

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Л. А. Хандожко

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПРОГНОЗОВ ПОГОДЫ

Текст лекций

Ленинградский ордена Ленина
Политехнический институт
имени М. И. КАЛИНИНА

ЛЕНИНГРАД
1987

УДК 551.5.003

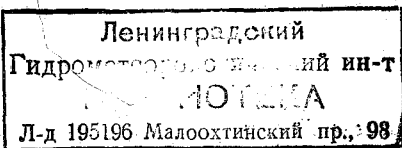
Хандожко Л. А. Оценка экономического эффекта прогнозов погоды. — Л.: изд. ЛПИ, 1987, 51 с. (ЛГМИ).

Рецензенты: Ленинградский гидрометеорологический центр (В. М. Баскаков), Е. Е. Жуковский, д-р физ.-мат. наук, проф. (Агрофизический институт).

Текст лекций представляет собой краткое введение в теорию оценивания метеорологической информации. Лекции содержат изложение современных представлений основных аспектов экономической полезности прогнозов погоды.

Учебный материал рассчитан на специалистов метеорологов и студентов метеорологической специальности. Он позволяет глубже освоить более сложную часть учебного курса «Метеорологическое обеспечение народного хозяйства», в которой рассматриваются эти вопросы. Будет полезен слушателям факультета повышения квалификации, а также аспирантам и стажерам.

Табл. 13. Ил. 1. Библ. 42.



© Ленинградский гидрометеорологический институт (ЛГМИ), 1987.

ВВЕДЕНИЕ

Метеорологическое обеспечение народного хозяйства¹ как комплекс научных знаний и практических рекомендаций об использовании метеорологической информации имеет довольно длительную историю, соизмеримую с возрастом самой метеорологической науки, особенно ее сугубо практической области — службы прогнозов.

Как учебная дисциплина метеорологическое обеспечение сформировалось в последние 10—15 лет в стенах Ленинградского гидрометеорологического института, на кафедре метеорологических прогнозов. Как самостоятельная дисциплина метеорологическое обеспечение имеет определенную область изучения, свой предмет, свои понятия и терминологию. Она включает ряд разделов, касающихся специфики использования метеорологической информации в различных отраслях народного хозяйства и экономических аспектов ее реализации. С этой точки зрения метеорологическое обеспечение есть не что иное, как метеорологическая праксиология (праксиология — наука о рациональной деятельности). Особое место здесь отводится использованию прогнозов погоды, поскольку они стали постоянной потребностью общественного развития. В настоящее время наряду с научными работами теоретических основ прогнозирования выполняется много прикладных исследований со все большим акцентом на экономическую значимость метеорологических прогнозов [3, 6, 15, 24, 32, 35].

Отечественная служба погоды, имеющая опыт более ста лет, выполняет в настоящее время сложный комплекс масштабных работ в целях удовлетворения все возрастающих запросов практики к метеорологической науке. Полезность метеорологических прогнозов во многом зависит от полноты их реализации в той или иной области общественного про-

¹ Далее будет использоваться сокращенное название дисциплины — метеорологическое обеспечение.

изводства. Полнота использования прогнозов погоды определяется многими факторами. Основной из них — **степень зависимости потребителя от метеорологических условий**. К другим факторам можно отнести следующие. **Оправдываемость прогнозов**, а значит, и различное доверие к ним. Хотя в настоящее время большинство потребителей используют в практике так называемую стратегию доверия прогнозам [11, 36], тем не менее последствия прогнозов с низкой оправдываемостью вызывает определенную к ним настороженность. **Заблаговременность прогноза** условий погоды, что позволяет в той или иной мере обеспечить эффективные защитные меры. **Экономическая полезность прогнозов**, необходимость оценки которой является основным условием современного использования прогнозов.

Известно, что в 30-е годы суточные прогнозы погоды оправдывались на 5—7% лучше инерционных. После внедрения карт барической топографии их оправдываемость по отношению к инерционным повысилась на 10—15%. Впоследствии численные прогностические карты способствовали повышению оправдываемости прогнозов на 18—20% относительно инерционных [28]. Однако абсолютный прирост оправдываемости, естественно, не может уже значительно увеличиваться во времени. В обозримом будущем оправдываемость прогнозов погоды достигнет некоторого «уровня стабилизации».

За последние 50 лет оправдываемость краткосрочных прогнозов возросла примерно на 30—35% и в настоящее время составляет 85—90% [16]. Оставшиеся 10—15% носят сугубо гипотетический характер, ибо время их реализации (достижения) в принципе бесконечно велико. Более того, «уровень стабилизации», вероятно, будет меньше 100%. Следовательно, на длительных отрезках времени придется довольствоваться некоторым достигнутым уровнем оправдываемости прогнозов. Экстенсивный путь метеорологического обеспечения, определявшийся ростом оправдываемости прогнозов, будет тем самым исчерпан. Формируются условия качественно нового этапа метеорологического обеспечения — интенсивного пути его развития, связанного с постоянным развитием технологии использования прогнозов и оценкой их экономического эффекта как меры экономической полезности такого вида метеорологической информации.

Уменьшение все более дорогостоящего прироста успешности прогнозов будет компенсировано более рациональным,

хозяйственным отношением к прогнозам, умением получать за счет прогнозов стабильной оправдываемости постоянно растущий экономический эффект.

Прогнозы погоды становятся полезными только тогда, когда они приобретают конечное целевое назначение, когда синоптику известна (!) область применения прогнозов — конкретная работа потребителя: его технология, география деятельности, зависимость от погоды, возможности защиты и варианты производственных решений. Синоптик обязан понимать экономический смысл прогнозов и принимать квалифицированное участие в разработке регламента решений, т. е. такого свода решений потребителя, который обеспечивал бы потребителю в среднем наибольший выигрыш или наименьшие потери в соответствии с ожидаемой погодой [12].

Все это говорит о необходимости глубокого изучения экономических аспектов метеорологического обеспечения в частности, путем оптимизации прогнозов погоды и методов оценки их экономического эффекта.

1. ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПОЛЕЗНОСТИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

1.1. Зависимость производственной деятельности народнохозяйственных организаций от условий погоды

Влияние погоды на социальную и экономическую сферы общества носит всеобъемлющий характер. Воздействию подвергаются все без исключения области человеческой деятельности, так или иначе связанные с внешними метеорологическими условиями.

Дадим краткую характеристику зависимости некоторых отраслей народного хозяйства от условий погоды.

Сельское хозяйство. Около 30% национального дохода создает сельское хозяйство — одна из важнейших отраслей материального производства. Крупная, технически оснащенная отрасль все же в значительной мере зависит от условий погоды. Это относится и к земледелию, и к животноводству.

В холодный период года условия погоды сказываются, главным образом, на перезимовку озимых культур. В это время возможны такие явления, как вымерзание озимых, их выпревание, образование ледяной корки и вымокание. По-

Года зимнего периода влияет на урожай не только озимых, но и плодовых культур и трав, на отгонное животноводство.

Весной и осенью большое влияние на урожай оказывают заморозки.

Не менее сложные погодные условия, хотя и иного характера, складываются летом. Обильные, продолжительные дожди, сильные ветры, пыльные и черные бури, суховеи и засухи неблагоприятно сказываются на урожайность зерновых и других культур.

К особо опасным агрометеорологическим явлениям условно относятся такие, которые по своей интенсивности и продолжительности могут вызывать повреждения и гибель культур на одной трети посевной площади и более. Это засуха и суховеи, почвенная корка, переувлажнение почвы, заморозки и понижение температуры воздуха в субтропиках до -7°C и ниже и другие.

Энергетика. Это сложный топливно-энергетический комплекс страны. Энергетика включает в себя электроэнергетическую систему (электрические системы и сети теплоснабжения), систему нефте- и газоснабжения, систему угольной промышленности, а также систему ядерной энергетики. Отсюда очевидно столь разнообразное влияние погодных условий на самые различные стороны производственной деятельности той или иной системы.

К особо опасным для энергетики относятся такие метеорологические явления, как грозы, ураганные ветры, гололедные явления значительной интенсивности, дожди с количеством осадков 50 мм и более и продолжительностью более 12 ч, резкие изменения температуры — на 10°C и более, продолжительные высокие и низкие температуры воздуха ($\pm 30^{\circ}\text{C}$).

Транспорт. Все виды транспорта: железнодорожный, автомобильный, речной, морской, воздушный и трубопроводный — испытывают различную степень воздействия метеорологических условий. В этой ранжировке их можно расставить так: авиация, морской и речной флот, железнодорожный транспорт, автомобильный транспорт и мало еще изученный в этом отношении трубопроводный. В экономике страны лидирующее положение занимает железнодорожный транспорт, однако наиболее зависимым от погоды является воздушный. Транспорт не только выполняет производственные связи, т. е. является непосредственно производственной сферой, но и остается потребителем различных видов топлива, энергии

и других производственных ресурсов. Отсюда очевидна необходимость изучения влияния метеорологических условий на работу транспорта и разработка технологии рационального использования прогнозов погоды.

В табл. 1.1 приведены некоторые особо опасные явления погоды для транспорта.

Таблица 1.1

Особо опасные явления погоды для транспорта

Вид транспорта	Особо опасные явления погоды
Авиация	На аэродроме. Высота нижней границы облаков, горизонтальная дальность видимости, направление и скорость ветра ниже установленного минимума. Вертикальный сдвиг ветра (более 6 м/с на 30 м). В полете. Грозы, болтанка, обледенение опасной интенсивности.
Морской флот	Волнение и скорость ветра выше критических значений, установленных для данного типа судов. Плохая видимость (менее 1000 м) в тумане, в осадках, в снежных «зарядах», в парении моря; сильные нажимные подвижки льда, вызванные штормовым ветром; обледенение судов. Сопутствующие гидрологические явления: цунами, тягун и сгонно-нагонные явления в портах и в иных местах стоянки судов.
Речной флот	Волнение и скорость ветра, плохая видимость, значительное и продолжительное понижение температуры ниже 0 °С и другие явления (приведенные выше для морского флота), наблюдающиеся на реках, озерах, заливах и других акваториях, включая места стоянки и базирования.
Железнодорожный транспорт	Снегопады (20 мм и более за сутки), мокрый снег (15 мм и более за сутки), метели (продолжительностью 12 ч и более при скорости ветра 15 м/с и более), гололед и изморозь (соответственно 20 и 15 мм и более), продолжительная сильная жара и морозы (± 30 °С и более), ливни (50 мм и более за сутки), видимость (менее 1000 м). Сопутствующие явления: обвалы, оползни и сходы снежных лавин на горных участках дороги; размыв и разрушение железнодорожного полотна при наводнениях и селях.

Вид транспорта	Особо опасные явления погоды
Автомобильный транспорт	Снегопады и метели, гололедные явления, плохая видимость в явлениях (туман, осадки, пыльная буря). В горных районах те же явления, что и для железнодорожного транспорта.
Трубопроводный транспорт	Для нефте- и газопроводов: грозы, продолжительные сильные жара и морозы ($\pm 30^\circ\text{C}$ и более); метели (продолжительностью 12 ч и более при скорости ветра 15 м/с и более); гололед, длительные дожди (7 мм и более за 12-ч и менее).

Строительные организации. Промышленное, коммунальное и жилищное строительство находится в сильной зависимости от условий погоды. Строительство любого объекта, а в последующем и эксплуатация некоторых из них (например, ЛЭП) требуют знания неблагоприятных метеорологических условий, при которых нарушается ход строительных работ или режим эксплуатации и потребитель несет соответствующие потери.

В холодный период года: подвоз строительных материалов и конструкций, работа кранов и других подъемных механизмов, монтажные и другие работы нарушаются вследствие таких явлений погоды, как метели (при скорости ветра 15 м/с и более), снегопады (15 мм и более за сутки), гололедные явления, скорость ветра 12 м/с и более, резкие и значительные понижения температуры.

В теплый период года: скорость ветра (12 м/с и более с учетом порывов при шквалах), ливни (15 мм и более за 12 ч).

Сопутствующие опасные явления отмечаются в горных районах (обвалы, оползни и сходы снежных лавин) и в прибрежных зонах (паводки и наводнения).

Коммунальное хозяйство. Это совокупность предприятий и служб, выполняющих обслуживание населения городов и других населенных пунктов. Оно включает в себя энергетические предприятия (электрические, газовые, теплофикационные распределительные сети, ТЭЦ и другие), обслуживающие промышленные объекты и население, транспорт (сухопутный и водный) местного значения.

В целях обеспечения нормального функционирования коммунального хозяйства постоянно используется информация о текущих и ожидаемых метеорологических условиях. При некоторых из них нарушается работа отдельных звеньев коммунального хозяйства.

Зимой в случае снегопадов и метелей сильно осложняется работа городского транспорта. То же отмечается при гололедице.

Большую сложность в работе коммунального хозяйства вызывают такие явления, как сильные ветры, ливни, сели и оползни, паводки и сгонно-нагонные колебания уровня воды. Резкие колебания температуры сказываются на работе теплоэлектроцентралей и других предприятий.

Как видим, воздействие неблагоприятных погодных условий на производственную деятельность различных отраслей народного хозяйства отличается многообразием и сложностью.

Прогнозы погоды и предупреждения об ОЯ и СГЯ¹ позволяют потребителю провести упреждающие стихию мероприятия — необходимые предупредительные защитные меры.

1.2. Оправдываемость прогнозов как мера их полезности

Оправдываемость метеорологических прогнозов есть степень адекватности прогнозируемых и фактических условий погоды. Чтобы установить оправдываемость прогнозов необходимо выбрать некоторую меру оправдываемости, которая позволяла бы дать количественную оценку схожести погод. Иначе, оправдываемость надо измерять, точнее, рассчитывать. В качестве меры оправдываемости используются некоторые показатели или критерии оправдываемости.

В оперативной практике устанавливается оправдываемость отдельных метеорологических величин и явлений погоды за прошедшие прогностические периоды. Для этого используется специальная система оценки как обязательная в оперативной синоптической работе. Она изложена в «Наставлении по службе прогнозов» [26]. Ведется оправдываемость предупреждений об опасных и особо опасных явлениях и условиях погоды.

¹ В 1986 г. категория опасности явления погоды ООЯ заменена на СГЯ — стихийное гидрометеорологическое явление.

Оправдываемость — одно из основных качеств прогнозов, определяющих их применимость. Чем выше оправдываемость прогнозов, тем с большим успехом они используются в деле, на практике, в производстве. Поэтому качество прогнозирования, т. е. оправдываемость прогнозов, иногда заменяют термином успешность прогнозов, подчеркивая тем самым их прикладное назначение.

Исторически сложилось так, что под **оправдываемостью** прогнозов часто понимается их **общая оправдываемость** как отношение числа оправдавшихся прогнозов к общему числу выданных потребителю прогнозов. Оправдываемость прогнозов, однако, имеет более широкое понятие, отражающее различные стороны качества прогнозирования.

Для более глубокой и разносторонней оценки успешности (оправдываемости) прогнозирования отдельных метеорологических величин и явлений погоды используется система критериев, каждый из которых характеризует отдельные стороны качества прогнозирования [2, 18, 23, 27].

В зависимости от принятого числа фаз прогнозируемой метеорологической величины, явления или условий погоды различают **многофазовые** и **альтернативные**, т. е. **двухфазовые** прогнозы. Наиболее полной характеристикой успешности прогнозов является матрица (табл. 1.2) сопряженности прогнозов. Иногда ее просто называют таблицей оправдываемости прогнозов.

Таблица 1.2

Матрица сопряженности многофазового прогноза

Фактическая погода, Φ_i	Прогнозируется, Π_j							$\sum_{j=1}^m n_j$
	Π_1	Π_2	Π_3	...	Π_j	...	Π_m	
Φ_1	n_{11}	n_{12}	n_{13}	...	n_{1j}	...	n_{1m}	n_{10}
Φ_2	n_{21}	n_{22}	n_{23}	...	n_{2j}	...	n_{2m}	n_{20}
Φ_3	n_{31}	n_{32}	n_{33}	...	n_{3j}	...	n_{3m}	n_{30}
...	...	...	...	...	...	...	...	...
Φ_i	n_{i1}	n_{i2}	n_{i3}	...	n_{ij}	...	n_{im}	n_{i0}
...	...	...	...	...	...	...	...	...
Φ_n	n_{n1}	n_{n2}	n_{n3}	...	n_{nj}	...	n_{nm}	n_{n0}
$\sum_{i=1}^n n_i$	n_{01}	n_{02}	n_{03}	...	n_{0j}	...	n_{0m}	N

Частоты оправдавшихся прогнозов ($\Pi_j = \Phi_i$) по всем фазам располагаются вдоль главной диагонали $n_{11} \dots n_{nm}$. Допуская, например, приемлемой некоторую ошибку в пределах плюс-минус одной градации, оправдавшимися будут считаться прогнозы по трем диагоналям $n_{11} \dots n_{nm}$, $n_{12} \dots n_{n-1, m}$, $n_{21} \dots n_{n, m-1}$. Остальные частоты n_{ij} характеризуют неоправдавшиеся прогнозы с различной ошибкой, оцениваемой по различию прогнозируемого и фактического состояния погоды.

Для оценки успешности многофазовых прогнозов необходимо знать «веса» ошибочных прогнозов, их числовую значимость в конкретном целевом решении. **Общая оправдываемость** методических прогнозов p_m находится как сумма произведений совместных вероятностей p_{ij} осуществления сопряженности $\Pi_j \sim \Phi_i$ на их «веса». Преимущество методического прогноза определяется по отношению к инерционному, случайному или климатическому прогнозу. Чтобы установить общую оправдываемость инерционных прогнозов $p_{ин}$, необходимо по фактическим данным построить матрицу сопряженности инерционных прогнозов. Это будет таблица с отличными от таблицы 1.2 частотами распределения и характерным свойством несмещенности прогнозов, когда $n_{10} = n_{01}$, $n_{20} = n_{02}$, ..., $n_{n0} = n_{0n}$.

Случайное распределение частот находится по данным табл. 1.2, что в итоге позволяет установить общую оправдываемость случайных прогнозов $p_{сл}$. Разности $\Delta p_m^{ин} = p_m - p_{ин}$, $\Delta p_m^{сл} = p_m - p_{сл}$ показывают преимущество, т. е. успешность оперативных методических прогнозов.

Другим показательным критерием является количество прогностической информации. Он устанавливается на основании ряда положений статистической теории информации [41, 42]. В качестве меры неопределенности осуществления фаз состояния погоды используется статистическая энтропия. Климатическая энтропия $H(\Phi)$, или безусловная энтропия характеризует меру неопределенности осуществления фаз состояния погоды с их известной климатической вероятностью

$$H(\Phi) = - \sum_{i=1}^n p(\Phi_i) \lg_p(\Phi_i), \quad (1.1)$$

где $p(\Phi_i) = n_{i0}/N$, а n — число фаз состояния погоды (выбранной метеорологической величины, явления погоды).

На основании данных табл. 1.2 формулу (1.1) можно записать в частотах следующим образом:

$$H(\Phi) = - \left(\frac{n_{10}}{N} \lg \frac{n_{10}}{N} + \frac{n_{20}}{N} \lg \frac{n_{20}}{N} + \dots + \frac{n_{n0}}{N} \lg \frac{n_{n0}}{N} \right). \quad (1.2)$$

Если правая колонка в табл. 1.2 характеризует природное распределение фаз, то все колонки, расположенные слева от нее, есть результат прогноза, т. е. некоторого условия (исходного состояния погоды, метода прогнозирования, прогностических указаний, правил), которое принимается в качестве базового, определяющего возможное осуществление фаз погоды. Тогда условная энтропия (энтропия по прогнозу) записывается так:

$$H(\Pi) = - \sum_{j=1}^m p(\Pi_j) H(\Pi_j / \Phi_i), \quad (1.3)$$

где $p(\Pi_j) = n_{0j}/N$ — вероятность осуществления прогноза данной фазы (данного текста); $H(\Pi_j / \Phi_i)$ — частная энтропия данной фазы (данного текста).

Используя частоты n_{ij} осуществления сопряженности $\Pi_j \sim \Phi_i$, представленные в табл. 1.2, формулу (1.3) можно записать в виде

$$\begin{aligned} H(\Pi) = & - \left[\frac{n_{01}}{N} \left(\frac{n_{11}}{n_{01}} \lg \frac{n_{11}}{n_{01}} + \frac{n_{21}}{n_{01}} \lg \frac{n_{21}}{n_{01}} + \dots + \frac{n_{n1}}{n_{01}} \lg \frac{n_{n1}}{n_{01}} \right) + \right. \\ & + \frac{n_{02}}{N} \left(\frac{n_{12}}{n_{02}} \lg \frac{n_{12}}{n_{02}} + \frac{n_{22}}{n_{02}} \lg \frac{n_{22}}{n_{02}} + \dots + \frac{n_{n2}}{n_{02}} \lg \frac{n_{n2}}{n_{02}} \right) + \dots \\ & \left. + \frac{n_{0m}}{N} \left(\frac{n_{1m}}{n_{0m}} \lg \frac{n_{1m}}{n_{0m}} + \frac{n_{2m}}{n_{0m}} \lg \frac{n_{2m}}{n_{0m}} + \dots + \frac{n_{nm}}{n_{0m}} \lg \frac{n_{nm}}{n_{0m}} \right) \right]. \quad (1.4) \end{aligned}$$

В качестве единицы измерения энтропии принимается «дит» (основание логарифма 10) или «бит» (основание логарифма 2).

Количество прогностической информации I есть разность энтропий

$$I = H(\Phi) - H(\Pi). \quad (1.5)$$

Более показательной характеристикой качества прогнозирования является информационное (энтропическое) отношение

$$v = \frac{H(\Phi) - H(\Pi)}{H(\Phi)} = 1 - \frac{H(\Pi)}{H(\Phi)}. \quad (1.6)$$

Оно может быть представлено в долях единицы или в процентах.

Альтернативные прогнозы относятся к самой простой форме прогнозирования. Прогнозируется одна из двух возможных фаз состояния погоды. Как правило, таким образом прогнозируются явления погоды.

Матрица сопряженности альтернативных прогнозов имеет вид (табл. 1.3):

Таблица 1.3

Матрица сопряженности альтернативного прогноза
(таблица оправдываемости)

Фактическая погода, Φ_i	Прогнозируется, Π_j		$\sum_{j=1}^m n_{ij}$
	Π	$\bar{\Pi}$	
Φ	n_{11}	n_{12}	n_{10}
$\bar{\Phi}$	n_{21}	n_{22}	n_{20}
$\sum_{i=1}^n n_i$	n_{01}	n_{02}	N

Частоты n_{11} и n_{22} относятся к оправдавшимся прогнозам соответственно наличия и отсутствия явления, а n_{12} и n_{21} — к неоправдавшимся, ошибочным прогнозам. При этом n_{12} — число прогнозов — пропусков явления, а n_{21} — число прогнозов — перестраховок.

Для построения матрицы сопряженности (табл. 1.3) альтернативного прогноза (оперативного методического), например, прогноза гроз, используются уже имеющиеся тексты прогнозов (на 24, 12, 9, 6 или 3 ч) и фактически наблюдавшиеся условия погоды. Каждому прогнозу будет соответствовать одно из четырех возможных сочетаний $\Pi_j \sim \Phi_i$: 1) явление прогнозировалось Π и наблюдалось Φ , т. е. $\Pi \sim \Phi$ — этот случай фиксируется в ячейке « n_{11} »; 2) явление прогнозировалось Π , но не наблюдалось $\bar{\Phi}$, т. е. $\Pi \sim \bar{\Phi}$ — в ячейке « n_{21} »; 3) явление не прогнозировалось $\bar{\Pi}$, но фак-

тически наблюдалось Φ , т. е. $\bar{П} \sim \Phi$ — в ячейке « n_{12} » и 4) явление не прогнозировалось $\bar{П}$ и не наблюдалось $\bar{\Phi}$, т. е. $\bar{П} \sim \bar{\Phi}$ — в ячейке « n_{22} ». В итоге в каждой ячейке подсчитывается общее число зафиксированных сочетаний (сопряжений), что и дает соответствующее число случаев или соответствующую повторяемость сочетаний $\bar{П}_j \sim \Phi_i$: n_{11} , n_{21} , n_{12} и n_{22} .

Наряду с оперативными методическими прогнозами (табл. 1.3) следует подготовить матрицу сопряженности стандартного прогноза, который принимается в качестве реперного (тривиального) прогноза, необходимого для сравнения. Без знания оправдываемости таких прогнозов любая оценка экономического эффекта оперативных методических прогнозов будет неполноценной. В табл. 1.4 приведены условия выбора стандартного прогноза.

Таблица 1.4

Выбор стандартного прогноза при оценке экономического эффекта оперативного методического прогноза

Стандартный прогноз, на который может ориентироваться потребитель при отсутствии методического	Оперативный методический прогноз, составляемый в прогностическом подразделении для данного потребителя
1	2
Случайный прогноз	Прогнозы дискретных условий погоды с большой пространственно-временной изменчивостью гроз, града, тумана... и других кратковременных явлений.
Инерционный прогноз	Прогнозы условий погоды, обладающих в определенной мере свойством инерционности температуры и влажности воздуха, давления воздуха, ветра, пыльных бурь, метелей, облачности слоистых форм, обложных осадков, гололедных явлений и др.
Климатические прогнозы (ориентация на климатические вероятности) 12-месячные	В прогностическом подразделении имеются сведения о вероятностях осуществления того или иного явления ($p_{кл} = n_{10}/N$ и $p_{кл} = 1 - p_{кл}$). Рассматриваются применительно ко всем явлениям и условиям погоды наряду со случайными и инерционными прогнозами.

Оперативный методический прогноз (альтернативный или многофазовый) рассматривается как прогностическая информация более высокого порядка. Такие прогнозы принимаются за новую информацию — **новый** вариант. Стандартный прогноз — информация, требующая замены, так называемый **базовый** вариант.

Если потребитель использует прогнозы явления, то очевидны два крайних состояния: явление прогнозируется — одна градация, явление не прогнозируется — другая, то же и по фактическим условиям. В итоге получаем таблицу сопряженности (типа табл. 1.3) второго порядка.

При составлении планов-схем метеорологического обеспечения потребителем предусматривается уточнение критических условий заданной метеорологической величины. Так, например, при прогнозе скорости ветра устанавливается некоторое опасное (штормовое) значение скорости ветра, по достижении и более которой потребитель обязательно принимает защитные меры.

Следовательно, многофазовые прогнозы метеорологических величин (ветра, температуры и т. п.) в итоге часто можно обобщить в виде таблицы сопряженности второго порядка. Одна из градаций будет включать опасные условия, другая — неопасные. Итак, большое число градаций можно свести к двум. Это наиболее распространенная, по причине простоты представления, форма сопряженности прогнозов и фактических условий как явлений погоды, так и метеорологических величин. Надо полагать, что потребителю, который получает из прогностического центра прогнозы в виде двух фаз и постоянно доверяет прогнозам, более просто использовать также два альтернативных решения: ориентироваться согласно прогнозу на неблагоприятную или благоприятную погоду.

Таблица сопряженности случайного прогноза рассчитывается на основании таблицы сопряженности методического прогноза, уже ранее рассчитанной (табл. 1.3). При этом используется известное условие [19]: если между признаками Π и Φ не существует никакой связи, то доля частот с признаком Φ среди частот, имеющих признак Π , должна быть равна доле частот с признаком Φ среди частот, обладающих признаком $\bar{\Pi}$. Итак, Π и Φ независимы, если

$$\frac{n_{11}}{n_{01}} = \frac{n_{12}}{n_{02}} = \frac{n_{10}}{N} \quad (1.7)$$

Аналогично (1.7) можно записать

$$\frac{n_{21}}{n_{01}} = \frac{n_{22}}{n_{02}} = \frac{n_{20}}{N}. \quad (1.8)$$

На основании (1.7) и (1.8) для случайных событий (прогнозов) $(n_{ij})_{\text{сл}}$ получим:

$$\begin{aligned} (n_{11})_{\text{сл}} &= \frac{n_{01} \cdot n_{10}}{N}, & (n_{12})_{\text{сл}} &= \frac{n_{02} \cdot n_{10}}{N}, \\ (n_{21})_{\text{сл}} &= \frac{n_{01} \cdot n_{20}}{N}, & (n_{22})_{\text{сл}} &= \frac{n_{02} \cdot n_{20}}{N}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

В равенствах (1.9) правая часть — значения частот сопряженности n_{ij} методического прогноза (табл. 1.3). Частоты $(n_{ij})_{\text{сл}}$ представляются в итоге в виде таблицы сопряженности. Следует помнить, что суммы частот для Φ , т. е. n_{10} , и для $\bar{\Phi}$, т. е. n_{20} , остаются одинаковыми при методическом, случайном или инерционном прогнозе, поскольку отражают реальное распределение фаз явлений (условий погоды).

Построение таблицы сопряженности инерционного прогноза основано на сравнении фактических данных, имеющих в начале и в конце периода прогнозирования. Такая последовательная сопоставительная оценка значений «прогноз — факт» может оказаться сравнительно трудоемкой при больших статистических рядах и сопровождаться ошибками. Поэтому в целях удобства можно предложить следующий способ построения таблицы сопряженности инерционного прогноза.

Пусть имеется исходная таблица, содержащая прогнозистические (согласно методическому прогнозу) и фактические сведения за выбранный период времени (сезон, полугодие и т. п.). Представим эту выборку следующим образом (табл. 1.5).

При составлении таблицы сопряженности методического прогноза сравнение выполнялось «по горизонтали» — P_j и Φ_i . Поскольку инерционный прогноз требует только исходных фактических данных, то построение таблицы сопряженности инерционного прогноза выполняется «по вертикали» — по значениям Φ_i .

Естественно полагать, что общее число инерционных прогнозов $N_{\text{ин}}$ равно общему числу методических прогнозов N . Для этого необходимо в начале ряда Φ_i добавить одно зна-

Таблица 1.5

Выборка прогностических и фактических данных

Дата	Прогноз, P_j	Фактически было,
...	...	Φ_0
1.01.86	P_1	Φ_1
2.01.86	P_2	Φ_2
3.01.86	P_3	Φ_3
...	...	...
...	...	...
86	P_m	Φ_n
...	...	Φ_{n+1}

чение предшествующей фактической погоды Φ_0 , допустив $\Phi_0 = \Phi_1$, или в конце ряда последующей погоды Φ_{n+1} , опять-таки приняв $\Phi_{n+1} = \Phi_n$.

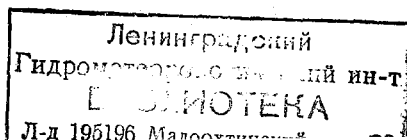
При инерционных и методических прогнозах n_{10} и n_{20} — значения одни и те же. Прогноз, при котором повторяемость текстов (граданий, фаз) совпадает с их природной повторяемостью, называется **несмещенным**. Поскольку инерционные прогнозы обладают свойством несмещенности, то для них $n_{10} = n_{01}$, $n_{20} = n_{02}$.

Остается установить одно из значений частот ошибок или n_{12} , или n_{21} . Здесь следует рекомендовать выбрать по фактическим данным (табл. 1.5) число ошибок-пропусков n_{12} при инерционном прогнозе (за исходной благоприятной погодой следовала неблагоприятная). Такая выборка уже не представляет особого труда.

Из условия несмещенности прогнозов следует также, что $n_{21} = n_{12}$. Поскольку суммы для P и $\bar{P}$, Φ и $\bar{\Phi}$ известны, то соответственно определяются $n_{11} = n_{10} - n_{12}$ и $n_{22} = n_{20} - n_{21}$.

Содержательность и оправдываемость прогнозов имеют основное значение в практике их использования.

Можно выделить три категории качества и ценности прогнозов: **информативность**, **полезность** и **экономическую эффективность**. Каждая последующая категория включает в себя предыдущие. Информативность и полезность прогнозов погоды определяют их экономическую полезность (экономический эффект и экономическую эффективность).



Информативность устанавливается посредством оценки количества прогностической информации I (1.5). Тем самым дается характеристика и качества прогнозов погоды. Необходимо учитывать при этом, что информативность прогнозов тем больше, чем больше дробление прогнозируемой погоды на отдельные фазы (высокая дискретность) и чем больше отрезки времени их осуществления. Более информативные прогнозы позволяют глубже осмыслить возможности их практического использования.

В качестве частных показателей информативности используются также различные критерии, например, критерий надежности прогнозов по Н. А. Багрову (H), критерий точности прогнозов по А. М. Обухову (Q) и другие.

Полезность является целевой категорией ценности. Любая метеорологическая информация в той или иной мере полезна, так как не только расширяет область познания, но и позволяет более целенаправленно решать практические задачи. Полезность прогнозов возрастает по мере повышения их информативности. Кроме того, полезность прогноза возрастает по мере того, насколько больше в прогнозе указано о метеорологических условиях, наиболее важных с точки зрения потребителя. Следовательно, при одной и той же информативности полезность прогнозов может быть разной.

Как видим, ценность информации, в частности прогнозов, выражается через ее информативность — содержательность прогностических сведений, а по отношению к производственным объектам — через их пользу. Полезность прогнозов, таким образом, определяется посредством ее реализации. Полезность прогностической информации может со временем меняться. Техническое совершенствование потребителя сопровождается изменением требований к прогнозам. Возникает необходимость прогнозирования новых характеристик погоды, более «тонких» для данного потребителя. Следовательно, прогнозы прежнего качества будут уже терять свою полезность.

Итак, не касаясь научной полезности прогнозов, видим, что их **потребительская полезность** определяется не только качеством прогнозов, но и научно-техническим уровнем области их использования. Полезность прогнозов можно оценить только в системе «прогноз — потребитель».

Следует рассматривать **познавательную**, или **научную**, и **экономическую полезность** прогнозов погоды. Для оценки научной полезности прогнозов можно использовать некото-

рые показатели. Один из таких показателей запишем в виде [35]

$$\kappa = 1 - \frac{\sigma(x_n)}{\sigma^{\wedge}(x)}, \quad (1.10)$$

где $\sigma(x_n)$ — среднеквадратическая ошибка прогнозируемой метеорологической величины; $\sigma^{\wedge}(x)$ — среднеквадратическая ошибка стандартного прогноза (случайного, инерционного, климатологического).

Среднеквадратические ошибки прогнозируемых величин записываются следующим образом:

$$\sigma(x_n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_n - x_i)^2},$$

$$\sigma^{\wedge}(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{x} - x_i)^2}.$$

Здесь x_n — значение метеорологической величины по оперативному методическому прогнозу, $\hat{x}$ — значение метеорологической величины по стандартному прогнозу, x — фактическое значение метеорологической величины на период прогноза.

Анализируя формулу (1.10), находим следующее:

$\kappa = 1$ — полностью адекватная информация;

$0 < \kappa < 1$ — частично адекватная информация;

$\kappa = 0$ — адекватная информация отсутствует;

$\kappa < 0$ — противоположная информация.

Другой показатель полезности прогнозов (через их адекватность) можно записать так:

$$\kappa_0 = 1 - \frac{\sigma(x_n)}{\sigma(x)}, \quad (1.11)$$

где $\sigma(x)$ — среднеквадратическая фактическая изменчивость, равная

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_0 - x_i)^2},$$

где x_0 — фактическое значение метеорологической величины в исходный момент прогнозирования (рис. 1.1).

На основании анализа формул (1.10) и (1.11) видно, что чем меньше среднеквадратическая ошибка прогноза, тем он более информативен и полезен.

Общей мерой полезности прогнозов является выгода (успех), которую они позволяют извлечь в той или иной области человеческой деятельности: в социальной, экономической, а также при решении специальных задач, например, оборонных. Не всегда представляется возможным дать количественную оценку выгоды. Особенно это касается социальной и военной областей.

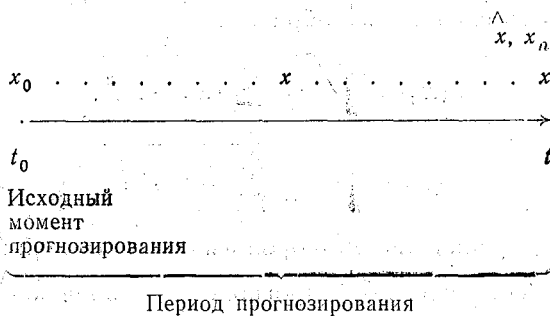


Рис. 1. Исходные данные для расчета среднеквадратических отклонений

В производственной сфере, во всех отраслях народного хозяйства полезность прогнозов находится посредством определения их производственной или экономической полезности: **экономического эффекта и экономической эффективности.**

Следует заметить, что качество прогнозов, их содержательность еще не достаточно полно отвечают запросам производства. Причины этого в основном следующие:

1. В природе атмосферных процессов еще многое остается не известным. Региональные и локальные факторы формирования погоды придают дополнительную сложность разработке прогнозов.

2. Количество и качество метеорологической информации, которую можно использовать для прогноза, постоянно растут. В то же время в прогностических целях эффективно используется небольшая часть этой информации.

3. Старые методы и способы прогнозирования часто заменяются новыми. Число прогностических разработок все

более растет. Однако всеобъемлющий синтез опыта прогнозирования пока еще не осуществлен. Недостаточно используется комплексирование прогнозов [15]. Более того, результаты оперативного прогнозирования погоды, к сожалению, в основном не сохраняются.

4. Содержательная часть прогнозов, отвечающая требованиям потребителя, меняется медленно.

Все вопросы, связанные с оценкой экономического эффекта метеорологических прогнозов, мы рассмотрим отдельно.

1.3. Функции полезности и формы их представления

В зависимости от ожидаемой погоды потребитель может принять одно из возможных производственных решений d_j в расчете на максимальную полезность следующих за ними хозяйственных действий. Последующая за этим фактическая погода Φ_i покажет меру полезности или ошибочности решений и в конечном счете полученный хозяйственно-экономический эффект θ_{ij} .

Таким образом, интересующая нас функция полезности записывается в виде

$$\theta_{ij} = \theta(\Phi_i, d_j). \quad (1.12)$$

Функция полезности (1.12) характеризует экономические последствия хозяйственных (производственных) решений потребителя. Она может быть выражена как в аналитической, так и в табличной дискретной форме. Аналитическое представление функции полезности возможно в том случае, если, с одной стороны, допускается непрерывное воздействие метеорологической величины на хозяйственный объект, с другой, — плавное регулирование потребителем производственного процесса.

Вид функции полезности определяется спецификой хозяйственной деятельности потребителя и степенью зависимости его от условий погоды — «чувствительностью» потребителя к изменениям погодных условий.

Более распространенной пока является дискретная форма представления функции полезности. В этом случае величина полезности определяется как результат сочетаний хозяйственных решений d_j и возможных состояний погоды Φ_i и может быть представлена в виде прямоугольной матрицы (табл. 1.6).

Таблица 1.6

Функция полезности, заданная в матричной форме

Фактическая погода, Φ_i	Решения потребителя d_j в расчете на ожидаемую погоду Π_j						
	d_1	d_2	d_3	...	d_j	...	d_m
Φ_1	θ_{11}	θ_{12}	θ_{13}	...	θ_{1j}	...	θ_{1m}
Φ_2	θ_{21}	θ_{22}	θ_{23}	...	θ_{2j}	...	θ_{2m}
Φ_3	θ_{31}	θ_{32}	θ_{33}	...	θ_{3j}	...	θ_{3m}
...	...	...	...	...	...	...	...
Φ_i	θ_{i1}	θ_{i2}	θ_{i3}	...	θ_{ij}	...	θ_{im}
...	...	...	...	...	...	...	...
Φ_n	θ_{n1}	θ_{n2}	θ_{n3}	...	θ_{nj}	...	θ_{nm}

Полезность предпринятых действий потребителя может иметь двоякое смысловое значение: выигрыш, когда погодные условия постоянно приносят тот или иной прямой доход, потери, когда погодные условия являются постоянной метеорологической помехой и производство несет те или иные издержки по метеорологическим причинам. Величины θ_{ij} , таким образом, приобретают смысл выигрыша или потерь.

Помимо этого можно ввести понятие **метеорологических потерь** [11, 12], определив их следующим образом:

если величины θ_{ij} имеют смысл выигрышей, то метеорологические потери s_{ij}^* определяются по формуле

$$s_{ij}^* = \max_j \theta_{ij} - \theta_{ij}, \quad (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}); \quad (1.13)$$

если же θ_{ij} — потери, то метеорологические потери определяются как

$$s_{ij}^* = \theta_{ij} - \min_j \theta_{ij} \quad (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}). \quad (1.14)$$

Например,

θ_{ij} — выигрыш

Φ_i	d_j		
	d_1	d_2	d_3
Φ_1	35	20	5
Φ_2	20	40	10
Φ_3	5	20	45

θ_{ij} — потери

Φ_i	d_j		
	d_1	d_2	d_3
Φ_1	5	20	35
Φ_2	20	10	40
Φ_3	45	20	5

Отсюда соответственно:

метеорологические
потери s_{ij}^*

Φ_i	d_j		
	d_1	d_2	d_3
Φ_1	0	15	30
Φ_2	20	0	30
Φ_3	40	25	0

метеорологические
потери s_{ij}^*

Φ_i	d_j		
	d_1	d_2	d_3
Φ_1	0	15	30
Φ_2	10	0	30
Φ_3	40	15	0

Как видим, функция полезности может быть представлена в виде функции метеорологических выигрышей, доходов или функции метеорологических потерь (1.14).

В дальнейшем мы будем пользоваться не матрицами метеорологических потерь, а просто матрицами потерь потребителя, элементы которой есть $\theta_{ij}=s_{ij}$. Матрица потерь $\|s_{ij}\|$ разрабатывается совместно с потребителем или заранее задается в виде таблицы потерь. Наиболее широкое использование в практике находит функция потерь, а не функция доходов. Это объясняется тем, что на производственные работы большинства потребителей наибольшее влияние оказывают метеорологические помехи, а нормальные условия погоды в основном отвечают уровню нулевых потерь.

Функция потерь, представляемая в дискретной форме, записывается в виде матрицы потерь порядка $n \times m$ (аналогично табл. 1.2). Величина потерь определяется степенью ошибочности в решениях потребителя ориентироваться на ожидаемую погоду Π_j . При осуществлении иной погоды потери потребителя будут определяться разностью значений Φ_i и Π_j заданной метеорологической величины X :

$$s_{ij} = s(\Phi_i, d_j) = s[\Phi(X) - \Pi(X)]. \quad (1.15)$$

Допускается, как видим, что потери s_{ij} не зависят от самой метеорологической величины и при любых ее количественных значениях определяются только величиной и знаком ошибки $\Delta(\Phi, \Pi)$.

Функции потерь вида (1.15) называются разностными. Потери потребителя могут быть выражены линейной, квадратической, линейно-квадратической, экспоненциальной и иной формой зависимости от ошибки $\Phi(X) - \Pi(X)$ [12].

Наиболее часто используется линейная функция потерь.

$$s(\Phi, d) = \begin{cases} A_1(\Phi - \Pi), & \text{если } \Phi > \Pi \\ A_2(\Pi - \Phi), & \text{если } \Phi \leq \Pi \end{cases}$$

где A_1 и A_2 — цена соответственно отрицательных и положительных ошибок прогноза.

Все сказанное имеет отношение к широкому кругу альтернативных прогнозов и решений. Для большей наглядности речь в основном пойдет об опасных явлениях и условиях погоды и соответственно проведении или непроведении защитных мер.

1.4. Потери потребителя по метеорологическим условиям и организация защитных мер

Экономическими параметрами, определяющими целевое использование метеорологической информации, являются: **убытки** — потери по метеорологическим причинам, **предварительные затраты** на предупредительные меры и **прибыль** (доход или экономия), получаемая потребителем.

Убытки (потери) s по метеорологическим причинам — это любые материальные потери или финансовые затраты, так или иначе связанные с неблагоприятными условиями погоды или неумелым использованием благоприятной погоды. Такого рода убытки можно разделить на **прямые** s_n (разрушения, повреждения, затопления, снижение урожая и т. п.), **косвенные** s_k (потери на предприятиях в связи с отключением участка ЛЭП, отсюда потери на взаимозависимых предприятиях и др.). В конечном счете те и другие убытки могут привести к невыполнению плановых заданий предприятий.

Убытки классифицируются следующим образом: **возможные** u_v , **предотвратимые** u_n , **реальные** u_p , **потенциально предотвратимые** u_{np} и **непредотвратимые** u_{nn} [35].

Величина **реальных убытков** зависит: от интенсивности атмосферного явления (степени его воздействия и продолжительности); «чувствительности» потребителя к неблагоприятной погоде; масштабов объекта и его стоимости; заблаговременности предупреждений и оправдываемости прогнозов; организации и эффективности защитных мер; умения оптимального планирования хозяйственной деятельности с учетом ожидаемой погоды.

Предотвращение убытков по метеорологическим причинам требует предварительных затрат. Такие затраты проводятся как в системе Госкомгидромета, так и самим потребителем прогностической информации.

Для разработки всех видов прогнозов необходима обширная, постоянно обновляющаяся текущая информация. Затраты здесь выражаются в виде стоимости наблюдений за погодой.

Известно, например, [31], что среднегодовая стоимость метеорологической станции II разряда составляет около 24 тыс. руб., а единичное метеорологическое наблюдение, включая обработку полученных данных, оценивается примерно в 8 руб. В работе [37] дана развернутая характеристика основных статей расхода на получение, передачу и обработку метеорологической информации, необходимой для составления прогнозов, а также стоимость основных видов работ в прогностическом подразделении (табл. 1.7).

Потребитель получает прогностическую информацию ежедневно, а в случае угрозы опасных или особо опасных

Таблица 1.7

Стоимость синоптического материала в Ленинградском гидрометцентре СЗУГКС по затратам на наблюдения, передачу, обработку, анализ и прогноз за 1983 г.

Виды работ (статьи затрат)	Затраты за определенные отрезки времени		
	год, тыс. руб.	сутки, руб.	один срок наблю- дения, руб.
1. Наблюдения на одной метеорологической станции	24,4	67	8
2. Наблюдения на одной судовой метеорологической станции	30,4	83	10
3. Наблюдения на всех четырех судах на каждом из шести морей	729,3	1998	250
4. Наблюдения на одной аэрологической станции	223,4	612	153
5. Сбор информации в ЛГМЦ всеми каналами связи	1297,3	3554	444
6. Наноска, построение и анализ синоптических карт, составление прогнозов	203,8	558	70

явлений погоды — предупреждения о них. Все затраты на прогностическую информацию предусматривают предотвращение или снижение потерь по метеорологическим причинам. Это значит, что, следуя прогнозу, потребитель принимает необходимые для этого производственные решения, включающие, в случае штормовых ситуаций, те или иные защитные меры.

В качестве защитных мер, принимаемых потребителем, рассматриваются: заградительные сооружения от возможных стихийных бедствий; простой транспорта, стационарных установок и прекращение отдельных видов работ в целях исключения убытков от неблагоприятных условий погоды; защита сельскохозяйственных угодий от градобития, заморозков и других опасных явлений; заблаговременная организация людских ресурсов и технических средств (аварийных бригад) в целях проведения защитных работ в период действия стихийных условий погоды; замена видов работ и другие.

Перечисленные защитные меры можно разделить на **прямые** и **косвенные**. Прямые защитные меры — это заградительные сооружения, защитные конструкции различного целевого назначения (от селей, снежных лавин, заморозков и т. п.), повышение напряжения. Косвенные меры защиты связаны с частичными производственными затратами времени, финансовых средств в целях снижения прямых потерь.

Эффективность защитных мер может быть оценена через отношение $M = u_n / u_v$.

Очевидно, что при

$M = 0$ — убытки непредотвращенные ($u_n = 0$);

$1 > M > 0$ — частично предотвращенные ($u_n > 0$);

$M = 1$ — полностью предотвращенные ($u_n = u_v$).

Предотвращенные убытки рассматриваются и оцениваются в основном через стоимость:

- 1) сбереженной, сохраненной от потерь сельскохозяйственной продукции;
- 2) сбереженных энергоресурсов (различных видов топлива или тепла и электроэнергии);
- 3) предотвращенных повреждений или разрушений производственных и иных объектов, механизмов, транспортных средств и т. п.;

4) сбереженного времени, выразившегося сокращением или предотвращением простоев на производстве и транспорте, минимизацией времени производственных операций, учитывающих погоду.

Стоимость общественных физических ценностей может быть выражена здесь в рублях или в натуральном измерении.

Если потребитель не пользуется никакой метеорологической информацией или ею пренебрегает, то он несет наибольшие потери вследствие неучета погоды. Использование прогнозов позволяет ему избежать в ряде случаев непредвиденных потерь.

В реальных условиях потребитель несет потери как по вине прогнозиста, допускающего ошибки-пропуски (n_{12}) и ошибки страховки (n_{21}) (табл. 1.3), так и по собственной вине — по причине недостаточной организации защитных мер.

В дальнейшем будем полагать, что потребитель, ориентируясь на ту или иную погоду, принимает соответствующее производственное решение в расчете на то, чтобы избежать значительных потерь. Естественнo, его решения не всегда удачны. Возможные при этом потери, как отмечалось в п. 1.3, обусловлены несоответствием принимаемых потребителем решений d_i фактически наблюдавшейся затем погоде Φ_i .

Будем в дальнейшем рассматривать преимущественно дискретную форму представления потерь s_{ij} по метеорологическим условиям в виде матрицы потерь порядка $n \times m$. Такая матрица может быть рассчитана на основании значений потерь s_{ij} , полученных непосредственно от потребителя (табл. 1.8).

Элементы матрицы потерь s_{ij} имеют следующий смысл. Например, величина s_{12} характеризует потери, которые несет потребитель в том случае, если он ориентируется на фазу погоды Π_2 , принимая соответственно решение d_2 , а фактически погода была иная — Φ_1 . Надо полагать, что величины потерь s_{ij} при $d_i = \Phi_i$ будут минимальными ($s_{11} \div s_{nm}$).

Функция потерь, как видим, описывает экономическое значение метеорологической информации, используемой в производственных целях.

В практике широко используются матрицы потерь 2-го порядка ($n = m = 2$). (табл. 1.9)

Матрица потерь s_{ij} потребителя

Таблица 1.8

Фактическая погода, Φ_i	Потребитель ориентируется на осуществление погоды P_j и принимает решение d_j						
	d_1	d_2	d_3	...	d_j	...	d_m
Φ_1	s_{11}	s_{12}	s_{13}	...	s_{1j}	...	s_{1m}
Φ_2	s_{21}	s_{22}	s_{23}	...	s_{2j}	...	s_{2m}
Φ_3	s_{31}	s_{32}	s_{33}	...	s_{3j}	...	s_{3m}
...	...	...	...	...	...	...	...
Φ_i	s_{i1}	s_{i2}	s_{i3}	...	s_{ij}	...	s_{im}
...	...	...	...	...	...	...	...
Φ_n	s_{n1}	s_{n2}	s_{n3}	...	s_{nj}	...	s_{nm}

Матрица потерь s_{ij} при альтернативном прогнозе

Таблица 1.9

Фактическая погода, Φ_i	Потребитель ориентируется на осуществление погоды P_j и принимает решение d_j	
	d	$\bar{d}$
Φ	s_{11}	s_{12}
$\bar{\Phi}$	s_{21}	s_{22}

В табл. 1.9 принято: d и $\bar{d}$ — хозяйственные решения потребителя, принимаемые соответственно в расчете на неблагоприятную (нерабочую, нелетную, неходовую, опасную для производственных операций) погоду или благоприятную погоду для данной производственной деятельности; Φ и $\bar{\Phi}$ — фактическая реализация погоды: соответственно неблагоприятная и благоприятная.

Рассмотрим содержание элементов матрицы s_{ij} в общем виде.

Ориентируясь на неблагоприятную погоду, потребитель принимает защитные меры d , стоимость которых s_{11} руб. Затем наступила действительно неблагоприятная погода Φ и защитные меры оказались оправданными. Величина s_{11} в табл. 1.9 приходится на сочетание $d \sim \Phi$.

При тех же начальных условиях d осуществилась иная погода — благоприятная для выполнения производственных работ. Принятые, как и ранее, защитные меры оказались

в этом случае неоправданными, а стоимость их составила s_{21} . В табл. 1.9 это соответствует сочетанию $d \sim \bar{\Phi}$. Заметим, что если меры защиты постоянно идентичны и надежны, то $s_{21} = s_{11}$. Согласно терминологии, известной в теории операций, это случай так называемой «ложной тревоги», поступившей к потребителю.

Потребитель ориентируется на благоприятную погоду и принимает решение $\bar{d}$ продолжать выполнение данного вида работ или иных операций. Фактически же наступила неблагоприятная (это может быть и особо опасная) погода Φ . В этом случае неизбежны потери (реальные, прямые и косвенные), исчисляемые в s_{12} руб., или издержки иного характера. В теории операций такую ситуацию для потребителя называют «пропуск цели». Величина потерь s_{12} зависит, как отмечалось выше, от ряда метеоролого-производственных факторов.

При той же ориентации $\bar{d}$ на благоприятную погоду и ее осуществлении $\bar{\Phi}$ потери по метеорологическим причинам отсутствуют $s_{22} = 0$.

Элементы s_{ij} матрицы потерь выражают в денежном или натуральном измерении.

Один и тот же потребитель может иметь несколько матриц потерь 2-го порядка. Это зависит от тех метеорологических величин и явлений погоды, которые учитываются им раздельно в своей производственной деятельности. Например, для разного типа воздушных судов должны быть построены матрицы потерь преимущественно по четырем характерным состояниям погоды: высоте нижней границы облаков, метеорологической дальности видимости, скорости ветра (с учетом направления относительно взлетно-посадочной полосы) и грозам. Применительно к морскому порту для участка погрузо-разгрузочных работ матрицы потерь могут быть построены применительно к скорости ветра, видимости, осадкам, подъемам уровня воды.

Матрица потерь порядка $n \times m$, выработанная совместно с потребителем, является долговременной, не требующей замены в течение ряда лет. Изменение ее содержания будет связано лишь с существенной модернизацией производства или изменением масштабов работ. Это потребует определенных уточнений матрицы потерь.

1.5. Хозяйственные решения и стратегия потребителя

Производственная польза метеорологических прогнозов определяется их качеством (успешностью прогноза) и эффективностью решений потребителя, будь это защитные или иные меры подстройки к текущей или будущей погоде.

В настоящее время решения потребителя вытекают из двух часто встречающихся отношений потребителя к прогнозам. Метеорологические прогнозы или вовсе не используются, или им доверяют полностью и безоговорочно. Некоторая промежуточная область решений должна отражать оптимальное, более выгодное использование прогнозов.

Решение потребителя d есть любое производственное действие его, направленное на обязательный учет текущей и прогнозической информации в целях снижения потерь по метеорологическим причинам. Решение потребителя — это одноразовое его поведение. Получив необходимую метеорологическую информацию, потребитель каждый раз принимает решение о дальнейших действиях по выполнению хозяйственных мероприятий. Оно может касаться прекращения или начала определенных работ или производственных операций, внесения корректив в ход их проведения. Решения принимаются потребителем заблаговременно в зависимости от продолжительности и характера предстоящих работ.

Множество решений Ω_d называется **регламентом действий** потребителя [12]. Если множество дискретно, значит, существует набор, перечень всевозможных хозяйственных действий d_j , а если непрерывно, то устанавливается некоторая область допустимых действий. Период действия решений потребителя соответствует периоду прогнозирования. Короткопериодные решения отвечают постоянным оперативным хозяйственным мероприятиям. Крупные разовые хозяйственные мероприятия требуют принятия решения с большой заблаговременностью.

Решение потребителя должно обеспечивать ему минимум потерь или максимум выгоды. Такое решение называется **оптимальным**. Потребитель стремится к этому всякий раз, однако не каждое его решение оказывается наилучшим. Фактическая погода Φ_i подтверждает или опровергает решения потребителя d_j . Повторяемость подтверждений или опровержений характеризует удачность решений потребителя в целом. На основании метеорологической информации потребитель стремится выработать вполне определенную ли-

нию своего поведения, т. е. **производственную стратегию** (S). Если решение потребителя есть его одноразовое поведение, то стратегия — некоторый принцип его поведения, определенный алгоритм действий, направленный на оптимизацию производственных мероприятий. Такое понимание стратегии потребителя прогноза впервые было дано в работе [11]. **Оптимальной стратегией** (S_0) называется такая, которая при известном наборе фаз погоды и принимаемых решений обеспечивает потребителю минимум потерь или максимум выгоды в своей производственной деятельности за счет учета погодных условий. Оптимальная стратегия означает вести дело в производственных условиях более эффективно: менее убыточно или более выигрышно, в целом наиболее успешно выполнять производственные задания и планы.

Таким образом, стратегия есть некоторый общий принцип принятия решений на основе метеорологической информации, которым постоянно руководствуется потребитель. Из ряда (множества) возможных решений d_j выбираются такие, которые в любом случае соответствуют определенным ожидаемым условиям погоды. Стратегия потребителя как некая система выбора решения, совокупность правил или алгоритм определяется содержанием поступающей к нему прогностической информации.

Стратегия потребителя называется **чистой**, если регулирование производственного процесса выполняется однозначно: ожидаемой конкретной погоде соответствует всегда одно и то же действие. Например, в соответствии с ожидаемой температурой воздуха устанавливается вполне определенный режим работы паровых котлов на теплоэлектроцентрали.

Стратегия потребителя называется **смешанной**, или **рандомизированной**, если ожидаемой конкретной погоде задается набор возможных решений, представляемый обычно в виде распределения вероятностей различных действий. В своей производственной практике потребитель может ориентироваться на климатические повторяемости $p(\Phi_i, d_j) = p(\Phi_i)$ и выбрать ту или иную стратегию. Такие стратегии называются **недифференцированными**. В случае, если потребитель будет ориентироваться на тексты прогнозов, каждый из которых имеет несколько реализаций $p(\Phi_i, d_j)$, то выбор стратегии будет уже определяться заданием прогностической информации. Такие стратегии назовем **дифференцированными**.

1.6. Оптимальное использование альтернативных и многофазовых прогнозов

С помощью выбранной стратегии действий потребитель стремится к тому, чтобы с учетом предстоящей погоды получить максимальный хозяйственный выигрыш: или максимальный доход, или минимальные потери.

Выбор стратегии, в свою очередь, предполагает сравнение результативности нескольких из них. **Оптимальной стратегией** будет такая, которая обеспечивает ему самый выгодный (по заданному критерию оптимальности) производственный результат из всех допустимых для него метеоролого-экономических стратегий. В качестве меры сравнения используются так называемые **критерии оптимальности**. В зависимости от специфики производства, т. е. особенностей выполняемых хозяйственных задач, они могут быть различны.

Поскольку потери s_{ij} потребителя по метеорологическим причинам являются наиболее очевидными последствиями его зависимости от погоды, то очевидно полагать, что оптимальная стратегия будет обеспечивать их минимум.

Пусть известна матрица потерь $s = s(\Phi_i, d_j)$ и матрица вероятностей осуществления текстов прогнозов (матрица сопряженности прогнозов), которая характеризует повторяемость различных сочетаний прогноза Π_j и осуществления Φ_i фаз погоды. Воспользуемся байесовским подходом в оценке средних (в статистическом смысле) потерь

$$R = M_s \{ s(\Phi, d) \}, \quad (1.16)$$

где M_s — оператор вероятностного осреднения (математическое ожидание) при заданной стратегии S .

Для дискретных условий

$$R_s = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m s(\Phi_i, d_j) p_s(\Phi_i, \Pi_j) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m s_{ij} p_{ij}. \quad (1.17)$$

Лучшая из k стратегий будет та, для которой величина R_s меньше, иначе, удовлетворяется условие

$$R_{s_0} = \min_{\langle s \rangle} R_s, \quad (1.18)$$

где $\langle s \rangle$ — множество стратегий.

Установить оптимальную стратегию можно и по такому критерию, как средний выигрыш:

$$G_s = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_{ij} p_{ij} \quad (1.19)$$

Лучшая стратегия S удовлетворяет следующему условию:

$$G_{s_0} = \max_{\langle s \rangle} G_s \quad (1.20)$$

Используя равенства (1.12) и (1.13), можно показать [12], что R_s и G_s связаны соотношением

$$G_s = W - R_s, \quad (1.21)$$

где W — некоторая константа, равная

$$W = \sum_{i=1}^n \max g(\Phi_i, d_j) p(\Phi_i).$$

На основании (1.21) следует, что оптимальная стратегия, минимизирующая средние потери, одновременно максимизирует средний выигрыш.

Для иных хозяйственных задач в качестве критериев оптимальности используются, такие, как дисперсия потерь, вероятность крупных потерь и другие [4].

В дальнейшем в целях выбора оптимальной стратегии мы будем использовать байесовские средние потери.

Рассмотрим наиболее простую процедуру принятия оптимального решения, когда потребитель использует альтернативный прогноз.

Упрощая схемы обозначения, зададим матрицу потерь $\|s_{ij}\|$

$$\|s_{ij}\| = \begin{array}{c|cc} & d & \bar{d} \\ \hline \Phi & s_{11} & s_{12} \\ \Phi & s_{21} & s_{22} \end{array} \quad (1.22)$$

и матрицу сопряженности прогнозов $\|n_{ij}\|$

$$\|n_{ij}\| = \begin{array}{c|cc|c} & \Pi & \bar{\Pi} & \\ \hline \Phi & n_{11} & n_{12} & n_{10} \\ \bar{\Phi} & n_{21} & n_{22} & n_{20} \\ \hline & n_{01} & n_{02} & N \end{array} \quad (1.23)$$

Матрица (1.23) есть то же, что и таблица сопряженности (табл. 1.3).

Матрицу сопряженности (1.23) представим в виде матрицы совместных вероятностей $p_{ij}=n_{ij}/N$

$$\|p_{ij}\| = \begin{array}{c|cc|c} & \Pi & \bar{\Pi} & \\ \hline \Phi & p_{11} & p_{12} & p_{10} \\ \bar{\Phi} & p_{21} & p_{22} & p_{20} \\ \hline & p_{01} & p_{02} & 1 \end{array} \quad (1.24)$$

из которой может быть получена матрица условных вероятностей с элементами $q_{ij}=p_{ij}/p_{0j}$ вида

$$\|q_{ij}\| = \begin{array}{c|cc|c} & \Pi & \bar{\Pi} & \\ \hline \Phi & q_{11} & q_{12} & \\ \bar{\Phi} & q_{21} & q_{22} & \\ \hline & 1 & 1 & \end{array} \quad (1.25)$$

Величины p_{i0} в (1.24) характеризуют природные климатические вероятности выбранных двух состояний (фаз) погоды, а p_{0j} — вероятности их текстов прогнозов. Как правило, они различаются между собой, что связано с особенностями используемой прогностической методики (смещенностью прогнозов).

В итоге информация, представленная в (1.22)—(1.25), достаточна для нахождения оптимальной стратегии в рамках байесовского подхода. Будем полагать, что в распоряжении потребителя такая информация имеется. Получив

текст прогноза Π , потребитель, если он пользуется правом выбора, может принять одно из двух решений, за каждым из которых последует соответствующее производственное действие. Допустим, он остановился на решении $d=d_1$ — потребитель доверяет прогнозу, ожидает неблагоприятную погоду $\Pi=\Pi_1$ и будет принимать защитные меры. Его средние потери при условии (d_i, Π_j) составят величину

$$R_{11} = R(d_1 / \Pi_1) = \sum_{i=1}^2 s_{1i} q_{1i} = s_{11} q_{11} + s_{21} q_{21}, \quad (1.26)$$

а во втором случае при $d=d_2$ (потребитель не доверяет тексту прогноза) они будут равны

$$R_{21} = R(d_2 / \Pi_1) = \sum_{i=1}^2 s_{i2} q_{1i} = s_{12} q_{11} + s_{22} q_{21}. \quad (1.27)$$

При использовании текста прогноза $\Pi=\Pi_2$ соответственно получим:

в случае $d=d_1$

$$R_{12} = R(d_1 / \Pi_2) = \sum_{i=1}^2 s_{i1} q_{i2} = s_{11} q_{12} + s_{21} q_{22}; \quad (1.28)$$

в случае $d=d_2$

$$R_{22} = R(d_2 / \Pi_2) = \sum_{i=1}^2 s_{i2} q_{i2} = s_{12} q_{12} + s_{22} q_{22}. \quad (1.29)$$

Обобщая (1.26) — (1.29), можно записать

$$R_{kj} = \sum_{i=1}^{n=m} s_{ik} q_{ij}, \quad (1.30)$$

где k — порядковый номер решения потребителя.

На основании (1.26) — (1.29) составим матрицу условных (систематических) потерь

$$\| R_{ij} \| = \begin{array}{c|cc} & \Pi_1 & \Pi_2 \\ \hline d_1 & R_{11} & R_{12} \\ d_2 & R_{21} & R_{22} \end{array} \quad (1.30')$$

и выделим минимальное значение R_{ij} из каждого столбца.

Если действительно при текстах прогноза Π и $\bar{\Pi}$ элементы матрицы условных потерь (1.30) соответственно R_{11} и R_{22} принимают минимальное значение, то, следовательно, решения d при тексте Π и $\bar{d}$ при тексте $\bar{\Pi}$ являются оптимальными решениями.

Поскольку, кроме оперативных методических прогнозов, потребитель может ориентироваться на нематодические прогнозы (климатологические, инерционные, случайные), то сразу возникает необходимость проверить такую возможность с точки зрения последующего выбора оптимальной стратегии.

Для сравнения воспользуемся таким критерием, как минимальные средние потери, которые может нести потребитель при выбранной им прогностической информации (методических или стандартных прогнозах, табл. 1.4).

Из (1.30) следует, что если R_{11} и R_{22} минимальны при текстах прогноза Π и $\bar{\Pi}$, то минимальные средние потери при использовании методического прогноза составят

$$R_m = \sum_{j=1}^2 p_{0j} R_{\text{мин}}(\Pi_j) = p_{01} R_{11} + p_{02} R_{22} \quad (1.31)$$

или, воспользовавшись (1.23) и раскрыв R_{11} и R_{22} , запишем

$$R_m = \frac{n_{01}}{N} \left(s_{11} \frac{n_{11}}{n_{01}} + s_{21} \frac{n_{21}}{n_{01}} \right) + \frac{n_{02}}{N} \left(s_{12} \frac{n_{12}}{n_{02}} + s_{22} \frac{n_{22}}{n_{02}} \right). \quad (1.32)$$

Рассчитаем R_{ij} , аналогично (1.26) — (1.29), для инерционных и случайных прогнозов. Для чего, естественно, воспользуемся одной и той же матрицей потерь (s_{ij}) , представленной в виде (1.22), и матрицами сопряженности инерционного и случайного прогнозов (см. раздел 1.2).

При использовании инерционных прогнозов

$$\| R_{\text{ин}}, ij \| = \begin{array}{c|cc} & \Pi_1 & \Pi_2 \\ \hline d_1 & (R_{\text{ин}})_{11} & (R_{\text{ин}})_{12} \\ d_2 & (R_{\text{ин}})_{21} & (R_{\text{ин}})_{22} \end{array} \quad (1.33)$$

Минимальные общие средние потери будут равны

$$R_{\text{ин}} = \sum_{j=1}^2 (p_{\text{ин}})_{0j} R_{\text{ин мин}}(\Pi_j), \quad (1.34)$$

а в случае $(R_{ин})_{11} < (R_{ин})_{21}$ и $(R_{ин})_{22} < (R_{ин})_{12}$

$$R_{ин} = (p_{ин})_{01} (R_{ин})_{11} + (p_{ин})_{02} (R_{ин})_{22} . \quad (1.35)$$

Аналогично при использовании случайных прогнозов (1.9)

$$\| R_{сл, ij} \| = \begin{array}{c} d_1 \\ d_2 \end{array} \left| \begin{array}{cc} \Pi_1 & \Pi_2 \\ (R_{сл})_{11} & (R_{сл})_{12} \\ (R_{сл})_{21} & (R_{сл})_{22} \end{array} \right| . \quad (1.36)$$

а минимальные средние потери составят

$$R_{сл} = \sum_{j=1}^2 (p_{сл})_{0j} R_{сл \text{ мин}} (\Pi_j) \quad (1.37)$$

Если $(R_{сл})_{11} < (R_{сл})_{21}$ и $(R_{сл})_{22} < (R_{сл})_{12}$, то

$$R_{сл} = (p_{сл})_{01} (R_{сл})_{11} + (p_{сл})_{02} (R_{сл})_{22} . \quad (1.38)$$

Рассмотрим далее ситуацию, когда потребитель может ориентироваться на климатические вероятности p_{i0} , представленные в (1.23) или (1.24) [13]. Он может придерживаться при этом одной из двух климатологических стратегий, которые характеризовались ранее, как недифференцированные стратегии. Одна из них $S_{кл 1}$ состоит в том, что будучи чрезмерно чувствительным к некоторым неблагоприятным условиям погоды, потребитель постоянно применяет защитные меры (например, $s_{11} = s_{21}$ в (1.22)). Это положение можно интерпретировать так: потребитель постоянно ориентируется на текст прогноза Π . Тогда, с учетом (1.23) или (1.24), его средние потери составят величину

$$R_{кл 1} = p_{10} s_{11} + p_{20} s_{21} . \quad (1.39)$$

Другая стратегия $S_{кл 2}$ может быть характерна для тех потребителей, для которых потери от редко встречающихся неблагоприятных условий погоды столь незначительны, что ими можно пренебречь и никаких защитных мер не принимать. Иначе, потребитель устанавливает для себя постоянный текст прогноза — Π . В этом случае средние потери будут равны:

$$R_{кл 2} = p_{10} s_{12} + p_{20} s_{22} . \quad (1.40)$$

Самое доступное и простое условие хозяйственного отношения потребителя к прогнозам состоит в том, чтобы им постоянно доверять. Такое поведение потребителя по отношению к прогнозам вытекает из естественной принадлежности оперативных прогнозов и называется **стратегией доверия**. Здесь важно помнить то, что стратегия доверия означает постоянную ориентацию потребителя на условные средние потери R_{11} и R_{22} , которые и будут являться составляющими расчета общих средних потерь.

Рассмотрим при этом условии выбор оптимальной стратегии. В качестве стандартного прогноза будем принимать тот, который отвечает содержанию прогноза (табл. 1.4). В случае, если используется прогноз метеорологической величины или состояний погоды, обладающих достаточной метеорологической инерцией, то в качестве стандартных прогнозов, эффективность которых сравнивается с методическим, будут инерционный и климатологический (кл. 1 или кл. 2). В итоге будем иметь три величины: R_m (согласно (1.31)), $R_{ин}$ (1.35)), а также $R_{кл1}$ или $R_{кл2}$ (1.39) — (1.40)).

Оптимальной будет та стратегия, которая обеспечивает данному потребителю минимум из всех величин R . Неравенство, например, вида $R_m < R_{ин} < R_{кл1}$ говорит в пользу оперативных методических прогнозов. Ориентация на них и будет составлять искомую оптимальную стратегию.

В том случае, когда потребитель использует прогнозы альтернативных состояний погоды (грозы, град и т. п.), то в качестве стандартных прогнозов будут рассматриваться случайный и климатологический (кл. 1 или кл. 2). Так же как и в предыдущем случае, будут сопоставляться три величины: R_m , $R_{сл}$ (согласно (1.38)), а также $R_{кл1}$ или $R_{кл2}$. Наименьшая из них и будет определять оптимальную стратегию.

Следует теперь обратить внимание на одно важное обстоятельство. Стратегия доверия далеко не всегда может быть оптимальной. Это обусловлено как недостаточной успешностью прогнозов, так и соотношением между затратами потребителя на предупредительные меры ($s_{11} = s_{21}$) и возможными потерями (s_{12}).

В общем случае, действительно, следует пользоваться соотношениями (1.31), (1.34) или (1.37), когда выбор минимума потерь $R_{минj}$ при данном прогнозе P_j не связывается с априорным условием доверия. Это положение более оче-

видно при использовании многофазовых прогнозов. Правда, на сегодня реальные матрицы метеорологических потерь размерностью $n=m>2$ разработаны недостаточно. В связи с этим имеются рекомендации [3] относительно осторожного подхода к построению и использованию матриц потерь, содержащих более трех фаз погоды. Тем не менее для некоторых потребителей соответствующие матрицы потерь необходимы.

Допустим, в частности, имеется пятифазовая матрица сопряженности прогнозов и соответствующая ей матрица потерь (табл. 1.10 и 1.11).

Таблица 1.10

Матрица сопряженности прогнозов

Фактическая погода, Φ_i	Прогнозы, Π_j					m $\sum_{j=1} n_j$
	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5	
Φ_1	n_{11}	n_{12}	n_{13}	n_{14}	n_{15}	n_{10}
Φ_2	n_{21}	n_{22}	n_{23}	n_{24}	n_{25}	n_{20}
Φ_3	n_{31}	n_{32}	n_{33}	n_{34}	n_{35}	n_{30}
Φ_4	n_{41}	n_{42}	n_{43}	n_{44}	n_{45}	n_{40}
Φ_5	n_{51}	n_{52}	n_{53}	n_{54}	n_{55}	n_{50}
$\sum_{i=1}^n n_i$	n_{01}	n_{02}	n_{03}	n_{04}	n_{05}	N

Матрица потерь, отвечающая пятифазовому прогнозу, должна иметь вид (табл. 1.11).

Таблица 1.11

Матрица потерь s_{ij}

Фактическая погода, Φ_i	Решения потребителя d_j в расчете на ожидаемую погоду				
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
Φ_1	s_{11}	s_{12}	s_{13}	s_{14}	s_{15}
Φ_2	s_{21}	s_{22}	s_{23}	s_{24}	s_{25}
Φ_3	s_{31}	s_{32}	s_{33}	s_{34}	s_{35}
Φ_4	s_{41}	s_{42}	s_{43}	s_{44}	s_{45}
Φ_5	s_{51}	s_{52}	s_{53}	s_{54}	s_{55}

На основании общего условия (1.30) рассчитываются все 5×5 значений условных потерь R_{ij} (табл. 1.12).

Таблица 1.12

Матрица условных средних потерь $R_{ij} = R(d_i, \Pi_j)$

Производственное решение, d_i	Прогноз, Π_j				
	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5
d_1	R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{14}	R_{15}
d_2	R_{21}	R_{22}	R_{23}	R_{24}	R_{25}
d_3	R_{31}	R_{32}	R_{33}	R_{34}	R_{35}
d_4	R_{41}	R_{42}	R_{43}	R_{44}	R_{45}
d_5	R_{51}	R_{52}	R_{53}	R_{54}	R_{55}

Пусть в идеальном варианте все элементы R_{ij} , расположенные по главной диагонали $R_{ij/i=j}$, иначе $R_{11} \div R_{55}$, имеют минимальные значения при данном тексте прогноза Π_j .

Потребитель, разумеется, вправе полагать, что при работе в режиме доверия прогнозам его потери, в конечном счете, будут приходиться на значения $R_{ij/i=j}$. На этом основании рассчитать минимальные общие потери

$$R_m = \sum_{j=1}^m p_{0j} R_{\min}(\Pi_j). \quad (1.41)$$

В случае пятифазового прогноза

$$\begin{aligned} R_m &= \sum_{j=1}^m p_{0j} R_{ij/i=j}(\Pi_j) = \\ &= p_{01} R_{11} + p_{02} R_{22} + p_{03} R_{33} + p_{04} R_{44} + p_{05} R_{55}. \end{aligned} \quad (1.42)$$

В реальных условиях такой исход по причине несовершенства прогнозов маловероятен. В общем случае для каждого текста прогноза найдется иное минимальное значение R_{ij} , которое отвечает определенному решению (действию) потребителя d_i и квалифицируется как оптимальное. Пусть в матрице (R_{ij}) выделены (в табл. 1.12 жирными линиями) $R_{\min}$ при заданном Π_j . Тем самым устанавливается наилуч-

шее (оптимальное) хозяйственное решение при известном тексте прогноза, полученном потребителем. Запишем это положение в виде некоторого правила, алгоритма поведения потребителя — его стратегии применительно к оперативным методическим прогнозам [12]:

Прогноз	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5
Оптимальное решение	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5

В итоге в этом уже неидеальном варианте (табл. 1.12) минимальные средние потери потребителя согласно (1.41) в случае пятифазового прогноза составят такую величину:

$$R_m = p_{01} R_{21} + p_{02} R_{22} + p_{03} R_{33} + p_{04} R_{34} + p_{05} R_{55}. \quad (1.43)$$

Поскольку многофазовые прогнозы содержат указания о метеорологических величинах, например, о температуре, о скорости ветра и т. п., обладающих свойством инерции, то, следовательно, полученное R_m в (1.43) необходимо сравнить с аналогично полученными минимальными средними потерями при использовании инерционных прогнозов $R_{ин}$. Таким образом, будет установлена **оптимальная стратегия** при реализации многофазовых прогнозов.

1.7. Оценка экономического эффекта и экономической эффективности оперативных методических прогнозов

Как уже отмечалось, экономическая полезность прогнозов зависит от их успешности, степени зависимости потребителя от погоды и эффективности защитных мер — подстройки к погоде.

На основании изложенного выше рассмотрим **метеоролого-экономическую модель** оценки экономического эффекта использования оперативных прогнозов.

Предварительно отметим некоторые условия, при которых, как говорят, модель «работает».

Первое. Погода оказывает совокупное воздействие на потребителя. Различные стороны его производственной деятельности становятся зависимыми от метеорологических ве-

личин и явлений погоды. Совершенно очевидно, что это воздействие едино, нераздельно, как нераздельна сама погода.

Второе. Прогноз погоды, составляемый в прогностических подразделениях, представляет собой дифференцированную характеристику ожидаемых метеорологических условий. Получая такой прогноз, потребитель вынужден вести раздельную оценку влияния составляющих погоды на отдельные виды производства. Такие комплексные параметры погоды, как критерий суровости погоды (критерий Бодмана), эффективная температура и другие в прогнозах погоды не содержатся.

Третье. Оценка экономического эффекта прогнозов должна пока вестись раздельно: по видам производственной деятельности и элементам погоды.

Четвертое. В качестве меры результативности решений будем рассматривать потери полезности, иначе говоря, производственные потери по метеорологическим причинам.

Пусть имеется некоторый потребитель, который использует в своей производственной практике прогноз только одной составляющей погоды: метеорологической величины или явления погоды.

Сформулируем алгоритмическую схему оценки экономического эффекта — последовательность расчетных операций, состоящую из трех этапов, применительно к простой альтернативной схеме.

Первый этап. Устанавливается количественное описание зависимости потребителя от погоды. Такое описание предусматривает сбор данных, касающихся стоимости мероприятий в случае $d \sim \Phi$ и $d \sim \bar{\Phi}$, а также «стоимости» прямых потерь в случае $\bar{d} \sim \Phi$. Устанавливается характер подстройки потребителя к ожидаемой погоде, а точнее, к той составляющей ее, которая рассматривается метеорологической помехой. В итоге составляется матрица потерь по метеорологическим причинам (s_{ij}) , отражающая метеоролого-экономический паспорт потребителя, о чем говорилось в п. 1.3 и более развернуто — в п. 1.4.

Второй этап. Устанавливается вероятностное описание влияющих метеорологических характеристик и соответствующей прогностической информации. Иначе говоря, составляются таблица сопряженности n_{ij} методического прогноза рассматриваемой метеорологической величины или явления погоды и таблица сопряженности инерционного

$(n_{ij})_{ин}$ или случайного $(n_{ij})_{сл}$ прогноза (выбор рекомендован в табл. 1.4). Процедура составления таблиц сопряженности довольно проста. Каждому сочетанию (сопряжению) $\Pi_j \sim \Phi_i$ устанавливаются повторяемости n_{ij} , на основании чего рассчитываются совместные вероятности p_{ij} и условные вероятности q_{ij} .

Таким путем категорические прогнозы, представленные в виде матриц сопряженности, получают *post factum* вероятностную характеристику их оправдываемости.

Третий этап. В качестве целевой функции или критерия оптимальности используется минимум средних потерь при оптимальной стратегии (S_0)

$$R_m = R_{s_0} = \min_{\langle s \rangle} R_s, \quad (1.44)$$

или

$$R_{ин} = R_{s_0} = \min_{\langle s \rangle} R_s, \quad (1.45)$$

или

$$R_{сл} = R_{s_0} = \min_{\langle s \rangle} R_s. \quad (1.46)$$

Выполнение (1.46) принципиально невозможно, поскольку никогда доверие случайному прогнозу не может быть лучше, чем одна из климатологических стратегий. Однако последние не всегда приемлемы.

При ориентации на климатологические стратегии

$$R_{кл1} = R_{s_0} = \min_{\langle s \rangle} R_s, \quad (1.47)$$

или

$$R_{кл2} = R_{s_0} = \min_{\langle s \rangle} R_s. \quad (1.48)$$

Заметим, что все перечисленные минимальные средние потери, отвечающие той или иной стратегии, есть потери, приходящиеся на один прогноз (на один случай, на одно действие потребителя).

Ранжировка R_h по мере возрастания потерь во всех стратегиях позволяет выбрать два значения R : одно из них наименьшее, другое — следующее по возрастанию потерь.

В итоге экономический эффект Θ оперативных методических прогнозов рассчитывается по формуле [36]

$$\Theta = \beta N[(R_{ст} - R_m) - 3_{ин}], \quad (1.49)$$

где β — коэффициент долевого участия прогностической информации системы Госкомгидромета в получении экономического эффекта; величины β колеблется в пределах от 0,2 до 1,0 [25], а $\bar{\beta}=0,3$; N — общее число прогнозов, идентичное числу принятых потребителем решений d ; $R_{ст}$ — минимальные общие потери при использовании **стандартного прогноза** ($R_{ин}$, $R_{сл}$, $R_{кл1}$ или $R_{кл2}$) — базовое прогностическое условие (базовый вариант); R_m — минимальные средние потери при использовании **оперативных методических прогнозов** — основное прогностическое условие; $З_{пп}$ — производственные затраты — затраты в системе Госкомгидромета, в частности, в прогностических подразделениях на получение прогнозов [37].

Разность $\Delta R = R_{ст} - R_m$ есть величина снижения потерь, т. е. фактически сбереженные материальные средства или иные материальные ценности за счет использования оперативных методических прогнозов, рассчитанные на один прогноз.

Использование байесовского подхода в решении поставленной задачи позволяет не только определить экономический эффект прогнозов, но и установить оптимальные условия (оптимальную стратегию) использования прогнозов.

В работе [37], выполненной по материалам Ленинградского гидрометцентра (ЛГМЦ), затраты на прогностическую информацию включали стоимость наземных c_1 и аэрологических c_2 наблюдений, а также стоимость оперативной обработки материалов и составление прогнозов c_3 . Затраты на единицу прогностической информации рассчитывались по формуле

$$З_{пп} = \frac{1}{W} \left[\frac{1}{k} (8c_1 + 4c_2) + c_3 \right] \text{ руб./прогноз,} \quad (1.50)$$

где W — число потребителей, $K=10$ — число крупных прогностических центров на ЕТС, использующих те же синоптические материалы.

В итоге была получена стоимость единицы прогностической информации (табл. 1.13).

Анализ формулы (1.49) позволяет дать определение: **экономическим эффектом** $\mathcal{E}$ называется сбереженные материальные средства $\beta N(R_{ст} - R_m)$ за вычетом затрат на их получение $NЗ_{пп}$; **экономическая эффективность** P есть отношение

Таблица 1.13

Стоимость одного прогноза данного вида, руб.

Вид прогноза	Варианты представления синоптических карт		Средняя стоимость
	«факсимильная передача»	«наноска вручную»	
Предупреждение об ОЯ и СГЯ, $Z_{пп}$ (ОЯ)	20	24	22
Специализированный прогноз, $Z_{пп}$ (сп)	16	18	17
Прогноз общего пользования или консультация, $Z_{пп}$ (опк)	14	17	15
Средняя стоимость	17	20	19

экономического эффекта $\mathcal{E}$ к затратам на его получение $N Z_{пп}$. Она рассчитывается по формуле

$$P = \frac{\mathcal{E}}{N Z_{пп}} = \beta \left(\frac{R_{ст} - R_m}{Z_{пп}} - 1 \right). \quad (1.51)$$

Следует иметь в виду, что в случае единичных прогнозов, необходимых для выполнения масштабных хозяйственных мероприятий, составляющие экономического эффекта $\mathcal{E}$ и экономической эффективности P могут быть иными, отличными от тех, которые имеют место в повседневной практике потребителя.

Таким образом, подведем итог следующего характера. Оценка экономического эффекта оперативных метеорологических прогнозов может дать достоверные результаты только в том случае, если выполняются следующие условия.

1. Поскольку осуществление любого прогноза носит вероятностный характер, оценивать экономический эффект единичного прогноза допустимо лишь при условии, что для полученной величины экономического эффекта рассчитывается процент его достоверности. При ином подходе полученный, скажем, большой экономический эффект, может оказаться случайным.

2. Для оценки экономического эффекта необходимо выбирать достаточно продолжительный период времени (месяц, сезон), при котором выбранный непрерывный ряд прогнозов можно считать статистически обеспеченным.

3. На основании выдаваемого потребителю прогностического материала устанавливается уровень отсчета полезности прогнозов — **базовый вариант**. Это могут быть инерционные, случайные или климатические прогнозы. Ориентация на так называемый **нулевой вариант**, когда допускается, что потребитель не располагает никакой метеорологической информацией, в большинстве своем неприемлем. Так, при ориентации на краткосрочный ход погоды, да и на разовый долгосрочный прогноз, потребитель всегда располагает информацией об исходной, текущей погоде, которая и может им использоваться в целях прогноза. Привлечение стандартного прогноза в качестве базового варианта позволяет установить преимущество оперативных методических прогнозов и является стимулом дальнейшего их совершенствования.

4. Учитывая экономические последствия воздействия погоды на потребителя в виде тех или иных потерь, а также тот факт, что эти последствия результат прогнозов, реализация которых пока не идеальна, в качестве основной характеристики экономического эффекта рассматривается уменьшение средних (статистических) потерь ΔR .

5. Желательным условием оценки экономического эффекта оперативных методических прогнозов является учет произведенных на них затрат $Z_{пп}$. Для этого можно воспользоваться данными, представленными в табл. 1.13 или провести уточнения по своему региону.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экономическая полезность прогнозов погоды представляет собой одну из целевых задач метеорологического обеспечения народного хозяйства. В решении этой важной задачи и количественной оценке ее особое значение приобретает разработка частных моделей производственной оптимизации прогнозов и их внедрение в автоматизированные системы управления. Научная технология использования прогнозов позволяет повышать экономию сырья и энергоресурсов, финансовых и иных средств, получать добавочную продукцию при условиях ожидаемой «стабилизации» опрашиваемости прогнозов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анапольская И. Е., Гандин Л. С. Метеорологические факторы теплового режима зданий. — Л.: Гидрометеиздат, 1973. — 239 с.
2. Багров Н. А. К вопросу об оценке гидрометеорологических прогнозов. — Метеорология и гидрология, 1953, № 6, с. 13—16.
3. Багров Н. А. О хозяйственной полезности гидрометеорологических прогнозов. — Труды Гидрометцентра СССР, вып. 159, 1975, с. 101—114.
4. Беленький Д. Х., Жуковский Е. Е. О нескольких подходах к задачам оптимального использования гидрометеорологической информации. — В кн.: Гидрометеорологическое обеспечение народного хозяйства. М., Гидрометеиздат, 1974, с. 125—131.
5. Брагинская Л. Л., Жуковский Е. Е. Методические рекомендации по построению функций полезности (применительно к задачам использования гидрометеорологической информации об опасных явлениях). — Л.: ГГО, 1981. — 15 с.
6. Вимберг Г. П., Брагинская Л. Л., Жуковский Е. Е. Методика определения экономической эффективности использования гидрометеорологической информации в народном хозяйстве. — Л.: Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, РТП, 1985. — 126 с.
7. Голубов Р. С. Метод прогноза тумана с указанием видимости на 6 ч для аэропорта Алма-Ата. — Тр. КазНИИ, 1984, вып. 86, с. 17—26.
8. Городецкий О. А., Сивопляс Г. Г. Организация, планирование гидрометеорологических работ и основы экономики. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 247 с.
9. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Вероятностные метеорологические прогнозы. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 271 с.
10. Грушка И. Г., Дмитренко В. П., Личикаки В. М. Оценка экономической эффективности агрометеорологических прогнозов сева сельскохозяйственных культур. — В сб.: Экономическая эффективность гидрометеорологического обслуживания народного хозяйства. Л., Гидрометеиздат, 1973, с. 139—145.
11. Жуковский Е. Е. К сравнению различных вариантов использования метеорологической информации при принятии хозяйственных решений. — Метеорология и гидрология, 1974, № 2, с. 38—48.
12. Жуковский Е. Е., Чудновский А. Ф. Методы оптимального использования метеорологической информации при принятии решений. Л., Гидрометеиздат, 1978. — 52 с.
13. Жуковский Е. Е. Альтернативные прогнозы: хозяйственная эффективность и требования к успешности. — Научно-техн. бюллетень по агрономической физике, 1979, № 36, с. 29—36.
14. Жуковский Е. Е., Федосеев А. П. Об использовании метеорологических прогнозов при дифференциации азотных подкормок. — Метеорология и гидрология, 1979, № 10, с. 102—110.
15. Жуковский Е. Е. Метеорологическая информация и экономические решения. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 303 с.

16. Израэль Ю. А. Роль атмосферных, геофизических наук в обеспечении Продовольственной программы. — В сб.: Продовольственная программа. Задачи науки. — М.: Наука, 1983, с. 80—86.
17. Израэль Ю. А. О мерах по реализации Продовольственной программы страны. Расширенное заседание коллегии Госплана СССР. — Плановое хозяйство, 1983, № 4, с. 22—36.
18. Карпеев Г. А. О критериях успешности альтернативных прогнозов. — Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1966, т. 11, № 8, с. 777—785.
19. Кендалл М. Дж., Стюарт А. Статистические выводы и связи. — М.: Наука, 1973. — 899 с.
20. Ключкин Н. К. К оценке экономической эффективности гидрометеорологического обслуживания. — Метеорология и гидрология, 1971, № 6.
21. Константинов А. Р. Погода, почва и урожай озимой пшеницы. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 263 с.
22. Мастерских М. А. Экономический эффект прогноза погоды для центральной отопительной системы Москвы. — Тр. Гидрометцентра СССР, 1971, вып. 90, с. 99—105.
23. Монин А. С. Об использовании ненадежных прогнозов. — Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1962, № 2, с. 218—228.
24. Монокрович Э. И. Гидрометеорологическая информация в народном хозяйстве. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 175 с.
25. Методические указания по оценке экономического эффекта от использования гидрометеорологической информации в сельскохозяйственном производстве. Под ред. В. Н. Страшного. — М.: Гидрометеиздат, 1985. — 63 с.
26. Наставление по службе прогнозов. Раздел 2. Служба метеорологических прогнозов. — М.: Гидрометеиздат, 1981, с. 56.
27. Обухов А. М. К вопросу об оценке успешности альтернативных прогнозов. — Изв. АН СССР, сер. геофиз. 1955, № 4, с. 339—349.
28. Петросянц М. А. Пятьдесят лет центру гидрометеорологических прогнозов. — В сб.: Пятьдесят лет центру гидрометеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1979, с. 3—16.
29. Поспелов В. И., Альперович А. И., Полосин М. Д., Чистяков А. Т. Машины для монтажных работ и вертикального транспорта. — М.: Стройиздат, 1981. — 351 с.
30. Синельщиков В. В., Уланова Е. С. Агрометеорологические работы в СССР (1962—1967 гг.). Доклад IV сессии Комиссии по сельскохозяйственной метеорологии. Манила, 1967.
31. Смирнова А. В. Опыт расчета экономической эффективности использования первичных материалов Гидрометфонда СССР. — Сборник работ Ленинградской гидрометеорологической обсерватории, 1978, вып. 10, с. 42—55.
32. Черкавский С. К. Об эффективности гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства. — Метеорология и гидрология, 1973, № 12, с. 93—97.
33. Федосеев А. П. Эффективность минеральной подкормки ячменя в зависимости от погодных условий. — Тр. ИЭМ, 1971, вып. 22.

34. Федосеев А. П. О методах оценки экономической эффективности агрометеорологических рекомендаций сельскому хозяйству. — В сб.: Экономическая эффективность гидрометеорологического обслуживания народного хозяйства. Л., Гидрометеониздат, 1973, с. 131—138.
35. Хандожко Л. А. Метеорологическое обеспечение народного хозяйства. — Л.: Гидрометеониздат, 1981. — 231 с.
36. Хандожко Л. А. Оценка экономического эффекта использования метеорологических прогнозов. — Межвузовский сб. «Физика пограничного слоя атмосферы и ее прикладные аспекты». Л., 1984, вып. 85, с. 133—142 (ЛГМИ).
37. Хандожко Л. А., Ситняковская Н. Г., Смирнова А. В. К вопросу о стоимости прогностической информации. — Сборник работ Ленинградского гидрометеорологического центра, 1985, вып. 2(15), с. 73—86.
38. Хандожко Л. А., Вдовин В. Б. Функции метеорологических потерь теплоэлектроцентралей. — Тр. ГГО, 1986, вып. 507.
39. Хандожко Л. А. Оценка экономической полезности прогноза весенних заморозков. — Сборник трудов по агрономической физике. Л., 1987, с. 10—15.
40. Учет экономической эффективности отдельных видов агрометеорологического обслуживания сельского хозяйства. Методическое пособие. Под ред. Г. В. Руднева. — М.: Гидрометеониздат, 1972.
41. Юдин М. И. Информационный подход к задаче оценивания гидрометеорологических прогнозов в категорической и вероятностной форме. — В кн.: Применение статистических методов в метеорологии. М., Гидрометеониздат, 1978, с. 7—15.
42. Яглом А. М., Яглом И. М. Вероятность и информация. — М.: Наука, 1973. — 511 с.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
1. Общая постановка задачи оценки экономической полезности метеорологических прогнозов	5
1.1. Зависимость производственной деятельности народнохозяйственных организаций от условий погоды	—
1.2. Оправдываемость прогнозов как мера их полезности	9
1.3. Функции полезности и формы их представления	21
1.4. Потери потребителя по метеорологическим условиям и организация защитных мер	24
1.5. Хозяйственные решения и стратегия потребителя	30
1.6. Оптимальное использование альтернативных и многофазовых прогнозов	32
1.7. Оценка экономического эффекта и экономической эффективности оперативных методических прогнозов	41
Заключение	46
Литература	47

Леонид Андреевич Хандожко

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПРОГНОЗОВ ПОГОДЫ

Текст лекций

Редактор О. С. Крайнова

Обложка художника Р. П. Костылева

Сдано в набор 09.06.87. Подписано в печать 02.11.87. М-20602.

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага тип. № 2. Литературная гарнитура.

Печать высокая. Печ. л. 3,1. Уч.-изд. л. 3,0. Тираж 900.

Темплан 1987 г., поз. 249. Заказ 4229. Цена 15 коп.

ЛПИ им. М. И. Калинина.

Межвузовская типография (2) СППО-2 Ленуприздата
191065, Ленинград, ул. Халтурина, 5

1. The first step in the process of the investigation is the identification of the problem. This is done by the investigator who is responsible for the study. The investigator must first identify the problem that is being investigated. This is done by the investigator who is responsible for the study. The investigator must first identify the problem that is being investigated.