей базы данных обеспечивают значительно более быстрый доступ к данным по сравнению с архивами.

В ГМЦ СССР вычислительный центр оборудован ЭВМ разных типов, а система автоматизированной обработки информации состоит из нескольких взаимосвязанных технологических линий. Это привело к необходимости организовать банк данных в виде системы локальных банков данных. Схема структуры этих банков с учетом их возможного обмена информацией приведена на рис. 1.3. Система банков состоит из четырех локальных: 1) банк данных на ЕС-1040 гидрометеорологических наблюдений; 2) банк данных технологической линии краткосрочных численных прогнозов на ЕС-1060; 3) банк данных технологической линии среднесрочных прогнозов на ЭВМ CYBER-172; 4) банк данных для работ по долгосрочным прогнозам на ЭВМ ЕС-1040.

Как видно из рис. 1.3, первичная метеорологическая информация с телеграммы поступает на линию информационно-логического обслуживания, реализуемую ЭВМ ЕС-1040. Эта линия осуществляет ряд контролирующих информации преобразований и накапливает ее в базе первичных данных. Фонд данных состоит

из базы первичных данных и циклического архива. В базе хранятся данные за последние календарные сутки (по Гринвичу). В конце срока хранения данные из базы переписываются на магнитные ленты циклического архива. В циклическом архиве контролируемые метеорологические телеграммы хранятся месяц, после чего они переписываются в постоянный архив.

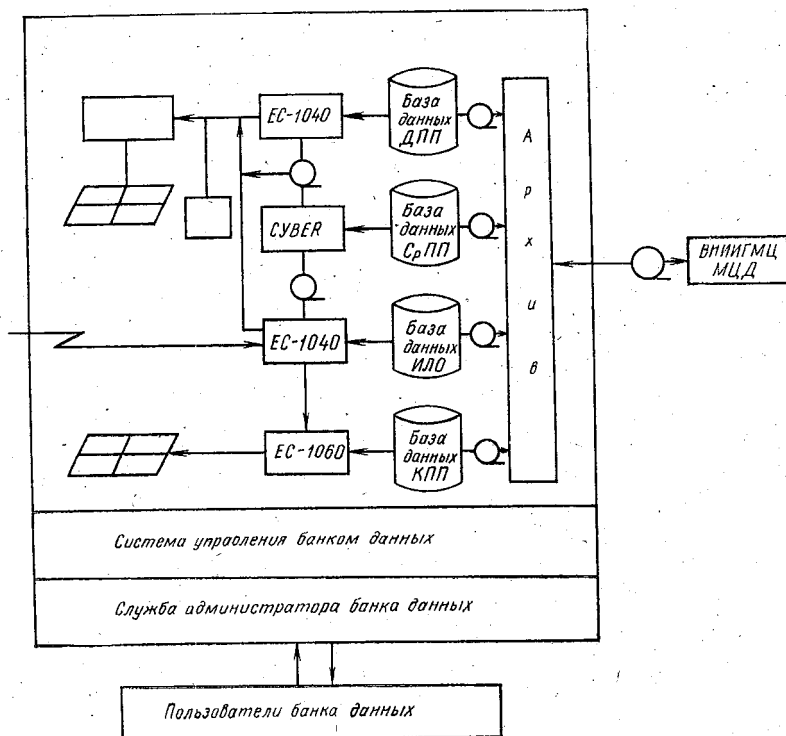


Рис. 1.3. Схема функционирования банка данных «Прогноз» в Гидрометеорологическом центре СССР.

База первичных данных является тем конечным пунктом, куда собирается метеорологическая информация, полученная в результате метеорологических наблюдений по местной сети связи или из ГСТ. С другой стороны, она является источником информации для работы всех прогностических программ.

Глава 2.

ПОНЯТИЕ О ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОДГОТОВКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ЧИСЛЕННЫХ ПРОГНОЗОВ

Для современного специалиста-синоптика большое значение приобретает понимание основных этапов преобразования метеорологических телеграмм, поступивших в РМЦ из ГСТ. Представление об этих этапах будет дано в настоящей главе в основном на примере функционирования прогностических служб Гидрометеорологического центра СССР.

В качестве регионального центра ГМЦ СССР несет ответственность за решение ряда научных, оперативных и методических задач. Перечислим основные оперативные задачи:

1. Подготовка данных для региональных анализов и прогнозов, автоматическая наноска карт с метеорологическими данными, контроль за поступлением информации.

2. Расчет и распространение анализов и прогнозов (с заблаговременностью до 72 ч).

3. Расчет прогнозов элементов погоды по зоне ответственности.

4. Расчет гидрологических и аэрометеорологических прогнозов.

5. Передача по системе связи цифровых дубликатов анализов и прогнозов в компактной форме в подразделении численных прогнозов УГКС.

6. Выдача обработанных данных по запросам учреждений различных ведомств и организаций, включая передачу данных в ВЦ ОАСУ для использования в производственном планировании.

Получаемая из ГМЦ СССР информация используется в ГМЦ УГКС, входящих в зону его ответственности для составления прогнозов и выпуска разнообразной информации. На рис. 2.1 изображена схема, показывающая, какие аэросиноптические материалы получают подразделения численных прогнозов УГКС из РГМЦ и какие материалы они производят сами.

Основная часть работ любого подразделения численных прогнозов по выполнению возложенных на него оперативных задач изображена на рис. 2.2. в виде схемы. На этом же рисунке дана для наглядности схема выполнения операций по сбору информации и подготовке прогнозов, соответствовавшая ранее выполняв-

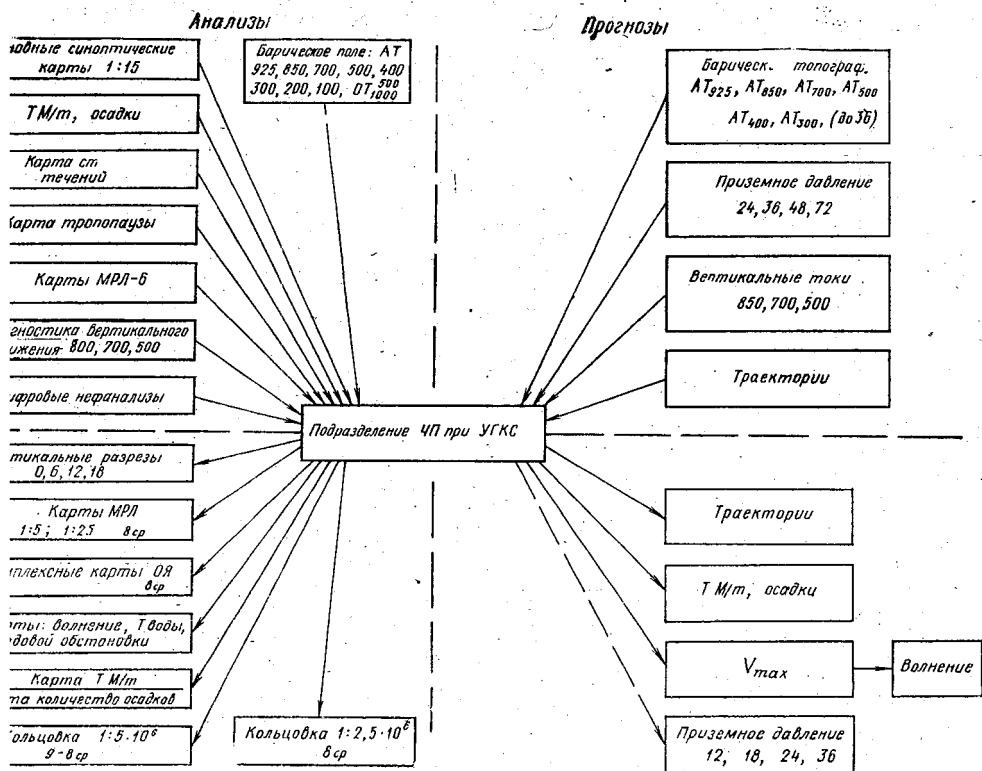


Рис. 2.1. Аэросиноптические материалы, поступающие в территориальные ГМЦ и вырабатываемые в подразделениях численного прогноза (ЧП).

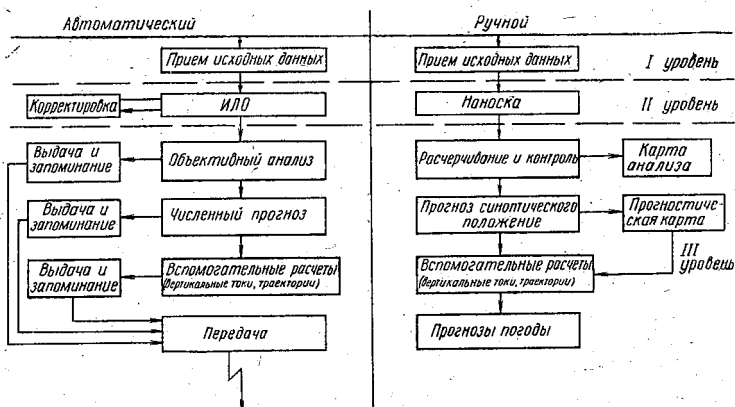


Рис. 2.2. Этапы переработки информации метеорологических наблюдений, реализуемые при создании прогноза погоды ручным способом (справа) или численно (слева).

шимся вручную операциям. Сопоставление ручных операций и блоков автоматической технологической линии, реализуемой на ЭВМ, позволяет понять функциональное назначение каждого блока автоматической линии. Поскольку процедура ручной обработки данных хорошо знакома всем специалистам-синоптикам, будем в основном рассматривать блоки автоматической линии.

Условно можно разделить автоматическую линию обработки метеорологической информации на три уровня:

- прием и распространение информации по каналам связи;
- информационно-логическая обработка;
- вычислительная обработка.

На первом уровне с помощью технических средств обеспечивается сбор данных и выдача потребителям результатов расчетов в виде алфавитно-цифровых сводок и факсимильных карт, обеспечивающих взаимодействие вычислительного комплекса с ЦКС. Об особенностях задач, возникающих при приеме — передаче данных по телеграфным и высокоскоростным каналам связи сообщалось в предыдущей главе. Основную часть информации, принимаемой и распространяемой РГМЦ, составляют сводки с данными наблюдений, сводки обработанных данных. Кроме того, по каналам связи поступают данные телеметрии от автоматических и полуавтоматических станций, станций радиозондирования и МРЛ в пределах зоны ответственности, которые подлежат обработке, контролю, оформлению в сводки и передаче по каналам связи.

Наряду с уровнем приема и распространения данных в непрерывном режиме функционирует и уровень информационно-логической обработки (ИЛО). Цель ИЛО состоит в создании текущей базы данных, где в специальной экономичной и удобной для доступа форме записана информация, поступившая от различных наблюдательных систем.

Первичная обработка данных на уровне ИЛО предусматривает решение ряда задач. Для создания базы данных необходимо прежде всего выделить в потоке информации отдельные телеграммы, опознать и раскрыть их кодовые формы (SYNOP, TEMP, PILOT, SATEM, SATOB, DRIBU и др.). Во многих телеграммах после раскодировки обнаруживается много явных дефектов, кроме того, их следует привести к единообразной форме (стандартному формату записи).

Именно ИЛО позволяет подготовить наборы данных, пригодных для выполнения численных анализов и прогнозов. Для этого предусмотрены программы сортировки данных. Сортировка производится в целях:

а) выбора сообщений, требуемых для данного сеанса обработки;

б) нахождения повторных сообщений и составления из них одного наиболее полного и точного;

в) комплектации в одну запись различных частей аэрологических телеграмм, пришедших с одной станции;

г) выделения тех частей из сообщений, которые подлежат дальнейшей передаче по различным системам обмена.

ИЛО осуществляет и контроль метеорологической информации. Этот контроль проходит две стадии. Сначала в процессе первичной обработки производится проверка взаимной согласованности данных в одном и том же сообщении, а также сопоставление данных на одной и той же станции за близкие сроки наблюдений, затем — проверка согласованности данных различных пунктов (горизонтальный контроль). Она реализуется уже вне уровня ИЛО при объективном анализе данных.

Важной операцией, выполняемой ИЛО, является комплексация данных. Она используется для подготовки выборок сообщений или их частей для различных последующих преобразований. При этом производится и частичная обработка составленных выборок, например, рассчитывается толщина слоя 500—1000 гПа или скорость термического ветра. Возможность расчета дополнительных характеристик представляет большое удобство для пользователя.

Перечислив основные возможности ИЛО, рассмотрим для чего она служит в оперативной работе ГМЦ СССР. С ее помощью выполняется подготовка данных для следующих целей:

— автоматизированной наноски синоптических и аэрологических карт;

— передачи сводок с данными по каналам связи;

— включения в общий комплект данных, подготовленных синоптиком и вводимых с удаленного терминала;

— использования данных для получения анализов, прогнозов и производства других расчетов;

— последующей обработки для расчета и накопления характеристик гидрометеорологического режима и хранения их.

Раскроем содержание каждого из этапов подготовки данных. Ежедневно в ГМЦ СССР автоматически наносится примерно 160 синоптических и аэрологических карт. Частично эта информация передается по фототелеграфу, остальная используется в оперативной работе ГМЦ. Цифровые сводки данных необходимы другим РМЦ и прогностическим подразделениям УГКС для подготовки собственных карт анализов состояния атмосферы. Кроме того, в виде цифровых сводок в специальном коде GRID могут быть переданы результаты анализов и прогнозов. Такой материал может поступать в ГМЦ УГКС гораздо раньше факсимильных карт и использоваться для производства синоптических расчетов при разработке локальных прогнозов. К моменту составления прогнозов ряд телеграмм не успевает поступить в РМЦ. В некоторых случаях значительные области оказываются неосвещенными исходной информацией. Точность автоматических процедур анализа в этих районах будет низкой, что скажется на качестве

прогнозов. Для повышения точности анализ производится в два этапа. После окончания первого этапа, который полностью автоматизирован, строится предварительная карта. Она передается специалисту-синоптику. В тех областях карты, где сеть станций, с которых пришли телеграммы, оказалась редкой, точки, из которых информация не поступила, отмечены специальным значком. Специалисту предлагается придумать для этих точек значения метеозаписей (как правило, геопотенциала) и ввести их в ЭВМ. Сообщения, вводимые синоптиком, подвергаются процедуре автоматического контроля, после чего, если они не противоречат структурным особенностям поля, используются при повторном автоматическом анализе. Обычно в каждый сеанс подготовки данных вводится 20—30 таких сообщений. Вся эта процедура называется восполнением недостающей информации. Ее внедрение оказало положительное влияние на качество численных прогнозов.

Подготовка исходных данных для анализа и численного прогноза с помощью системы ИЛО составляет одну из важнейших функций этого уровня обработки данных. Как уже указывалось, ИЛО усваивает данные в непрерывном режиме круглосуточно. Телеграммы обрабатываются по мере их поступления из канала связи и поступают в базу текущих данных¹. Для того чтобы численный прогноз был готов к определенному сроку (обычно не более чем через 6 ч после очередного срока наблюдений 00 ч или 12 ч по Гринвичу), сбор информации необходимо периодически прекращать. Момент прекращения сбора текущей информации называется «сроком отсечения». Понятно, что для сбора как можно большей информации срок отсечения следует отдалить от срока наблюдений, но для подготовки своевременного прогноза полную обработку информации следует начать как можно раньше. Сейчас в ГМЦ СССР для прогнозов по ЕТС принято время отсечения 2 ч 20 мин. Таким образом, сбор информации прекращается в 2 ч 20 мин и 14 ч 20 мин по Гринвичу. Данные, поступившие после этого времени, для краткосрочного регионального прогноза не используются. Они накапливаются для прогнозов по северному полушарию с заблаговременностью свыше 48 ч. После наступления «срока отсечения» в базе текущих данных информация передается на другой магнитный накопитель данных. ИЛО продолжает сбор информации, а отсеченная часть ее далее обрабатывается другой системой программ. Снова обратившись к рис. 2.2, отметим, что после завершения ИЛО решаются в основном те же задачи, которые решает и инженер-синоптик после того, как ему передана карта с нанесенной на ней метеорологической информа-

¹ Вследствие этого в базе текущих данных имеются повторные сообщения от одной и той же станции, телеграммы не упорядочены по пространству, входящие в разное время части А, В, С, Д телеграмм ТЕМП от одной станции хранятся в разных местах базы.

цией. Следует отметить, однако, коренное различие в методике решения задач анализа и прогноза человеком и ЭВМ. Это различие вытекает из способа хранения и обработки информации. Для того чтобы подготовиться к прогнозу, человек должен «увидеть» метеорологическое поле. Для этого ему нужно провести его изолинии, «поднять» синоптическую или аэрологическую карту. Для численного прогноза ЭВМ не нуждается в визуализации поля, так как она хранит и обрабатывает только таблицы чисел или символов. Однако полученная от ИЛО табличная информация не может быть эффективной, то есть быстро и точно преобразована в прогноз. Для получения высококачественного прогноза необходимо предварительно произвести интерполяцию значений метеозлементов в узлы регулярной сетки, покрывающей область анализа и прогноза. Именно это преобразование формы исходной информации составляет главную цель этапа автоматического или, как его принято называть, объективного анализа.

Принципиальные основы объективного анализа будут рассмотрены в следующей главе. Ниже приводятся только главные сведения по организации оперативной процедуры этого анализа в ГМЦ СССР. Сообщения, собранные в базе текущих данных за время до «срока отсеечения» перед подачей на объективный анализ, преобразуются. Выбранная информация сортируется. При этом сообщения синоптических и аэрологических станций, расположенных на суше, упорядочиваются по возрастанию индексов. Судовые сообщения и данные ИСЗ упорядочиваются по географическим координатам. Подробно с методикой подготовки данных и объективного анализа можно познакомиться по работе [2]). Кроме того, из части В аэрологических телеграмм отбираются сведения о значениях метеозлементов на изобарической поверхности 925 гПа. После сортировки производится ликвидация повтора среди сообщений. В конце процедуры комплектации данных печатаются сведения о количестве информации, пригодной для объективного анализа. При этом сообщается количество синоптических и аэрологических телеграмм, собранных по каждому синоптическому району, а также общее количество судовых сообщений и спутниковых наблюдений по 10-градусным квадратам.

Сведения о количественном составе исходной информации позволяют принять решение о целесообразности проведения автоматического анализа. Если число районов, не освещенных данными совсем, составляет более 20 % от общего числа, а число районов, освещенное данными не полностью — более 30 %, то расчет объективного анализа и прогноз по таким данным не целесообразны. В этом случае для распространения используют прогнозы, рассчитанные на соответствующие моменты в предыдущем сеансе. Такие аварийные ситуации достаточно редки, в среднем они составляют примерно 3 % общего числа прогнозов. Если обеспеченность данными достаточна, то начинают функционировать


модули задачи объективного анализа. На их вход подаются наборы синоптических сообщений с суши и моря, климатические характеристики и дополнительные управляющие параметры. В результате приземного анализа формируются поля приземного давления, геопотенциала АТ-1000, приземной температуры и точки росы. Эти поля равномерно освещают территорию регионального прогноза. После завершения приземного анализа выполняется комплексный контроль аэрологической информации. (Процедура комплексного контроля освещена в работе [3, 7]). Затем начинает работать модуль объективного анализа в свободной атмосфере.

На вход этого модуля поступают наборы проконтролированных аэрологических данных и спутниковых сообщений. По этим данным производится интерполяция значений метеозлементов в узлы регулярной сетки. На выходе из блока выдаются поля геопотенциала АТ₉₂₅, АТ₈₅₀, АТ₇₀₀, АТ₅₀₀, АТ₄₀₀, АТ₃₀₀, АТ₂₅₀, АТ₁₅₀, АТ₁₀₀ и поля дефицита точки росы на уровнях 850, 700 и 500 гПа. Результаты анализа имеются как в узлах сетки, применяемой для численного прогноза с шагом 300 км, так и в узлах широтно-долготной сетки с шагом $2,5 \times 2,5$. Эти поля накапливаются в базе данных анализов и прогнозов циклического архива и хранятся в нем в течение пяти суток, после чего передаются в циклический архив с месячным временем хранения. Они могут быть переданы в виде цифровых сводок всем потребителям, располагающим средствами приема и воспроизведения для расчетов или использования в прогнозе. Важно отметить, что передача таких сводок может быть осуществлена примерно через 3 ч после срока наблюдений, тогда как факсимильная передача карт анализа заканчивается в основном только спустя 6 ч после срока наблюдений.

По завершению автоматического анализа начинает работать комплекс программ численного прогноза. На этом этапе значения метеозлементов в узлах регулярной сетки, полученные для срока наблюдений путем объективного анализа, вычисляются для заданного будущего момента. В настоящее время в ГМЦ СССР рассчитывают прогнозы регионального масштаба по данным за 00 и 12 ч по Гринвичу с заблаговременностью от 18 до 72 ч. В результате прогноза определяются приземное давление, геопотенциалы изобарических поверхностей от 850 до 200 гПа. Принципы, методология и успешность численных прогнозов будут более подробно рассмотрены в последующих главах.

Полезно принять во внимание, что результаты численных прогнозов вместе с результатами объективного анализа накапливаются в циклическом архиве. Накопление архивов прогнозов позволяет организовать их регулярную оценку и определять их систематические ошибки. Накопление архивов позволяет также исследовать возможности уточнения прогнозов погоды, применяя статистические методы.

Последовательное выполнение всех этапов оперативной обработки информации в ГМЦ СССР осуществляется благодаря функционированию единой управляющей программы, обеспечивающей диспетчеризацию и протоколирование вычислительного процесса. Эта программа последовательно запускает отдельные программы с учетом временного графика обработки, она позволяет осуществлять обработки в аварийных ситуациях. Такая организация вычислительного процесса исключает ошибки операторов. Создание ее потребовало больших усилий опытейших программистов. Она называется единой технологической линией производства краткосрочных прогнозов.



Глава 3

ТОЧНОСТЬ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ, ИСПОЛЪЗУЕМОЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ. СОВРЕМЕННЫЙ АНАЛИЗ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В настоящей главе будет рассмотрена процедура и охарактеризована точность объективного анализа данных. Объективный анализ начинается после сбора и первичного контроля телеграмм и служит для преобразования значений метеозлементов, наблюдавшихся на нерегулярной сети станций, на какую-нибудь заранее заданную регулярную сетку. С позиции синоптика наибольший интерес представляет вопрос о точности результатов этого анализа, так как нельзя ожидать, что прогноз, рассчитанный по некоторым начальным данным, может быть точнее, чем анализ этих данных.

Имеются три основных источника погрешности анализа: во-первых, ошибки измерения метеорологических характеристик; во-вторых, ошибки, возникающие в системе сбора метеорологической информации, наконец, в-третьих, ошибки, возникающие при интерполяции или каком-либо другом восполнении метеорологической информации в процессе самого анализа.

При наличии ошибок в значении какой-либо величины важно уметь оценить возможные отклонения имеющихся результатов измерений от истинного значения. Из опыта известно, что ошибки измерений, если они произведены в примерно равных условиях, подчиняются нормальному закону распределения вероятностей. Случайная величина x , подчиняющаяся нормальному закону распределения, характеризуется математическим ожиданием μ и средним квадратическим отклонением σ_x . Математическое ожидание или средняя арифметическая ошибка характеризует систематическую погрешность определения величины с помощью имеющейся системы наблюдений. Поскольку нет возможности получить значения метеорологических характеристик с помощью нескольких независимых равноточных систем наблюдений, то будем считать, что систематическая ошибка наблюдений отсутствует.

При таких условиях возможные ошибки регистрации метеорологической информации можно вполне охарактеризовать

средним квадратическим отклонением либо другой величиной, связанной со средним квадратическим отклонением в силу свойств нормального закона распределения. Ниже в таблицах погрешность измерений будет характеризоваться абсолютной ошибкой, то есть средним арифметическим модулем ошибки η . Эта величина для нормального распределения связана со средним квадратическим отклонением соотношением

$$\sigma \cong 1,25\eta. \quad (3.1)$$

Значения величин η для метеорологических наблюдений приведены в табл. 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1

Погрешности метеорологических и актинометрических наблюдений

Элемент	Срок	Средние		Погрешности интерполяции, сут.
		сутки	месяц	
Давление, гПа	0,24	0,2	0,2±0,2	0,3±0,3
Ветер				
скорость, м/с	1—2	1—2	0,5—1	2—3
направление, румб	1	0,5	0,5	0,5
Температура, °С (психрометр)	0,3—0,4	0,3—0,4	0,2—0,3	0,5—1
Упругость водяного пара, гПа	0,2	0,2	0,2	0,5
Относительная влажность, %				
психрометр	2—4	2—4	1—3	4—7%
гигрометр	5—7	3—4	1—3	
Температура, °С				
поверхности	1—2	0,5—1	0,3—0,5	1
почвы				
глубин	0,6	0,5	0,4	1—2
Осадки, %				
жидкие	15—20	15—20	15—20	40—80
твердые	45—55	40—50	45—55	60—70
Облачность				
количество, балл	1	1	1	2
высота, %	15—20			
Суммарная радиация, %	5	10	5	5
Эффективное излучение, %	20	20	20	5
Радиационный баланс, %	15	10	10	5
Испарение (по весовому испарителю), %	17		13	10

Погрешности аэрологических наблюдений

Элемент	Срок	Средние		Погрешность интерполяции, сут.
		сутки	месяц	
Температура, °С				
1 км	0,5	0,3	0,3	0,6
5 км	0,7	0,5	0,4	0,7
10 км	1	0,7	0,4	0,9
Давление, гПа				
1	0,4	0,3	0,3	0,7
5	0,4	0,3	0,3	0,7
10	0,6	0,4	0,4	0,5
Высота, дкм				
1	0,3	0,1	0,3	0,6
5	0,6	0,4	0,5	1,2
10	1,5	1	1	1,9
Скорость ветра, м/с				
1	1,4	1	0,3	1,2
5	1,9	1,4	0,3	1,9
10	2,1	1,8	0,6	2,5
Направление ветра, град				
1	6	4	0,7	9
5	5	4	0,6	9
10	4	2,5	0,5	10
Влажность, %				
1	4	2,6	1,2	5
5	5	3,5	1,2	5
10	6	4,4	1,2	6

Зная величину η , можно оценить вероятностный диапазон, в котором истинное значение $x_{\text{и}}$ метеорологической характеристики находится по отношению к наблюдаемому x . Для этого по формуле (3.1) определяется σ_x , а затем учитывается, что практически независимо от закона распределения ошибки в 90 % случаев измерений выполняется соотношение

$$x - 1,6\sigma_x \leq x_{\text{и}} \leq x + 1,6\sigma_x. \quad (3.2)$$

Например, согласно табл. 3.1, в 90 измерениях из 100 истинное количество облаков в срок наблюдения будет не дальше от наблюдавшегося чем на 2 балла.

Анализ ошибок наблюдений, приведенных в табл. 3.1 и 3.2, показывает, что не все метеозлементы наблюдаются с большой

точностью. Следует еще учитывать, для каких целей используются значения наблюдавшихся величин. Например, в прогнозах большую роль играют горизонтальные градиенты метеорологических характеристик, которые рассчитываются на основе конечно-разностных соотношений. Точность метеорологических наблюдений должна быть не ниже той, которая обеспечивает заранее заданный уровень погрешности оценки градиентов. В табл. 3.3 приведены значения абсолютных ошибок радиозондирования на уровне 500 гПа, по данным Б. Д. Решетова, а также точность, которой следовало бы добиваться, чтобы можно было измерять разности метеоэлементов для пунктов, находящихся на расстоянии 300 км друг от друга, с относительной погрешностью 20 %. Под относительной ошибкой подразумевается отношение средней квадратической ошибки измерений к средней квадратической разности значений метеоэлементов. На основе табл. 3.3 можно сделать вывод, что современные аэрологические наблюдения еще не вполне пригодны для проведения по ним прогностических расчетов. Повышение точности необходимо еще и для обеспечения эффективности обнаружения грубых ошибок наблюдений. Для иллюстрации этого соображения приводится табл. 3.4. На основании этой таблицы, также построенной Б. Д. Решетовым, можно выявить связь

Таблица 3.3

Требуемая точность зондирования по Решетову [8] для $P=500$ гПа

Элемент	Средняя разность на 300 км	Точность измерений	
		достигнутая	требуемая
H_{500} дкм	6	0,6	0,5
T °С	3	0,7	0,5
V м/с	6	1,9	1,0
α град.	40	5	5
f отн. вл., %	15	5	2

Таблица 3.4

Процент станций, дающих ошибки, равные половине характерной разности H_{500} при разной относительной ошибке наблюдений

Относительная ошибка наблюдений	0,2	0,3	0,5
% станций с ошибкой более 0,5η	1,5	10	32

между числом аэрологических станций, которые могут дать грубую ошибку в наблюдениях, и уровнем точности наблюдений. Например, если относительная ошибка наблюдений 20 %, то примерно 2 станции из 300 могут дать грубую ошибку, а значит, эта ошибка будет легко обнаруживаться в процессе объективного анализа и контроля. При относительной погрешности наблюдений 40 % практически на каждой пятой станции возможна грубая ошибка, и выявить ее путем объективного анализа и горизонтального контроля очень трудно.

Перейдем к оценке ошибок, связанных с системой сбора метеорологической информации. Источники этих ошибок — погрешности передачи синоптических или аэрологических телеграмм, которые приводят: а) к потере или полному искажению индекса станции или заголовка; б) к наличию пропусков в содержании; в) к наличию дефектов в самом тексте.

Как показывает опыт эксплуатации систем сбора и первичного контроля метеоинформации, по причине искажения индекса за счет невозможности использовать при этом само содержание телеграммы может теряться от 3 до 8 % всех приходящих телеграмм. Некоторые из оставшихся не полны, т. е. в них либо совершенно отсутствуют данные с верхних уровней, либо пропущены значения геопотенциала или температуры на каком-то уровне. Но даже, если информация имеется, в ней могут быть дефекты. В настоящее время принято считать, что дефекты имеются в 15 % полных телеграмм. Дефекты при передаче геопотенциала возникают примерно в 1,4 раза чаще, чем при передаче температуры. Причины дефектов: а) искажения значений на величину, кратную 10 или 100; б) потеря старшего или младшего десятичного знака числа; в) десятичные знаки переставлены местами; г) перепутаны знаки (+) и (—).

Таким образом, если не предусматривать специальных мер контроля, примерно из 520—600 аэрологических телеграмм, собираемых ко времени отсечения для прогноза на полушарии, до 30 % (160—200) можно потерять только в результате ошибок системы сбора. Имеющиеся системы контроля в настоящее время автоматически исправляют до 80 % ошибочных телеграмм.

Третьим источником погрешностей метеорологической информации, используемой для прогноза, является наличие районов, недостаточно освещенных метеорологической информацией. Синоптик осуществляет восполнение недостающей информации при проведении на карте изолиний, а в процедуре объективного анализа восполнение информации происходит в основном при интерполяции в узлы регулярной сетки. Возникновение ошибок при интерполяции данных, наблюдавшихся на дискретной сети, можно проследить с помощью рис. 3.1. В верхней части его изображен сигнал, состоящий из смеси крупномасштабного фона и мелкомасштабного случайного шума. В нижней части изображены резуль-

таты наблюдений, по которым сигнал должен быть восстановлен путем кусочно-линейной интерполяции. Легко убедиться, что восстановленный сигнал не похож ни на истинный, ни на крупномасштабный фон. Для того чтобы уменьшить влияние этих ошибок, расположение сети станций должно удовлетворять ряду условий. В частности, сеть станций должна быть достаточно густой и позволять восстанавливать значения метеорологических характеристик путем интерполяции с погрешностью, не превышающей погрешности наблюдений. В настоящее время планирование сети аэрологических станций производится на основе анализа статистической структуры метеорологических полей. Расстояние между станциями для сети достаточной густоты должно быть 200—300 км. Такая густота сети наблюдений приемлема только для климатологических исследований. Если требовать, чтобы система наблюдений фиксировала все необходимые для синоптики барические системы и, в частности, приземные барические новообразования, с достаточной точностью, то шаг 200 км будет слишком большим. Однако стоимость системы наблюдений очень велика, и планировать сеть на основе требований прогноза погоды можно будет только тогда, когда мы сможем точно оценить экономическую эффективность прогноза.

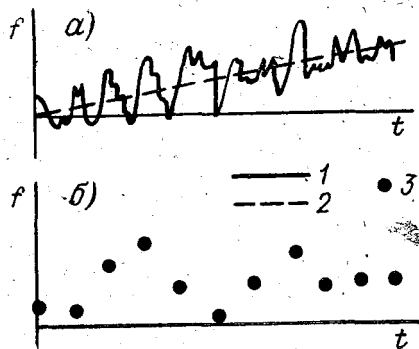


Рис. 3.1. Образование фиктивных крупномасштабных колебаний под влиянием дискретности системы наблюдений. Смесь сигнала и шума (1), налагающегося на истинный сигнал (2) приведены в части (а), наблюдаемые значения (3) — в части (б)

Дадим теперь краткую характеристику системы современного объективного анализа, сравнив ее с методикой синоптического анализа начальных данных, производимого вручную перед составлением прогноза. При сравнении результатов необходимо помнить о различных целях численного и синоптического анализа. Сводка задач, которые решаются при этом человеком и ЭВМ, приведена в табл. 3.5. Обращает на себя внимание тот факт, что при анализе вручную человек ставит перед собой и решает не только задачи преобразования и контроля исходной информации, но дополнительно осмысливает факторы, послужившие причиной сложившегося синоптического положения, намечает тенденции развития процессов. Большая смысловая нагрузка синоптического анализа приводит к тому, что, несмотря на гораздо меньшую, чем у ЭВМ, точность интерполяции, человек до сих пор вручную успешно справляется с оперативной работой. Кроме различия в целевых

Задачи оперативного анализа исходной информации

Задачи	Анализ, выполняемый человеком	Анализ, выполняемый ЭВМ (объективный анализ)
Тактические	Придание наглядности начальным данным путем расчерчиваний карт Контроль начальных данных Корректировка начальных данных на основе согласования всех полей с учетом стратегических целей анализа Восполнение недостающей числовой информации	Получение таблицы необходимых исходных данных в узлах регулярной сетки Контроль начальных данных Корректировка начальных данных на основе согласования начальных полей, заданных в числовой форме Восполнение недостающей числовой информации
Стратегические	Уяснение структуры начальных полей и выделение их главных особенностей Определение изменений структуры за последний период для установления тенденций эволюции главных особенностей На основе вычисления дополнительных характеристик выявления причинно-следственных связей в эволюции главных особенностей	Приведение исходных данных к форме, обеспечивающей наиболее точное численное интегрирование прогностической модели

установках между синоптическим и численным объективным анализом имеется и разница в методике. Это естественно, так как при объективном анализе происходит преобразование одних таблиц в другие, а человек для удобства своей работы преобразовывает табличные исходные данные в картографические. Этапы обработки исходной информации при анализе вручную и объективным анализе перечислены в табл. 3.6. На ее основе можно сделать вывод, что человек и ЭВМ в принципе выполняют одну и ту же работу: интерполируют данные в точки, лежащие между станциями, где производились наблюдения, однако человек, производя интерполяцию на основе нескольких приближений, в качественной форме согласует практически все доступные ему сведения о погоде, тогда как в процессе объективного анализа в основном производится одноэлементная интерполяция и согласование небольшого количества полей, как правило, ветра и геопотенциала. Вследствие этого синоптический анализ располагает возможностями более детального описания мелкомасштабных процессов.

Таблица 3.6

Этапы оперативного анализа исходной информации

Анализ, выполняемый человеком	Анализ, выполняемый на ЭВМ (объективный анализ)
1. Предварительное расчерчивание изолиний, нахождение особых точек и особых линий	Предварительная интерполяция данных в узлы регулярной сетки (поиск влияющих станций, определение весов, собственно интерполяция)
2. Предварительный качественный анализ зон осадков, облаков и явлений погоды	Оценки точности предварительной интерполяции
3. Анализ полей изотенденций, нахождение особых точек этих полей	Восполнение недостающей информации (если необходимо)
4. Анализ фронтов	Согласование полей ветра и геопотенциала
5. Окончательный анализ зон осадков	
6. Окончательный анализ изолиний полей	
7. Уточнение положений и перемещения центров	

В чем объективный анализ существенно превосходит субъективный синоптический, так это в точности интерполяции. В настоящее время в объективном анализе наиболее широкое распространение получила так называемая оптимальная интерполяция. При этой процедуре интерполируются отклонения наблюдавшихся значений метеоэлементов от его климатической нормы или от его значения по прогностическим данным на соответствующий срок по формулам

$$f'_0 = \sum_{i=1}^n P_i f'_i, \quad (3.4)$$

$$f'_i = f_i - \bar{f}_i. \quad (3.5)$$

В этих формулах f_i — значение метеоэлемента в искомой точке $i=0$ и в точках, где имеется информация ($i=1, \dots, n$); \bar{f}_i — климатическая норма метеоэлемента или его спрогнозированное поле на момент интерполяции; P_i — весовые коэффициенты интерполяции; n — число пунктов, привлекаемых для интерполяции.

В соответствии с формулой (3.4) оптимальная интерполяция является линейной, как и интерполяция, вручную выполняемая синоптиком. Однако при выборе весовых коэффициентов человек, руководствуется только расстоянием. При выборе весов оптимальной интерполяции учитывается статистическая структура поля. Технически определение P_i производится путем решения системы линейных уравнений

$$\sum_{j=1}^n \mu_{ij} P_j + \eta_i P_i = \mu_{i0}, \quad (3.6)$$

где μ_{ij} — значение нормированной автокорреляционной функции интерполируемого поля, которая считается зависящей только от расстояния r между точками, например, по формулам¹:

$$\mu_{ij} = \mu(r_{ij}) = \left(1 + \frac{r_{ij}}{L}\right) \exp\left(-\frac{r_{ij}}{L}\right), \quad (3.7)$$

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \quad (3.8)$$

L — параметр, определяющий скорость убывания корреляционной функции анализируемого метеорологического поля. Величина η_i представляет собой отношение среднего квадрата ошибки наблюдений к дисперсии интерполируемого метеорологического элемента. Она задается на основе дополнительной информации и численных экспериментов.

Указанный выше способ выбора весов приводит к тому, что при интерполяции нормальных изотропных случайных полей, автокорреляционные функции, которых совпадают с автокорреляционными функциями метеорологических полей, средний квадрат ошибки интерполяции оказывается минимальным на архиве метеорологических полей, по которому установлены величины климатических норм и получены автокорреляционные функции. Теоретическая ошибка оптимальной интерполяции может быть определена по формуле

$$\varepsilon = 1 - \sum_{i=1}^n P_i \mu_{i0}. \quad (3.9)$$

Метеорологические поля не отвечают в полной мере тем предположениям, при которых ошибка оптимальной интерполяции достигает минимальных теоретических значений, определяемых формулой (3.9). Эти поля могут содержать значительную неслучайную детерминистическую компоненту, за счет которой может нарушаться предположение о нормальном характере распределения, о стационарности и изотропности характеристик нормального распределения. В результате для каждого отдельного случая ошибка

¹ Такая форма автокорреляционной функции используется в системе оперативного объективного анализа Гидрометцентра СССР.

оптимальной интерполяции может оказаться существенно больше, чем теоретическая.

Исследование точности непрерывно совершенствующейся системы оперативного объективного анализа производится путем сопоставления его результатов с результатами синоптического анализа на одном и том же исходном материале. Расхождения между результатами синоптического и объективного анализа характеризуются:

1. Средней абсолютной ошибкой объективного анализа δ , то есть разностью между значениями давления или геопотенциала в объективном анализе и в анализе синоптика.

2. Средней ошибкой пространственного положения барических образований Δr , то есть расстоянием между положением одинаковых барических центров в объективном анализе и анализе синоптика.

3. Средней ошибкой давления, или геопотенциала в центрах барических образований δP или δH .

4. Степенью сглаживания барического поля при объективном анализе P , то есть процентом барических центров, отсутствующих в объективном анализе, но выявленных при синоптическом, по отношению к общему числу барических образований.

Результаты оценки качества объективного анализа по данным за 1980 г. приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Синоптико-статистическая оценка объективного анализа
барического поля над Европой (числитель),
Северной Африкой и Тихим океаном (знаменатель в графе δ)


Уровень	δ	Δr км			δP или δH			P %		
		Ц*	А _ц	Σ	Ц	А _ц	Σ	Ц	А _ц	Σ
Земля	1.0 — 1.5	130	142	135	1.4	0.7	1.1	11	5	9
	2.0 — 3.5 гПа									
500 гПа	1.0 — 2.0	264	364	326	1.4	1.1	1.2	39	5	22
	4.0 — 10.0 дам									

На основе анализа абсолютной ошибки выявляется большая чувствительность объективного анализа к густоте сети наблюдений: в районах с редкой сетью возможны весьма значительные отклонения объективного анализа от синоптического. Ошибка в определении положения барических центров и их интенсивности может быть признана довольно низкой, так как при определении центра барического образования у земли синоптик может допу-

* Ц — циклон; А_ц — антициклон.

скасть ошибку до 50 км в ту или иную сторону. Степень сглаживания центров составляет примерно 15 %, причем сглаживаются исключительно мелкие барические образования, очерченные не более чем одной изолинией. В синоптическом анализе такие центры обнаруживаются не столько по данным о давлении (геопотенциале), сколько по данным о ветре или о структуре предшествующего по времени поля давления (геопотенциала).

Характеризуя в целом объективный анализ, на основе которого рассчитывается численный прогноз, следует отметить, что он несколько отличается от того, который по тем же результатам вырабатывает синоптик. Различие возникает как вследствие использования при объективном анализе значительно меньшего объема характеристик погоды, так и вследствие методологических расхождений. Особенно велика разница в районах, недостаточно освещенных метеорологическими наблюдениями.



Глава 4

ОПИСАНИЕ ПОГООООБРАЗУЮЩИХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА БАЗЕ МОДЕЛЕЙ ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗА

Численный прогноз барических полей является одним из важнейших этапов технологии краткосрочного прогноза погоды. Он представляет собой преобразование исходной метеорологической информации с помощью ЭВМ по программам, созданным на основе уравнений гидротермодинамики атмосферы. Вопросы постановок математических задач для численного прогноза систематически изучаются динамической метеорологией. Эффективные численные методы для алгоритмизации задач численного прогноза разрабатываются специалистами-математиками. Инженер-метеоролог с указанными вопросами в общих чертах был знаком во время обучения в вузе. Объем и характер данного учебного пособия не позволяет сколько-нибудь подробно останавливаться на них, тем более что по данному материалу имеются монографии и учебники, например [1, 5, 14].

Цель настоящей главы — создать у читателя представление о процессе формирования «завтрашней» погоды из «сегодняшней» на основе достижений теории численного прогноза. Для того чтобы сформулировать схемы взаимосвязей, необходимо постулировать, что модель адекватна атмосфере. Напомним, на каком основании можно вообще ожидать, что система уравнений гидротермодинамики пригодна для описания эволюции погоды. В настоящее время имеются два типа аргументов, которые подкрепляют нашу уверенность в справедливости математической постановки задачи. С одной стороны, в лабораторных экспериментах по анализу динамики жидкостей во вращающихся сосудах с подопревом достигнуто большое сходство течений с картинами линий тока, характерными для планетарной циркуляции атмосферы. Численное моделирование условий лабораторного эксперимента, в процессе которого производился расчет течения жидкости на основе уравнений гидродинамики, продемонстрировало близость расчетных полей и наблюдавшихся в лаборатории. С другой стороны, уже более двадцати лет ежедневно производится оперативный численный прогноз погоды. Хотя его результаты еще далеки от идеала, однако у синоптиков, использующих рассчитанные карты, уже

нет никаких сомнений в справедливости методологии численного прогноза. Таким образом, вторым доказательством справедливости математической модели численного прогноза является повседневная практика. Уравнения динамики атмосферы, записанные в σ -системе координат¹, имеют вид

$$\frac{du}{dt} = lv - g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{RT}{P_*} \frac{\partial P_*}{\partial x} + F_x, \quad (4.1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -lu - g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{RT}{P_*} \frac{\partial P_*}{\partial y} + F_y, \quad (4.2)$$

$$T = -\frac{g}{R} \sigma \frac{\partial H}{\partial \sigma}, \quad (4.3)$$

$$\frac{dP_*}{dt} = -P_* \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} \right), \quad (4.4)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta}{T} \varepsilon. \quad (4.5)$$

Здесь u , v — компоненты вектора горизонтальной скорости; $\omega = \frac{d\sigma}{dt}$ — вертикальная скорость в σ -системе координат ($\sigma = P/P_*$); P_* — приземное давление; H — геопотенциальная высота; T — абсолютная температура; F_x , F_y — горизонтальные компоненты силы трения; ε — скорость нагревания атмосферы за счет суммарного действия источников и стоков тепла; θ — потенциальная температура.

Оператор $\frac{d}{dt}$ дает изменение метеорологического элемента внутри движущейся частицы и определяется по формуле

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + \omega \frac{\partial}{\partial \sigma}. \quad (4.6)$$

Уравнения (4.1) — (4.3) выражают собой закон сохранения импульса; уравнение (4.4) — закон сохранения массы; уравнение притока тепла (4.5) — закон изменения внутренней энергии.

Уравнения, определяющие горизонтальное распределение и эволюцию P_* , являются одним из следствий граничных условий. Вертикальная скорость в σ -системе координат должна удовлетворять двум ограничениям, так как на верхней границе атмосферы при $\sigma=0$ и на нижней границе при $\sigma=1$ она определяется равенством $\omega=0$. Одно из этих граничных условий, как правило, верхнее, используется при интегрировании уравнений неразрывности

¹ Вывод уравнений и понятие о σ -системе координат даны в работе [1].

(4.4) в целях получения выражения, определяющего распределение σ по вертикали:

$$\sigma(\sigma) = \frac{\sigma}{P_*} \int_0^1 \left(\frac{\partial u P_*}{\partial x} + \frac{\partial v P_*}{\partial y} \right) d\sigma - \frac{1}{P_*} \int_0^{\sigma} \left(\frac{\partial u P_*}{\partial x} + \frac{\partial v P_*}{\partial y} \right) d\sigma. \quad (4.7)$$

Второе условие используется как уравнение, определяющее P_* , имеет вид

$$\frac{\partial P_*}{\partial t} = - \int_0^1 \left(\frac{\partial u P_*}{\partial x} + \frac{\partial v P_*}{\partial y} \right) d\sigma. \quad (4.8)$$

Система (4.1) — (4.5) является незамкнутой, так как содержит неопределенные переменные: силы трения F_x и F_y , скорость нагревания ϵ и приземное давление P_* .

Определение зависимостей, выражающих величины F_x , F_y и ϵ через характеристики основных метеорологических полей u , v , ω , P_* , H , θ , представляет собой сложную, не до конца еще решенную задачу динамической метеорологии, принципиально важную для средне- и долгосрочных прогнозов, а также теории климата. Для краткосрочного прогноза принимают предположения: 1) жидкость квазиидеальна (то есть движение атмосферы происходит без внутреннего трения); 2) скорость нагревания атмосферы равна нулю (термодинамические процессы квазиadiaбатичны). Предположение об отсутствии трения в атмосфере используется в синоптической деятельности, когда скорость ветра рассчитывают по полю давления с помощью формул градиентного ветра. Близость ветра к градиентному неоднократно проверялась экспериментально, например, см. работу [2]. В настоящее время принято считать, что погрешности определения направления ветра стандартными аэрологическими методами ($\pm 10^\circ$) в среднем больше, чем возможные погрешности от замены реального ветра градиентным. Кроме того, отклонения ветра от геострофического или градиентного вне пределов пограничного слоя синоптическая метеорология объясняет нестационарностью полей ветра и геопотенциала, так что гипотеза квазиидеальности не вступает в противоречие с практикой. (С описанием природы агеострофических отклонений можно ознакомиться по учебнику [1]).

Совершенно иначе обстоит дело с гипотезой квазиadiaбатичности. На первый взгляд она противоречит основным физическим представлениям о механизме общей циркуляции атмосферы. Существование известного нам режима движения атмосферы сильно зависит от поступления солнечной энергии. В умеренных широтах показателем важности притока солнечного тепла для каждого конкретного пункта является амплитуда годового хода температуры воздуха. Наличие существенного годового хода температуры представляется несовместимым с гипотезой квазиadiaбатичности.

Однако, если обратить внимание на скорость изменения температуры в каждой точке за счет годового хода солнечного тепла, то можно отметить, что она поразительно меньше, чем та, которая вызывается адвекцией тепла или холода. За счет годового хода в Ленинграде, например, температура воздуха у поверхности земли изменится примерно на 30° за полгода, то есть скорость нагревания атмосферы составляет около $0,2^\circ$ за сутки, тогда как за счет смены воздушных масс изменение температуры может составить $5-10^\circ$ за сутки. Таким образом, гипотеза квазиadiaбатичности справедлива именно для целей краткосрочного прогноза погоды. Чтобы выяснить, как же согласовать факт физической необходимости учета радиационного нагрева и факт его незначительного влияния на краткосрочный прогноз, следует вспомнить, что процедуры оперативного численного прогноза летом и зимой ничем не различаются. Однако используемые для численного прогноза начальные поля существенно различаются. Это означает, что климатические особенности и, в частности, радиационный нагрев могут повлиять на результат краткосрочного прогноза только через начальные условия. Таким образом, принятие гипотезы квазиadiaбатичности не препятствует расчету прогноза погоды с заданной временностью не более двух-трех суток.

Соберем описанные выше факты и получим систему уравнений для краткосрочного прогноза:

$$\frac{du}{dt} = lv - g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{RT}{P_*} \frac{\partial P_*}{\partial x}, \quad (4.9)$$

$$\frac{dv}{dt} = -lu - g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{RT}{P_*} \frac{\partial P_*}{\partial y}, \quad (4.10)$$

$$H = H_* + \frac{R}{g} \int_0^1 \frac{T}{\sigma} d\sigma, \quad (4.11)$$

$$\omega(\sigma) = \frac{\sigma}{P_*} \int_0^1 \left(\frac{\partial u P_*}{\partial x} + \frac{\partial v P_*}{\partial y} \right) d\sigma - \frac{1}{P_*} \int_0^\sigma \left(\frac{\partial u P_*}{\partial x} + \frac{\partial v P_*}{\partial y} \right) d\sigma, \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial P_*}{\partial t} = - \int_0^1 \left(\frac{\partial u P_*}{\partial x} + \frac{\partial v P_*}{\partial y} \right) d\sigma, \quad (4.13)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = 0. \quad (4.14)$$

Упростим дополнительно систему (4.9) — (4.14), воспользовавшись квазигеострофическим соотношением. Зафиксируем так же давление P_* , перейдя, таким образом, от σ -системы к ξ -системе координат, где $\xi = \frac{P}{P_0}$, а P_0 — стандартное давление на уровне

одстилающей поверхности¹. При этом без существенного уменьшения общности можно ограничиться рассмотрением небольшого айма с плоской подстилающей поверхностью, отвлекаясь от анализа воздействия на атмосферу орографических неоднородностей эффекта изменения параметра Кориолиса. При этих условиях оток оказывается бездивергентным. Учитывая это, получим следующую систему уравнений для описания изменений синоптического положения:

$$v = \frac{g}{l} \frac{\partial H}{\partial x}, \quad (4.15)$$

$$u = -\frac{g}{l} \frac{\partial H}{\partial y}, \quad (4.16)$$

$$H = H_* + \frac{R}{g} \int_{\xi}^1 \frac{T}{\xi_1} d\xi_1, \quad (4.17)$$

$$\omega(\xi) = 0, \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0. \quad (4.19)$$

В этой системе введено новое обозначение H_* для характеристики геопотенциала на близком к земле уровне, где давление равно стандартному P_0 . Отметим также, что уравнение (4.13), определяющее в системе (4.9) — (4.14) величину давления у подстилающей поверхности, в ξ -системе координат и при условии геострофичности потока превращается в тождество. Для доопределения системы (4.15) — (4.19) необходимо найти уравнение для H_* . Воспользовавшись известной зависимостью между «геометрической» вертикальной скоростью W и «изобарической» ω в виде

$$W = \frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} + \omega \frac{\partial H}{\partial \xi}, \quad (4.20)$$

и соотношения геострофичности (4.15) и (4.16), а также равенство, определяющее W (4.18), получим для определения изменений геопотенциала соотношение

$$W = \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (4.21)$$

Если принять во внимание, что у подстилающей поверхности, точнее, на верхней границе пограничного слоя, значения «геометрических» вертикальных скоростей могут быть связаны с полем ветра

¹ Переход к ξ -системе координат позволяет отождествить функцию H с геопотенциалом стандартных изобарических поверхностей, применяемым в синоптической практике.

диагностическими соотношениями, например, с помощью формулы Дюбука $W = K \nabla^2 H_0$, то (4.21) можно использовать для определения изменений геопотенциала у подстилающей поверхности:

$$\frac{\partial H_*}{\partial t} = \dot{W}(H_*, T_*, \vec{V}_{g*}). \quad (4.22)$$

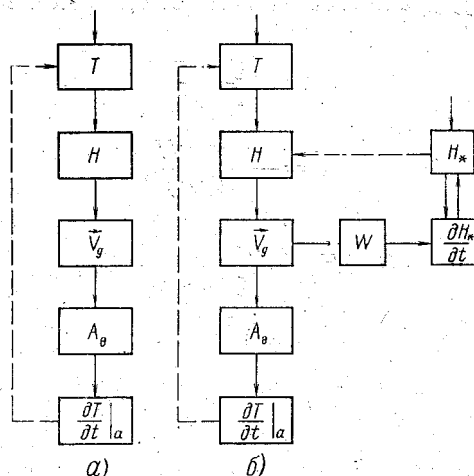


Рис. 4.1. Схема формирования изменений метеорологических полей в геострофическом приближении при отсутствии (а) и наличии (б) пограничного слоя; A_θ — адвекция тепла

Получив при указанных условиях максимально упрощенную систему, описывающую эволюцию атмосферы, отметим прежде всего, что в ней имеются лишь две производные по времени — в уравнениях (4.19) и (4.22). Это означает, что влияние «сегодняшней» погоды на «завтрашнюю» происходит в первую очередь через «тепловую память» атмосферы, а затем — через тормозящий эффект пограничного слоя¹. На рис. 4.1 приведены схемы формирования изменений погоды при отсутствии и наличии влияния пограничного слоя. В обоих случаях главным погодообразующим полем является исходное, горизонтально неоднородное поле температуры. При отсутствии приземного трения оно однозначно определяет распределение геопотенциала по высоте, а значит формирует геострофический ветер. Последний вызывает адвекцию тепла или холода, что приводит к изменениям исходного поля температуры, то есть образует новое температурное поле.

¹ Если пренебречь наличием пограничного слоя, то вблизи плоской подстилающей поверхности вертикальная скорость обратится в нуль и изменения геопотенциала происходить в соответствии с (4.22) не будет.

При наличии торможения атмосферы под действием трения о подстилающую поверхность горизонтальная неоднородность геострофического ветра приводит к изменению поля геопотенциала. Возникшая, таким образом, эволюция поля геопотенциала сильно усложняет движение атмосферы, вызывает дополнительную адвекцию тепла или холода и тем самым влияет на температурное поле в атмосфере.

Рассмотренная схема формирования синоптического положения вполне соответствует современным представлениям синоптической метеорологии, за исключением оценки роли вертикальных токов. Ни у кого из синоптиков-практиков не вызывает сомнений, что в атмосфере изменения температуры под воздействием вертикальных токов могут быть по величине сравнимыми с адвективными и даже превосходить их. Исчезновение вертикальных токов в рассмотренных выше схемах связано в первую очередь с принятием гипотезы геострофичности, благодаря которой уравнение (4.12) перешло в равенство (4.18). Агеострофическая составляющая ветра в атмосфере возникает благодаря ускорениям потока и за счет трения. (Для изучения вопроса о величине геострофической составляющей ветра может быть использована, например, работа [8]). В свободной атмосфере роль ускорений важна. Для рассмотрения погодообразующих взаимодействий с учетом вертикальных токов дополним систему (4.15) — (4.19), сохраняя ξ -систему координат и вводя, как поправки, к геострофическому ветру ускорения:

$$v = \frac{g}{l} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{l} \frac{du}{dt}, \quad (4.23)$$

$$u = -\frac{g}{l} \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{1}{l} \frac{dv}{dt}, \quad (4.24)$$

$$H = H_* + \frac{R}{g} \int_{\xi}^1 \frac{T}{\xi} d\xi, \quad (4.25)$$

$$\omega(\xi) = - \int_0^{\xi} D(\xi) d\xi, \quad (4.26)$$

$$\int_0^1 D(\xi) d\xi = 0. \quad (4.27)$$

Отметим, что через $D(\xi)$ обозначена горизонтальная дивергенция агеострофического ветра, возникающая за счет ускорений потока, определяемая по формуле

$$D(\xi) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{l} \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{dv}{dt} - \frac{\partial}{\partial y} \frac{du}{dt} \right). \quad (4.28)$$

Учитывая определение дивергенций, можно сделать вывод, что образование вертикальных токов происходит в атмосфере за счет горизонтальной неоднородности поля ускорения. При изложении вопроса образования вертикальных токов принято использовать равенство (4.28) в несколько другой форме. Ее легко получить, произведя дифференцирование ускорений по пространственным координатам и введя обозначение Ω для вертикальной составляющей вихря:

$$D(\xi) = -\frac{1}{l} \left(\frac{d\Omega}{dt} + D\Omega + \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (4.29)$$

где $\Omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$.

Легко узнать в равенстве (4.29) широко известное уравнение вихря.

На основе системы (4.23) — (4.28) можно представить себе механизм эволюции синоптического положения более полно, чем по схеме, приведенной на рис. 4.1. Дополненная схема приведена на рис. 4.2. Становится понятным, что при учете вертикальных токов уже нельзя считать, что будущее состояние атмосферы определяется только начальной температурой и приземным давлением. Динамическая инерция атмосферы и горизонтальная неоднородность начального поля скоростей приводят к независимым от теплового состояния изменениям скоростей движения воздуха, за счет чего генерируются вертикальные токи. Через поле вертикальных токов инерционность атмосферы влияет на термический режим и приземное поле давления. Два нестационарных процесса — изменение поля температуры и изменение поля скоростей — существуют в атмосфере и связаны друг с другом через геопотенциал и скорости. Через геопотенциал поле температуры влияет на изменение скорости, а через поле скорости влияют на поле температуры динамические факторы. Именно взаимосвязь этих двух нестационарных процессов приводит к формированию сложного суммарного циклического изменения метеорологических полей.

Система уравнений (4.23) — (4.28) служит базой для получения моделей численного прогноза по полным уравнениям. Для понимания термина «полные» уравнения, а также для уточнения общих представлений и формирования изменений синоптического положения полезно ознакомиться с моделью квазигеострофического численного прогноза с учетом образования в атмосфере вертикальных скоростей. Квазигеострофические модели предшествовали в оперативной практике полным моделям и до сих пор употребляются в ряде прогностических учреждений в целях прогноза по небольшой территории. Основным отличием квазигеострофических моделей от моделей прогноза по полным уравнениям является способ определения ускорения. В квазигеострофических

моделях для оценки реального ускорения используется ускорение геострофического ветра. Учитывая небольшие расхождения фактического и геострофического ветра, такой способ оценки ускорения не должен приводить к сильным расхождениям в результатах численного прогноза. Действительно, в оперативной практике показано, что оценки точности региональных квазигеострофических прогнозов на 24 ч близки к оценкам прогнозов по полным уравнениям. С ростом заблаговременности точность квазигеострофических прогнозов падает. Кроме того, они даже в региональном

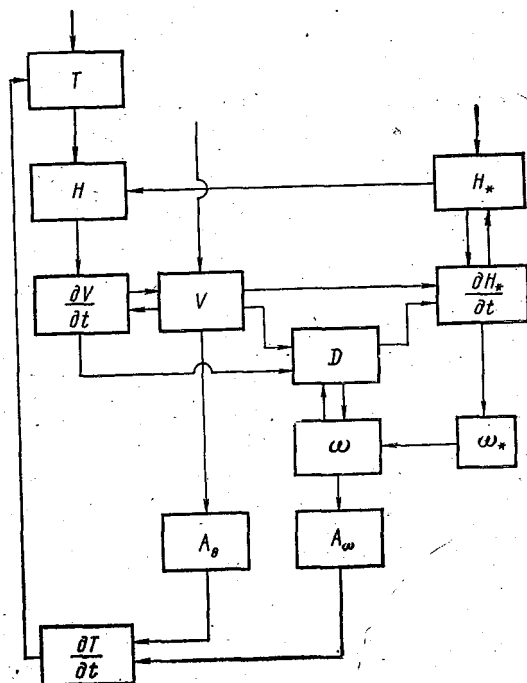


Рис. 4.2. Схема формирования изменений метеорологических полей при прогнозе по полным уравнениям. A_{ω} — изменения температуры за счет вертикальных движений.

варианте технически не проще и не экономичнее полных. Этим и обусловлено почти полное их исчезновение из оперативной практики.

Схема взаимосвязи метеорологических характеристик при квазигеострофическом прогнозе приведена на рис. 4.3. Сравнивая эту схему со схемой геострофического прогноза (рис. 4.1, б), можно выяснить, что за счет введения в рассмотрение ускорений и образования вертикальных токов процесс формирования изменений термического режима осложняется дополнительными обрат-

ными связями. Во-первых, эволюция приземного давления определяется теперь не только влиянием трения, но и изменениями вихря. Во-вторых, горизонтальная адвекция температуры оказывает существенное влияние на вертикальные токи. Возникновение новых обратных связей приводит к усложнению характера изменений температуры по времени. Однако в квазигеострофической модели не возрастает количество независимых метеорологических полей, определяющих начальное состояние системы.

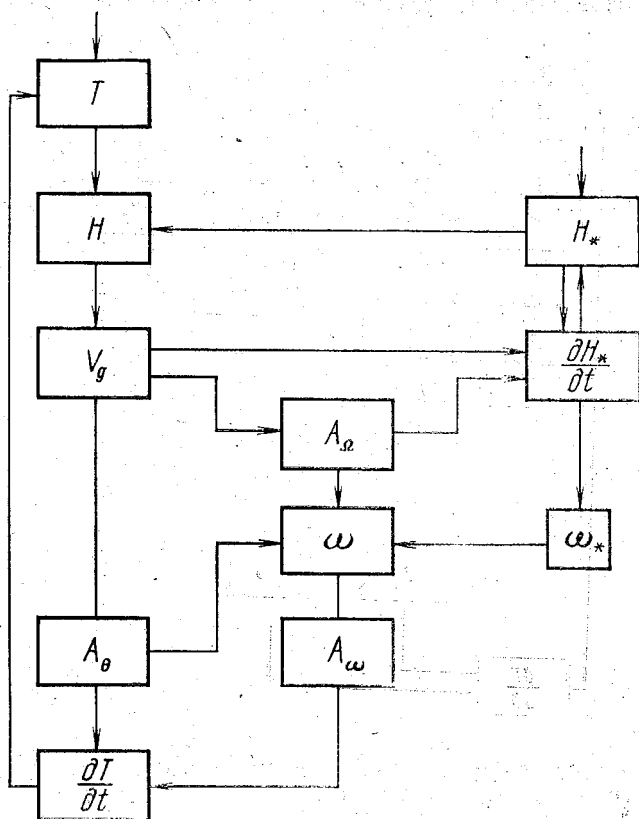


Рис. 4.3. Схема формирования изменений метеорологических полей при прогнозе по квазигеострофической модели. A_θ — адвекция вихря.

Иначе обстоит дело при переходе от квазигеострофического прогноза к прогнозу по полным уравнениям. Сравнивая схемы, приведенные на рис. 4.2 и 4.3, прежде всего отметим, что в прогнозе по полным уравнениям для описания динамики атмосферы необходимо задать в начальный момент помимо температуры и

приземного давления еще и поле скоростей. Дополнительно можно отметить, что в модели по полным уравнениям ослаблено по сравнению с квазигеострофическими влияние геопотенциала на поле ветра: геопотенциал, а через него температура, частично определяют только изменения скорости, а не саму скорость, как в квазигеострофическом случае. За счет большей самостоятельности поля скорости в модели по полным уравнениям приспособление динамики к термическому полю происходит не мгновенно. Время приспособления (адаптации) поля скорости к полю геопотенциала составляет несколько часов. Отметим, что приспособление поля ветра к полю геопотенциала теоретически происходит в атмосфере неизбежно, и после завершения этого процесса дальнейшая эволюция динамики атмосферы должна быть квазигеострофической. Однако полного приспособления движения к квазигеострофическому не происходит, так как в период адаптации в атмосфере возникают новые возмущения поля скоростей. Таким образом, коренное отличие описываемых двух методов прогноза в способе описания ускорения приводит к различным трактовкам физических процессов, происходящих в атмосфере. Квазигеострофический прогноз описывает как бы идеальный режим согласованной эволюции поля температуры и поля скорости. Чтобы наглядно представить себе различие между двумя подходами, полезно обратить внимание на движение тела в воде. От носовой части тела разбегаются гравитационные волны. Именно наличие волн такого рода характерно для режима адаптации поля ветра и поля геопотенциала в атмосфере. (Математическое описание процесса адаптации можно найти в ряде учебных пособий, например, в [1, 5]).

Благодаря механизму гравитационных волн в атмосфере в конечном итоге устанавливается квазигеострофический режим. Поэтому, если бы можно было получить фотографию квазигеострофического движения, то на ней не было бы волнообразования.

Таким образом, модели, основанные на полных уравнениях, описывают атмосферные процессы более реалистично, чем квазигеострофические. Они более физичны, хотя и более чувствительны к уровню технической оснащенности вычислительного центра. В настоящее время их реализуют в Мировых, Региональных и в отдельных Национальных центрах погоды. В территориальных центрах эксплуатируются квазигеострофические модели.



Глава 5.

СВЕДЕНИЯ ОБ ИСТОЧНИКАХ ОШИБОК ПРИ ЧИСЛЕННОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ

Математические модели, смысл которых описан в предыдущей главе, служат базой для практической организации численного прогноза. Однако для проведения расчетов прогнозов с помощью ЭВМ необходимо преобразовать уравнения модели. В исходной форме они представляют собой систему уравнений в частных производных. В определении производной подразумевается предельный переход от отношения конечных разностей, а понятие предельного перехода теоретически может быть реализовано только при бесконечном процессе. При использовании ЭВМ производные должны быть исключены из рассмотрения, а система уравнений должна быть записана в дискретной форме. Существует ряд способов дискретизации системы исходных уравнений моделей численного прогноза. Каждый из них имеет определенные преимущества и недостатки, однако все они вносят погрешность в базовую модель. В данной главе будет рассмотрен наиболее широко распространенный метод дискретизации моделей, используемых для численного прогноза, — метод сеток.

Для того чтобы понять суть погрешностей, возникающих при численной реализации модели прогноза методом сеток, рассмотрим простейшую задачу.

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \Omega}{\partial x} = 0, \quad (5.1)$$

$$\Omega = \frac{g}{l} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}. \quad (5.2)$$

Физическое содержание модели (5.1) — (5.2) более чем скромное: с ее помощью можно рассматривать только перенос геострофического вихря в одном направлении. Однако эта модель тесно связана с задачей численного прогноза и достаточно проста для проведения подробного анализа погрешностей метода сеток.

Для полноты постановки задачи необходимо определить краевые условия. отождествим ось OX с широтным кругом. В соот-

ветствии с рис. 5.1 расположим мысленно равномерно вдоль широтного круга систему точек наблюдения за некоторой функцией $f(x, t)$. Будем изображать область решения и наблюдавшиеся значения функции в плоскости. Для этого мысленно разрежем широтный круг и развернем его в отрезок, как показано на рис. 5.1. Легко понять, что при таком преобразовании всегда будет выполняться условие

$$f(x=0, t) = f(x=2\pi, t). \quad (5.3)$$

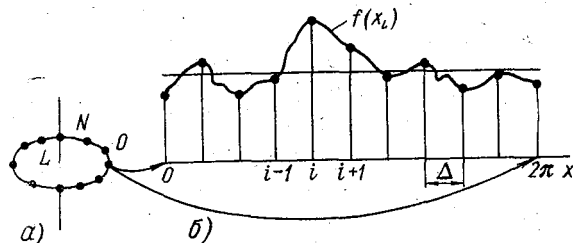


Рис. 5.1. Размещение узлов сетки вдоль широтного круга (а) и изображение этого размещения на прямолинейном отрезке (б)

Можно заметить, что это условие означает, что наблюдаемая функция периодична на оси x с периодом 2π . Требование периодичности для метеорологических полей является естественным краевым условием. Для нашей задачи, определяемой уравнениями (5.1) — (5.2), естественным краевым условием будет требование периодичности геопотенциальной высоты среднего уровня,

$$h(0, t) = h(2\pi, t). \quad (5.4)$$

Задача (5.1) — (5.2) и (5.4) будет использована ниже для иллюстрации вопроса о точности численного прогноза. Пронумеруем систему узлов, изображенную на рис. 5.1, где наблюдается функция $f(x)$, присвоив каждому узлу номер i , начиная с $i=0$ (левая крайняя точка) в порядке возрастания номеров слева направо на единицу. Тогда координата i -го узла x_i выражается формулой $x_i = i\Delta$, где Δ — постоянное расстояние между узлами, называемое шагом сетки. Значение функции в узле i обозначим через f_i с использованием формулы

$$f_i = f(x_i). \quad (5.5)$$

Центральным моментом метода сеток является определение способа аппроксимации производных, то есть замены их конечно-разностными операторами. Без дополнительного обсуждения

будем использовать для аппроксимации широко известное в метеорологии центрально-разностное соотношение¹

$$\hat{f}'_i = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta}, \quad (5.6)$$

где через \hat{f}'_i обозначена оценка значения искомой производной в узле с номером i .

Очевидно, что равенство (5.6) является приближенным. Оценим его точность на конкретном примере. Выберем такую функцию $f(x)$, которая была бы близка к моделям метеорологических полей и легко поддавалась исследованию. Поскольку основой аналитического описания метеорологических полей является их периодичность по широте, естественно в качестве примера выбрать простейшую гармоническую функцию. Итак, пусть

$$f(x) = \sin kx \quad (5.7)$$

и соответственно

$$f_i = \sin k\Delta i, \quad (5.8)$$

где коэффициент k представляет собой волновое число гармоники, связанное с длиной волны соотношением

$$k = \frac{2\pi}{L}. \quad (5.9)$$

Подставляя вычисленные по формуле (5.8) значения f_{i+1} и f_{i-1} в равенство (5.6) и используя формулу преобразования разности тригонометрических функций в произведение, получим

$$\hat{f}'_i = \frac{\sin k\Delta(i+1) - \sin k\Delta(i-1)}{2\Delta} = \left\{ \frac{\sin k\Delta}{k\Delta} \right\} k \cos k\Delta i. \quad (5.10)$$

Так как точное значение производной от избранной функции в узле находится элементарно:

$$f'_i = k \cos k\Delta i, \quad (5.11)$$

легко заметить, что применение конечно-разностного соотношения (5.6) привело к систематической ошибке в оценке производной.

Характер этой ошибки определяется множителем $\mu_k = \frac{\sin k\Delta}{k\Delta}$.

В силу того, что этот множитель всегда меньше единицы, применение формулы (5.6) приводит к систематическому занижению амплитуды дифференцируемого колебания. Отметим, что вели-

¹ Способы аппроксимации производных и рекомендаций по их использованию являются предметом вычислительной математики. С метеорологическими приложениями можно ознакомиться, например, в монографии [6].

чина занижения амплитуды зависит от длины дифференцируемой волны через волновое число.

В табл. 5.1 приведена зависимость значения множителя μ_k от длины дифференцируемой волны, выраженной в шагах сетки. Из нее видно, что даже при «густом», с точки зрения человека, распределении числа точек для изображения синусоиды (например, $L=6\Delta$) при численном дифференцировании теряется до 17 % амплитуды. Отсюда возникают требования к густоте сетки точек при применении метода сеток для численного прогноза погоды.

Таблица 5.1

Зависимость от длины волны коэффициента μ_k , характеризующего величину занижения производной амплитуды при численном дифференцировании — гармоники с волновым числом k по центрально-разностной схеме (5.6).

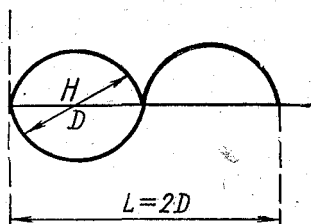
Изображение волны ¹	Длина волны	Волновое число	$k\Delta$	μ_k
	2Δ	$\frac{2\pi}{2\Delta}$	π	0
	3Δ	$\frac{2\pi}{3\Delta}$	$\frac{2\pi}{3}$	0,41
	4Δ	$\frac{2\pi}{4\Delta}$	$\frac{\pi}{2}$	0,64
	6Δ	$\frac{2\pi}{6\Delta}$	$\frac{\pi}{3}$	0,83
	8Δ	$\frac{2\pi}{8\Delta}$	$\frac{\pi}{4}$	0,90
	10Δ	$\frac{2\pi}{10\Delta}$	$\frac{\pi}{5}$	0,94
	12Δ	$\frac{2\pi}{12\Delta}$	$\frac{\pi}{6}$	0,95

Если потребуется, чтобы были предсказаны барические центры с диаметром около 100 км (такими бывают в начальной стадии циклоны умеренных широт), то при выборе шага сетки можно, как это сделано на рис. 5.2, считать диаметр этого образования половиной длины волны. Тогда, выбрав по табл. 5.1 относительную погрешность, скажем, равной 0,9, с которой мы допускаем численное дифференцирование, получим соотношение между диаметром наименьшего представимого с этой точностью на сетке барического образования D_{\min} и шагом сетки в виде

$$\Delta \leq \frac{D_{\min}}{4}. \quad (5.12)$$

¹ Длина волны выражена в шагах сетки.

Видно, что для представления рассматриваемых барических образований с заданной точностью находим шаг сетки $\Delta = 25$ км. Существующие модели численного прогноза имеют пространственные шаги 100—200 км. Это значит, что минимальное барическое образование, которое может быть представлено в них без большой ошибки, имеет диаметр 400—800 км.



$$\Delta \leq \frac{L}{8} = \frac{D}{4}$$

Рис. 5.2. Интерпретация половины длины волны как ложбины или циклона, удобная для выбора шага численного дифференцирования

Такое барическое образование у земли в реальной атмосфере является уже достаточно хорошо развитым, поэтому существующие модели численного прогноза могут в синоптической практике использоваться только как фоновые¹.

Учтя наличие ошибок метода сеток и предположив, что они компенсированы достаточно густым расположением узлов сетки, применим центрально-разностную схему (5.6) для дискретизации уравнений избранной нами модели (5.1) — (5.2) с периодическими краевыми условиями. Предварительно преобразуем систему (5.1) — (5.2) к форме, распространенной при численной реализации моделей прогноза погоды:

$$\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} = -\bar{u} \frac{\partial^3 h}{\partial x^3} \quad (5.13)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = q \quad (5.14)$$

Такая форма записи подчеркивает наличие в задаче численного прогноза погоды двух этапов: 1) определение тенденции (q) прогнозируемых характеристик на основе исходной информации; 2) решение задачи Коши в целях нахождения прогнозируемых полей. Обсудим особенности численной реализации обоих этапов.

Для нахождения решения уравнения (5.13) запишем его в дискретной форме на сетке, используя конечно-разностные соотношения:²

¹ Следует помнить, что в численном прогнозе на каждом шаге по времени в целях повышения точности прогноза фона осуществляется фильтрация всех гармоник мелкого масштаба, которые порождают вычислительные ошибки.

² Принятые конечно-разностные соотношения следуют из определения конечно-разностного аналога первой производной (5.6) при определенных допущениях. Важно отметить, что они не являются единственно возможными. На одной и той же сетке могут быть введены разные конечно-разностные соотношения для определения производных. Выбор наилучшего варианта требует большого опыта и знаний и является определяющим этапом построения алгоритма решения задачи численного прогноза методом сеток.

$$\left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_i = \frac{f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}}{\Delta^2}. \quad (5.15)$$

$$\left. \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} \right|_i = \frac{f_{i+2} - 2f_{i+1} + 2f_{i-1} - f_{i-2}}{2\Delta^3}. \quad (5.16)$$

Тогда для расчета тенденции геопотенциала по исследуемой модели получим уравнение

$$q_{i+1} - 2q_i + q_{i-1} = F_i, \quad (5.17)$$

где

$$F_i = -\frac{\bar{u}}{2\Delta} (h_{i+2} - 2h_{i+1} + 2h_{i-1} - h_{i-2}). \quad (5.18)$$

Отметим, что нахождение решения системы уравнений (5.17) представляет собой непростую, хотя и хорошо изученную задачу. (Вопросы численных методов решения уравнений прогностических моделей подробно освещены в учебной литературе, например, [1, 6]). Для того чтобы в этом убедиться, приведем уравнения этой системы для сетки, содержащей 6 узлов, причем значения тенденции в крайних узлах совпадают в силу условия периодичности:

$$\begin{aligned} q_2 - 2q_1 + q_5 &= f_1, \\ q_3 - 2q_2 + q_1 &= f_2, \\ q_4 - 2q_3 + q_2 &= f_3, \\ q_5 - 2q_4 + q_3 &= f_4, \\ q_1 - 2q_5 + q_4 &= f_5. \end{aligned} \quad (5.19)$$

Трудности нахождения решений аналогичных уравнений при численных прогнозах погоды усугубляются необходимостью решать эти задачи на сетках, содержащих по каждой пространственной координате более 100 точек сетки.

Пояснив особенности реализации на ЭВМ уравнения (5.13), перейдем к анализу второго этапа алгоритма численного прогноза. Для решения уравнения (5.14) методом шагов по времени необходимо заменить конечными разностями производную по времени. Разбивая временную ось на слои и обозначая сеточные функции на каждом слое по времени с помощью индекса k^1 , воспользуемся конечно-разностным описанием первой производной по времени, аналогичным (5.6):

$$\left. \frac{\partial h}{\partial t} \right|_i^k = \frac{h_i^{k+1} - h_i^{k-1}}{2\tau}, \quad (5.20)$$

¹ Например, значение геопотенциала в узле i пространственной сетки и на временном слое k обозначим через h_i^k .

где через τ обозначим шаг по времени, то есть интервал между двумя соседними временными слоями. Уравнение (5.14) в конечно-разностной форме примет вид

$$h_i^{k+1} = h_i^{k-1} + 2q_i^k \tau \quad (5.21)$$

и при известной сеточной функции q_i^k решается элементарно.¹

Соберем теперь отдельные блоки алгоритма численного решения модельной задачи, то есть перепишем уравнения (5.17) и (5.21), введя новое обозначение для приращения геопотенциала между двумя слоями по времени:

$$Q_i^k = 2q_i^k \tau. \quad (5.22)$$

Тогда алгоритм численного прогноза примет вид

$$F_i^k = \frac{\bar{u}\tau}{\Delta} (h_{i+2}^k - 2h_{i+1}^k + 2h_{i-1}^k - h_{i-2}^k). \quad (5.23)$$

$$Q_{i+1}^k - 2Q_i^k + Q_{i-1}^k = F_i^k. \quad (5.24)$$

$$h_i^{k+1} = h_i^{k-1} + Q_i^k. \quad (5.25)$$

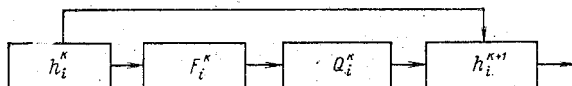


Рис. 5.3. Алгоритм одного шага баротропного прогноза по одномерной модели (5.23) — (5.25)

В соответствии с этим алгоритмом для прогноза геопотенциала на один шаг по времени необходимо по известному из наблюдения полю геопотенциала h_i рассчитать адвекцию вихря F_i^k . Затем получить по ней приращение геопотенциала между временными слоями Q_i^k . Отметим, что для получения прогностического поля h_i^{k+1} в каждом варианте алгоритма требуется знать геопотенциал на двух последовательных временных слоях. Однако это создает трудности только в начальный момент расчета прогноза. Описанная последовательность расчета приведена на рис. 5.3 в виде блок-схемы.

¹ При обзорном характере нашего изложения обойден ряд вопросов численного интегрирования шагами по времени и, в частности, вопрос постановки начальных условий. Для детального ознакомления рекомендуем работу [10].

Особую важность при численном прогнозе методом сеток имеет согласованный выбор шагов по времени τ и по пространству Δ . Для того чтобы оценить последствия неверного выбора шагов по времени, обратимся к рис. 5.4. На нем показано, что формальная экстраполяция начальной тенденции методом одношагового прогноза приводит с ростом шага к все большим ошибкам. Однако, если выбрать шаг достаточно малым, скажем, для примера, приведенного на рис. 5.4, равным 3 ч, для прогноза на 36 ч потребуется сделать 18 шагов. Возникает вопрос, не накопится ли за такое количество шагов малая ошибка, связанная с экстраполяцией на один шаг, до таких пределов, что все решение окажется совершенно ошибочным. Ответ на этот вопрос дает теория устойчивости исследуемой задачи на примере. Непосредственной подстановкой легко проверить, что система уравнений (5.1) — (5.2) имеет частное решение:

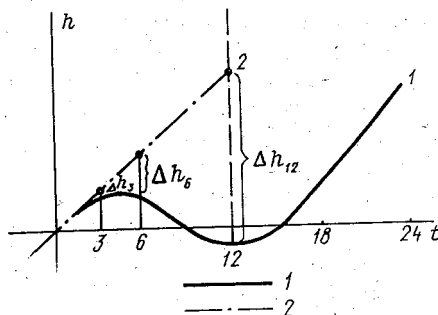


Рис. 5.4. Влияние выбора шага по времени на результат экстраполяции хода величины h :

1 — истинный ход; 2 — результат экстраполяции. По оси абсцисс отложены интервалы времени; Δh — погрешность экстраполяции на один шаг

$$h(t, x) = \sin(x - \bar{u}t) \quad (5.26)$$

или в сеточной форме

$$h_i^k = \sin(\Delta i - \bar{u}\tau k). \quad (5.27)$$

Конечно-разностный аналог задачи (5.1) — (5.2) — система уравнений (5.23) — (5.25) — имеет решение \hat{h}_i^k , близкое по форме к (5.27), но распространяющееся по оси x со скоростью c :

$$\hat{h}_i^k = \sin(\Delta i - c\tau k). \quad (5.28)$$

В этом можно убедиться путем подстановки решения (5.27) в систему (5.23) — (5.25) с использованием формул преобразования разностей тригонометрических функций в произведение. При этом будет получено условие существования решения в форме

$$\sin c\tau + \frac{\bar{u}\tau}{\Delta} \sin \Delta = 0. \quad (5.29)$$

Согласно этому условию, решение конечно-разностной задачи может быть близким к решению исходной только, если выполняется неравенство

$$\frac{|\bar{u}| \tau}{\Delta} \leq 1. \quad (5.30)$$

Однако, если неравенство выполняется строго, то скорость распространения гармоник, описывающей приближенное решение, будет меньше, чем истинная, а значит, со временем будет накапливаться ошибка в форме приближенного решения. Если условие (5.30) не будет выполнено, то решение конечно-разностной задачи не будет похоже на искомое решение уже после первых шагов расчета. Таким образом, при численном прогнозе погоды нельзя произвольно выбирать шаги по пространству и по времени.

Этот вывод оказывается принципиально важным для практической реализации численного прогноза. Покажем это на примере. В соответствии с техническим регламентом продолжительность расчета прогноза в настоящее время не может превышать 1—1,5 ч, иначе результаты расчетов будут «доходить» до синоптика, когда он уже закончил работу над созданием прогноза. В настоящее время возможности ЭВМ позволяют рассчитывать прогнозы погоды на сетке с шагом около 200 км. Предположим, что мы хотим выбрать шаг численного прогноза достаточно малым, чтобы описать хорошо новообразования в барическом поле у земли в умеренных широтах. Диаметр этих новообразований около 100 км, так что в соответствии с рис. 5.1 и формулой (5.12) мы должны были бы выбрать шаг сетки 25 км.

На рис. 5.5 поясняется, что в этом случае мы должны разместить на плоскости расчета в 8^2 раз больше точек, чем было. Однако объем вычислительной работы возрастает в 8^3 раз. Это связано с необходимостью обеспечивать вычислительную устойчивость метода. Для этого в соответствии с (5.30) при уменьшении шага по пространству необходимо пропорционально уменьшить и шаг по времени. Время, отведенное на расчет численного прогноза, в оперативной практике ограничено. Расчет может начинаться не ранее чем через 2—3 ч после срока наблюдений и должен быть закончен раньше, чем дежурная смена синоптиков приступит к анализу материалов для составления прогноза. В настоящее время весь расчет занимает примерно час. Поэтому для уменьшения пространственного шага от нужного синоптику предела необходимо иметь ЭВМ, по быстродействию в 512 раз превосходящие используемые в настоящее время. Грубый пространственный шаг численных прогнозов еще долгое время будет определять фоновый характер результатов предсказания синоптического положения с помощью ЭВМ. (С принципами организации вычислительного процесса и с перспективным развитием ЭВМ можно ознакомиться, например, по [13]).

Вернемся к рассмотрению алгоритма решения модельной задачи (5.23) — (5.25), чтобы обсудить еще один источник погрешностей метода сеток. Поскольку решение задачи должно удовлетворять естественным краевым условиям, определение адвекции вихря по уравнению (5.23) на краях области не вызывает затруднений. Действительно, если, скажем, необходимо определить адвекцию в начальной точке сетки, где $i=0$ (см. рис. 5.1), то

$$F_0^k = -\frac{\bar{u}\tau}{\Delta} (h_2^k - 2h_1^k + 2h_{-1}^k - h_{-2}^k) = -\frac{\bar{u}\tau}{\Delta} (h_2^k - 2h_1^k + h_{L-1}^k + h_{L-2}^k), \quad (5.31)$$

так как $h_{-1}^k = h_{L-1}^k$ и $h_{-2}^k = h_{L-2}^k$ в силу периодичности решения.

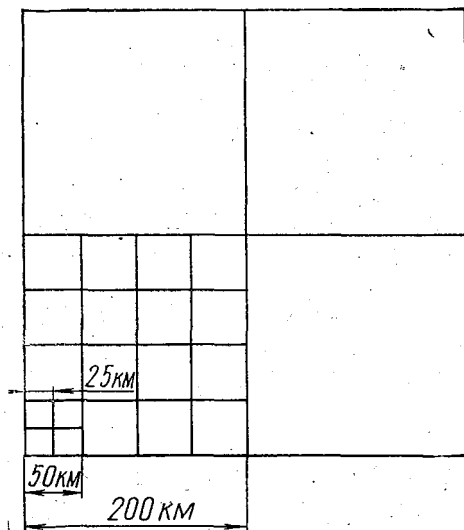


Рис. 5.5. Влияние увеличения разрешающей способности сетки (уменьшение шага по времени) на рост количества точек, в которых рассчитывается прогноз.

Таким образом, если расчетная область охватывает весь земной шар, то определение расчетных значений метеорологических полей на границах областей не вызывает принципиальных затруднений. Однако современная вычислительная техника позволяет использовать глобальные модели только со слишком грубым пространственным шагом.

Для получения моделей с более хорошим пространственным разрешением приходится ограничиваться в расчетах только частью атмосферы. В этих условиях определение краевых значений метеоэлементов сразу оказывается проблемой: ведь если область не весь земной шар, то за границами ее также происходят изменения погоды, которые не предсказываются моделью. Рассмотрим влияние ошибок в постановке граничных условий на результат численного прогноза с помощью примера. Предположим, что модельная задача (5.23) — (5.25) решается в области ON (см. на рис. 5.1). Если зафиксировать значение геопотенциала на краях области, то после первого шага по времени ошибка распространится на один узел внутрь области, после второго — на два и так далее. Компенсировать влияние ошибки можно было бы сужая на каждом следующем шаге область на один шаг. При этом расчет возможен только на конечное число шагов по времени, определяемое начальным размером области.

Для постановки краевых условий в моделях прогноза по полным уравнениям используется метод телескопизации. Идея метода проста: для прогноза в ограниченном регионе ON (см. рис. 5.1) берем модель с малым шагом по пространству, а значения на границах, то есть в точках O и N извлекаются из памяти ЭВМ, куда они записываются заранее на основе расчетов прогноза по глобальной (полушарной) модели с большим горизонтальным шагом.

Для синоптических приложений важно учитывать, что региональные модели обязательно содержат ошибку, связанную с постановкой неточных краевых условий, поэтому использовать прогностические карты, полученные по таким моделям, следует главным образом в районах, расположенных на значительном удалении от обреза карты.

В заключение целесообразно отметить, что ошибки, связанные в современных моделях численного прогноза с применением метода сеток, могут быть существенно уменьшены не только с ростом быстродействия ЭВМ, но и путем перехода к другим методам дискретизации исходных дифференциальных уравнений моделей атмосферы. Все более широкое распространение в оперативных прогностических моделях получают спектральные методы, которые позволяют достичь значительно большей точности расчета, но с точки зрения их программной реализации оказываются пока слишком сложными для массового внедрения. Значительные перспективы увеличения точности расчетов связаны с переходом к новым принципам программирования, необходимым для эксплуатации ЭВМ с параллельными процессорами. В этом случае становится возможной синхронная реализация нескольких моделей прогноза при условии свободного обмена между моделями как исходной информацией, так и результатами расчетов. Однако и метод сеток имеет значительные неиспользованные резервы — схемы высокого порядка точности, так что перспективы получения высокоточных прогнозов благоприятны.

Глава 6

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ КАЧЕСТВА ПРОГНОЗОВ

Численный прогноз, как и всякий другой метеорологический прогноз, необходимо оценить, чтобы в дальнейшем учесть выявленные погрешности. Оценка качества прогноза осуществляется в следующей последовательности: а) определяется цель оценивания; б) устанавливаются свойства прогноза, которые следует оценивать, т. е. определяется само понятие качества прогноза; в) формируются критерии качества, или правила оценки прогноза; г) выбираются способы определения статистической значимости полученных оценок.

Специализированное оценивание метеорологических прогнозов производится либо с точки зрения потребителя прогнозов, либо с точки зрения разработчика метода прогноза. Цели потребителя связаны с ликвидацией неблагоприятных последствий его решений, принятых с учетом прогноза. С позиции разработчика наилучшим будет прогноз, результаты которого оказались наиболее близкими к полученным впоследствии результатам наблюдений. Следует отметить, что специалисту-синоптику, выпускающему оперативный прогноз, обе точки зрения не свойственны. Он не может учесть всех последствий своих прогнозов для всех потребителей, так как последствия зависят от их планов и решений. С другой стороны, он не может пытаться создать наилучший прогноз в смысле близости к фактической погоде, так как для этого требуется в момент составления прогноза уже знать, какова будет погода.

В настоящее время вопросы оценки прогнозов с позиции синоптика, дающего оперативный прогноз, пока еще не разработаны. Наиболее распространенной является точка зрения разработчика: получить наиболее точный прогноз¹. Оценка качества производится только после получения фактических данных о погоде.

¹ Отметим, что в теории принятия решений имеются уже примеры определения свойств прогноза, наиболее желательных с позиции лица, принимающего решение (ЛПР) о прогнозе. Например, можно потребовать, чтобы прогноз представлялся ЛПР наиболее полезным по своим последствиям, скажем, чтобы меньше всего «ругало начальство».

Когда выбрана точка зрения, с которой будет оцениваться прогноз, естественно, возникает и понимание желательных свойств прогноза. Если добиваться наиболее точного прогноза по отношению к фактической погоде, то оценки прогноза должны характеризовать близость фактических и спрогнозированных полей. Мера близости полей зависит от формы их представления и различна у человека и ЭВМ, человек оценивает близость контуров изолиний на картах, контролируя степень совпадения синоптически значимых образов. ЭВМ оперирует с таблицами чисел и может оценить только степень совпадения двух или нескольких таблиц. Поскольку визуальное оценивание карт человеком представляет собой процесс длительный и творческий, нельзя надеяться на ежедневный массовый контроль качества всей прогностической продукции вручную. Контроль качества прогнозов на ЭВМ осуществляется легко, но критерии качества прогноза не совпадают с теми, которые использует синоптик. В основе применения численных методов для анализа метеорологических полей лежит представление их в виде векторов. Оно осуществляется в два этапа: сначала выбирается система точек на карте, а затем устанавливается порядок обхода всех этих точек, что сводится к их нумерации в определенной последовательности. После этого можно считать, что любая функция, заданная на этой системе точек, образует N -мерный вектор

$$\vec{F} = \{f_1, f_2, \dots, f_i, \dots, f_N\} \quad (6.1)$$

с компонентами f_i , где индекс i определяет номер точки, а N общее число точек.

Векторная интерпретация позволяет рассматривать всевозможные векторы \vec{F} как элементы N -мерного евклидова пространства и, соответственно, применять к ним методы функционального анализа. Важно всегда использовать одну и ту же систему точек и введенный на ней порядок нумерации точек. Кроме того, сравнивать можно только векторы, образованные из метеоэлементов одной и той же природы. При анализе результатов численного моделирования сетка точек для оценки совпадает с используемой для расчетов.

Рассмотрим два N -мерных вектора

$$\vec{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}, \quad (6.2)$$

$$\vec{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}, \quad (6.3)$$

образованных из рассчитанных \vec{x} и наблюдаемых \vec{y} значений в одних и тех же точках. Близость двух векторов можно оценить, найдя длину вектора, являющегося их разностью по формуле

$$|\vec{x} - \vec{y}| = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}, \quad (6.4)$$

а также определив угол между этими векторами с помощью формулы

$$\cos(\vec{x}, \vec{y}) = \frac{(\vec{x}, \vec{y})}{|\vec{x}| \cdot |\vec{y}|}. \quad (6.5)$$

Скалярное произведение, стоящее в числителе правой части (6.5), как известно, определяется равенством

$$(\vec{x}, \vec{y}) = \sum_{i=1}^N x_i y_i, \quad (6.6)$$

а длина вектора

$$|\vec{x}| = \sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2}. \quad (6.7)$$

Особенно наглядную интерпретацию приобретают эти формулы в трехмерном случае.

Теперь рассмотрим векторы \vec{x} и \vec{y} как выборки, состоящие из N значений двух случайных величин. Среднее квадратическое отклонение разности этих случайных величин и коэффициент корреляции между ними определяются по формулам

$$\sigma_{xy} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}, \quad (6.8)$$

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (6.9)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N x_i^2}. \quad (6.10)$$

Формулы (6.8) — (6.10) точны для случайных величин с нулевым математическим ожиданием, но в данном случае важно то, что рассматриваемые статистические характеристики практически совпадают с векторными характеристиками (6.4) — (6.7). Это позволяет дать полезную интерпретацию стандартно вычисляемым статистическим характеристикам метеорологических полей. Среднеквадратическую разность двух полей можно рассматривать как длину N -мерного вектора разности, а коэффициент корреляции как косинус угла между двумя сравниваемыми векторами. Длина вектора разности и косинус угла дают разную информацию о близости векторов. Это значит, что σ_{xy} и r_{xy} не являются взаимозаменяемыми, но дают дополняющие друг друга характеристики близости метеорологических полей: среднеквадратическое отклонение больше реагирует на величины погрешностей,

а коэффициент корреляции указывает, насколько сильно в среднем смещено одно поле по отношению к другому.

Для полной оценки качества численного прогноза следовало бы пользоваться комплексом разных характеристик успешности, в частности, и средней квадратической ошибкой, и коэффициентом корреляции. Однако в оперативной практике СССР для характеристики краткосрочных прогнозов наибольшее распространение получила средняя относительная ошибка ε .

Предположим, что известна совокупность значений высоты поверхности 500 гПа в N точках сетки за определенный срок. Они будут называться далее фактическими — \vec{H}^{Φ} . Компоненты N -мерного вектора \vec{H}^{Φ} будут обозначены H_i^{Φ} . Далее предположим, что известны значения этой же характеристики, которые были спрогнозированы на рассматриваемый срок. Эти значения образуют N -мерный вектор с \vec{H}^{Π} компонентами H_i^{Π} . Наконец, исходное поле, на основе которого был рассчитан прогноз и из которого «произшло» фактическое поле, обозначим вектором \vec{H}^{Π} с компонентами H_i^{Π} . Все три вышеуказанных поля приведены на рис. 6.1. Визуальное сопоставление фактического и спрогнозированного поля показывает, что прогноз можно признать хорошим. Рассчитаем абсолютную ошибку прогноза по формуле

$$|\vec{H}^{\Pi} - \vec{H}^{\Phi}| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |H_i^{\Pi} - H_i^{\Phi}|. \quad (6.11)$$

На рис. 6.1 приведен пример расчета для хорошего прогноза. Отметим, что абсолютная ошибка является величиной по смыслу очень близкой к среднему квадратическому отклонению и обычно заменяет его в метеорологических оценках, так как рассчитывается на ЭВМ гораздо проще и быстрее.

Так же как и среднее квадратическое отклонение, абсолютная ошибка не вполне удобна как показатель успешности для человека. Чтобы использовать ее человек должен помнить числовые значения характеристик успешности для разных случаев. Практическое удобство можно увеличить, если характеризовать успешность прогноза, сравнивая ее с успешностью какого-то эталонного прогноза. Прогноз, избираемый в качестве эталона, должен быть легко выполним и давать приемлемые по точности результаты. В настоящее время в качестве эталонных применяются два вида прогнозов: инерционный — «завтра будет то же, что и сегодня» и климатический — «в период прогноза погода не будет заметно отличаться от климатической нормы». Оба эти прогноза не требуют от человека специальных знаний и могут быть получены автоматически только на основе имеющейся к моменту составления прогноза информации.

Однако при оценке методического прогноза следует сравнивать его только с одним из эталонных, а именно с тем, который обеспечивает наибольшую точность. Известно, что средняя квадратическая ошибка инерционного прогноза $\sigma_{A_{ин}}(\tau)$ растет при увеличении заблаговременности τ и может быть выражена через временную структурную функцию $B(\tau)$ прогнозируемой характеристики $A(t)$ по формуле

$$\sigma_{A_{ин}}(\tau) = \sqrt{B(\tau)} = \sqrt{(A(t) - A(t+\tau))^2}. \quad (6.12)$$

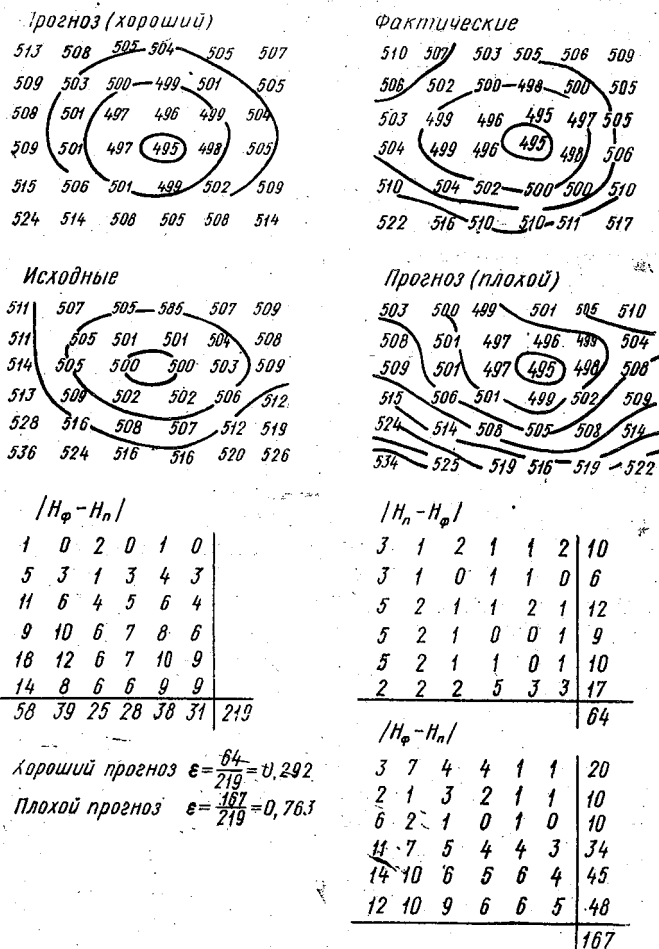


Рис. 6.1. Пример расчета количественной оценки ошибки прогноза для случаев хорошего прогноза и плохого прогноза. Размещение полей выбрано для удобства определения абсолютных ошибок

С увеличением заблаговременности структурная функция стремится к предельному значению, которое связано со средним квадратическим отклонением σ_A параметра A от его климатической нормы равенством

$$B(\infty) = 2\sigma_A^2. \quad (6.13)$$

Поскольку σ_A является и мерой ошибки климатического прогноза, то существует значение заблаговременности $\tau = \tau_{кр}$, при котором ошибка инерционного прогноза равна ошибке климатического прогноза. Эта заблаговременность находится из уравнения

$$\sigma_{A_{ин}}^2(\tau_{кр}) = B(\tau_{кр}) = \sigma_A^2, \quad (6.14)$$

которое легко решить графически, построив зависимость структурной функции параметра A от времени. Например, для приземного давления, как видно из

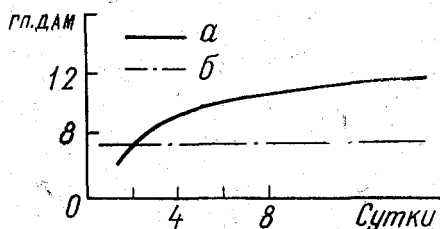


Рис. 6.2. Сравнение ошибок эталонных прогнозов в зависимости от заблаговременности.

a — инерционный прогноз; b — климатический; по оси абсцисс отложено время, по оси ординат — геопотенциальная высота.

рис. 6.2, $\tau_{кр}$ составляет 48 ч, то есть для краткосрочных прогнозов приземного давления лучшим эталонным прогнозом является инерционный. Примерно аналогичные критические заблаговременности инерционного прогноза имеют значения давления и геопотенциал по всему Северному полушарию.

Сравним абсолютную ошибку прогноза, приведенного на рис. 6.1, с абсолютной ошибкой инерционного прогноза. Последнюю мы получим, если

заменим в формуле (6.11) вектор \vec{H}^n на вектор \vec{H}^a в соответствии с основным принципом инерционного прогноза (инерционный прогноз — это исходное поле в момент составления прогноза). Тогда абсолютная ошибка инерционного прогноза может быть вычислена по формуле

$$|\vec{H}^n - \vec{H}^\Phi| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |H_i^n - H_i^\Phi|. \quad (6.15)$$

Показателем превышения успешности методического прогноза над инерционным является средняя относительная ошибка прогноза ε . Она вычисляется по формуле

$$\varepsilon = \frac{|\vec{H}^n - \vec{H}^{\Phi}|}{|\vec{H}^n - \vec{H}^{\Phi}|} \quad (6.16)$$

Относительная ошибка является величиной, ограниченной снизу нулем, так как для идеального прогноза числитель выражения, стоящего в правой части формулы (6.16), обращается в нуль. Поскольку всякий методический прогноз должен быть лучше инерционного, оценка ε является ограниченной и сверху, так как для самого инерционного прогноза $\vec{H}^n = \vec{H}^{\Phi}$ и $\varepsilon = 1$. Именно наличие ограничений вида

$$0 \leq \varepsilon \leq 1 \quad (6.17)$$

делает относительную ошибку более удобной для восприятия человеком, чем абсолютная.

Величина ε чутко реагирует на качество каждого отдельного прогноза. Это видно и на рис. 6.1, где, помимо хорошего прогноза (6.1), дан и несколько худший прогноз (6.1), и для каждого из них приведены оценки ε . В настоящее время расчет относительной ошибки производится во всех региональных и территориальных центрах СССР ежедневно два раза в сутки после расчета оперативного численного прогноза. Ежеквартально и ежегодно определяются средние за период значения ε , которые систематизируются в Гидрометеорологическом центре СССР и доступны в виде сводок для любого прогностического подразделения нашей страны. Естественно, что средние величины ε характеризуют не только точность отдельных прогностических карт, но в большей степени надежность прогнозов.

Знание относительных ошибок методики численного прогноза, на основе которой рассчитаны карты, используемые синоптиком на его рабочем месте, позволяет ему составить представление о качестве визуального сходства прогностических карт с ожидаемыми фактическими. Для установления меры визуального сходства можно использовать таблицу, которая получается, если в течение некоторого периода синоптик будет ежедневно оценивать качества прогноза визуально в баллах и сопоставлять эту оценку с критерием ε . Впервые такого рода работа была проведена для территории Северо-Западного УГКС. Ее результаты приводятся в табл. 6.1. Разработка и использование аналогичных таблиц помогают синоптикам оценивать будущую синоптическую ситуацию с учетом возможных ошибок численного прогноза.

Таблица 6.1

**Соотношение между относительной ошибкой и синоптической
оценкой прогнозов барического поля**

Относительная ошибка	Оценка		Характеристика сходства полей
	качественная	в баллах	
0,00—0,19	Идеально	6	Расхождение контуров изолиний визуально не обнаружить
0,20—0,39	Отлично	5	Расхождение контуров изолиний не превышает возможного при независимом расчерчивании карт двумя синоптиками по одним и тем же значениям
0,40—0,59	Хорошо	4	Встречаются расхождения контуров изолиний в пределах 200 км
0,60—0,79	Удовлетворительно	3	Встречаются расхождения контуров изодоний в пределах 400 км
0,80—0,99	Плохо	2	Расхождение контуров в пределах 200—400 км приобретает систематический характер. Удачное совпадение контуров встречается редко
≥ 1	Очень плохо	1	Сходство на уровне инерционных прогнозов

Глава 7

ХАРАКТЕРИСТИКА ОШИБОК СОВРЕМЕННЫХ КРАТКОСРОЧНЫХ ЧИСЛЕННЫХ ПРОГНОЗОВ

Точность результатов численных прогнозов постоянно контролируется во всех центрах, где эти прогнозы производятся. Различают две формы контроля: текущий контроль статистических характеристик успешности прогнозов барического поля в целом и периодический синоптико-статистический контроль успешности прогнозов положения барических центров. Текущий контроль осуществляется автоматически на ЭВМ после окончания очередного сеанса прогноза. В процессе контроля из памяти ЭВМ считываются ранее рассчитанные прогностические поля на текущий момент и поля, являвшиеся исходными для этого прогноза. Затем подсчитываются описанные в предыдущей главе статистические характеристики ошибок прогноза. Синоптико-статистический контроль численных прогнозов производится лишь эпизодически; он предполагает значительную ручную обработку результатов прогнозов, направленную на выявление синхронных барических центров на фактических и прогностических картах с прослеживанием их эволюции. Ввиду трудоемкости этого анализа и активного участия человека в отборе и подготовке информации возникают затруднения с регулярным синоптико-статистическим контролем. В настоящее время указанные работы примерно раз в три года производятся в ГМЦ СССР. Большая работа по контролю успешности оперативных численных прогнозов в нашей стране и за рубежом позволила создать достаточно полное описание характерных ошибок этих прогнозов.

В табл. 7.1 приведены статистические оценки успешности численных прогнозов на 24 ч по результатам испытаний, проведенных в ГМЦ СССР в 1979 г. Все оценки производились для одной и той же территории, (ЕТС), прогнозы рассчитаны по исходной информации за 00 ч (по Гринвичу) и соответствуют теплomu периоду.

Анализ помещенных в таблице оценок показал близость оценки будущего положения, сделанных для приземного давления синоптиками, к результатам численных прогнозов. Это очень важно вследствие того, что синоптик в настоящее время принимает численный прогноз синоптического положения за основу и

лишь подправляет его. В целом по региону численный прогноз барического поля в настоящее время не может быть существенно улучшен человеком, хотя отдельные детали на небольших участках поля, безусловно, могут быть скорректированы. Отметим, что синоптический прогноз высотного барического поля уже давно не производится, ввиду явного выигрыша численных прогнозов. Этим объясняется отсутствие соответствующих оценок в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Статистическая оценка успешности прогнозов
барического поля, рассчитанных
с заблаговременностью 24 ч

Уровень	Схема	$\bar{\epsilon}$	$\bar{\epsilon} > 4$	$\bar{\epsilon} \leq 4$	$\bar{\delta}$	$\bar{\delta}_{\Phi}$	δ_{Π}
Земля	СИН	0,70	0,41	1,55	3,16	4,67	4,99
	М+Б	0,68	0,48	1,27	3,08	4,67	3,80
	Р	0,70	0,55	1,14	3,21	4,67	3,09
	НМЦ	0,62	0,43	1,15			
500 гПа	М+Б	0,73	0,55	1,43	3,75	5,23	4,03
	Р	0,64	0,46	1,28	3,24	5,23	4,32
	НМЦ	0,65	0,47	1,30			

Примечание. СИН — карты будущего положения, составленные в оперативном порядке в отделе краткосрочных прогнозов ГМЦ СССР; М+Б — численные прогнозы, рассчитанные на высотах по квазигеострофической модели С. Л. Белоусова, а у земли — по синоптико-гидрометеорологической схеме А. И. Мерцалова; Р — по модели с полными уравнениями и телескопизацией при постановке граничных условий, разработанной С. О. Кричаковым; НМЦ — по полусферической модели с полными уравнениями, применяемой в Национальном Метеорологическом Центре США.

Вторым важным для синоптической практики выводом анализа статистических оценок прогнозов является то, что оценки прогнозов барического поля у земли и на высотах близки. Это противоречит бытующему среди синоптиков мнению, что ЭВМ хорошо прогнозирует «высоты» и плохо «землю». Предпочтение, которое синоптик склонен отдавать той или иной прогностической карте, должно, таким образом, учитывать вероятность ошибок не только у земли, но и на высотах. Из табл. 7.1 ясно видно, что оценки прогнозов наиболее существенно зависят от скорости изменений фактических полей. Успешность прогнозов стационарных полей, у которых изменения за сутки не более 4 дам ($\epsilon \leq 4$), значительно хуже, чем для полей нестационарных ($\epsilon > 4$).

Важным также является вывод о том, что для умеренных широт успешность казигеострофических прогнозов сравнима с успешностью прогнозов по полным уравнениям. Следует отметить, что общий уровень успешности прогнозов по разным методам довольно близок, а некоторое превышение успешности для прогнозов НМЦ в 1979 г. обусловлено активным использованием средств диалога синоптик — ЭВМ. В табл. 7.2 приведены оценки успешности численных прогнозов ГМЦ СССР. Легко видеть, что в численном прогнозировании достигнут заметный прогресс. Общее состояние успешности численных прогнозов в мире можно получить на основе данных за 1979 г. (см. табл. 7.3, составленную по публикациям ВМО). Из нее можно заключить что, несмотря на различия в территориях прогноза и в применяемых в разных странах оценках, процедура численного прогноза имеет приблизительно одинаковую успешность.

Таблица 7.2

Изменение успешности численных прогнозов H_{500} ,
разрабатываемых в ГМЦ СССР с заблаговременностью 24 ч

Год	1975	1978	1981	1982	1983
ε	0,84	0,70	0,67	0,62	0,56

Таблица 7.3

Характеристики успешности численных прогнозов
за рубежом на 24 ч за 1979 год

Страна	Земля			H_{500}		
	r	sl	σ	r	sl	σ
Австралия	0,85	45	—	0,93	36	—
Великобритания	—	—	3,5	—	—	3,5
ГДР	—	60	4,4	—	45	4,9
Канада	—	—	3,5	—	—	2,95
Норвегия	—	—	—	0,86	—	4,2
Н. Зеландия	0,74	53	—	0,78	41	—
США	—	29,5	—	—	—	—
Франция	0,83	—	—	0,87	—	—
ФРГ	0,85	2	3,2	0,87	—	3,2
Швеция	0,80	—	3,9	0,83	—	3,7
Япония	0,81	54	2,7	0,83	27	2,4

Применение синоптиком в практическом прогнозировании статистических характеристик успешности может быть облегчено знанием примерного соответствия конкретной оценки ε и качественной характеристики прогноза. Это соответствие дается в табл. 6.1 (см. гл. 6). На основе оценок точности ежедневных прогнозов на 24 ч, составлявшихся в СЗ УГКС в 1983 г., можно заключить, что величина ε является случайной и подчиняется гамма-распределению. Пример гистограммы ε и плотности гамма-распределения приведен на рис. 7.1. Поскольку для полной характеристики гамма-распределения вероятностей необходимо знать не только среднее значение ε , но и среднее квадратическое отклонение σ_ε , нельзя сделать исчерпывающих выводов о ежедневных оценках прогнозов по данным табл. 7.1 и 7.2. Для приведенного на рис. 7.1 случая $\varepsilon = 0,73$ и $\sigma_\varepsilon = 0,29$. Зная эти характеристики, по таблицам

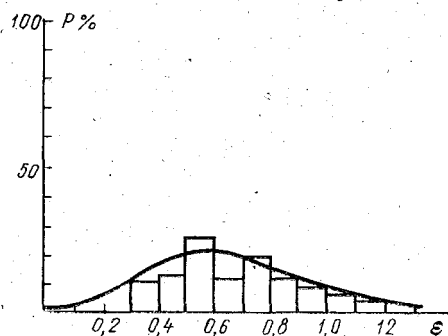


Рис. 7.1. Гистограмма оценок ε ошибок численных прогнозов высоты поверхности 500 гПа и график плотности гамма-распределения

гамма-распределения можно определить, какова вероятность выхода оценок успешности прогноза за заданный предел. Например, для рассматриваемого случая вероятность того, что оценка успешности прогноза будет больше 0,77 (прогноз неудовлетворителен), составит 25 %. Таким образом, каждый четвертый прогноз имеет шанс быть плохим. Отметим, что вывод об успешности будущего прогноза, как показал анализ, можно конкретизировать в момент

составления прогноза, поскольку величина ε хорошо коррелирует с синоптической оценкой прогноза, рассчитанного 12 часов назад. Все вышеуказанное свидетельствует о пользе, которую может извлечь оперативно работающий синоптик из регулярного анализа статистических оценок успешности.

Однако наиболее полно можно уяснить качество численных прогнозов на базе синоптико-статистических оценок. Рассматривая результаты такого оценивания (табл. 7.4), можно сделать ряд выводов об успешности прогнозов перемещения барических образований. Так, например, из таблицы следует, что скорости перемещения барических образований определяются значительно удобнее, чем направление. Скорость перемещения центров несколько занижается, причем у циклонов сильнее, чем у антициклонов, однако процент грубых ошибок невелик. Направление перемещения прогнозируется в значительной части случаев с грубыми

ошибками. Как правило, прогностические траектории перемещения барических образований лежат левее фактических. Прогноз направления перемещения циклонов несколько хуже, чем антициклонов.

Перейдем теперь к оценке успешности прогноза эволюции барического поля. В табл. 7.5 приведены оценки успешности прогнозов давления (геопотенциала) в барических центрах. Обращает на себя внимание тот факт, что оценка ε для центров барических образований оказывается существенно ниже, чем по полю в целом. Причем анализ повторяемости разных ε показывает, что у земли отличные и хорошие прогнозы столь же вероятны, как и плохие, а на высотах инерционный прогноз барических центров систематически лучше, чем численный. В результате численных прогнозов интенсивность барических центров у земли систематически занижается. На высоте 500 гПа занижение интенсивности почти не происходит, но прогноз геопотенциала в центрах содержит значительную ошибку за счет несовпадения знака эволюции. Для детализации этих выводов следует отметить, что рассчитанная эволюция барических центров имеет тенденцию к завышению давления в циклонах и занижению в антициклонах. Как показала практика эксплуатации численных прогнозов, значительная эволюция барических полей, приводящая к их перестройке, может предсказываться на 12 ч позже ее истинного начала. Вследствие этого синоптику рекомендуется учитывать при составлении прогноза карты, рассчитанные с большей заблаговременностью.

Для полной характеристики качества численной схемы очень важно оценить прогноз возникновения новых барических образований, прогноз заполнения циклонов или разрушения антициклонов. При оценке оправдываемости прогноза этих эффектов используется табл. 7.6, позволяющая по наличию или отсутствию барических образований на исходных, фактических или прогностических картах признать прогноз оправдавшимся или неоправдавшимся. Результаты проверки оправдываемости этого вида прогностической продукции приведены в табл. 7.7. На основании этих данных можно сделать некоторые заключения о статистике новообразований в реальной атмосфере. В частности, видно, что за сутки в атмосфере возникает примерно 19 % новообразований, а исчезает около 14 %. Учитывая ограниченность района оценки, можно считать, что количество центров примерно сохраняется. Оправдываемость численного прогноза исчезновения центров достаточно высока, тогда как оправдываемость численного прогноза возникновения центров значительно уступает синоптическим прогнозам. Это неудивительно в свете общепринятой фронтальной теории циклогенеза и с учетом того факта, что фронтальные зоны в численном прогнозе выражены гораздо слабее, чем в природных условиях.

Таблица 7.4

Оправдываемость прогноза перемещения барических образований на 24 ч

Уровень	Схема	Скорость перемещения, км/24 ч					Направление перемещения, град.				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		0—300	300—600	>600	S_{ϕ}	ΔS	≤ 15	16—30	31—45	>45	$\Delta \varphi$
Земля	СИН	78	20	2	578	202	41	27	11	21	30
	М+Б	84	14	2	578	188	46	23	11	20	35
	Р	76	21	3	578	217	37	27	15	21	35
	НМЦ	82	17	1	522	183	34	37	8	26	34
500 гПа	М+Б	84	12	4	429	193	24	20	13	43	49
	Р	80	16	4	429	194	28	22	17	33	43
	НМЦ	87	12	1	391	159	40	28	12	20	28

Примечание. В графах 1—3 и 6—9 даны повторяемости в %; S_{ϕ} — скорость фактического перемещения; ΔS — ошибка прогноза; $\Delta \varphi$, $\Delta \varphi_{\max}$ — ошибки прогноза направления (средняя и максимальная); «вл» — отклонение прогностических траекторий от фактических влево.

Таблица 7.5

Оправдываемость прогнозов эволюции барических образований на 24 ч

Уровень	Схема	ε	Повторяемость ошибки по градациям							δφ	δn	δ
			≤15	0,51—0,70								
				0,71—0,8	0,81—0,9	0,91—1,0	> 1,00					
Земля	СИН	0,70	23	17	12	12	20	16	4,60	3,6	3,2	
	М+Б	0,80	5	38	9	8	11	29	4,60	2,8	3,6	
	Р	0,83	9	25	7	15	21	23	4,60	2,7	3,8	
	НМЦ	0,74	30	18	6	3	17	26	3,66	3,8	2,7	
500 гПа	М+Б	1,02	15	4	—	—	16	65	3,41	3,6	3,5	
	Р	1,25	19	4	—	—	8	69	3,41	4,1	4,2	
	НМЦ	1,01	12	19	5	5	9	59	3,14	2,9	3,2	

Таблица 7.6

**Форма для оценки прогнозов возникновения, исчезновения
и сглаживания барических образований**

Вид прогноза барических образований	Барические образования на картах			
	исходных	фактиче- ских	прогностических	
			есть	нет
Возникновение	Нет	Есть	+	—
Исчезновение (заполнение циклонов, разрушение антициклонов)	Есть	Нет	—	+
Ложные центры	Нет	Нет	—	+
Сглаживание центров	Есть	Есть	+	—

Примечание. «+» — прогноз оправдывается; «—» — прогноз не оправдывается.

Таблица 7.7

Оправдываемость прогноза изменения поля барических образований на 24 ч

Уровень	Схема	Число барических образований в исходный срок	Исчезновение барических центров	Возникновение барических центров	Сглаживание центров, %	Ложные центры, %
Земля	СИН	334	73	72	18	2
	М+Б	334	78	58	27	2
	Р	334	84	42	30	1
	НМЦ	176	57	51	67	2
500 гПа	М+Б	302	83	17	31	—
	Р	302	96	18	34	—
	НМЦ	167	83	57	73	—

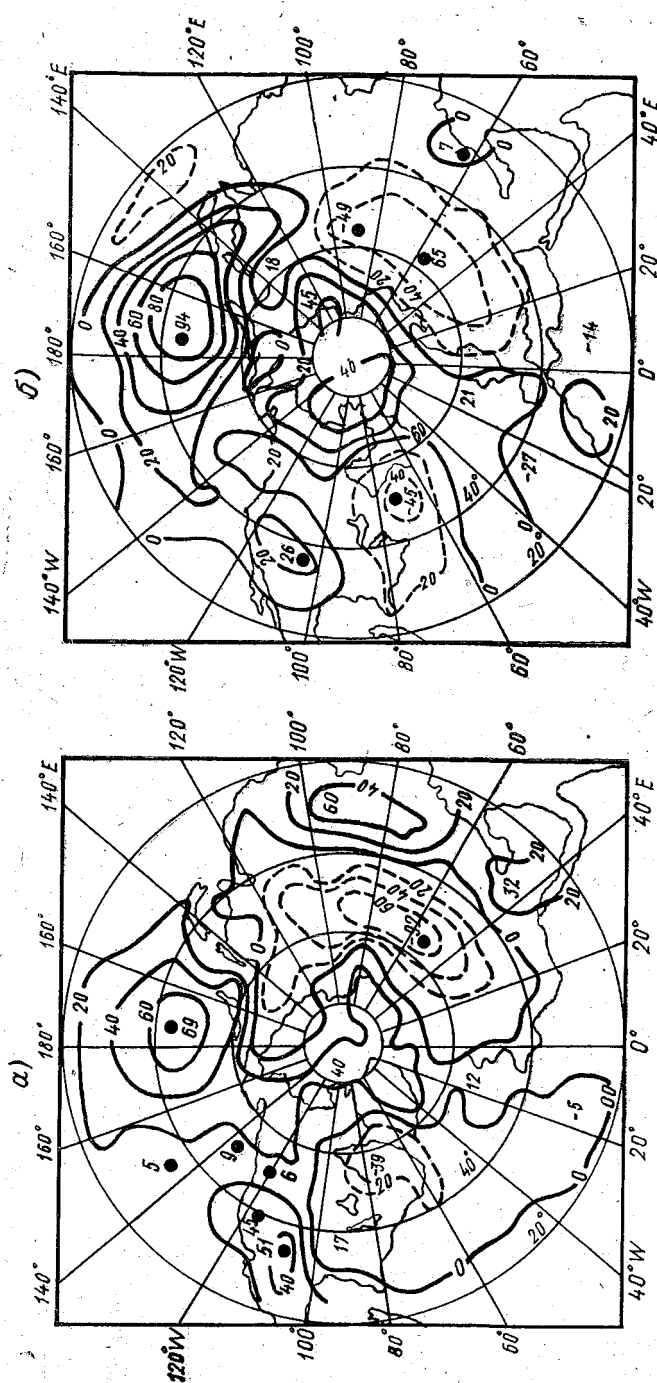


Рис. 7.2. Среднее значение ошибки прогноза геопотенциала (в гл. м) с заблаговременностью 72 ч за период 01.01.1979 г. — 31.03.1979 г., рассчитанных в Европейском центре прогнозов погоды на средние сроки.
 а — прогноз H_{1000} ; б — прогноз H_{500} .

Больший, чем в реальной атмосфере пространственный масштаб наименьших барических образований, возникающих в численном прогнозе, приводит к тому, что предвычисленные поля часто сглаживают реальные особенности барического рельефа и практически не генерируют ложных центров. Дополнительно следует принять к сведению, что возникновение циклонов прогнозируется лучше, чем возникновение антициклонов. Циклоны часто трансформируются в ложбины, а антициклоны — в гребни.

Помимо сведений, получаемых в результате регулярных статистических и синоптических исследований, нужно иметь в виду и ряд фактов, полученных эмпирически в результате использования численных прогнозов в практической работе. К ним относится, например, так называемая «географическая ошибка», то есть наличие систематических ошибок численного прогноза в определенных географических областях. На рис. 7.2 приведено распределение средних ошибок одной из моделей численного прогноза. Видно, что наименее точные результаты численный прогноз имеет в стационарных зонах бароклинности (на границах континентов и океанов или морей), а также в районах с сильной горизонтальной неоднородностью рельефа. Интересно отметить, что карты распределения географической ошибки у земли и на среднем уровне обладают значительным сходством. Это означает, что ошибки связаны с воспроизведением средней по атмосфере, а точнее баротропной составляющей циркуляции атмосферы. Дополнительным фактором, указывающим на крупномасштабный характер ошибок численных прогнозов, является то, что, как правило, хуже всего в численном прогнозе воспроизводятся среднезональные характеристики динамики атмосферы, такие, например, как индексы циркуляции Е. И. Блиновой. Ошибки в прогнозе положения крупномасштабных волн были отмечены уже в начале оперативной эксплуатации численных прогнозов, но и в настоящее время ошибки такого рода оказываются очень большими.

Неоднократно отмечалось, что успешность численных прогнозов в значительной степени определяется характером изменений реальных метеорологических полей. Известно, что успешность прогнозов внутри естественных синоптических периодов выше, чем при их смене. Наличие такой зависимости делает весьма перспективным учет информации о характере хода макросиноптических процессов, вырабатываемой при долгосрочном прогнозе погоды. Имеется и существенная корреляция между качеством краткосрочных прогнозов по начальным данным, отстоящим друг от друга на 12 ч. На рис. 7.3 приведен пример такой зависимости. Интересно, что характеристики успешности прогнозов, рассчитанных по исходной информации, отстоящей друг от друга на 24 ч, практически не коррелируют между собой. Связь успешностей прогнозов по разным начальным полям может быть весьма полезной в оперативной практике. Ошибки численного прогноза, а также

скорости их нарастания с ростом заблаговременности оказываются зависящими от типа исходной синоптической ситуации. Табл. 7.8 демонстрирует зависимость успешности численных прогнозов от

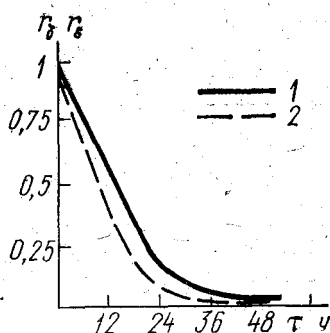


Рис. 7.3. Коэффициенты автокорреляции временных рядов оценок δ (1) и ε (2). По оси абсцисс отложен сдвиг по времени τ в часах

типа исходной синоптической ситуации. В настоящее время существуют указания на то, что различные исходные ситуации имеют различную скорость нарастания ошибок. В ряде случаев ошибка становится неприемлемо большой через 12 ч. Таким образом, существуют ситуации, не предсказуемые численно. (С вопросами предсказуемости метеорологических процессов можно ознакомиться, например, по [12]).

Таким образом, ошибки численных прогнозов в ряде случаев могут быть предсказаны. Научные исследования в этом направлении ведутся во всем мире.

Таблица 7.8

Зависимость качества прогнозов барического поля от типа исходной синоптической ситуации

Тип барического поля на поверхности 500 гПа	Количество прогнозов	
	хороших и удовлетворительных ($\varepsilon \leq 0,66$)	неудовлетворительных ($\varepsilon > 0,66$)
Зональный перенос	79	35
Процесс меридиональной или циклонической формы	32	69
Размытое поле или другие меридиональные формы	190	208

Глава 8

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ПРОГНОЗОВ В ОПЕРАТИВНОЙ СИНОПТИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

Практическая деятельность метеоролога, составляющего прогноз погоды, содержит два принципиально различных этапа. Во-первых, ему приходится определять будущее состояние атмосферы, а во-вторых, на основе своего представления о будущем состоянии необходимо составить прогноз локальных условий погоды в словесной форме для последующей передачи потребителю. С позиции оценки эффективности деятельности метеоролога-прогнозиста первый этап необходим только ему самому для выработки решения, тогда как качество прогноза для потребителя определяется словесной формулировкой прогноза, то есть на втором этапе. В соответствии с этим вопрос использования численных прогнозов в оперативной практике следует рассматривать в двух аспектах: с одной стороны, следует выяснить, как человек использует результаты численного прогноза для формирования своей точки зрения о будущем состоянии атмосферы, а с другой стороны, нужно рассмотреть, какую практическую помощь оказывают расчеты на ЭВМ при формулировке окончательного словесного прогноза локальной погоды для потребителя.

Степень «используемости» численных прогнозов при оценке синоптиком будущего состояния атмосферы количественно оценить весьма затруднительно. Для того чтобы выявить среди процессов важные для формирования будущего ее состояния, синоптик использует информацию от различных источников. При этом он ассимилирует ее интуитивно, и свои суждения формулирует в терминах, которые пока еще количественно не связаны с исходной информацией.

Поясним суть дела, рассмотрев кратко историю развития синоптического метода прогноза. В довоенный период синоптик составлял свое мнение о будущей погоде почти исключительно на основе распределения приземного давления и теории атмосферных фронтов, то есть самые характерные явления погоды связывались с границами воздушных масс. Точное установление положений фронтов на приземной карте служило необходимой предпосылкой для составления прогноза. Затем с внедрением в практику анализа карт барической топографии были выявлены соотношения

между полями метеорологических характеристик во всей атмосфере и состоянием погоды. Усвоение синоптиком этой информации позволило уточнять положение фронтов. Дальнейшее расширение информационной базы произошло с внедрением в практику синоптического анализа спутниковых карт облачности. Спутниковая информация дополняет данные наземных наблюдений, позволяет сосредоточить внимание на важных деталях синоптических процессов и обнаружить тенденции эволюции метеорологических полей. Ассимилируя все эти виды информации, человек все точнее может себе представить исходное состояние атмосферы.

Карты будущего состояния атмосферы, рассчитываемые на ЭВМ с начала 60-х годов, дают синоптику совершенно иную информацию: конечно, они представляют собой экстраполяцию того же исходного состояния атмосферы, от которого отталкивается и синоптик, причем экстраполяцию, физически более точную, чем та, на которую способен он сам. Однако эта экстраполяция основана на значительно менее детализированном описании начальных условий для той небольшой пространственной области, которая наиболее сильно интересует синоптика. Кроме того, как показано в предыдущей главе, она может содержать значительные ошибки в описании тех процессов небольшого масштаба, которые приводят к локальным особенностям погоды. Поэтому для практического использования численного прогноза синоптик должен ответить на вопрос, согласуется ли представленный ему прогноз с тем, более детальным описанием исходного состояния, которое он имеет. Если такого согласования нет, то человек должен иметь возможность скорректировать численный прогноз по своим исходным данным в соответствии со своим мнением о его точности. В настоящее время такая корректировка осуществляется путем ручного исправления контуров изолиний на прогностических картах. Однако естественно, что при этом человек может внести ошибочные коррективы, несовместимые с исходными данными, по которым производился расчет численного прогноза. Таким образом, корректировка численного прогноза должна содержать обратную связь с методикой численного прогноза. Но даже если допустить, что численный прогноз хорошо согласован с исходной информацией синоптика, то он все еще требует доработки, так как не содержит информации об эволюции фронтов, что необходимо для прогноза погоды. Такую доработку человек производит также вручную и без обратной связи между своими поправками и изменениями, допускаемыми погрешностями методики численного прогноза.

Таким образом, в процессе ассимиляции синоптиком информации численного прогноза, во-первых, не налажен систематический контроль за правильностью использования человеком этой информации о будущем состоянии атмосферы, а во-вторых, рассчитываемая информация о будущем состоянии атмосферы неполна

с позиции синоптического метода прогноза погоды, так как не содержит мелкомасштабных особенностей барического поля и описания фронтальных разделов.

После критического анализа общего состояния проблемы использования численных прогнозов в синоптической практике, остановимся на ряде конкретных приемов применения численных прогнозов в метеослужбах разных государств.

В национальной службе прогнозов США синоптик имеет возможности количественно оценить потенциальную ошибку численного прогноза. Для этого он изучает прогноз синоптического положения, рассчитанный с заблаговременностью 12, 24 и 36 ч, а затем сравнивает прогноз на 12 часов с фактическими данными, которые в момент составления прогноза у него уже имеются. Путем сравнения он устанавливает, какая ошибка возникла в процессе прогноза. Затем он производит вручную экстраполяцию этой ошибки с учетом ее нарастания со временем на оставшийся срок, пользуясь сведениями о систематических погрешностях методики. К моменту окончания этой процедуры синоптик получает еще и детализированный прогноз, рассчитанный на более густой сетке, и сравнивает его со своим. Такая организация работы позволяет творчески усваивать информацию, содержащуюся в численном прогнозе, способствует большей обоснованности в оценке будущего состояния погоды.

Иначе используется численный прогноз в Новой Зеландии. Главная сложность в прогнозах для этого региона состоит в недостаточной плотности сети аэрологических и синоптических станций, а значит, в большом дефиците исходной информации. Синоптик в этой метеослужбе получает три варианта численного прогноза с заблаговременностью 12, 24 и 36 ч, рассчитанных по начальной информации с разными способами восполнения недостающих данных. Синоптик, вырабатывая прогноз на 24 ч, сравнивает все варианты прогноза на 12 ч с фактической погодой и выбирает тот вариант, который наилучшим образом согласуется с наблюдениями. После этого выбранный вариант прогноза используется и с заблаговременностью 36 ч. Таким образом, синоптик выбирает вариант прогноза, наилучшим образом соответствующий развитию фактической погоды, и в процессе выбора творчески усваивает информацию, содержащуюся в численном прогнозе.

В метеорологической службе Австралии ведутся работы по автоматическому прогнозу не только барических полей, но и вероятных ошибок прогнозов. На основе анализа успешности численных прогнозов выявлены их систематические ошибки и найдены связи пространственного распределения этих ошибок с начальными полями. Поправка к прогнозу может быть введена автоматически, если синоптик считает корректировку целесообразной. Опыт работы, однако, показал, что существуют случаи, когда корректировка, рассчитанная на уменьшение ошибок про-

гноза, в среднем ухудшает описание конкретных барических полей, поэтому вклад человека в оценку будущего положения оказывается весомым.

В ряде стран (Швеция, ФРГ, Нидерланды, ГДР) численный прогноз барического положения сопровождается подбором ситуации-аналога. Синоптик, имея численный прогноз и аналогичный процесс из архива, может, сравнив фактическое исходное состояние и исходное состояние для аналога, проанализировать имеющиеся отклонения и уточнить свои представления о развитии атмосферных процессов.

Весьма интересным представляется также опыт прогностической работы в Японии, где специалист-синоптик, помимо сравнения процессов на 12 ч с фактическим развитием погоды, предварительно проверяет карты анализа исходной информации, полученные на ЭВМ. Цель этой проверки — выявить мелкомасштабные особенности метеорологических полей, сглаженные или пропущенные при объективном анализе, чтобы в дальнейшем с особым вниманием проследить развитие синоптически значимых мелкомасштабных возмущений.

Рабочим методом составления краткосрочных прогнозов погоды в нашей стране является метод фронтологического анализа, опирающийся на численный прогноз синоптического положения. При этом численные прогнозы составляются иногда по нескольким схемам, в результате чего синоптик должен выбрать вариант численного прогноза, на основе которого он будет продолжать работу. Единой методики выбора лучшего прогноза пока не разработано. Выбор и корректировка производятся синоптиком на основе личного опыта, эмпирических правил и простейших расчетов. Базовый вариант прогноза синоптик вырабатывает на основе формальной или физической экстраполяции особенностей исходных барических полей и сравнения их результатов с численным прогнозом.

Перейдем теперь к вопросу об использовании численных прогнозов для составления прогноза для потребителя в словесной форме. Для составления такого прогноза синоптик производит интерпретацию будущего состояния атмосферы в терминах, характеризующих явления погоды в конкретных пунктах и прилегающих к ним областях. Возвращаясь к количественным характеристикам ошибок прогнозов, произведенным выше, можно отметить, что ошибки интерпретации и расчетов элементов и явлений погоды происходят примерно в 40 % всех ошибочных прогнозов, поэтому проблема автоматизации интерпретации является не менее актуальной, чем повышение точности гидродинамических прогнозов.

Теоретически проблема определения элементов локальной погоды на основе фонового гидродинамического прогноза еще не решена. Принципиально известны физические законы, описывающие мезо- и даже микромасштабные метеорологические процессы.

Однако прямое воспроизведение атмосферных процессов мелкого масштаба на ЭВМ в оперативной практике вряд ли применимо, во-первых, по причине значительного объема вычислений (практический расчет для территории одного крупного города с необходимой детализацией описания приведет к затратам не меньшим, чем расчет прогноза по полушарию на современных ЭВМ), а во-вторых, вследствие недостаточной густоты сети метеорологических наблюдений для обеспечения таких расчетов начальными условиями (нужно учесть, что если поставить перед собой задачу воспроизвести состояние атмосферы с пространственным шагом, например, 1 км, то и наблюдать метеорологические характеристики следует на сети с неменьшей густотой). Эти препятствия затрудняют в настоящее время даже единичные научные исследования мезометеорологических процессов путем численных экспериментов. Исследование взаимодействия процессов синоптического масштаба с мезомасштабными затруднительно и на основе эмпирического анализа данных наблюдений также по причине недостаточной густоты сети метеорологических наблюдений.

В настоящее время детализация прогнозов синоптического положения производится на основе нескольких принципиально разных подходов. В национальной службе прогнозов США еще до того, как была начата оперативная эксплуатация ЭВМ, локальные прогнозы давались эмпирико-статистическими методами, основанными на построении линейных корреляционных связей между метеорологическими характеристиками. В соответствии с этой традицией при внедрении ЭВМ возникло научное направление, решающее задачу установления статистических связей между прогностически важными характеристиками и значениями метеорологических величин, полученными в результате прогноза с помощью ЭВМ. Ход рассуждений исследователя при решении этой задачи можно уяснить на следующем примере.

Предположим, что синоптический фон, на котором возникают местные явления погоды, описывается значениями какой-либо метеорологической характеристики, скажем, геопотенциала $\vec{\Phi} = \{\Phi_i\}$, в узлах регулярной сетки. Для создания локального прогноза нам нужно найти зависимость значений прогнозируемого элемента D в точках, не совпадающих ни с одним узлом сетки. На рис. 8.1

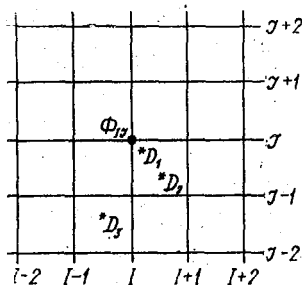


Рис. 8.1. Расположение трех пунктов, в которых предполагается создать метод локального прогноза величины D на основе модельной статистики по данным поля Φ_{xj} , представленного на регулярной сетке, где I, j — соответственно номера столбцов и строк

приведен пример расположения трех точек относительно узлов сетки. Будем считать также, что все три точки находятся в разных микроклиматических условиях. Наличие значительного, возможно, даже определяющего влияния синоптического фона на локальную погоду будем учитывать, предполагая, что существуют функциональные зависимости $D_1(\vec{\Phi})$, $D_2(\vec{\Phi})$, $D_3(\vec{\Phi})$. Для каждого из трех пунктов эти связи могут быть разными по форме, а аргументами в них могут быть либо не все компоненты вектора $\vec{\Phi}$, либо комбинации из этих компонент. В каждом случае следовало бы провести кропотливый предварительный анализ и выявить наиболее обоснованную теоретически и эмпирически форму зависимости. Но для большого числа пунктов и аргументов такая работа вручную оказывается невозможной, а для ее автоматизации исследователь вынужден постулировать форму связи. Учитывая это предположим что во всех трех пунктах значение прогнозируемого метеозлемента линейно зависит от всех компонент вектора, характеризующего фон

$$D_k = \sum_{i=1}^N a_{ik} \Phi_i; \quad k=1, 2, 3. \quad (8.1)$$

Отметим, что микроклиматические различия пунктов не сказываются при этом на форме связи, а проявляются через различия весовых коэффициентов a_{ik} для каждого пункта.

Для определения весовых коэффициентов мы можем использовать имеющиеся метеорологические архивы. Пусть, например, мы хотим конкретизировать зависимость (8.1) для одного месяца. Тогда мы можем выбрать из архива значения прогнозируемого метеозлемента за все дни одноименных месяцев ряда лет и аналогично выбрать из архивов синоптических полей значения фоновой характеристики $\vec{\Phi}$, наблюдавшиеся в те же моменты времени в узлах сетки. При наличии таких архивов получение коэффициентов в зависимости (8.1) осуществляется на основе метода наименьших квадратов с помощью стандартных программ, имеющихся в библиотеках математического обеспечения всех современных ЭВМ. Понятно, что, хотя для каждого пункта

фон $\vec{\Phi}$ будет одним и тем же, различия в архивах D приведут к различиям и в коэффициентах a_{ik} . Таким образом, эта методика позволяет в какой-то мере учесть влияние микроклимата на локальную погоду при одном и том же синоптическом фоне.

Дальнейшее развитие излагаемого подхода заключалось в том, чтобы автоматически учесть потенциальную ошибку прогноза.

Используя в зависимости (8.1) вместо фактического фона $\vec{\Phi}$ прогностические значения $\vec{\Phi}^p$, исследователь вносит в расчет D_k ошибку. Как указывалось в предыдущей главе, ошибки прогно-

стических моделей носят систематический характер. Поэтому естественной представляется попытка вместо зависимости (8.1) использовать аналогичную по форме зависимость

$$D_h = \sum_{i=1}^N b_{ih} \Phi_i^n, \quad (8.2)$$

в которой предполагается, что прогнозируемый метеоэлемент D_h линейно связан не с фактическим, а с прогностическим фоном, представляемым вектором $\vec{\Phi}^n$ компонентами Φ_i^n . Коэффициенты связи можно отыскивать на основе архивов фактических значений метеоэлемента D_h и спрогнозированных на моменты наблюдения

этого метеоэлемента характеристик поля $\vec{\Phi}^n$. Понятно, что коэффициенты b_{ih} не совпадают с a_{ih} , так как они отражают не только имеющиеся в природе связи, но и наличие ошибок прогноза, и зависят от того, по какой модели рассчитан прогноз. Изменив модель, мы изменяем и ее точность и, следовательно, обязаны произвести накопление новых архивов прогнозов и перерасчет коэффициентов в связи (8.2). Метод прогноза локальных характеристик погоды с помощью всех фактических данных и зависимости (8.1) принято называть методом идеальных прогнозов для того, чтобы отличить этот подход от метода, где учитывается наличие погрешностей в расчете синоптического фона. Последний принято называть методом модельной статистики. Он широко используется в прогностической практике США. Регулярно два раза в сутки по более чем 200 пунктам в Национальном метеорологическом центре США рассчитываются прогнозы вероятности и типа различных градаций количества осадков, облаков и их нижней границы, характеристик ветра и значений экстремальных температур у земли: Заблаговременность прогноза от 12 до 60 ч. Качество прогнозов зависит от прогнозируемого метеоэлемента и его заблаговременности. Например, тип осадков и характеристики облачности при заблаговременности 24 ч и более предсказываются по методу модельной статистики лучше, чем по синоптическому методу. Прогнозы скорости ветра и экстремальных температур до 24 ч синоптическими методами определяются точнее.

Рассмотрим описание метода модельной статистики на примере расчета экстремальных температур. В табл. 8.1 приведены все аргументы, которые входят в прогностическую связь (8.2) вместо Φ_i^n при расчете максимальной температуры с заблаговременностью 12 ч. Все эти характеристики определяются по исходной или прогностической информации, проинтерполированной от значений в узлах регулярной сетки в точку, находящуюся над пунктом. Архивы прогнозов и исходных данных разбиты на четыре группы в соответствии с сезонами года. Для 228 станций в каждый сезон имелось около 400 случаев для статистической

обработки. Аргументы выбирались с учетом возможных физических связей.

Таблица 8.1

Основные параметры, используемые при подборе предикторов для построения уравнения регрессии с целью локального прогноза максимальной температуры методом модельной статистики в Австралии

Наземные наблюдения	На стандартных изобарических уров		Дополнительные параметры
	анализ	прогноз	
P	H	H	$\sin \tau$
t	t	t	$\cos \tau$
u	u	u	—
v	v	v	—
t_D	f	f	—
Видимость	Среднее по слоям влаго-содержание	—	—
Балл облаков	—	—	—
Высота нижней границы облаков	—	—	—
Сумма осадков	—	—	—
Предыдущая максимальная температура	—	—	—

Примечание. u — западная составляющая ветра; v — северная составляющая ветра; τ — часовой угол максимальной высоты солнца на заданную дату.

Как показал анализ диагностических расчетов, выбор аргументов играет определяющую роль в точности прогноза. В табл. 8.2 приведены основные из них, определяющие точность прогноза, ранжированные по значимости. Обращает на себя внимание тот факт, что наличие всех наиболее значимых аргументов легко понять физически на базе теории пограничного слоя атмосферы.

Интересным представляется и результат испытаний метода модельной статистики для прогноза температуры. (Подробное описание метода и результатов испытаний можно найти в работе

[4]). Выяснилось, что абсолютная погрешность определения экстремальных температур на независимой выборке составляет летом $3,5^\circ$, идеальный статистический прогноз за этот же период дает абсолютную ошибку в $3,8^\circ$. Оказалось также, что использование для прогноза аргументов, полученных из другой прогностической модели, приводит к ухудшению прогноза примерно на $0,3^\circ$. Таким образом, можно полагать, что идеальный статистический прогноз немного проиграет прогнозу по методу модельной статистики, если последний не будет использовать ту же прогностическую модель, для которой произведена оптимизация.

Таблица 8.2

Список предикторов, наиболее часто употребляемых для локальных прогнозов максимальной температуры методом модельной статистики в США и Австралии

Ранг по частоте употребления	Предикторы	
	Австралия	США
1	v на уровне 1000 гПа	t пограничного слоя
2	t „ 1000 „	t на уровне 1000 гПа
3	t „ 850 „	f в слое от 1000 до 500 гПа
4	u „ 850 „	t на уровне 850 гПа
5	t „ 700 „	Высота уровня 500 гПа
6	f „ 500 „	v в пограничном слое

Метод модельной статистики своей логической простотой и конкретностью окончательных результатов, безусловно, привлекателен и может казаться решением всех проблем локальных метеорологических прогнозов. Однако синоптик, использующий прогностические связи, полученные с помощью этого подхода, должен помнить основополагающие предположения, при которых этот метод может быть использован корректно. С точки зрения математической статистики прогностические уравнения (8.1) или (8.2) выражают гипотезу, что $N+1$ случайные переменные (N — аргументов и предикторов) связаны статистической линейной зависимостью. Метод наименьших квадратов, с помощью которого получают коэффициенты, основывается на предположении, что входящие в зависимость случайные величины имеют нормальный закон распределения, параметры которого определены весьма точно. Кроме того, необходимо, чтобы случайные аргументы были независимы между собой и выборки, по которым они определяются, содержали несвязанные значения.


Нарушения этих требований в практике могут происходить довольно часто. Во-первых, линейный характер связи не всегда соответствует истинному закону соответствия между предсказываемой величиной и аргументами. Отклонения же связи от линейной приводят к систематическим ошибкам; коэффициенты связи становятся неоптимальными, а сама она применима только к выборке, по которой найдена, или для условий, близких к нормальным для данной выборки. В целом метод модельной статистики, так же как и идеального прогноза, требует предварительного изучения характера связи, выравнивания нелинейностей и выделения неслучайных факторов, нормализации случайных отклонений, отбрасывания зависимых предикторов. Вся эта работа необходима для каждой отдельной станции, для каждого нового прогнозируемого явления. Если же она не выполняется, а подменяется массовой обработкой рядов на ЭВМ, то можно надеяться только на то, что прогноз явлений, близких к нормам, будет хорош, а в моменты резко аномального течения атмосферных процессов (именно в эти моменты прогноз наиболее ценен) расчеты по методу модельной статистики приведут к сглаживанию эффекта.

Из изложенного выше следует, что метод модельной статистики не может заменить поиска существующих в природе детерминистических связей. В нашей стране, наряду с методами модельной статистики и идеального прогноза¹, постоянно совершенствуются расчетно-синоптические методы. Для интерпретации результатов гидродинамического прогноза в Гидрометеорологическом Центре СССР разработан синоптико-статистико-гидродинамический метод прогноза полей температуры, влажности и осадков. (Подробное описание метода в работе [10]).

Заканчивая описание методов использования численных прогнозов в синоптической практике, остановимся на методе аналогии. Прогноз типа погоды на основе установления будущего термобарического поля и использования характеристик типов погоды, присущих ожидаемой синоптической ситуации, является основным в работе синоптика. Главным препятствием в автоматизации этого принципа является его языковая основа: человек обрабатывает метеорологическую информацию путем умозрительного построения сжатого описания изображения, а затем классифицирует его. В настоящее время задача такого рода в ЭВМ решается иначе — на основе дискриминантного анализа. Между таблицами чисел, с которыми ЭВМ оперирует вместо изображений, сначала устанавливается количественное соответствие на основе понятия близости двух точек в N -мерном пространстве. Затем производится отнесение данной таблицы к одному из классов, образованных ранее при обработке архива с помощью статистического анализа.

¹ Метод идеального прогноза использован в работах [10, 11].

Возможное использование принципа аналогичности в краткосрочном прогнозе проиллюстрируем на примере организации этой процедуры в ГДР. Для десяти точек, расположенных над территорией страны, по спрогнозированному полю геопотенциала и ветра вычисляются количественные признаки типа переноса (западный, северный и так далее). По этим признакам из архива автоматически выбирается самое близкое высотное поле и по его дате — приземная карта погоды. Такой подход, безусловно, может дать синоптику очень ценную вспомогательную информацию, если аналог, выбранный из архива, соответствует тому, который синоптик сам мог бы получить, опираясь на собственную классификацию. Именно эта проблема соответствия образа, используемого человеком при прогнозе, и количественных критериев сходства, принятых в автоматической типизации, нуждается в детальном исследовании. Успешное ее решение создаст предпосылки для разработки системы диалога человека и ЭВМ в работе над прогнозом.



Глава 9

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО МЕСТА СИНОПТИКА: ТЕХНОЛОГИЯ И ПРОБЛЕМЫ

Быстрый рост уровня автоматизации в системе сбора, обработки и передачи метеорологической информации, прогресс в области численного прогноза — все это поставило на повестку дня вопрос о создании автоматизированных систем оперативного краткосрочного прогноза. До настоящего времени рост технической оснащенности и объема информации практически не сказался на методике обслуживания народного хозяйства прогнозами. Основная масса информации подается инженеру-прогнозисту в виде карт. Он осмысливает их на базе классической синоптической метеорологии и принимает субъективное решение о будущей погоде. Важнейший этап — составление локальных прогнозов погоды для потребителей — требует от человека чрезвычайно ответственного отношения, а значит, в обозримом будущем устранение человека из системы оперативного прогнозирования невозможно не только практически, но и теоретически. Социальную роль синоптика — лица, ответственного перед обществом за составление наилучшего прогноза погоды, нельзя передать ЭВМ. Однако нецелесообразность полной автоматизации локального прогноза погоды не означает, что существующая синоптическая методика не нуждается в усовершенствовании. Наоборот, человек всегда стремится создать наиболее надежный, обоснованный всеми возможными способами прогноз, а работает он в условиях чрезвычайно ограниченного времени. Приведем в качестве примера расписание работ по составлению прогноза погоды на 24 и 36 ч в Ленинградском гидрометеорологическом центре (мск время):

1. С 8.00 до 9.30 производится прием дежурств, ознакомление с метеорологической обстановкой на основе всех видов текущей информации, с прогнозами погоды на основе отечественных и зарубежных схем, получение новых распоряжений, ручная обработка «кольцовки» за 07 ч и карт АТ₇₀₀ и АТ₈₅₀ за 0,4 ч, построение прогностических траекторий частиц для Ленинграда; построение и обработка прогностического радиозонда на текущий день; подготовка карт будущего положения заблаговременностью 24 и 36 ч; составление предварительного прогноза погоды.

2. С 9.30 до 11.00 производятся уточнение прогноза на 24 и 36 ч на основе высотных и приземных прогностических карт, полученных из ГМЦ СССР; обработка карт AT_{300} , AT_{200} , OT_{1000}^{500} за 04 ч; построение и обработка прогностических кривых стратификации температуры и влажности на 24 и 36 ч, уточняющие расчеты элементов прогноза погоды, составление обзоров погоды за предыдущие сутки и суточных прогнозов по областям для радиопередачи.

3. С 11.00 до 11.20 — обсуждение прогнозов.

4. С 11.20 до 12.20 оформляется бюллетень погоды, производятся запись результатов расчета метеоэлементов и явлений погоды в журнал обоснований прогнозов, составление и передача текстов прогноза общего пользования и специализированных прогнозов.

За три часа инженеру-синоптику приходится усваивать огромный объем информации, выполнять значительную ручную работу по оформлению карт и аэрологических диаграмм, вырабатывать варианты хода погоды и свои взгляды на наиболее вероятное ее развитие. Естественно, предположить, что избавление человека от ручного анализа карт может сэкономить ему время и способствовать более высококачественному прогнозу. Именно исходя из подобной точки зрения в Национальной Метеорологической Службе США была проведена работа по программе автоматизации рабочего места синоптика. К настоящему времени работа по этой программе в целом завершена, и результаты ее внедрения обобщаются. Рассмотрим некоторые из них. Технической базой для создания автоматизированного рабочего места послужили, с одной стороны, вычислительные системы на базе мини-ЭВМ, оснащенные графическими дисплеями, а с другой стороны, система связи между ЭВМ, обеспечивающая их функционирование, в качестве единой вычислительной сети. Схема организации связи между ЭВМ отдельных прогностических подразделений изображена на рис. 9.1. Главная магистраль системы связи состоит из отдельных линий, связывающих 47 управлений прогнозов штатов, а также центров контроля окружающей среды. Каналы связи позволяют передавать информацию из Национального метеорологического центра (НМЦ) или из любого управления прогнозов в двухстороннем дуплексном режиме со скоростью 2400 бит/с. Таким образом, обеспечивается обмен сообщениями между управлениями, максимально удаленными друг от друга, менее чем за одну минуту. Каждое управление обменивается информацией со своими низовыми подразделениями с помощью радиальных линий односторонней (полудуплексной) связи, имеющих также скорость обмена 2400 бит/с. Все данные, собранные путем метеорологических наблюдений, поступают по местным линиям в местные учреждения службы погоды, затем через радиальные линии связи — в главную магистраль и далее для распределения общепринятым способом.

Важной особенностью системы связи является то, что обмен ведется исключительно цифровой информацией. В настоящее время Национальная служба прогнозов США не использует фото-телеграфную связь. Цифровое кодирование позволяет осуществлять прием и передачу карт в 40 раз быстрее, чем факсимильный обмен, создает предпосылки для повышения надежности и накопления большого объема необходимой информации на каждом рабочем месте синоптика.

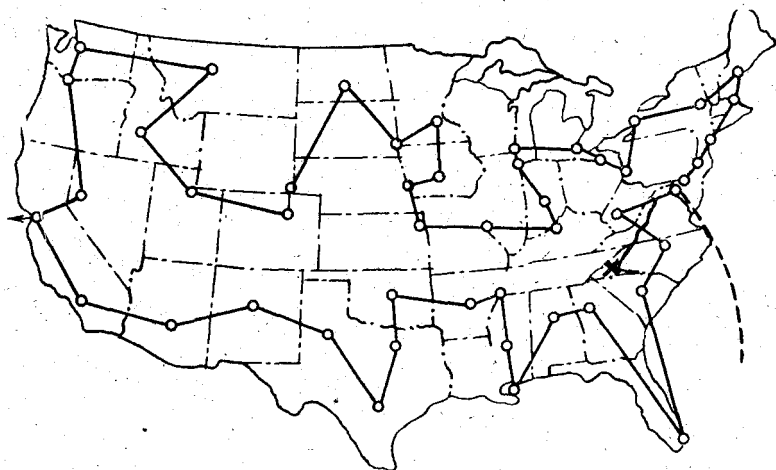


Рис. 9.1. Схема организации связи между отдельными прогностическими подразделениями Национальной службы погоды США.

* — Национальный метеорологический центр

Вторым существенным компонентом автоматизации оперативной прогностической деятельности НМС США является создание автоматизированных рабочих мест синоптика (АРМС). Ими оснащены в настоящее время как управления прогнозов штатов, так и местные прогностические учреждения. АРМС разработаны на базе вычислительной сети из двух мини-ЭВМ с оперативной памятью 128 килобайт каждая, памятью на гибких магнитных дисках и кассетах магнитных лент. Одна из этих ЭВМ обслуживает каналы связи, обеспечивая АРМС необходимой информацией, а вторая служит для выполнения необходимых расчетов, управления дисплеями, выполнения ряда вычислительных операций.

Важными техническими средствами, входящими в АРМС, являются периферийные устройства: интерфейсы для подключения средств связи, дополнительные блоки памяти, электронные часы, печатающее устройство, обеспечивающее выдачу как алфавитно-цифровой информации, так и графиков и карт. Размер бланка 28×21,5 см, скорость выдачи одной копии 20 с. Самым главным средством общения синоптика и ЭВМ являются дисплеи (до четырех штук) и пульт управления ими. Каждый дисплей способен

принимать от ЭВМ числовую информацию, накапливать ее и отображать на телевизионном экране с размером изображения примерно 43 см по диагонали. Один из дисплеев (алфавитно-цифровой) служит для выполнения расчетов и операций над текстами (вызов текстов, редакция, композиция, создание новых текстов), другие (графические) позволяют вызвать изображения, выделить из него часть и увеличить ее, наложить одно на другое до трех изображений. Графические дисплеи обеспечены устройствами обратной связи с оператором, с их помощью можно редактировать изображения и вызывать их из памяти ЭВМ, комбинировать с текстом.

Указанное выше техническое оснащение АРМС дополнено специализированным математическим обеспечением, т. е. комплектом программ, обеспечивающих выполнение ряда необходимых синоптику операций. Это позволяет синоптику повышать эффективность решения следующих задач:

- а) обеспечение автоматического контроля за состоянием текущей погоды во всем регионе, за который он отвечает;
- б) автоматическое преобразование различной вспомогательной информации, приходящей по каналам связи из НМЦ, в форму, удобную для создания локальных прогнозов погоды;
- в) непрерывный автоматический контроль качества прогнозов;
- г) систематическое совершенствование качества информации, получаемой из центра синоптиками на местах.

Перечислим примеры использования АРМС.

1. Организация штормового оповещения осуществляется на основе непрерывного сбора текущей местной метеорологической информации. С помощью методов статистической экстраполяции данных каждой станции эта информация преобразуется в сверхкраткосрочный прогноз на 1, 2, 3, 4 и 6 ч. Этот прогноз сравнивается с ранее составленным прогнозом на соответствующие сроки и, если ожидаются непредусмотренные опасные явления погоды, система предъявляет дежурному синоптику на экран дисплея временной ход прогностических характеристик с указанием ожидаемого опасного явления (табл. 9.1).

Таблица 9.1

Прогностическая матрица хода высоты нижней границы облачности, генерируемая автоматически с помощью АРМС США

Время	Вероятности категорий высоты НГО						Наилучшая категория
	1	2	3	4	5	6	
15.25	1	10	67	17	6	0	3
16.25	2	15	50	17	8	8	3
17.25	3	17	41	22	9	8	3
18.25	3	18	36	19	8	17	3
20.25	8	19	24	21	11	17	3

2. Подготовка вариантов прогнозов в словесной форме производится на основе передаваемой по системе связи из НМЦ прогностической матрицы (табл. 9.2). Прогностическая матрица для более чем 200 пунктов территории США составляется в НМЦ методом модельной статистики на основе фоновых численных прогнозов. Прогностическая матрица программно преобразуется в несколько вариантов словесного прогноза (табл. 9.3). Дежурный синоптик может выбрать один из этих вариантов, но может скорректировать его или составить собственный текст прогноза.

Таблица 9.2

Прогностическая матрица, рассчитываемая в Национальном метеорологическом центре США методом модельной статистики и передаваемая синоптику с помощью АРМС

Прогностическая матрица для Питтсбурга.
Воскресенье 14 декабря 1975 г.

Элементы	Единицы	Дата выдачи прогноза	Срок (ГТ)	Заблаговременность						
				12	18	00	06	12	18	00
				(день)		(ночь)		(завтра)		
Температура max/min	°C	12/14	00	17		4		11		
Вероятность ос. (12)	%	12/14	00			35		91		70
Вероятность ос. (6)	%	12/14	00	0	18	61	84	60	42	
Вероятность тв. ос.	%	12/14	00	0	0	0	2	4	16	24
Вероятность ливня	%	12/14	00	25		17		18		
Вероятность дождя	%	12/14	00	52		55		67		
Вероятность мороси	%	12/14	00	23		28		16		
Вероятность гроз	%	12/14	00	1		1		2		
Облачность	категор.	12/14	00	1	1	4	4	4		4
Ветер скор/напр	м/с/град	12/14	00	1705	2113	2109	2909	3011	3110	

После этого простые манипуляции с клавиатурой пульта АРСМ позволяют ему передать свой прогноз всем абонентам и, в частности, в НМЦ, где этот прогноз будет в дальнейшем автоматически оцениваться. Интересно отметить, что оценивается не только успешность прогноза, но и степень близости его к предварительным вариантам. Это позволяет оценивать как самостоятельность работы синоптика, так и степень полезности прогностической продукции НМЦ.

3. Путем привлечения информации МРЛ делается уточнение прогнозов осадков на 12 и 24 ч, исходя из того факта, что свежие данные МРЛ, доступные синоптику перед составлением прогноза, собираются на 9 ч позже той информации, по которой рассчитан прогноз НМЦ. Методика уточнения основана на статистической экстраполяции. В качестве предикторов вводятся результаты наблюдений МРЛ и прогноз вероятности осадков, переданный из НМЦ.

Таблица 9.3

Варианты словесного прогноза, соответствующие прогностической матрице, приведенной в табл. 9.2, выведенные на АЦПУ рабочего места синоптика

Прогноз по пункту.

Воскресенье 14 декабря 1975 г.

Сегодня утром ясно, во второй половине дня образование облачности, дождь маловероятен, сохранение тепла, температура не ниже 16, слабый юго-западный ветер, ночью дождь, температура около 4, ветер слабый, понедельник — пасмурно, возможен дождь, температура не ниже 10, вероятность осадков сегодня — 40%, ночью — 90%, завтра — 70%.

Сегодня утром ясно, во второй половине дня образование облачности, дождь маловероятен, сохранение тепла, температура не ниже 16, слабый юго-западный ветер, ночью дождь, прохладно, температура около 4, ветер слабый, понедельник — пасмурно, возможен дождь, температура не ниже 10, слабый северо-западный ветер.

Сегодня утром ясно, во второй половине дня образование облачности, дождь маловероятен, сохранение тепла, температура не ниже 16, слабый юго-западный ветер, ночью — дождь, температура около 4, ветер слабый, понедельник — пасмурно, возможен дождь, температура не ниже 10.

Сегодня дождь маловероятен, утром ясно, к вечеру образование облачности, сохранение тепла, температура не ниже 16, слабый юго-западный ветер. Ночью — дождь, температура около 4, ветер слабый, понедельник — пасмурно, возможен дождь, температура не ниже 10.

Сегодня облачно с прояснениями, во второй половине дня дождь маловероятен, сохранение тепла, температура не ниже 16, слабый юго-западный ветер, ночью — дождь, температура около 4, ветер слабый, понедельник — пасмурно, возможен дождь, температура не ниже 10.

Сегодня дождь маловероятен, облачно с прояснениями, сохранение тепла, температура не ниже 16, слабый юго-западный ветер, ночью — дождь, температура около 4, ветер слабый, понедельник — пасмурно, возможен дождь, температура не ниже 10.

4. Автоматизация расчетно-графической работы дежурного синоптика обеспечивается с помощью АРМС путем автоматической наноски микрокольцевых карт и выдачи ее на экран графического дисплея. На этот же экран могут быть выданы карты, построенные по цифровым данным НМЦ, содержащим как диагностическую, так и прогностическую информацию о фоновых метеорологических процессах. Помимо этого автоматически расчерчиваются разрезы атмосферы, на которых изображаются изолинии потенциальной температуры, относительной влажности, числа Ричардсона, скорости и направления геострофического ветра. Разработаны специальные сценарии диалога синоптик — ЭВМ, которые позволяют использовать качественный анализ синоптической ситуации и уточнить положение фронтов, учитывая все виды метеорологической информации.

5. Составление специализированных прогнозов с помощью АРМС производится как на основе стандартного программного обеспечения, так и на основе программ, специально разработанных для отдельных районов. Например, имеются возможности рассчитать скорости горно-долинных ветров, достигающих опасных скоростей, предусмотрен прогноз паводков с учетом местных условий и прогноза ливней.

Для того чтобы более полно представить себе возможности автоматизации деятельности синоптика, важно представить и ту информацию, которая передается из НМЦ. Рассмотрим вкратце технологию ее получения. В первую очередь полезно охарактеризовать время выполнения основных расчетных операций. Для этого на рис. 9.2 дана их временная диаграмма.

Особенностью системы расчета прогнозов является непрерывный сбор и ассимиляция всех видов метеорологической информации. Это обеспечивает наиболее высокую скорость расчета краткосрочных прогнозов по ограниченной территории, максимально быструю доставку синоптикам важнейшего для них краткосрочного прогноза. Однако малое время сбора метеорологической информации для работы региональной модели приводит к необходимости проведения повторных расчетов по большей территории. Глобальная модель, имея максимальное время отсечения, использует практически всю информацию о начальном состоянии и дает очень точный прогноз на 12 ч. Этот прогноз служит в качестве первого приближения при усвоении метеорологической информации, которая будет приходить в следующий срок наблюдений. (Результаты работы глобальной модели имеют и самостоятельное значение, так как используются для определения аномалий температуры и осадков).

По каналам связи собирается многообразная информация: синоптическая (сухопутная и судовая), аэрологическая (радиозондовая, шаропилотная и радиоветровая с сухопутных станций и судов, сообщения самолетов, спутниковые сообщения). В резуль-

тате работы ЭВМ первого уровня вся эта информация накапливается в специальном архиве во внешней памяти (на магнитных дисках), доступной для всех ЭВМ вычислительного комплекса. Дальнейшая обработка этой информации производится на ЭВМ второго уровня. Особенностью этого этапа является эффективное обеспечение диалога человека и ЭВМ. В режиме диалога решается задача подготовки метеорологических данных для расчета прогноза. Этот процесс осуществляется в два этапа. На первом

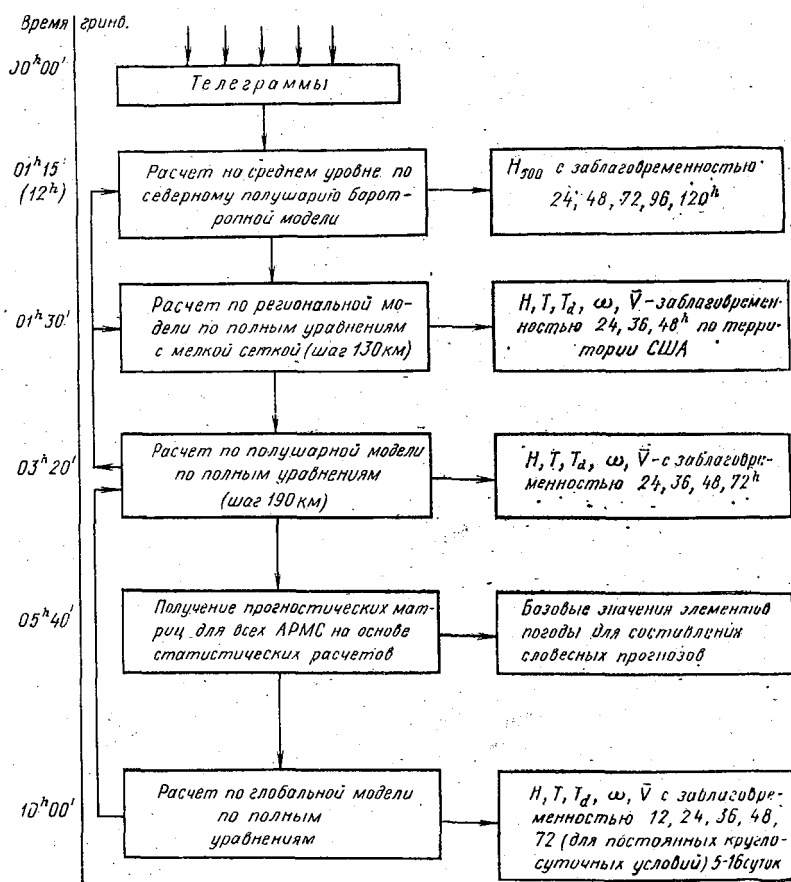


Рис. 9.2. Временная диаграмма цикла прогностических расчетов, выполняемых в НМЦ США, при обработке метеорологической информации за один срок наблюдений

производится контроль и корректировка принятой метеорологической информации. Для этого производится автоматическая на- носка данных и их объективный анализ. Эти данные подвергаются субъективному синоптическому анализу на автоматизированном

рабочем месте. В ходе субъективного анализа производится отбраковка и коррекция данных, находящихся в ЭВМ. Использование субъективного анализа позволяет достаточно просто учитывать при подготовке данных те виды информации, которые не находят в настоящее время применения в автоматизированной линии, например, оценки облачности, скорости и направления ветра по спутниковым снимкам. Интересно, что при проведении анализа, как объективного, так и синоптического, в качестве первого приближения используется прогноз на 12 ч, выданный по глобальной модели.

Вторым этапом процедуры подготовки данных является восполнение недостающей информации. Эта процедура производится после субъективного анализа. В тех районах, где, по мнению дежурного синоптика, первое приближение объективного анализа сильно отличается от результатов последующего прогноза, осуществляется ввод дополнительных данных. Наличие АРМС позволяет реализовать эту процедуру графически, что удобно для человека. Производится исправление контуров изолиний на экране дисплея с последующим автоматическим переводом координат изолиний в цифровую форму. Таких исправлений может оказаться до нескольких сотен, но процедура их ввода занимает лишь несколько минут. Коррекции подвергаются не только данные о геопотенциале, но и о температуре и точке росы.

После окончания подготовки данных производится окончательный объективный анализ данных, результаты которого, так же как и результаты первого приближения, составленного без участия человека, запоминаются в архиве. Это позволяет организовать контроль за качеством работы человека с разбором его ошибок. Вне рабочего времени человек может использовать ЭВМ и эти данные для тренировки и осмысления. Каждый синоптик может составлять свой личный архив и пользоваться им в период своего дежурства. Кроме того, ему доступны климатические и физико-географические данные, а также ряд вспомогательных метеорологических полей (вихрь на AT_{500} , адвекция тепла на AT_{850} и так далее). На экран дисплея можно одновременно вызвать до трех изображений, что создает дополнительные возможности для анализа.

После окончания объективного анализа подготовленные данные через общую сверхбыструю внешнюю память поступают на третий уровень вычислительного комплекса. Здесь производится непосредственный расчет прогноза. Он обеспечивается самой быстродействующей ЭВМ, которая недоступна человеку для диалога. Она контролируется и управляется через ЭВМ второго уровня. Расчет на 48 ч занимает около получаса, после чего результаты прогноза с нужными заблаговременностями вновь поступают в общую память для передачи в ЭВМ второго уровня на окончательную редакцию.

Завершающим этапом является анализ результатов дежурным синоптиком. Этот этап очень ответственный и важный. Его необходимость связана с наличием в численном прогнозе разнообразных систематических ошибок. Для решения этой задачи дежурный синоптик может привлечь всю информацию, выработанную на предыдущих этапах, а также воспользоваться методическими документами, содержащими перечень типичных ошибок для каждой модели. После контроля синоптиком прогнозы поступают на передачу и для архивации.

Организация автоматизированного рабочего места синоптика наряду с расчетом всех элементов прогноза локальной погоды в НМЦ создала предпосылки для существенного улучшения условий работы прогнозиста. Однако уже после первого года эксплуатации оказалось, что ускорение передачи информации и автоматизация практически всех операций, которые должен произвести синоптик в процессе составления прогнозов, породили целый ряд сложных психологических проблем. Во-первых, человек при существующей методике не успевает осмыслить все виды поступающей к нему информации. Он вынужден ограничиваться только частью, сознавая при этом, что в численных прогнозах НМЦ учтен, и учтен объективно, гораздо больший объем информации. Это создает предпосылки для недооценки своего труда и излишнего доверия к результатам численных прогнозов. Во-вторых, процедура автоматической выдачи расчерченных карт привела к понижению внимания дежурного синоптика к анализу деталей метеорологических полей. Известно, что при субъективном анализе метеорологической информации синоптик очень внимательно контролирует ее, этап расчерчивания вручную помогает ему сосредоточиться на комплексном использовании разных видов информации. Получение готовых карт не только сокращает ручной труд, но и порождает понижение внимания к анализу. Человек рассуждает так: «Информация у ЭВМ полнее, она произведет и расчерчивание лучше, чем я». Таким образом, автоматизация всмогательных процедур способствует снижению ответственности в отношении местных синоптиков к качеству их анализа. Это неизбежно влечет за собой снижение уверенности в свою способность улучшить словесный прогноз, полученный ими через АРМС из НМЦ. Имеется и третья предпосылка к излишнему доверию к прогнозам погоды из НМЦ — постоянный дефицит времени у синоптика для разработки прогнозов. Местный синоптик, как показывает хронометраж, большую часть времени затрачивает на работу с потребителями метеорологической информации, контроль за ходом погоды, составление штормовых оповещений, составление специальных прогнозов. Работая в условиях недостатка времени, человек стремится снять с себя ответственность за прогноз, боится, что тоже побуждает его без изменений принимать прогноз, данный в центре.

Таким образом, автоматизация рабочего места синоптика привела к неожиданному эффекту: значительная часть специалистов-синоптиков на местах начала самоустраняться от разработки прогнозов и осуществлять лишь диспетчерские функции — передавать прогноз, принятый ими из НМЦ, своим абонентам. Самоустранение синоптиков наметилось еще до введения АРМС, когда из НМЦ вся информация принималась факсимильно или по телетайпу. Однако казалось, что введение АРМС ликвидирует самоустранение. Этого не произошло.

Рис. 9.3.¹ иллюстрирует, какая возможность была заложена при создании сети АРМС и как явление самоустранения вредит реализации этих возможностей.

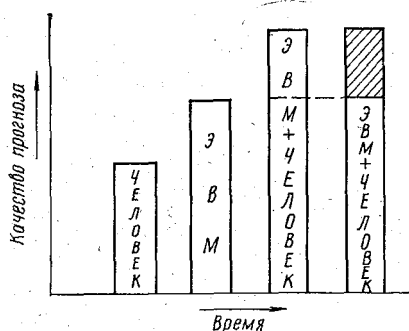


Рис. 9.3. Сравнение качества прогнозов, составлявшихся в разные годы с использованием разных технологий: вручную (человек), численно (ЭВМ) или при совмещенной технологии (ЭВМ+человек).

Заштрихованная область соответствует снижению качества прогнозов при «самоустранении» синоптика

или иных видов информации автоматическая система оказывается в условиях неопределенности, а, как известно, в этих условиях человек принимает решение более эффективно.

Таким образом, единственным возможным путем развития прогностической службы является создание прогностических систем на базе взаимодействия человека и ЭВМ. Но при этом опыт прогностической службы США показывает, что недостаточно оснастить рабочее место синоптика технически. Необходимо разрабатывать методику наиболее эффективного использования человеком новых технических возможностей.

Учитывая указанное выше, наметившуюся тенденцию к полному устранению человека из системы прогнозирования погоды следует считать неэффективной. В полностью автоматической системе местная информация будет усваиваться с большим запаздыванием, чем при наличии человека. В настоящее время не решена проблема усвоения многих видов информации о погоде, имеющих качественную форму (например, форма облачности). Автоматические системы прогноза необходимо стабильно снабжать единообразной информацией, что в практике организовать очень трудно. При отсутствии тех

¹ Рисунок предложен Л. Снеллманом, который образно назвал явление самоустранения синоптиков от разработки местных прогнозов «раком» метеорологических прогнозов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов П. И. Численные методы прогноза погоды. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975. — 392 с.
 2. Белоусов С. Л., Гандин Л. С., Машкович С. А. Обработка метеорологической информации с помощью электронных вычислительных машин. — Л.: Гидрометеоиздат, 1968. — 282 с.
 3. Вопросы оперативной автоматической обработки гидрометеорологической информации. — Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра СССР. Л., Гидрометеоиздат, 1985, вып. 259. — 87 с.
 4. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Вероятностные метеорологические прогнозы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — 271 с.
 5. Монин А. С. Прогноз погоды как задача физики. — М.: Наука, 1969. — 184 с.
 6. Мезингер Ф., Аракава А. Численные методы, используемые в атмосферных моделях. — Л.: Гидрометеоиздат, 1979. — 135 с.
 7. Парфиневич Я. Комплексный контроль аэрологической информации. (Методическое пособие). — М.: Гидрометеоиздат, 1976. — 67 с.
 8. Решетов В. Д. Изменчивость метеорологических элементов в атмосфере. — Л.: Гидрометеоиздат, 1973. — 215 с.
 9. Руководство по автоматизированной оперативной обработке гидрометеорологической информации и по составлению численных прогнозов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 63 с.
 10. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. I. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 702 с.
 11. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации. — Л.: Гидрометеоиздат, 1985. — 301 с.
 12. Русин И. Н. Гидродинамические методы долгосрочных прогнозов погоды. — Л. изд. ЛПИ, 1984. — 150 с. (ЛГМИ).
 13. Современный компьютер: Сб. науч.-попул. статей. Пер. с англ./Под ред. В. М. Курочкина. — М.: Мир. 1986. — 212 с.
 14. Томпсон Ф. Анализ и предсказание погоды численными методами. — М.: Изд. иностр. лит., 1962. — 240 с.
-