

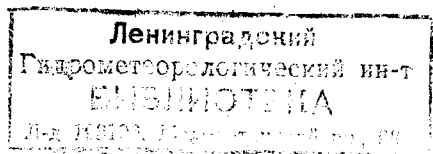
Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Л. А. ХАНДОЖКО

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Учебное пособие



ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени М. И. КАЛИНИНА

ЛЕНИНГРАД
1979

*Одобрено Ученым советом
Ленинградского гидрометеорологического института*

Учебное пособие содержит ряд разделов курса «Гидрометеорологическое обеспечение народного хозяйства», который читается в Ленинградском гидрометеорологическом институте с 1965 г. и в практике работы вузов гидрометеорологического профиля издается впервые.

Оно является продолжением ранее изданного учебного пособия «Оценка успешности метеорологических прогнозов» и предназначено для студентов метеорологической специальности. Кроме того, оно может быть полезно аспирантам, стажерам, оперативным работникам службы погоды, а также руководителям предприятия и диспетчерских служб различных отраслей народного хозяйства.

Ответственный редактор проф. В. И. ВОРОБЬЕВ

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях нет такой отрасли экономики, которая не испытывала бы потребности в прогнозах погоды или иной метеорологической информации. Научно-технический прогресс способствовал не только быстрому развитию гидрометеорологической науки, но и разработке способов экономически выгодного применения гидрометеорологических сведений в народном хозяйстве.

Еще В. Н. Каразин — известный метеоролог начала XIX века — говорил: «Не имею надобности доказывать пользу метеорологии. Наука, которая бы, руководя земледельцем в его работах, предотвращала неурожай, наука, которая могла бы указать время, когда должно ожидать скудных сборов земных произрастаний, и принимать меры, если не к воспрепятствованию их недостатка, то, по крайней мере, к отклонению голода, — такая наука не требует многоречивых похвал».

Прогнозы погоды стали повседневным оперативным материалом в производственной деятельности и важным экономическим фактором развития народного хозяйства. Современное значение службы погоды можно определить словами Д. И. Менделеева: «...у научного изучения предметов две основные и конечные цели: **предвидение и польза**». **Предвидение** относится к области предположения будущего хода атмосферных процессов и погоды. Что касается **пользы**, то эта область экономически оптимального использования в народном хозяйстве метеорологических сведений.

Проектирование и строительство городов, путей сообщения, линий связи и электропередачи, морских портов, аэродромов, курортов и т. д. требуют, кроме прогнозов погоды, самого широкого и целенаправленного учета климатических особенностей и климатических ресурсов.

В современных условиях быстро развивается техника, совершенствуется структура всех отраслей производства и вместе с этим растут запросы к службе погоды. Все это требует более активного участия метеорологов в экономически эффективной реализации метеорологической продукции в народном хозяйстве. В системе гидрометеорологической службы страны вопросам оценки экономической эффективности стало больше уделяться

внимания после Постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР № 760 от 24 сентября 1968 г. Были развернуты широкие исследования по разработке способов рационального использования прогностической информации в производстве и методов оценки ее экономической эффективности. Как писал В. А. Бугаев, «...в настоящее время внимание науки должно быть привлечено не только к тому, как правильно составлять прогнозы, но и как правильно применять их в деле»¹.

Чтобы успешно внедрять метеорологические данные в производство, необходимы знания основных характеристик этого производства, его специфики. Это позволяет правильно оценивать необходимую потребителю метеорологическую информацию: ее объем, точность, критические границы, частоту передачи, форму ее представления и другие параметры.

Для успешной реализации на практике метеорологических сведений недостаточно лишь довести их до потребителя. Возникает необходимость двустороннего обмена информацией между потребителем и метеорологом. Это позволяет оперативно решать, какие действия будут экономически наиболее выгодны при ожидаемых условиях погоды или уже известных климатических параметрах.

Внедрение научных методов использования метеорологической информации и, прежде всего, прогнозов погоды позволяет значительно снизить издержки в экономике страны за счет влияния погодных условий, получить наибольший эффект при заданных затратах или при минимальных затратах. В настоящее время имеются реальные возможности заблаговременно предупредить о наступлении опасных и особо опасных явлений погоды и предотвратить или уменьшить их пагубное влияние. Опыт и интуиция в использовании метеорологической информации должны быть заменены экономическим расчетом.

Научная основа оценки экономической эффективности метеорологической информации продолжает развиваться, базируясь главным образом на положениях теории вероятностей и математической статистике. Некоторые задачи решаются на основании математико-экономического моделирования, теории массового обслуживания, теории оценивания, сетевого планирования и ряда других разделов математики.

Вопросы оценки экономической эффективности метеорологической информации решаются пока раздельно, в зависимости от вида информации и конкретного потребителя. Единой, всеобъемлющей методики в этом отношении нет. Это вносит определенную трудность в изучение этих вопросов.

До сих пор ряд потребителей не имеют необходимых программ, алгоритмов (хотя бы простых) использования метеорологической

¹ Бугаев В. А. Всемирная служба погоды: ее влияние на экономическое и социальное развитие. — «Метеорология и гидрология», 1974, № 1, с. 3—13.

информации. Некоторые из них, производственная деятельность которых немислима без метеорологической информации, еще не располагают достоверными данными о потерях, которые они несут, в зависимости от ориентации на ту или иную информацию службы погоды.

Все это пока не позволяет установить обоснованно предельные границы необходимого и возможного в изложении материала и не может не сказаться на характере изложения и полноте охвата отдельных тем. Некоторые вопросы обобщены впервые, для чего использовались многочисленные отечественные и зарубежные литературные источники.

В последние два десятилетия получили дальнейшее развитие такие формы метеорологического обеспечения народного хозяйства, как специальные рекомендации, касающиеся конкретных действий потребителя, и активные воздействия на атмосферные процессы. Так, служба погоды в оперативном порядке выполняет для морского флота расчеты оптимальных маршрутов следования судов, обеспечивающих наибольшую безопасность и экономичность плавания. Аналогично ведутся расчеты траекторий минимального времени полета самолетов по некоторым маршрутам для гражданской авиации.

В настоящее время успешно осуществляется противоградовая защита сельскохозяйственных культур на некоторых территориях страны методами активных воздействий на кучево-дождевые облака. Успешно проводятся работы по рассеянию туманов на аэродромах и в открытых горных карьерах. На практическую основу поставлены воздействия на облака с целью искусственного получения осадков.

Исследования, выполненные по оценке полезности специальных рекомендаций и активных воздействий, подтверждают их большую экономическую эффективность.

Однако в практике службы погоды приходится сталкиваться с явным недопониманием некоторыми потребителями роли метеорологической информации. В этом отношении следует привести один, на наш взгляд, любопытный факт. В 1947 г. известный английский метеоролог Е. Голд в своей лекции заявил: «Ввиду имеющегося сейчас критического отношения к прогнозам я, прежде чем начать свою лекцию, делаю следующее предложение: я обязуюсь платить 1 гинее¹ всякий раз, когда а) по прогнозу, передаваемому Би-Би-Си в 17 ч 55 мин для юго-восточной Англии, дается дождь, но дождя не будет до следующего дня или б) в прогнозе не дано дождя, но до 18 ч следующего дня будет дождь. Я буду платить всякому лицу, которое, со своей стороны, согласится платить мне полгинее в тех случаях, когда в прогнозе был дан дождь и он действительно был, либо когда

¹ По курсу Госбанка СССР на январь 1978 г. 1 гиней — английская денежная единица — примерно равна 0,95 руб.

в прогнозе не дано дождя и его действительно не было. Условие заключается на год и расчеты будут производиться помесечно». Прошло более 30 лет после обнародования метеорологического «кредо» Е. Голда, но тем не менее лицам, ответственным за производство, и сегодня следует всерьез задуматься о причинах, побудивших его сделать столь расчетливое предложение:

Современный потребитель заинтересован в хорошей информации об ожидаемой погоде. Поступающие к нему метеорологические сведения должны быть умело использованы. Это позволит получить максимальный экономический эффект: наибольшую прибыль или наименьший убыток.

За пятилетие (1966—1970 гг.) экономия средств народному хозяйству СССР за счет использования всех видов гидрометеорологической информации, как указывал Е. К. Федоров¹, составила $3 \div 4$ млрд. рублей при затратах на содержание службы погоды 1,2 млрд. рублей. Определением экономической эффективности метеорологического обеспечения народного хозяйства и национальной экономики занимаются все службы погоды мира.

В нашей стране ряд важных работ этого направления выполнен Н. А. Багровым, Б. Н. Беляевым, Г. А. Карпеевым, К. П. Васильевым, Л. Г. Гандиным, Е. Е. Жуковским и другими. Большое внимание этой проблеме уделяет Гидрометеорологический научно-исследовательский центр СССР. За рубежом эти проблемы обстоятельно обсуждались в работах Дж. Д. Маккуинга, Дж. К. Томпсона, И. И. Грингортена, Б. Дж. Мейсона, А. Х. Мафи и других. Многие вопросы оценки полезности гидрометеорологической информации получают освещение в периодических изданиях ВМО. Значительная методическая работа в этом направлении ведется в Государственном комитете СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды. Под руководством С. К. Черкавского уже многие годы работает Центральная комиссия по методам оценки эффективности использования гидрометеорологических материалов в народном хозяйстве. Выполненные в нашей стране за последние 15—20 лет исследования по оптимальному использованию и оценке экономической эффективности гидрометеорологических материалов в народном хозяйстве нашли обстоятельное обсуждение на двух научных совещаниях в Киеве (18—20 октября 1971 г.) и в Алма-Ате (28—30 мая 1974 г.).

В целях разработки новых методов оценки экономической эффективности гидрометеорологической информации и оптимального использования ее в народном хозяйстве предстоит еще большая работа, включая соответствующую подготовку гидрометеорологических кадров в вузах страны.

¹ Федоров Е. К. Гидрометеорологическая служба на рубеже двух пятилеток. — «Метеорология и гидрология», 1971, № 6, с. 3—14.

Автор считает своим долгом выразить глубокую благодарность ответственному редактору книги проф. В. И. Воробьеву, а также рецензентам проф. Б. Н. Беляеву, доц. Ю. Н. Волконскому и канд. геогр. наук Л. П. Яковлевой за ценные замечания и советы, высказанные в процессе работы над рукописью.

Автор будет признателен за замечания и пожелания, которые просьба присылать по адресу: 195196, Ленинград, Малоохтинский пр., 98, кафедра метеорологических прогнозов.

Глава 1

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

1.1. Виды метеорологических прогнозов

Оперативные метеорологические прогнозы содержат информацию о комплексе ожидаемых значений метеорологических элементов и явлений погоды.

По назначению метеорологические прогнозы делятся на прогнозы общего пользования и специализированные прогнозы. Их общая характеристика и требования к ним рассмотрены в учебном пособии автора¹.

В зависимости от охвата территории различают следующие прогнозы:

1) **прогнозы по району обслуживания** или части района. Они содержат обобщенные прогностические данные по территории;

2) **прогнозы по пункту**. Это локальные прогнозы, которые содержат прогностическую информацию по конкретному пункту в пределах района обслуживания;

3) **прогнозы по маршруту**. Такие прогнозы содержат обобщенные прогностические сведения по всему маршруту или отдельным его частям. Прогнозы по маршруту (для авиации, морского флота, речного транспорта) являются специализированными.

В зависимости от времени действия различают:

1) **краткосрочные прогнозы** — от нескольких часов до 48 часов;

2) **долгосрочные прогнозы** — свыше 48 часов. Они могут быть малой заблаговременности — от 3 до 10 суток и большой заблаговременности — на месяц, сезон или несколько месяцев².

¹ Хандожко Л. А. Оценка успешности метеорологических прогнозов. Л., изд. ЛПИ, 1977. 68 с. (ЛГМИ).

² Термин «заблаговременность», применяемый в долгосрочных прогнозах, является неудачным. В действительности термин «заблаговременность» должен отражать упреждение по времени до начала действия прогноза, но не его продолжительность.

3) **сверхдолгосрочные прогнозы** циркуляционного режима на год или несколько лет вперед. Такие прогнозы являются фоновыми и составляют пока как экспериментальные.

Краткосрочные и долгосрочные прогнозы могут быть как общими; так и специализированными.

Любой из указанных выше прогнозов содержит комплекс метеорологических элементов и явлений погоды. Потребитель использует его в целом или частично по своему усмотрению.

1.2. Параметры оценки экономической эффективности прогнозов погоды

Основными экономическими параметрами, позволяющими оценить производственную полезность прогнозов, являются: **убытки** по метеорологическим причинам, **предварительные затраты** на предупредительные меры и **прибыль** — показатель полезности.

Убыток — материальные потери в народном хозяйстве, в отдельной отрасли или на отдельном производственном объекте, вызванные влиянием неблагоприятных условий погоды или неиспользованием в хозяйственных целях благоприятной погоды.

Различают следующие убытки по метеорологическим причинам:

а) убытки в результате потери и порчи материальных средств вследствие катастроф, значительных повреждений, разрушений и т. п.;

б) убытки в результате простоя — материальные потери, вызванные непроизводительными простоями транспорта, стационарной техники, производственных объектов и т. п., что ведет к снижению производительности труда;

в) убытки, связанные с дополнительной затратой времени, средств, топлива и др.;

г) убытки, вызванные удорожанием проектирования и строительства технических средств в связи с завышением запасов прочности, что связано с недостаточным знанием метеорологических условий.

В различных отраслях народного хозяйства эти убытки заметно различаются и могут быть еще более дифференцированы в зависимости от специфики производства.

Для последующей оценки экономической эффективности прогнозистической информации необходимо установить причины и величину убытков.

Убытки в народнохозяйственных организациях могут быть допущены по вине оперативных подразделений службы погоды, по вине организаций, не принявших своевременных мер на основании прогнозов и штормовых предупреждений, а также вследствие сложившихся длительных тяжелых (аномальных) гидрометеорологических условий.

Анализ убытков позволяет установить, насколько полно используется метеорологическая информация в планировании и проведении хозяйственных работ.

В народном хозяйстве нашей страны ежегодный убыток по метеорологическим причинам в среднем составляет около 5 млрд. рублей¹.

Максимальные убытки несет сельское хозяйство. Значительные убытки несет также наземный транспорт, особенно в холодную половину года. Снежные заносы, туманы, гололеды и сильные морозы не только затрудняют, но и нередко на длительное время парализуют работу транспорта.

После бурана 16—20 января 1970 г. в Харькове с проезжих частей улиц потребовалось вывезти более четырех миллионов кубометров снега, на что было затрачено три миллиона рублей². В Новосибирске на снегоборьбу за зиму расходуются около 180 тыс. рублей³.

В холодную половину года продолжительные туманы в открытых карьерах нередко переходят в смог с концентрацией СО на глубоких горизонтах выше предельно допустимых норм (ПДК), что приводит к приостановке всех видов работ в карьере. Это особенно касается глубоких карьеров, где в периоды сильных температурных инверсий затруднена естественная вентиляция.

Так, в ноябре 1967 г. убытки по Коркинскому угольному карьере из-за тумана и загазованности составили около 1,5 млн. рублей⁴.

Авиация, наиболее зависимый от погоды вид транспорта, несет значительные потери при неблагоприятных метеорологических условиях (туманы, сильные метели и пыльные бури, грозы и т. п.). В США в 1966 г. по этим причинам убытки в авиации составили 400 млн. долларов.

Неблагоприятные состояния погоды и моря снижают эффективность производственных операций морского флота и рыбной промышленности.

Убытки в морском флоте могут быть связаны с потерей ходового времени за счет волнения и плохой видимости. Зависимость скорости хода судна от волнения определяется по формуле

$$V = V_0 - aH - bH^2 - cqH, \quad (1.1)$$

¹ Рекомендации по оценке экономической эффективности использования в народном хозяйстве гидрометеорологических материалов. ГУГМС при СМ СССР, № УГМО-552 от 20.5.1966. 12 с.

² Прох Л. З., Башкирова Л. Е., Игнатенко М. И. Буран на Украине в январе 1970 г. УГМС УССР, Киев, 1971. 88 с.

³ Петрова М. Г., Черкесова М. А., Щенина Д. Н. Опыт оценки экономической эффективности использования в народном хозяйстве гидрометеорологических прогнозов и предупреждений. — В кн.: Гидрометеорология и народное хозяйство. М., Гидрометеониздат, 1978, с. 138—142.

⁴ Хандожко Л. А. Условия формирования и прогноз тумана в Коркинском карьере. — «Тр. ГГО», 1970, вып. 270, с. 79—95.

где V — фактическая скорость судна; V_0 — техническая скорость судна (скорость судна на спокойной воде); H — средняя высота волны; q — средний курсовой угол волны; a, b, c — коэффициенты, вычисляемые опытным путем для каждого типа судна.

Потери ходового времени судна в открытом море при ухудшении видимости могут быть рассчитаны по формуле

$$\Delta t = \left(1 - \frac{V_T}{V}\right) T, \quad (1.2)$$

где Δt — потери ходового времени; V_T — скорость судна в условиях пониженной видимости; V — скорость судна при нормальной видимости; T — продолжительность пребывания судна в условиях пониженной видимости.

Расчеты выполняются по данным судовых журналов. Определение потерь ходового времени, например, для судов Балтийского пароходства показало, что в среднем многолетнем Δt , обусловленное туманом, составляет около 2% от общего ходового времени судов. Потери из-за ухудшения видимости за счет снегопадов, дождей, ливней равны 0,7%. Суммарный ущерб по причине ограничения видимости составляет в среднем за год около 350 000 рублей¹.

Удельный вес стояночного времени судов в портах, например, для сухогрузного флота превышает 50%. В общем стояночном времени судов в порту 30% времени простоя связано с неблагоприятными условиями погоды². Продолжительность простоя судна в порту может быть получена по имеющимся в пароходстве сведениям.

Простои, вызванные туманами, рассчитываются по формуле, предложенной И. Л. Бухановским,

$$\Delta t = \frac{\Sigma T^2}{2\tau 24}, \quad (1.3)$$

где Δt — продолжительность простоя судов; ΣT^2 — сумма квадратов за данный период; τ — средний интервал времени как между заходами судов в порт, так и их выходами из порта, т. е. средний интервал движения судов.

Средний месячный интервал движения судов τ определяется по формуле

$$\tau = \frac{F}{n},$$

где F — календарное число часов данного месяца; n — судоборот порта за тот же период, как сумма числа судозаходов n_z и судовых выходов n_v .

¹ Морозова А. Г. Влияние плохой видимости на судоходство в Балтийском море. — «Тр. НИИАК», 1962, вып. 17, с. 44—57.

² Брускин М. И. и др. Статистика морского транспорта. М., «Транспорт», 1971. 248 с.

Ущерб от простоя судов определяется либо по стоимости содержания их на стоянке в порту, либо по потерянному доходу за время простоя. Первый способ более прост и применяется чаще.

Ущерб от простоя судов определяется величиной

$$L = c\Delta t, \quad (1.4)$$

где c — стоимость простоя судно-суток.

Различают следующие виды убытков, вызванных метеорологическими причинами.

1. **Возможные убытки** u_v — убытки, которые могли бы иметь место или имеют место, если потребитель не располагает необходимой для их предотвращения метеорологической информацией или поступившая к нему информация не используется. Это максимальные убытки, вызванные отдельным опасным явлением погоды или комплексом неблагоприятных условий погоды (рис. 1.1).

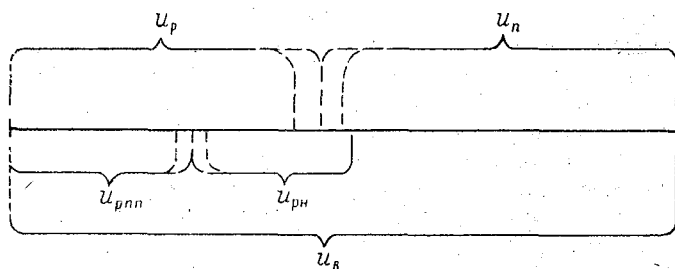


Рис. 1.1. Классификация убытков по метеорологическим причинам:

u_v — возможные убытки; u_n — предотвратимые убытки; u_p — реальные убытки; u_{pnn} — потенциально предотвратимые убытки; u_{pnn} — непредотвратимые убытки

Уменьшение убытков достигается принятием эффективных предупредительных мер при заблаговременном и успешном прогнозе данного опасного явления. Убытки имеют место и в тех случаях, когда благоприятная погода учитывается нерационально, т. е. экономически неполно.

Уменьшение убытков достигается оптимальной расстановкой технических и людских ресурсов, форсированным режимом работ, выполнением ремонтных, подготовительных и прочих операций.

2. **Предотвратимые убытки** u_n — часть возможных убытков, которую удается предотвратить в результате правильного использования успешных прогнозов погоды (штормовых предупреждений) и своевременно принятых предупредительных мер. Учитывая заблаговременность прогноза опасного явления и принимая защит-

ные меры, потребителю удастся уменьшить возможные убытки. Таким образом, предотвращенные убытки характеризуют выигрыш потребителя вследствие учета метеорологических условий.

3. **Реальные убытки** u_p — убытки, которые еще имеются в различных отраслях народного хозяйства при существующем уровне успешности прогнозов погоды и эффективности предупредительных мер. Они отражают зависимость производственной деятельности от гидрометеорологических условий. В тех отраслях народного хозяйства, где гидрометеорологическая информация используется слабо или вовсе игнорируется, реальные убытки будут равны возможным. В свою очередь частью реальных убытков являются потенциально-предотвратимые u_{pnp} и непредотвратимые (неизбежные) u_{pn} .

Потенциально-предотвратимые убытки u_{pnp} — часть реальных убытков, — которые при существующей методике прогнозирования можно избежать. Эти убытки указывают на резерв повышения экономической эффективности метеорологического обеспечения.

Непредотвратимые убытки u_{pn} — убытки, которые нельзя предотвратить, если даже неблагоприятное явление заблаговременно предусмотрено прогнозом (штормовым предупреждением). Чаще всего непредотвратимые убытки наблюдаются в сельском хозяйстве. Сильные ветры, пыльные бури, град¹ могут уничтожать злаковые и другие культуры на большой площади. Ливневые дожди могут привести к вымыванию посевов, а частые заморозки и продолжительные морозы при отсутствии снежного покрова — к их вымерзанию. Огромный ущерб сельскому хозяйству приносят «черные» бури в южных районах страны. В настоящее время даже при наличии хороших прогнозов можно предотвратить или уменьшить лишь очень малую долю таких убытков. Значительная часть их остается предотвращенной. Только активные воздействия на атмосферные процессы, а также агротехнические, мелиоративные и иные мероприятия могут заметно уменьшить в будущем убытки такого рода.

В каждой отрасли народного хозяйства потребитель должен знать средние реальные убытки по метеорологическим причинам.

По характеру влияния погоды на производственный объект реальные убытки могут быть прямыми (разрушение промышленных и других объектов, вымерзание посевов, обрыв линий электропередач и т. п.) и косвенными, которые проявляются через побочные производственные операции (простой производственных объектов и транспортных средств вследствие повреждения линий электропередач, нарушение производственных работ вследствие недодачи тепла ТЭЦ при значительных и быстрых понижениях температуры воздуха и другие).

¹ Исключение составляют, например, те районы в СССР, где практикуются активные воздействия в целях защиты субтропических культур от градобития.

Величина реальных убытков определяется в основном следующими факторами:

1) степенью воздействия (интенсивностью и продолжительностью) опасного явления на объект и стоимостью этого объекта;

2) заблаговременностью, с которой предсказаны неблагоприятные или благоприятные условия погоды;

3) эффективностью предупредительных мер с целью предотвращения или уменьшения убытков, а также рациональным планированием мероприятий с целью экономически эффективного использования условий погоды.

В первом приближении можно принять, что реальные убытки прямо пропорциональны интенсивности явления I и обратно пропорциональны заблаговременности прогноза явления τ и эффективности защитных мер — предварительных затрат c_0 .

$$u_p = \frac{aI}{\tau c_0}, \quad (1.5)$$

где a — коэффициент пропорциональности.

Применение формулы (1.5) возможно в том случае, если выбрать способ измерения интенсивности явления.

Введем понятие меры эффективной защиты от неблагоприятных воздействий погоды M как отношения предотвратимых убытков к возможным

$$M = \frac{u_{\text{п}}}{u_{\text{в}}}. \quad (1.6)$$

Чем меньше M , тем хуже проводятся защитные меры в данной отрасли на основании метеорологических (особенно прогностических) сведений. Даже при хороших прогнозах ущерб может быть велик, если потребитель не принял своевременных и действенных мер или принимаемые меры не дают должного эффекта.

В качестве меры эффективности защиты можно рассматривать также величину $u_{\text{п}}$.

При условии, что меры защиты принимаются своевременно, можно представить следующие случаи соотношения реальных и возможных убытков.

1. Реальные убытки равны возможным

$$u_p = u_v, \text{ т. е. } u_{\text{п}} = 0.$$

Следовательно, $M = 0$.

Такие убытки, как уже указывалось, называются непредотвратимыми. Кроме сельского хозяйства, они могут быть и в других отраслях народного хозяйства. Так, ураганные ветры могут уничтожить участок леса, повредить опоры линий электропередач; ливневые дожди могут размыть полотно железной дороги и т. п.

2. Реальные убытки меньше возможных

$$u_p < u_v, \text{ т. е. } u_n \neq 0,$$

отсюда $1 > M > 0$.

В этом случае убытки называются частично предотвратимыми, т. е. имеют место как реальные, так и предотвратимые убытки. Размеры предотвратимых убытков (сбереженных материальных средств) различны в зависимости от эффективности предупредительных мер.

3. Реальные убытки равны нулю

$$u_p = 0, u_v = u_n, \text{ отсюда } M = 1.$$

В этом случае реальные убытки отсутствуют, т. е. они полностью предотвратимы. Суда получают предупреждение и уходят в укрытие; самолеты проходят стороной грозовую зону; до наступления обложных дождей в колхозах и совхозах срочно завершают важные сельскохозяйственные работы.

Частичное или полное предотвращение убытков связано с определенными предварительными затратами на предупредительные меры c_0 .

В зависимости от характера используемых метеорологических сведений предварительные затраты могут быть двух категорий.

1. Затраты, связанные с использованием климатических характеристик. В строительном проектировании постоянно учитываются ветровые, термогигрометрические и другие нормативные данные. Это позволяет рассчитать ветровые и гололедные нагрузки на высотные сооружения, почвенно-климатические характеристики, характеристики комфорта условий труда и другие параметры. На этом основании выбирается наиболее выгодный вариант строительства объекта, определяется урожайность, достигается уменьшение расхода материалов, экономия времени, труда и т. п.

Предварительные затраты в этом случае определяются стоимостью разработки проекта с учетом уточненных нормативных характеристик, представленных в СНиПе¹.

Предварительные затраты, как и предотвращенные убытки, при использовании климатологических данных, носят разовый характер. Предотвращение убытков вследствие предварительных затрат достигается один раз, а сам объект эксплуатируется многие годы.

2. Затраты, связанные с использованием прогностической информации. Они включают в себя:

а) затраты рабочей силы и техники, т. е. зарплату людей и стоимость эксплуатации и амортизации техники, привлекаемой в связи с проведением предупредительных мероприятий;

¹ СНиП — «Строительные нормы и правила» — свод основных нормативных требований и положений, регламентирующих проектирование и строительство во всех отраслях народного хозяйства СССР.

б) затраты на вынужденное перемещение материальных и технических средств;

в) затраты в связи с простоями транспорта и прекращением отдельных видов производственных работ. Сюда входят простои самолетов, судов, железнодорожного и автомобильного транспорта, прекращение погрузо-разгрузочных работ или работ на производстве при отключении участка ЛЭП в связи с обогревом его током для предотвращения обрыва проводов во время обледенения и т. п.

Предотвращенные убытки оцениваются стоимостью возможных повреждений объекта (судна, самолета) или стоимостью сохранения режима производственных работ (сохранения графика движения поездов, полета самолетов и т. п.).

В других отраслях народного хозяйства предварительные затраты или стоимость предупредительных мер имеют иной характер. В сельском хозяйстве, например, широко практикуется борьба с заморозками (дымление, укрытие растений, обогрев плантаций, дождевание и другие). В качестве предупредительных средств защиты от пыльных бурь и суховеев используются лесные полосы и лесопосадки. Мерами защиты посевов от недостатка влаги являются орошение, снегозадержание, боронование. Борьба с градом в некоторых южных районах страны осуществляется методом активного воздействия на градовые облака. Такого рода предупредительные меры стоят дорого, но себя окупают.

Еще не найдено средств борьбы с ураганами, тропическими циклонами. Поэтому предупредительные меры здесь имеют полностью защитный характер.

В ряде случаев при использовании прогнозов погоды предупредительные меры сводятся к оптимальным (заранее отработанным) организационным и производственным решениям. Так, прогнозы температуры для энергосистем позволяют уточнить режим электропотребления, а при долгосрочном прогнозе — уточнить планы топливоснабжения электростанций.

Предупредительные меры эффективны в том случае, когда они выполняются по отработанной системе, заблаговременно и в соответствии с прогнозами.

Большая прибыль для сельского хозяйства, как уже указывалось, достигается, в частности, активными воздействиями на градовые облака в период работы комплексных противоградовых экспедиций (КПЭ)¹ (табл. 1.1).

Финансирование комплексных противоградовых экспедиций осуществляется на договорных началах с сельскохозяйственными организациями.

¹ Сокол Г. П. Экономическая эффективность противоградовых работ в Таджикской ССР. — В кн.: Гидрометеорология и народное хозяйство. М., Гидрометеоздат, 1978, с. 131—136.

**Результаты противоградовых работ КПЭ УГМС Таджикской ССР
в 1972 и 1973 гг.**

Год	Общая занимаемая площадь, га	Количество израсходованных снарядов на предотвращение убытка	Снижение возможных повреждений, %	Чистый доход, млн. руб.
1972	320 000	5 368	94,3	5,0
1973	370 000	5 682	81,7	4,7

Экономически полезными являются рекомендации Гидрометцентра СССР по оптимальным курсам следования судов. Средняя экономия времени на одном переходе в зимний период составляет 9,6 часа. Если учесть, что стоимость судосуток судна среднего тоннажа равна 2500—3000 рублей, то предотвращенные убытки оцениваются примерно в 3 млн. рублей¹. Так как затраты на содержание группы, обеспечивающей проводку судов, невелики, то выгоды использования рекомендаций по оптимизации курсов судов очевидны.

Используя прогнозы и штормовые предупреждения, потребитель неоднократно предотвращает материальные потери. Иначе говоря, предварительные затраты и предотвращаемые убытки носят постоянный, систематический характер.

1.3. Оценка экономической эффективности метеорологических прогнозов

Ориентируясь на средние убытки по метеорологическим причинам, можно сделать заключение о реакции производства на погодные условия. Уменьшение средних убытков в одинаковые сезоны или с годами является положительным фактом. Однако это не дает основания для выводов, действительно ли прогнозы и штормовые предупреждения были экономически полезными. Это обусловлено двумя обстоятельствами. Во-первых, в одни и те же сезоны погода может быть разной. Во-вторых, с развитием структуры и технологии производства с годами совершенствуются защитные меры, что ведет к сокращению материальных потерь за счет неблагоприятной погоды. Таким образом, изменение средних убытков потребителя не может служить надежной

¹ Красюк В. С. Экономическая эффективность использования гидрометеорологических прогнозов. — В кн.: Гидрометеорология и народное хозяйство. М., Гидрометеониздат, 1978, с. 25—33.

мерой качества метеорологического обеспечения. Пусть теперь потребитель имеет ряды сведений о средних убытках и оценках прогнозов. Поставим вопрос: является ли их противоположный ход (успешность прогнозов растет — средние убытки уменьшаются) указанием на экономическую эффективность прогнозов. В целом нет. В ряде случаев в связи с наступлением длительного периода благоприятной погоды для всех видов транспорта успешность прогнозов может оказаться выше средней за счет роста оправдываемости отсутствия опасных явлений. При этом, естественно, уменьшаются и убытки по метеорологическим причинам. Определить полезность прогнозов только по ходу изменений средних убытков и оправдываемости прогнозов в данном случае не представляется возможным.

В условиях неблагоприятной, скажем, штормовой погоды успешный прогноз ее начала будет экономически полезным. В последующем при сохранении неблагоприятных погодных условий полезность успешного прогноза снижается по той причине, что потребитель уже работает в этих условиях. Чем устойчивее и длительнее такая погода, тем более вероятно, что потребитель сам достаточно надежно может прогнозировать ее сохранение, т. е. составлять инерционные прогнозы. Поэтому методические прогнозы будут представлять для него экономический интерес только в том случае, если они будут больше снижать потери по метеорологическим причинам, чем инерционные прогнозы. В связи с этим необходимо иметь оценку **экономической эффективности инерционных прогнозов.**

Прогнозист нередко сталкивается с такими синоптическими процессами, когда примерно с одинаковой вероятностью можно утверждать развитие каждого из них. В таких ситуациях формулировка прогноза, даже удачного, может оказаться случайной. Будучи успешными такие случайные прогнозы нередко являются экономически полезными. Потребитель не ориентируется на меру обоснованности прогнозов. Он решает свои задачи в соответствии с текстом прогноза.

Поставим еще вопрос: как много может быть таких случайных прогнозов и как учесть их при оценке экономической эффективности прогнозирования погоды.

Чем сложнее прогнозировать отдельные явления или условия погоды при большой их изменчивости, тем возникает большая необходимость оценить предварительно **экономическую эффективность случайных прогнозов.** Можно заранее утверждать, что в подавляющем большинстве случаев методические прогнозы будут более экономически эффективными для данного потребителя. Насколько больше, т. е. какова величина прироста — будет зависеть от оправдываемости прогнозов и специфики потребителя.

При низкой оправдываемости методических прогнозов возможна ориентация потребителя на среднее значение (норму). В этом случае полезность методического прогноза может быть установлена

путем сопоставления их экономической эффективности с **экономической эффективностью климатологических прогнозов.**

Таким образом, оценке эффективности методических прогнозов должна предшествовать оценка экономической эффективности стандартных прогнозов: случайных, климатологических и инерционных.

Стандартные прогнозы не требуют аналитической работы синоптика с оперативными материалами.

Для оценки потенциальной полезности прогнозов для данного потребителя следует рассчитать **экономическую эффективность идеальных прогнозов**, а для сравнительной оценки можно принять некоторый «средний» или ранее применявшийся способ прогнозирования.

Выбор начального уровня отсчета полезности прогнозов необходим для сравнимости получаемых результатов, объективизации методов оценки экономической эффективности и их дальнейшего совершенствования. При этом условии для данного потребителя можно установить, какой способ прогнозирования является менее убыточным или более выгодным.

Непрерывный рост производства требует постоянного проведения режима экономии — одного из важных принципов социалистического хозяйствования. Он состоит в сбережении, в интересах всего общества, рабочего времени, материальных и денежных средств.

Экономия общественных средств идет по двум направлениям: производственная экономия — хозрасчет и экономия за счет правильного учета и использования влияния окружающей среды, в частности климатических и погодных условий. Ценность гидрометеорологической информации включает в себя две категории значимости: информативность и полезность. Информативность прогнозов погоды отражает уровень адекватности прогностической информации будущему фактическому состоянию атмосферы. Полезность их является целевой категорией ценности и необходимой предпосылкой экономической эффективности прогнозов погоды в народном хозяйстве.

Пусть $\sigma_0(\eta)$ — есть средняя квадратическая ошибка оперативного прогноза, учитывающего всю информацию η , поступающую в прогностический центр, $\sigma(\eta)$ — средняя квадратическая ошибка случайного, инерционного или климатического прогноза.

Тогда в качестве показателя полезности прогнозов можно брать величину, рекомендуемую Б. Н. Беляевым,

$$\kappa(\eta) = 1 - \frac{\sigma_0(\eta)}{\sigma(\eta)}. \quad (1.7)$$

Очевидно, что $\kappa(\eta) \leq 1$. Если $\kappa(\eta) = 1$, то источник дает абсолютно полезную информацию, при $0 < \kappa(\eta) < 1$ — полезную информацию, в случае $\kappa(\eta) = 0$ — не дает информации, а при $\kappa(\eta) < 0$ — дает вредную (убыточную) информацию.

Как видим, оценка полезности может быть получена при условии заранее заданного стандартного прогноза.

Общим принципом оценки экономической полезности прогнозов служит метод сравнения убытков (или выгод), которые имеет потребитель при использовании методических прогнозов, с убытками (или выгодами), когда он планирует производственные операции, ориентируясь на некоторые стандартные прогнозы.

1.3.1. Оценка полезности прогнозов погоды по методу приведенных затрат

Рассмотрим сначала общий подход к оценке экономической эффективности прогнозов погоды, используя для этого известные положения метода приведенных затрат.

В промышленном проектировании, размещении и строительстве предприятий для оценки оптимального варианта используются показатели сравнительной эффективности, принятые Научным Советом АН СССР по проблеме экономической эффективности капитальных вложений. В качестве таких показателей принимаются приведенные затраты, расчетная прибыль, сроки окупаемости и коэффициент эффективности.

В основу расчета положено соизмерение капитальных затрат в сравниваемых вариантах с текущими издержками производства.

Использование этих критериев для оценки экономической эффективности прогнозов погоды в известной мере ограничено. Запишем формулу приведенных затрат

$$\Pi = C + E_n K, \quad (1.8)$$

где C — эксплуатационные годовые издержки; E_n — нормативный коэффициент эффективности капитальных затрат для данной отрасли; K — капитальные затраты.

Оба параметра C и K зависят от метеорологических условий. При использовании климатологической информации снижаются, в основном, капитальные затраты, а в случае использования прогностической информации — преимущественно эксплуатационные годовые издержки. Сравнение Π с некоторым базовым вариантом Π_0 , характеризующим иной, более низкий уровень гидрометеорологического обеспечения, дает возможность определить величину сэкономленных расходов, т. е. экономию средств. Многие статьи капитальных вложений должны быть откорректированы в соответствии с климатическими показателями, приведенными в СНиПе.

Задача гидрометеорологического обеспечения сводится к предоставлению потребителю метеоинформации, на основе которой он может минимизировать приведенные затраты.

Для действующих отраслей народного хозяйства (предприятий, народно-хозяйственных объектов, транспорта и т. п.) $E_n K = 0$. Тогда $\Pi = C$, где C — показатель расчетной себестоимости про-

дукции. Снижение себестоимости продукции (повышение расчетной прибыли) действующего предприятия может быть достигнуто уменьшением эксплуатационных издержек. При этом издержки, или расходы, вследствие неучета гидрометеорологического фактора могут быть самыми различными.

Годовая экономия в действующих отраслях может быть более полно определена по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \left(\frac{A_2 - A_1}{A_1} \right) \Pi_1 + \left(\frac{C_1 - C_2}{100} \right) A_2, \quad (1.9)$$

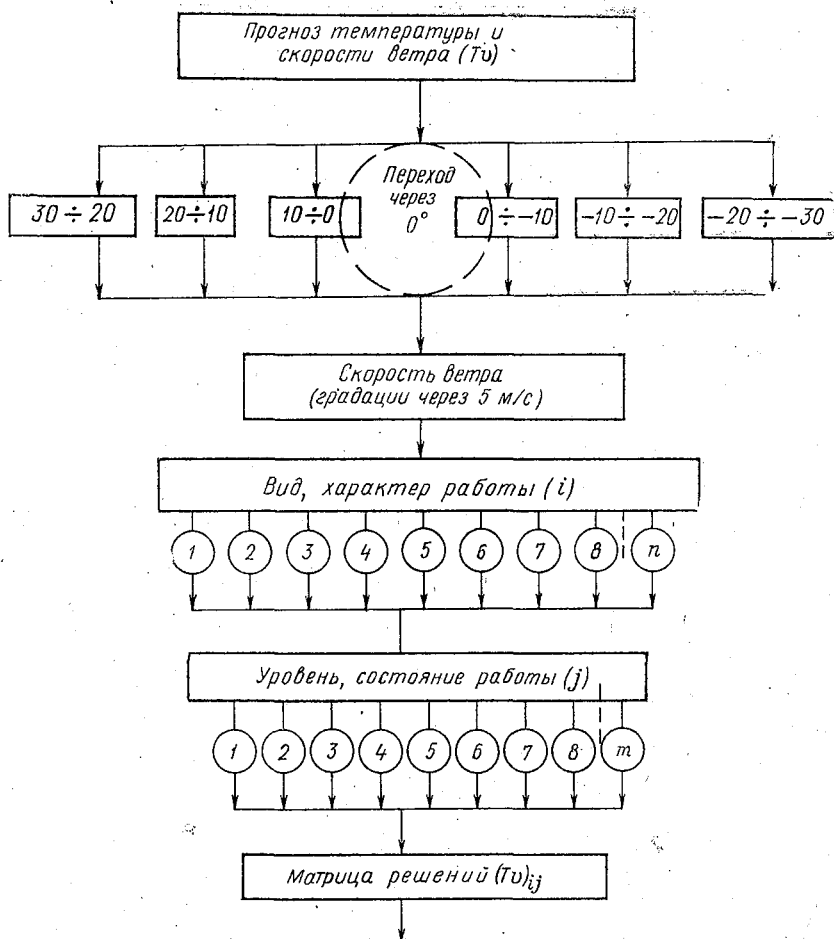
где A_1 , A_2 — годовой объем реализуемой продукции до и после внедрения новой системы обеспечения; C_1 , C_2 — затраты на 1 рубль реализуемой продукции до и после внедрения новой системы обеспечения; Π_1 — прибыль от реализации продукции до внедрения новой системы обеспечения.

Новая система обеспечения может быть представлена в виде разработанной методики прогноза (метеорологического элемента или явления погоды) и алгоритма принятия решения потребителем или иной формы метеорологического обеспечения.

1.3.2. Оценка полезности прогнозов погоды при полном доверии к ним

Во многих отраслях народного хозяйства использование прогностической информации находится еще на низком уровне. Это связано с неумением потребителя наиболее полно и результативно использовать прогнозы. По-видимому, до того как будут повсеместно внедрены в народное хозяйство модели оптимального использования прогнозов, необходимо совместно с потребителем разработать ряд простых алгоритмов, определяющих его производственные решения. Их форма и содержание будут определяться спецификой работы потребителя. Например, в строительной организации некоторые решения руководителя или диспетчера будут зависеть от прогноза температуры и ветра (рис. 1.2), а более полные — и от прогноза осадков. Подобные алгоритмы могут быть разработаны для различных видов автомобильного транспорта, энергосистем, газопроводов и в ряде других отраслей, где применение более совершенных экономико-метеорологических моделей пока затруднительно. Матрицы решений должны иметь жесткий регламент, при котором каждое решение потребителя отвечает только заданным условиям производственной ситуации и конкретному содержанию прогноза погоды.

Прямое использование прогнозов заключается в том, что потребитель каждый раз принимает решения, полностью доверяя прогнозу. В случае успешных прогнозов, применяя защитные меры, он сохраняет материальные ценности, выполняет плановые задания и т. п. Неоправдавшиеся прогнозы могут приводить



$j \backslash i$		Вид работы			
		1	2	...	n
Состояние работы	1	Решения Tv_{11}	Решения Tv_{21}	...	Решения Tv_{n1}
	2	— " — Tv_{12}	— " — Tv_{22}	...	— " — Tv_{n2}
	3	— " — Tv_{13}	— " — Tv_{23}	...	— " — Tv_{n3}
	...	...	...	...	...
	m	— " — Tv_{1m}	— " — Tv_{2m}	...	— " — Tv_{nm}

Рис. 1.2. Схема алгоритма принятия решения.

к убыткам. За выбранный отрезок времени предотвращенные убытки u_{Π} будут представлять собой стоимость сбереженных в итоге материальных средств. В свою очередь предотвращенные убытки, за вычетом предварительных затрат c_0 , есть **экономия материальных средств** (просто экономия) за счет методических прогнозов S_M :

$$S_M = u_{\Pi} - c_0. \quad (1.10)$$

Для инерционных прогнозов экономия материальных средств S_{Π} определяется следующим образом:

$$S_{\Pi} = u'_{\Pi} - c'_0. \quad (1.11)$$

Вследствие большей успешности методических прогнозов по сравнению с инерционными, превышение экономии материальных средств Θ выразится формулой:

$$\Theta = S_M - S_{\Pi}. \quad (1.12)$$

Величину Θ иногда называют **экономическим эффектом**.

Далее примем, что S_0 — стоимость содержания прогностического подразделения: бюро погоды, гидрометбюро, АМСГ и т. п., а кроме того, стоимость затрат на получение данного вида прогностической информации, стоимость организации и проведения специального гидрометеорологического обеспечения некоторых мероприятий. Тогда величина

$$P = \Theta - S_0 \quad (1.13)$$

представляет собой **экономическую прибыль**. Экономическую прибыль рассматривают по отношению к единице стоимости прогностического подразделения и записывают в виде

$$P_a = \left(\frac{\Theta}{S_0} - 1 \right). \quad (1.14)$$

Формула (1.14) показывает **удельную экономическую прибыль** или **экономическую эффективность** прогнозов метеорологических элементов и явлений погоды, а также штормовых предупреждений. Таким образом, **экономическая эффективность** есть отношение экономической прибыли к стоимости затрат на ее достижение. Формула (1.14) может быть приведена в целом для оценки экономической эффективности гидрометеорологических прогнозов.

В ряде случаев, особенно для долгосрочных прогнозов, целесообразно вместо S_{Π} рассчитывать экономию материальных средств за счет случайных S_c или климатологических S_K прогнозов.

Если принять в оперативном гидрометеорологическом подразделении в качестве единицы стоимости 1000 рублей, то формула (1.14) может быть записана в виде

$$P_3 = \left(\frac{\Theta}{S_0} - 1 \right) 1000. \quad (1.14')$$

Тогда (1.14') показывает, сколько средств возвращается народному хозяйству на каждые 1000 рублей, затраченные государством на содержание этого подразделения.

Так, за период с 1966 по 1970 г. экономическая эффективность гидрометеорологического обеспечения по Союзу в среднем составила¹

$$P_3 = \left(\frac{4}{1,2} - 1 \right) 1000 = 2300 \text{ рублей.}$$

1.3.3. Оценка полезности прогнозов погоды по отношению экономии к затратам

Для приближенной оценки экономической эффективности использования метеорологических прогнозов применяется отношение экономии к затратам

$$S^* = \frac{\Theta}{c_0 + S_0}. \quad (1.15)$$

Для различных отраслей народного хозяйства это отношение меняется в значительных пределах.

Оценка сбереженных средств Службой погоды за пятилетие (1966—1970 гг.) дает в целом для народного хозяйства страны отношение экономии к затратам, примерно равное 4 : 1.

В литературе по ряду других государств приводятся отношения, которые колеблются от 20 : 1 до 100 : 1. Они рассчитаны, как это принято в ряде стран, при таком базовом условии, которое характеризует отсутствие метеорологического обеспечения. Вряд ли такой базовый вариант является оправданным. Полученные при этом отношения безусловно завышены.

В ряде случаев при использовании метеорологической информации предпочтение отдается не столько оценке ее экономической эффективности, сколько способности этой информации обеспечить безопасность проведения производственных операций. Это в первую очередь относится к авиации, морскому пассажирскому флоту и к другим видам транспорта массовой перевозки людей.

¹ Федоров Е. К. Гидрометеорологическая служба на рубеже двух пятилеток. — «Метеорология и гидрология», 1971, № 6, с. 3—14.

1.3.4. Оценка полезности альтернативных прогнозов погоды

Успешность и экономическая эффективность прогнозов при нормированном сопоставлении — характеристики взаимосвязанные. Чем выше успешность прогнозов, тем вероятно больше их полезность в конкретной области использования.

Пусть потребитель получает прогностическую информацию, все значения которой можно разделить на две фазы: X_1 , когда необходимо принимать предупредительные меры, и X_2 , когда эти меры принимать не следует. Эти альтернативные условия отвечают, например, наличию или отсутствию штормового ветра заданной скорости, наступлению заморозков, критического значения количества осадков и тому подобное.

Успешность альтернативных прогнозов опасных условий погоды характеризуется таблицей оправдываемости (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Успешность прогнозов наличия Π и отсутствия $\bar{\Pi}$ заданных условий погоды

Фактическая погода Φ_j	Прогноз Π_i		$\sum_{i=1}^2 \Phi_j$
	$X_1 = \Pi$	$X_2 = \bar{\Pi}$	
$X_1 = \Phi$	p_{11}	p_{12}	p_{10}
$X_2 = \bar{\Phi}$	p_{21}	p_{22}	p_{20}
$\sum_{j=1}^2 \Pi_i$	p_{01}	p_{02}	1

В табл. 1.2 $p_{ij} = \frac{n_{ij}}{N}$, где n_{ij} — частота соответствующей группы сопряженности $\Pi_i \sim \Phi_j$. Значения p_{10} и p_{20} — повторяемости соответственно наличия Φ и отсутствия $\bar{\Phi}$ заданных условий погоды, а p_{01} и p_{02} — повторяемости прогноза наличия Π и прогноза отсутствия $\bar{\Pi}$ заданных условий погоды. Здесь $p_{10} = p_{11} + p_{12}$, $p_{20} = p_{21} + p_{22}$, $p_{01} = p_{11} + p_{21}$, $p_{02} = p_{12} + p_{22}$ и $p_{10} + p_{20} = p_{01} + p_{02} = 1$. Прогнозы, при которых $p_{10} = p_{01}$ и $p_{20} = p_{02}$, т. е. когда равны ошибки первого и второго рода $p_{12} = p_{21}$, называются несмещенными.

Потери потребителя s_{ij} зависят от того, на какую фазу X он ориентируется и какая затем фактически наблюдалась. Распределение их отражено матрицей потерь (табл. 1.3).

Элементы s_{ij} матрицы потерь потребителя характеризуют следующие особенности конкретного производства.

Таблица 1.3

Матрица потерь потребителя

Фактическая погода Φ_j	Потребитель ориентируется на прогноз Π_i	
	$X_1 = \Pi$ предупредительные меры принимаются	$X_2 = \bar{\Pi}$ предупредительные меры не принимаются
$X_1 = \Phi$ опасные условия погоды наблюдаются	s_{11}	s_{12}
$X_2 = \bar{\Phi}$ опасные условия погоды отсутствуют	s_{21}	$s_{22} = 0$

1. Опасные условия погоды прогнозировались и фактически наблюдались ($\Pi \sim \Phi$). Предупредительные меры уменьшают возможные убытки, особенно при заблаговременном прогнозе, но полностью их не предотвращают. В этом случае убытки s_{11} могут быть связаны с авариями, простоями транспорта и производства, сокращением объема работ, а также со стоимостью предупредительных мер.

2. Прогнозом не предусматривались опасные условия погоды, а фактически они наблюдались ($\bar{\Pi} \sim \Phi$). Убытки s_{12} , обусловленные ошибками первого рода, могут составлять значительные материальные потери. В первую очередь это катастрофы, аварии, разрушения, затопления и тому подобное. Здесь же потери, связанные с невыполнением или срывом плановых зданий.

3. Опасные условия погоды прогнозировались, но фактически не наблюдались ($\Pi \sim \bar{\Phi}$). Убытки s_{21} , обусловленные ошибками второго рода, будут включать в себя стоимость предупредительных мер и частичные простои транспорта и производства, поскольку потребитель не может быстро перестроить свою работу на условия отсутствия опасного явления. В соответствии с прогнозом он продолжает ожидать опасное явление. Отсюда для ряда потребителей можно принять $s_{11} = s_{21}$. Заблаговременная отмена прогноза опасного явления позволяет значительно уменьшить s_{21} . Поэтому для большинства потребителей $s_{11} > s_{21}$.

4. При сопряженности $\bar{\Pi} \sim \bar{\Phi}$ убытки $s_{22} = 0$.

Успешность альтернативных прогнозов будет характеризовать коэффициент качественной корреляции

$$r = \frac{p_{11} p_{22} - p_{12} p_{21}}{\sqrt{p_{10} p_{20} p_{01} p_{02}}} = \frac{n_{11} n_{22} - n_{12} n_{21}}{\sqrt{(n_{11} + n_{12})(n_{21} + n_{22})(n_{11} + n_{21})(n_{12} + n_{22})}}. \quad (1.16)$$

Для несмещенного прогноза можно записать

$$r = \frac{n_{11} n_{22} - n_{12} n_{21}}{(n_{11} + n_{12})(n_{12} + n_{22})}, \quad (1.16')$$

Равенство средних потерь при ошибках первого рода (потребитель ориентируется на то, что опасных явлений не будет) и ошибок второго рода (потребитель ориентируется на то, что будут опасные явления) выполняется при условии критического значения повторяемости опасных явлений p_K :

$$p_K = \frac{s_{21}}{(s_{12} - s_{11}) + s_{21}}. \quad (1.17)$$

Кроме прогнозов погоды, потребитель может ориентироваться на климатологическую информацию и выбирать оптимальное решение.

Зная повторяемость опасного явления $p_{10} = \frac{n_{10}}{N}$ и p_K , можно выбрать одно из оптимальных решений ($S \rightarrow S_{\min}$):

1) $p_{10} > p_K$ — оптимальным будет решение ориентироваться на опасные условия погоды, т. е. полагать, что будут опасные условия и необходимо применять предупредительные меры;

2) $p_{10} < p_K$ — оптимальным будет решение ориентироваться на отсутствие опасных условий погоды, т. е. полагать, что опасных условий погоды не будет;

3) $p_{10} = p_K$ — любое из двух решений приведет к одинаковым средним потерям.

Введем следующие обозначения убытков при использовании стандартных (климатологических, случайных), методических и идеальных прогнозов:

R_{K1} — средние убытки в случае ориентации на климатическую информацию при $p_{10} > p_K$;

R_{K2} — средние убытки в случае ориентации на климатическую информацию при $p_{10} < p_K$;

R_M — средние убытки при доверии методическому прогнозу;

R_H — средние убытки при ориентации на идеальный прогноз;

R_C — средние убытки при ориентации на случайный прогноз.

Используя случайные прогнозы, можно определить по отношению к ним экономический эффект климатологической информации. При $p_{10} > p_K$ имеем $R_{K1} - R_H = p_{10}(s_{12} - s_{11})$. Тогда

$$\frac{R_{K1} - R_C}{R_{K1} - R_H} = \frac{p_{10}(s_{12} - s_{11}) - p_{20} s_{21}}{s_{21}}. \quad (1.18)$$

При $p_{10} < p_K$ получаем

$$R_{K2} - R_H = p_{20} s_{21}$$

и

$$\frac{R_{K2} - R_c}{R_{K2} - R_H} = \frac{p_{20} s_{21} - p_{10}(s_{12} - s_{11})}{s_{12} - s_{11}}. \quad (1.19)$$

Пусть для потребителя климатологически оптимальным будет условие $p_{10} > p_K$. Тогда методический несмещенный прогноз будет экономически полезным, если r превышает положительную величину r_1 :

$$r_1 = \frac{p_{10}(s_{12} - s_{11}) - p_{20} s_{21}}{p_{10}(s_{12} - s_{11} + s_{21})}. \quad (1.20)$$

Относительный экономический эффект при использовании методического прогноза равен

$$\frac{R_{K1} - R_M}{R_{K1} - R_H} = \frac{p_{10}}{p_K} (r - r_1). \quad (1.21)$$

При климатологически оптимальном условии $p_{10} < p_K$ методический несмещенный прогноз будет экономически полезным, если r превышает положительную величину r_2 :

$$r_2 = \frac{p_{20} s_{21} - p_{10}(s_{12} - s_{11})}{p_{20}(s_{12} - s_{11} + s_{21})}. \quad (1.22)$$

Относительный экономический эффект при использовании методического прогноза в этом случае равен

$$\frac{R_{K2} - R_M}{R_{K2} - R_H} = \frac{1 - p_{10}}{1 - p_K} (r - r_2). \quad (1.23)$$

При условии $p_{10} = p_K$ целесообразно использовать несмещенные прогнозы с $r > 0$. При этом относительный экономический эффект будет равен r .

Методический прогноз будет полезен для данного потребителя, если $\frac{s_{12} - s_{11}}{s_{21}}$ лежит в интервале

$$\frac{p_{21}}{p_{11}} < \frac{s_{12} - s_{11}}{s_{21}} < \frac{p_{22}}{p_{12}}. \quad (1.24)$$

Относительно идеального прогноза экономический эффект данного методического прогноза при $p_{10} > p_K$ определяется по формуле

$$\frac{R_{K1} - R_M}{R_{K1} - R_H} = \frac{p_{11}(s_{12} - s_{11}) - p_{21} s_{12}}{p_{10}(s_{12} - s_{11})}. \quad (1.25)$$

При условии $p_{10} < p_K$

$$\frac{R_{K2} - R_M}{R_{K2} - R_H} = \frac{p_{22} s_{21} - p_{12}(s_{12} - s_{11})}{p_{20} s_{21}} \quad (1.26)$$

Если $p_{10} = p_K$, то

$$\left. \frac{R_{K1} - R_M}{R_{K1} - R_H} \right|_{p_{10}=p_K} = \left. \frac{R_{K2} - R_M}{R_{K2} - R_H} \right|_{p_{10}=p_K} = r \sqrt{\frac{p_{01} p_{02}}{p_{10} p_{20}}} \quad (1.27)$$

Таким образом, методический прогноз может быть полезным для данного потребителя только при определенных условиях. Доверие к методическому прогнозу должно быть основано, как видим, на сравнительной оценке его полезности к полезности стандартного прогноза.

1.3.5. Оценка экономического эффекта прогнозов погоды с помощью критериев А. М. Обухова и Н. А. Багрова

Следуя Г. А. Карпееву, рассмотрим возможность применения критериев успешности прогнозов по А. М. Обухову и Н. А. Багрову для оценки экономического эффекта прогнозов погоды.

Пусть имеются прогнозы Π_i и их реализации Φ_j . Матрица сопряженности (вероятности попарно независимых событий) — $\{p_{ij}\}$.

Рассмотрим два следующих варианта использования прогнозов и оценки их экономического эффекта.

1. Потребитель, имеющий матрицу выигрышей $\{g_{ij}\}$, получает оперативный (методический) прогноз Π_M со средним выигрышем G_M , случайный прогноз Π_C со средним выигрышем G_C и идеальный прогноз Π_H , обеспечивающий выигрыш G_H . Здесь $G_K = \{p_{i, \cdot}\}_K \{g_{i, j}\}_K$.

Преимущество оперативного прогноза по сравнению со случайным будет определяться величиной

$$\Delta G_{MC} = G_M - G_C \quad (1.28)$$

Идеальный прогноз будет более выигрышным по сравнению со случайным на величину

$$\Delta G_{HC} = G_H - G_C \quad (1.29)$$

Поскольку G_H и G_C в пределе являются экстремальными ($G_H = G_{\max}$, $G_C = G_{\min}$), то ΔG_{HC} представляет собой максимально возможный выигрыш для данного потребителя или его **потенциальный экономический эффект**. Тогда в качестве меры **относительного экономического эффекта** можно принять

$$W = \frac{\Delta G_{MC}}{\Delta G_{HC}} \quad (1.30)$$

2. Имеется «идеальный» потребитель, матрица выигрышей которого $\{g_{ij}^{\circ}\}$ удовлетворяет условию

$$\left. \begin{aligned} (g_{11} - g_{12})p_{10} &= (g_{22} - g_{21})p_{20}, \\ g_{11} - g_{12} > 0, \quad g_{22} - g_{21} > 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.31)$$

Условие (1.31) отражает следующее: вероятные выигрыши правильных прогнозов сравнительно с ошибочными (n_{12}) при реализации Φ равны вероятным выигрышам правильных прогнозов сравнительно с ошибочными (n_{21}) при реализации $\bar{\Phi}$.

Из условия (1.31) следует, что для случайного прогноза средний выигрыш будет равен

$$G_c^{\circ} = p_{10} g_{11} + p_{20} g_{21} = p_{10} g_{12} + p_{20} g_{22}. \quad (1.32)$$

Условие $g_{11} - g_{12} = 0$, отражающее независимость поведения потребителя от прогнозов, не рассматривается.

По аналогии с (1.28) и (1.29) запишем

$$\left. \begin{aligned} \Delta G_{mc}^{\circ} &= G_m^{\circ} - G_c^{\circ}, \\ \Delta G_{nc}^{\circ} &= G_n^{\circ} - G_c^{\circ}. \end{aligned} \right\} \quad (1.33)$$

С учетом (1.31)

$$\Delta G_{mc}^{\circ} = \frac{(g_{22} - g_{21})(p_{22} - p_{20} p_{02})}{p_{10}} = \frac{(g_{11} - g_{12})(p_{11} - p_{10} p_{01})}{p_{20}}. \quad (1.34)$$

В свою очередь

$$\Delta G_{nc}^{\circ} = p_{20}(g_{22} - g_{21}) = p_{10}(g_{11} - g_{12}). \quad (1.35)$$

В итоге мерой относительного экономического эффекта будет величина

$$W = \frac{\Delta G_{mc}^{\circ}}{\Delta G_{nc}^{\circ}} = \frac{p_{11} - p_{10} p_{01}}{p_{10} p_{20}} = \frac{p_{22} - p_{20} p_{02}}{p_{10} p_{20}} = Q. \quad (1.36)$$

Следовательно, при условии (1.31) экономический эффект определяется критерием точности прогнозов по А. М. Обухову.

Если принять, что $g_{11} p_{01} = g_{22} p_{02}$, то

$$W'_0 = H = \frac{p - p_c}{1 - p_c}, \quad (1.37)$$

где H — критерий надежности прогнозов по Н. А. Багрову.

1.4. Частные оценки экономической эффективности метеорологических прогнозов

Многообразие экономических структур производства и различное влияние погодных условий на них требует разработки частных методик оценки полезности прогнозов.

1.4.1. Экономическая эффективность прогнозов погоды для авиации

Экономическая полезность воздушного транспорта в развитии народного хозяйства проявляется в том, что он способствует экономии времени на перевозку грузов и пассажиров, быстрым темпам освоения природных богатств отдаленных районов страны, созданию и эксплуатации нефтегазовой и металлургической промышленности, строительству объектов по добыче дефицитного промышленного сырья и тому подобное. Известно, что количество грузов, требующих ускоренной, срочной доставки, составляет 10—15% общего грузопотока. Поэтому ускорение доставки грузов существенно повышает экономическую эффективность авиации.

Однако эффективность работы данного вида транспорта в народном хозяйстве во многом зависит от правильного повседневного учета метеорологических условий. Здесь уже проявляется способность службы погоды повысить эффективность работы авиации.

Целевое назначение прогнозов погоды состоит в том, чтобы обеспечить безопасность, регулярность и высокую экономичность полетов самолетов и вертолетов. Первостепенное значение приобретают прогнозы погоды, в особенности по пункту посадки. Экономическая эффективность прогнозов погоды проявляется в том, что на единицу стоимости прогностического подразделения сберегаются огромные материальные средства аэрофлота, а главное — предотвращаются аварии и катастрофы.

На известных маршрутах в предполетном планировании можно оценить вероятность «непопадания» самолета в опасные метеорологические условия

$$P_m = 1 - p(\Phi), \quad (1.38)$$

где $p(\Phi)$ — фактическая вероятность опасных метеорологических условий на маршруте полета.

Вероятность безопасности полета можно тогда записать в виде

$$P_{m(b)} = 1 - p(\Phi) p(B/\Phi), \quad (1.39)$$

где $p(B/\Phi)$ — условная вероятность выполнения установленных правил полета B при попадании в сложные метеорологические условия.

Очевидно, вероятность предпосылок к летным происшествиям будет равна

$$P_{м(л.п)} = 1 - P_{м(б)} = p(\Phi) [1 - p(B/\Phi)]. \quad (1.40)$$

Чем выше оправдываемость прогнозов, тем больше обеспечивается безопасность полетов (рис. 1.3).

Если известно число нарушений регулярности полетов самолетов по метеорологическим условиям (отмененных и задержанных рейсов, возвратов самолетов), то вероятность выполнения рейса по расписанию можно записать в виде

$$P_p = 1 - \frac{m}{N}, \quad (1.41)$$

где m — число нарушений регулярности полетов по метеорологическим условиям; N — общее число запланированных рейсов по расписанию.

Частые нарушения регулярности полетов связаны с туманами. Например, по аэропорту «Жуляны» (Киев) отношение числа нарушений регулярности полетов из-за туманов к общему числу запланированных рейсов $k = \frac{m}{N}$ в холодную половину года достигает 0,15 (табл. 1.4).

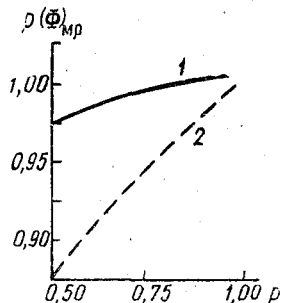


Рис. 1.3. Зависимость вероятности безопасного полета $p(\Phi)_{мр}$ от вероятности опасных метеорологических условий p на маршруте: 1 — $p(\Phi) = 0,10$; 2 — $p(\Phi) = 0,30$

Таблица 1.4

Среднемесячные значения k , характеризующие нарушения регулярности полетов в аэропорту «Жуляны» из-за тумана (по И. В. Кошеленко)

Месяц	I	II	III	IV	IX	X	XI	XII
k	0,11	0,13	0,08	0,02	0,04	0,06	0,11	0,15

Нарушения регулярности полетов будут зависеть от числа неблагоприятных метеорологических условий как в пункте вылета, так и в пункте посадки, а также от числа их одновременного появления в обоих пунктах. Тогда можно записать

$$m = Np_k + Np_k(1 - p_{усл}) = Np_k(2 - p_{усл}), \quad (1.42)$$

где p_k — климатическая вероятность наличия тумана в пункте вылета; $p_{усл}$ — условная вероятность появления тумана в пункте посадки при его отсутствии в пункте вылета.

Учитывая, что $p_k p_{\text{усл}} < 0,1$, И. В. Кошеленко предлагает принять

$$k \cong 2p_k. \quad (1.43)$$

Способы оценки экономической эффективности метеорологических прогнозов в авиации касаются, в основном, опасных условий погоды по пункту взлета и посадки. Наиболее общий подход к такой оценке связан с расчетом некоторых критериев — показателей полезности прогнозов.

Критерий «отношение затрат к убыткам». Имея прогноз погоды в вероятностной форме, т. е. зная так называемую оперативную вероятность p наступления опасного явления погоды, диспетчер может принять одно из двух решений: полет отменить или выпустить самолет по расписанию. В случае $p > \frac{c_0}{L}$ предупредительные меры применяются, при $p < \frac{c_0}{L}$ — не применяются. Здесь L — убытки, которые может понести аэрофлот, если предупредительные меры стоимостью c_0 не приняты, а опасная погода наступит.

Отсюда понятно, что $L = s_{12}$. Если $p > \frac{c_0}{s_{12}}$ и предупредительные меры c_0 не будут приняты, то опасное явление может вызвать убытки на сумму s_{12} . Необходимость предупредительных мер возрастает с увеличением возможных убытков. Чем меньше отношение затрат на предупредительные меры к возможным убыткам, тем более эффективны принятые меры.

Критерий И. Грингортена. Пусть p — оперативная вероятность того, что аэропорт посадки будет открыт и самолет прибудет в пункт назначения в срок, согласно расписанию.

Диспетчер аэропорта вылета может принять одно из двух решений: выпустить самолет или отменить рейс. В первом случае, если аэропорт посадки в момент вылета будет открыт, то убытки, связанные с возвратом самолета или посадкой его на запасной аэропорт, составляют s_{12} . При отмене рейса убытки будут составлять s_{11} (стоимость простоя машин, зарплата и иные расходы). Успешное выполнение рейса обеспечит получение прибыли, равное G .

Средние убытки при принятии решения о выпуске самолета будут равны

$$\bar{R}_1 = p \cdot 0 + (1 - p) s_{12} - pG, \quad (1.44)$$

где p — вероятность того, что аэропорт будет открыт, а $p \cdot 0$ — связанные с таким рейсом убытки; $1 - p$ — вероятность того, что аэропорт будет закрыт, а $(1 - p)s_{12}$ — связанные с этим убытки; pG — прибыль от успешного рейса;

При принятии решения об отмене рейса средние убытки будут равны

$$\bar{R}_2 = p s_{11} + (1 - p) s_{11}, \quad (1.45)$$

где $p s_{11}$ — убытки при условии, что аэропорт назначения открыт, а $(1 - p) s_{11}$ — убытки при условии, что аэропорт назначения закрыт.

Нетрудно видеть, что существует некоторая критическая вероятность $p = p_{кр}$, при которой средние затраты не будут зависеть от решения диспетчера. В этом случае

$$(1 - p_{кр}) s_{12} - p_{кр} G = p_{кр} s_{11} + (1 - p_{кр}) s_{11},$$

откуда

$$p_{кр} = \frac{s_{12} - s_{11}}{s_{12} + G}. \quad (1.46)$$

Расписание полетов следует выдерживать, если $p > p_{кр}$. Из (1.46) следует: чем больше суммарная выгода G от успешности полета, тем меньше $p_{кр}$. Следовательно, если G велико, то даже при малых значениях $p > p_{кр}$ следует выдержать расписание полета. В этом случае посадка на запасной аэродром, ближайший к пункту назначения, будет оправдана. Это скорее всего может быть отнесено к чрезвычайным, или экстренным грузоперевозкам. На основании вероятностного прогноза опасного явления диспетчер выносит окончательное решение об отмене или продолжении полета.

Все расчеты синоптика и диспетчера прежде всего должны учитывать безопасность полетов. Катастрофы, случающиеся по метеорологическим условиям, не могут быть оправданы никакими ожидаемыми материальными выгодами.

При известных s_{11} , s_{12} и G значения $p_{кр}$ могут быть рассчитаны заранее для каждого стандартного маршрута.

Разрабатываются другие частные методы оценки экономической эффективности прогноза отдельных метеорологических явлений для авиации. Например, расчеты, выполненные И. В. Кошленко по аэропорту «Жуляны» (Киев), показали, что экономический эффект прогноза туманов может достигать 60 000 рублей в месяц, что примерно в 10 раз больше месячного содержания АМСГ.

Таким образом, экономическая эффективность метеорологической службы, обеспечивающей гражданскую авиацию, может быть оценена по увеличению доходов, достигаемому при практической реализации ее рекомендаций, направленных на повышение безопасности и регулярности полетов, а также выбор оптимальных (по протяженности, затратам времени, расходу горючего, безопасности и т. д.) маршрутов полетов.

1.4.2. Экономическая эффективность прогнозов погоды для морского и речного флота

К основным видам морских работ относятся: судоходство (транспортное, пассажирское), рыбный промысел, добыча полезных ископаемых (нефть, янтарь, строительные материалы и т. п.), работа портов, гидротехническое строительство и другие. Каждый из них имеет свою специфику и различия по степени и характеру зависимости от погоды. Опасные гидрометеорологические явления снижают эффективность плавания судов в морях и океанах и нередко создают угрозу их безопасности. Ущерб, нанесенный мировому судоходству за счет аварий и гибели судов, связанных с неблагоприятными условиями плавания, составляет примерно 150 млн. долларов ежегодно.

Безопасность плавания судов оценивается показателем степени трудности плавания

$$K = 1,17 \frac{h_m}{h_0} \left(1 + \frac{\tau_1}{\tau} \right) \left(1 + 2 \frac{\tau_2}{\tau} \right) e^{-0,05 \sqrt{D}}, \quad (1.47)$$

где h_m — максимальная высота волны на переходе; h_0 — высота волн, ограничивающая переход; τ — время, затраченное на весь переход; τ_1 — время нахождения судна в зоне, где высота волн отмечается в пределе от h_0 до $h = 8$ м; τ_2 — время нахождения судна в условиях, когда высота волн достигала 8 м и более; D — водоизмещение судна.

Если $K \leq 1$, условия плавания безопасные.

Аналогичные показатели безопасности плавания могут быть получены и по другим комплексам метеорологических элементов.

Так, опасность обледенения судов является своего рода критерием трудности плаваний в арктических морях.

Оценка показателя K должна предшествовать расчету оптимальных путей следования судов. Величина $K > 1$ является пороговым значением опасных условий плавания, особенно при ограничении плавания на допустимую высоту волн.

Экономическая эффективность рекомендаций оптимальных маршрутов для судов морского флота достигается за счет повышения безопасности плавания, сохранности груза, экономии топлива, уменьшения времени, затрачиваемого на рейс, увеличения продолжительности эксплуатационного периода судна и, следовательно, в целом повышения производительности труда.

Оптимальные маршруты следования судов более выгодны по сравнению со стандартными путями.

Рассмотрим способ оценки экономической эффективности оптимальных путей следования судов, предложенный Г. А. Карпеевым и В. С. Красюком.

Оптимальными называются такие пути следования судов, на которых минимальна вероятность встречи с опасными для море-

плавания условиями и перегрузка грузов осуществляется с минимальными затратами¹.

Пусть переход между портами A и B (рис. 1.4) осуществляется по оптимальному l_0 и стандартному $l_{ст} = l_{ij}$ путям.

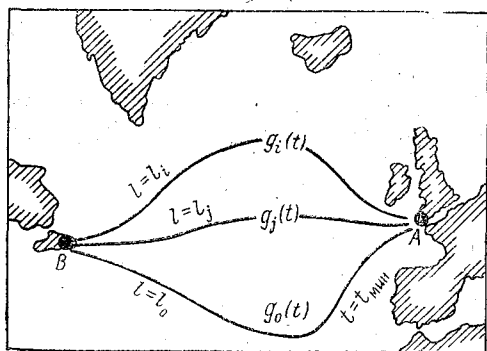


Рис. 1.4. Положение маршрутов l_i , l_j , и l_0 между пунктами A и B .

Будем полагать, что эффективность плавания судов определяется временем, затраченным на переход по тому или иному пути. Отсюда, в качестве функции выигрышей принимается величина $g_{i0}(w) = \tau_i - \tau_0$, где τ_0 — время, затраченное на переход по оптимальному пути l_0 , а τ_i — по любому другому заданному пути следования. Параметр w является характеристикой судна и перевозимого им груза.

В качестве меры положительного эффекта принимается величина

$$g_{ij}(w) = \tau_{i0} - \tau_{j0}, \quad (1.48)$$

где $\tau_{i0} = \tau_i - \tau_0$ — разность затрат времени на стандартном (i -ом) и оптимальном путях следования; $\tau_{j0} = \tau_j - \tau_0$ — разность затрат времени на стандартном (j -ом) и оптимальном путях следования.

При $g_{ij}(w) < 0$ плавание по пути l_i выгоднее, чем по l_j . Если $g_{ij}(w) = 0$, то затраты времени на путях l_i и l_j одинаковы. В случае $g_{ij}(w) > 0$ плавание по пути l_j более предпочтительно. Величина $\tau_{i0}(w)$ может принимать разные значения для каждого момента времени t . Тогда условная вероятность ее появления будет $q[\tau_{i0}(w), t]$, а математическое ожидание $g_{ij}(w)$, характеризующее среднее значение положительного эффекта, будет равно

$$G(w, t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_{ij}(w) q[\tau_{i0}(w), t]. \quad (1.49)$$

¹ В оперативной практике гидрометеорологического обеспечения морского флота оптимальными путями являются рекомендованные, так как они рассчитываются на основании прогностических гидрометеорологических материалов и обеспечивают наиболее вероятные условия перехода с минимальными затратами времени.

Пусть для ряда n при конкретных гидрометеорологических условиях известны время τ_{ij} , затраченное на переход по путям плавания, и эти пути: оптимальный путь (при учете идеальных гидрометеорологических прогнозов) — τ_0 , климатический (при учете климатических данных) — τ_1 , кратчайший (следование по ортодромии) — τ_2 , фактический — τ_3 и рекомендованный (оптимальный в условиях принимаемых оперативных решений с учетом методических прогнозов) — τ_4 .

Тогда для некоторых типов судов можно получить относительный экономический эффект плавания по оптимальному пути:

$$\left. \begin{aligned} \tau_{10} &= \tau_1 - \tau_0, \\ \tau_{20} &= \tau_2 - \tau_0, \\ \tau_{30} &= \tau_3 - \tau_0, \\ \tau_{40} &= \tau_4 - \tau_0, \end{aligned} \right\} \quad (1.50)$$

а также относительный экономический эффект плавания по оперативному оптимальному пути следования — рекомендованному пути:

$$\left. \begin{aligned} \tau_{14} &= \tau_1 - \tau_4, \\ \tau_{24} &= \tau_2 - \tau_4, \\ \tau_{34} &= \tau_3 - \tau_4. \end{aligned} \right\} \quad (1.51)$$

Расчеты, выполненные для 235 рейсов в Северной Атлантике за период 1967—1970 гг., показали следующее: 1) оптимальные пути τ_4 по сравнению с другими видами маршрутов оказались более близкими к кратчайшим; 2) суда, следовавшие в соответствии с рекомендациями τ_4 Гидрометцентра СССР, получили средний выигрыш τ_{14} по сравнению с переходами по климатическим путям, равный 6 ч, а зимой — 8.

Эффективность плавания судов определяется путем сравнения фактического ходового времени на рекомендованном маршруте (t) со средним ходовым временем ($\bar{t}$) на этом пути для данного типа судна.

С учетом стоимости судо-суток или среднесуточного дохода c можно найти экономический эффект, равный

$$\Theta = c\Delta t. \quad (1.52)$$

Здесь Δt — выигрыш времени на оптимальном пути следования по сравнению с климатическим; $\Theta = S_m - S_k$, где S_m — экономия материальных средств на оптимальном пути; S_k — экономия материальных средств при среднеклиматических условиях, когда ходовое время равно $\bar{t}$.

Зная Θ и S_0 (стоимость содержания оперативной группы, обеспечивающей суда оптимальными путями следования), по формуле (1.14) определяем экономическую эффективность плавания судов по оптимальным путям.

Экономическая эффективность прогнозов погоды по морскому порту определяется по предотвращенным убыткам. Дзюбенко Е. В. и Непоп К. И. предложили следующую методику. Пусть по многолетним данным установлено, что ежегодно в порту предотвращаются в среднем $\bar{n}$ аварий. Общий убыток от аварий судов будет определяться стоимостью их ремонта и стоимостью вынужденного простоя (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Средние убытки ремонта и простоя судов в зависимости от их тоннажа

Экономический показатель	Крупно-тоннажные суда	Средне-тоннажные суда	Малотоннажные суда
Средняя стоимость судна, млн. руб.	3,5	1,2	0,15
Средняя стоимость ремонта, % от стоимости судна	5	5	5
Средняя стоимость ремонта судна, тыс. руб.	175	60	7,5
Средняя продолжительность ремонта судна, сут.	15	12	7
Средние убытки от часа простоя, руб.	82	46	18
Среднемультилетнее распределение аварий, % по тоннажу судов ($\bar{a}$)	36	46	18

Экономический эффект — сбережение материальных средств за счет использования метеорологических прогнозов — можно определить по формуле

$$\Theta = \sum_{i=1}^3 n c_{\text{рем}} + \sum_{i=1}^3 n c_{\text{ст}} t_{\text{рем}}, \quad (1.53)$$

где n — число предотвращенных аварий, вычисляемое по трем категориям судов отдельно; $c_{\text{рем}}$, $c_{\text{ст}}$ — средняя величина затрат на ремонт судна и за час простоя; $t_{\text{рем}}$ — средняя продолжительность ремонта судна.

Для оценки числа предотвращенных аварий n используется формула вида

$$n = \bar{n} \frac{N}{\bar{N}} \frac{\bar{a}}{a}, \quad (1.54)$$

где N — количество судов, обработанных в порту за год; $\bar{a}$ — средняя многолетняя аварийность в процентах по тоннажу судов (см. табл. 1.5); $\bar{N}$ — среднее годовое количество судов, обрабатываемых портом до открытия гидрометеорологического бюро.

Экономическая эффективность рейсовых прогнозов ветра для лесосплава на озерах и водохранилищах складывается из двух величин: выгоды за счет оправдавшихся прогнозов и расходов, вызванных ошибочными прогнозами.

Введем следующие обозначения:

N — число 12-часовых прогнозов ветра за месяц; n_{ij} — число 12-часовых прогнозов в каждой ячейке матрицы оправдываемости альтернативных прогнозов опасного для лесосплава ветра; m — число 12-часовых прогнозов ветра в одном рейсе, т. е. $m = \frac{\tau_i}{12}$, где τ_i — продолжительность рейса на озере, водохранилище и т. п.; M — число плотов; $r = \frac{N}{m}$ — число полных рейсовых прогнозов за месяц; $k = \frac{M}{r}$ — число плоторейсов, приходящихся на один полный рейсовый прогноз.

Стоимость сплава одного плоторейса C определяется как отношение стоимости всего лесосплава за месяц к числу плоторейсов. Можно записать

$$C = \frac{cQ}{M}, \quad (1.55)$$

где c — стоимость сплава 1 м³ леса; Q — количество древесины (м³), сплавленной за месяц.

Стоимость содержания одного плоторейса (c) характеризует издержки, приходящиеся на один плоторейс и связанные с обслуживанием транспортировки плота (расход горючего на буксировку, заработная плата, амортизационные расходы и т. п.), и определяется, главным образом, величиной простоя плота в убежище при опасном ветре.

Значения n_{ij} в табл. 1.6 — частоты оправдавшихся (n_{11} , n_{22}) и неоправдавшихся (n_{12} , n_{21}) альтернативных прогнозов скорости ветра v .

Таблица 1.6

Матрица сопряженности альтернативных прогнозов ($\Pi_i \sim \Phi_j$)

Фактически было, Φ_j		Прогноз, Π_i		$\Sigma \Phi_j$
		Π	$\bar{\Pi}$	
		$V \geq V_{\text{макс}}$	$V < V_{\text{макс}}$	
Φ	$V \geq V_{\text{макс}}$	n_{11}	n_{12}	n_{10}
$\bar{\Phi}$	$V < V_{\text{макс}}$	n_{21}	n_{22}	n_{20}
$\Sigma \Pi_i$		n_{01}	n_{02}	N

Для каждой ячейки матрицы находим $\tilde{n}_{ij}$ — количество плоторейсов, приходящихся на данное число полных рейсовых прогнозов:

$$\tilde{n}_{ij} = k r_{ij} = k \frac{n_{ij}}{m}. \quad (1.56)$$

Матрица стоимости лесосплава или грузопотока (табл. 1.7) содержит значения s_{ij} .

Таблица 1.7

Матрица стоимости лесосплава s_{ij}

Фактически было, Φ_j		Потребитель ориентируется на прогноз, Π_i	
		Π	$\bar{\Pi}$
		$V \geq V_{\text{макс}}$	$V < V_{\text{макс}}$
Φ	$V \geq V_{\text{макс}}$	s_{11}	s_{12}
$\bar{\Phi}$	$V < V_{\text{макс}}$	s_{21}	s_{22}

Далее определяем потери s_{ij} .

Для первой ячейки ($\Pi \sim \Phi$) находим

$$s_{11} = \bar{a} \tilde{n}_{11} - \tilde{c} \tilde{n}_{11} = \tilde{n}_{11} (\bar{a} - \tilde{c}). \quad (1.57)$$

Здесь $\bar{a} = \frac{zc'}{M}$ — средняя стоимость условной аварийности, где z — потери древесины на штормовой день в данном году; c' — стоимость 1 м³ леса.

Для второй ячейки ($\bar{\Pi} \sim \bar{\Phi}$)

$$s_{12} = c \tilde{n}_{12} - a \tilde{n}_{12} = \tilde{n}_{12}(c - a). \quad (1.58)$$

Для третьей ячейки ($\Pi \sim \bar{\Phi}$)

$$s_{21} = c \tilde{n}_{21} - \tilde{c} \tilde{n}_{21}. \quad (1.59)$$

Для четвертой ячейки ($\bar{\Pi} \sim \bar{\Phi}$)

$$s_{22} = c \tilde{n}_{22}. \quad (1.60)$$

На основании формул (1.57)—(1.60) находим экономию материальных средств за счет оперативных методических прогнозов

$$S_M = s_{22} + s_{11} - s_{21} - s_{12}. \quad (1.61)$$

Зная S_M и S_0 , по формуле (1.14) определяем экономическую эффективность прогнозов ветра.

Расчеты, выполненные А. Д. Семиной и Е. Н. Мелешкиной по Горьковскому и Куйбышевскому водохранилищам за 1972—1974 гг., показали, что экономическая эффективность P_e величина положительная и колеблется в пределах от 0,6 до 18,5 рублей на 1 рубль затрат. Наибольшие значения P_e приходятся в основном на осень, когда наблюдается большая изменчивость ветра. Это является дополнительным подтверждением экономической эффективности прогнозов ветра при метеорологическом обеспечении речного транспорта на указанных водоемах.

1.4.3. Экономическая эффективность прогнозов погоды для сельского хозяйства

Сельское хозяйство — многоотраслевое производство, требующее самой разнообразной метеорологической и агрометеорологической информации. Оно включает в себя отрасли земледелия (полеводство, овощеводство, плодоводство, виноградарство и др.) и животноводства (скотоводство, свиноводство, овцеводство, оленеводство, птицеводство и др.).

Спецификой сельского хозяйства является сезонность производства и пространственное рассредоточение на больших площадях.

Из всех отраслей народного хозяйства сельскохозяйственное производство имеет наибольшие потери от неблагоприятных метеорологических условий. Пока не представляется возможным применять эффективные меры защиты на значительных площадях. Поэтому в сельском хозяйстве особенно велики непредотвратимые убытки.

Правильный учет текущей и предстоящей погоды на сутки, несколько дней и более продолжительный период дает большой эко-

номический эффект за счет сохранения и получения добавочной сельскохозяйственной (земледельческой и животноводческой) продукции. При выполнении полевых работ учитывается, прежде всего, текущая метеорологическая информация. Значительную пользу приносят прогнозы погоды. Это особенно относится к долгосрочным прогнозам. На основе прогностической информации принимаются рекомендации по обоснованию агротехнических мероприятий, внесению минеральных удобрений и др. Долгосрочные прогнозы урожайности сельскохозяйственных культур и валового сбора зерна (агromетеорологические прогнозы) помогают лучше планировать сельскохозяйственное производство и повышать его эффективность. В сельскохозяйственной практике с успехом применяются трехдневные и периодные прогнозы. Прогнозы сроком от 3 до 10 дней позволяют спланировать отдельные виды сельскохозяйственных работ таким образом, чтобы выполнить их с наименьшими затратами средств, агротехнически грамотно или принять меры, чтобы потери свести к минимуму.

Важным агromетеорологическим прогнозом является прогноз влагосодержания в почве к началу вегетационного периода.

Успешное ведение животноводства во многом зависит от умелого использования метеорологической информации. Большое значение имеют прогнозы погоды для отгонного животноводства, особенно в периоды сложных условий работы: зимовки скота на отдельных пастбищах, весенние и осенние перегоны с низин в высокогорные пастбища и обратно.

Разность между стоимостью добавочной сельскохозяйственной продукции, полученной в результате использования агromетеорологической информации, и стоимостью этой информации представляет собой экономический эффект агromетеорологического обеспечения сельского хозяйства.

Для предотвращения потерь сельскохозяйственной продукции используются различные способы защиты сельскохозяйственных культур.

1. Экономическая эффективность прогноза заморозков

Предупреждения о заморозках передаются весной с целью предотвращения повреждения или гибели рассады овощных культур и всходов теплолюбивых культур, цветущих садов, а осенью — с целью предотвращения повреждения и гибели сельскохозяйственной продукции.

Заметим, что в настоящее время прогнозы заморозков с заблаговременностью 12—24 часа имеют высокую оправдываемость.

Пусть известно, что на обслуживаемой территории S — площадь, занятая плодовыми и овощными культурами, га; Y — средний урожай, ц/га; S^* — стоимость (в закупочных ценах) одного центнера урожая, руб/ц.

Кроме того, известны такие климатологические характеристики заморозков, как $p_{кл}$ — вероятность понижения температуры до заданных отрицательных значений, k — степень гибели или значительного повреждения культур (25, 50, 75, 100% или в долях единицы от площади S) при данной величине заморозка.

Значения k определяются предварительно по справочным материалам для различных понижений температуры воздуха. Если потребителем защитные меры не были приняты, то средние потери R (возможные убытки — u_B) будут равны

$$R = YSC^*pk. \quad (1.62)$$

Далее потребитель, получив прогноз ожидаемой величины заморозка, своевременно принимает защитные меры. В этом случае, зная снижение потерь урожая (в % или в долях единицы) вследствие применения защитных мер (k'), среднюю предупрежденность прогноза заморозков ($\bar{p}$), получим величину предотвращенных убытков

$$u_{\Pi} = Rk'\bar{p}. \quad (1.63)$$

Если известна стоимость предупредительных мер (c_0), приходящаяся на единицу площади, то экономия средств потребителя составит

$$S_M = u_{\Pi} - c_0. \quad (1.64)$$

В итоге, зная S_M и S_0 , можно определить экономическую эффективность P_3 прогноза заморозков.

Экономическая эффективность предупреждений о весенних заморозках может быть рассчитана по величине страховых возмещений.

В случае гибели или повреждения посевов по причинам неблагоприятных гидрометеорологических условий (засуха, вымокание, выпревание, заморозок и другие явления) органы Госстраха возмещают ущерб колхозам. При страховании урожая сельскохозяйственных культур возмещается 50%, а при страховании многолетних насаждений (плодовые деревья, ягодники) — 100%.

Пусть в весенний период в колхозе A высажена рассада огурцов на площади 15 га и помидоров — 60 га.

Ряду хозяйств района, в том числе и данному колхозу, передано предупреждение, что ночью ожидается понижение температуры воздуха до $-1,0^\circ$, а на поверхности почвы — до $-1,5 \div -2,0^\circ$. В колхозе A был произведен полив дождеванием стоимостью 80 рублей. В двух соседних колхозах B и C меры не были приняты и посевы овощных культур погибли на 60% площади. Они получили страховое возмещение 103 руб. на 1 га погибших растений (50% убытка).

Если бы в колхозе A не были приняты предупредительные меры, то следовало бы ожидать гибель посевов на площади 45 га (60%), что эквивалентно предотвратимому убытку

$$u_{\pi} = 206 \text{ руб.} \times 45 \text{ га} = 9270 \text{ руб.}$$

С учетом половины этой суммы как страхового возмещения и затрат (c_0) получим в итоге экономию средств

$$S_M = 9270 - 4635 - 80 = 4555 \text{ руб.}$$

2. Экономическая эффективность агрометеорологических прогнозов урожайности зерновых культур

Согласно исследованиям И. Г. Грушка и А. М. Фридмана, доход $G(S)$ при возделывании n культур на площади $S = S_1 + S_2 + \dots + S_n$ рассчитывается по формуле

$$G(S) = \sum_{i=1}^n Y_i (C_i^* - C_i) S_i, \quad (1.65)$$

где Y — средний урожай, ц/га; C_i^* — стоимость одного центнера продукции в закупочных ценах, руб./ц; C_i — затраты на производство единицы урожая, руб./ц; S_i — площадь под i -й культурой, га.

Задача сводится к тому, чтобы на основании агрометеорологического прогноза среднего урожая $Y_{\pi i}$ выбрать оптимальные площади посевов (S'_i) и получить максимально возможный доход $G'(S)$, т. е.

$$G'(S) = \max \left[\sum_{i=1}^n Y_{\pi i} (C_i^* - C_i) S'_i \right]. \quad (1.66)$$

Здесь C'_i — ожидаемые затраты на производство 1 ц зерна (руб./ц), определяемые уравнением

$$C'_i = \frac{a_i}{Y_{\pi i}} + b_i, \quad (1.67)$$

где a_i (руб./га) и b_i (руб./ц) — эмпирические постоянные величины при заданных сельскохозяйственных культурах и зонах выращивания.

Прогноз урожайности отдельных видов культур естественно поставит вопрос об изменении (сокращении или расширении) посевной площади S_i . Это, в свою очередь, повлечет изменение урожайности $Y_{\pi i}$. В итоге необходимо найти такую структуру посевных площадей, которая обеспечивает максимум $G'(S)$. Разность ΔG между доходами $G'(S)$ при оптимальных посевных площадях S'_i и $G(S)$ при стандартных посевных площадях S_i (без

учета прогноза урожайности) составляет приращение продукции, стоимость которой составляет экономический эффект-агрометеорологической информации. В соответствии с (1.14) определяется ее экономическая эффективность.

До настоящего времени еще практически не разработаны методы оценки экономической эффективности прогнозов погоды для животноводства. Однако даже грубые расчеты показывают, что специализированные прогнозы в этой отрасли сельского хозяйства способствуют правильной организации зоотехнических мероприятий, повышению рентабельности ведения животноводства, получению дополнительной продукции и снижению ее стоимости.

1.4.4. Экономическая эффективность прогнозов погоды для железнодорожного и автомобильного транспорта

Сокращение простоев, увеличение грузооборота, сохранение графика перевозок — главные параметры, определяющие экономический эффект использования метеорологических прогнозов для данного вида транспорта.

Для железнодорожного транспорта общая схема оценки полезности прогнозов погоды (особенно штормовых предупреждений) сводится к следующим положениям:

1) по значениям s_{11} и s_{12} определяются средние многолетние убытки, вызванные, например, простоями за счет снегопадов и метелей;

2) находится c_0 — затрата на техническое обеспечение и обслуживание снегоочистительной техники. На этом основании по формуле (1.14) определяется P_9 .

Экономия материальных средств за счет прогнозов метелевых условий для автомобильного транспорта определяется по формуле

$$S_m = (R - c_0)k, \quad (1.68)$$

где k — коэффициент, учитывающий роль организационных мероприятий.

В формуле (1.68) $R = p_{ij} s_{ij}$ — предотвращенный убыток (стоимость простоя) вследствие своевременно принятых предупредительных мер. Значение k меняется от 0 до 1. Если $k = 0$, то R — непредотвращенные убытки. При $k = 1$ организация предупредительных мер проводится незамедлительно и эффективно. В практике расчетов принимается $k = 0,5$.

Средняя экономия материальных средств за счет серии прогнозов гололеда (гололедицы) определяется по формуле

$$S_m = (R_T - R_{T-t}) - c_0, \quad (1.69)$$

где R_T — предотвращенные убытки 8-часового T простоя¹ транспорта за счет правильных прогнозов гололеда n_{11} ; R_{T-t} — убытки

¹ 8-часовой интервал выбран с учетом требований потребителя.

за время t вследствие неверных прогнозов гололеда n_{12} (спецавто-
транс производит подсыпку дорог песком, но с запозданием на
 t часов).

1.4.5. Экономическая эффективность прогнозов погоды для энергетики и связи

В этих отраслях народного хозяйства, как и во многих дру-
гих, прогнозы погоды находят самое широкое использование.
Грозы, образование гололеда при сильном ветре, колебания тем-
пературы воздуха и другие явления существенно влияют на ха-
рактер работы предприятий энергетики и связи. Так, при пониже-
нии температуры происходит повышение потребления электро-
энергии и тепла, вырабатываемых теплоэлектроцентралями
(ТЭЦ), а при повышении температуры — картина обратная.
Прогноз хода температуры позволяет диспетчерской службе регу-
лировать рабочую мощность энергосистемы, увеличить надеж-
ность энерго- и теплоснабжения потребителей.

Месячные прогнозы аномалий температуры могут использо-
ваться для уточнения планов топливоснабжения ТЭЦ, особенно
газотопных, не имеющих топливных складов большой емкости,
планирования, установки и ремонта линий связи.

Следуя Г. А. Карпееву и Н. Н. Кузнецовой, рассмотрим оценку
экономического эффекта прогноза температуры воздуха для теп-
лосети. При использовании теплосетью оперативных прогнозов
могут возникнуть следующие ситуации:

1) прогнозируемая температура воздуха $\Pi(T)$ ниже факти-
ческой средней суточной $\bar{T}$, что приводит к перерасходу топлива
(«перетоп»);

2) $\Pi(T) > \bar{T}$, что будет сопровождаться недодачей тепла («не-
дотоп»);

3) $\Pi(T) = \bar{T}$ — количество тепла, получаемого потребителем,
соответствует фактической температуре.

Чтобы обеспечить нормальный тепловой режим сети, ТЭЦ
должно потреблять количество топлива, равное

$$F(t) = fQ[T(t), t], \quad (1.70)$$

где f — удельный расход топлива (кг/гкал), т. е. количество топ-
лива (кг), необходимое для производства одной гигакалории
(гкал); $Q[T(t), t]$ — количество тепловой энергии в гигакало-
риях, потребляемой сетью при фактической температуре $T(t)$
в единицу времени t .

В соответствии с формулой (1.70) величина $Q[T(t), t]$ будет
оптимальной, если она отвечает фактическому ходу температуры.

В случае прогностической температуры $T_{\pi}(t)$ режим работы теплосети будет отличаться от оптимального на величину потерь

$$R(T, T_{\pi}, t) = \gamma f\{Q[T_{\pi}(t), t] - Q[T(t), t]\}, \quad (1.71)$$

где γ — стоимость одной тонны условного топлива¹.

Формула (1.71) показывает стоимость нерационально израсходованного топлива, когда $T_{\pi}(t) < T(t)$. Если $T_{\pi}(t) > T(t)$, то выгода от экономии топлива во много раз меньше тех убытков, которые появляются на предприятиях в связи с отсутствием необходимого количества тепловой энергии.

Потери за отопительный сезон при методических прогнозах будут равны

$$R_{\pi}(t_0, \tau) = \sum_{t_i=t_0}^{t_0+\tau} R_i(T_{\pi}, T, t) = k_1 \alpha(t_0, \tau) + k_2 \beta(t_0, \tau), \quad (1.72)$$

где $k_1 \alpha(t_0, \tau)$ и $k_2 \beta(t_0, \tau)$ — потери, вызванные соответственно перерасходом и недодачей тепловой энергии; k_1 и k_2 — весовые коэффициенты, определяющие степень важности потерь; τ — продолжительность отопительного сезона.

Если при инерционных прогнозах потери составят $R_{\pi}(t_0, \tau)$, то в качестве меры экономического эффекта принимается величина

$$G = R_{\pi}(t_0, \tau) - R_{\pi}(t_0, \tau), \quad (1.73)$$

а ее математическое ожидание будет равно

$$G_0(k_1, k_2) = \frac{f_0 \gamma}{\sqrt{2\pi}} (k_1 + k_2) \sum_{t_i=t_0}^{t_0+\tau} [M(R_{\pi}) - M(R_{\pi})], \quad (1.74)$$

где f_0 — удельный расход топлива в единицу времени на 1°, M — знак математического ожидания.

Расчеты, выполняемые по формулам (1.73) и (1.74), для теплоэнерго Ленинграда за отопительный сезон 1973—1974 гг., показали, что экономический эффект оперативных прогнозов температуры воздуха (относительно инерционных прогнозов) составил 620 тыс. рублей, а потенциальный экономический эффект — экономический эффект идеальных прогнозов (относительно оперативных) — на 25—30% больше.

1.4.6. Экономическая эффективность прогнозов погоды для строительства и коммунального хозяйства

Снижение материальных и трудовых потерь при использовании прогностической информации по сравнению с теми, которые имели

¹ За условное топливо принимается топливо с теплотворной способностью, равной 7000 ккал/кг.

бы место при использовании строительными организациями климатологических или инерционных прогнозов, принимается за основу оценки экономического эффекта оперативных прогнозов и штормовых предупреждений.

Пусть потребитель (например, трест жилищного строительства) получает альтернативный прогноз опасных для него условий погоды.

Если неблагоприятная погода прогнозировалась и фактически наблюдалась, то потребитель имел возможность заблаговременно предусмотреть наиболее рациональную расстановку людей и механизмов. При ожидаемых неблагоприятных условиях погоды потребитель принимает предупредительные меры в целях предотвращения аварий, расчистки рабочих мест от снежных заносов, укрытия строительных материалов и т. п. В этом случае предотвращенные потери составят величину $s_{11} = u_{\pi} - c_0$.

Если неблагоприятная погода не прогнозировалась, а фактически наблюдалась (ошибка первого рода), то потребитель несет потери s_{12} , связанные с невыполнением планового объема наружных работ, простоем рабочих, строительных механизмов и автотранспорта, а также порчей строительных материалов.

Наконец, если неблагоприятная погода прогнозировалась, но фактически не наблюдалась (ошибка второго рода), то потребитель будет иметь потери, равные величине напрасно принятых предупредительных мер, т. е. $s_{21} = c_0$.

Суммарные потери определяются по формуле

$$R = s_{12} n_{12} + c_0 n_{21} - n_{11}(u_{\pi} - c_0). \quad (1.75)$$

При условии

$$|n_{11}(u_{\pi} - c_0)| > |s_{12} n_{12} + c_0 n_{21}| \quad (1.76)$$

предотвращенные убытки больше наблюдавшихся за счет ошибок первого и второго рода. Следовательно, для данного потребителя при $R < 0$ метеорологическое обеспечение выгодно, при $R > 0$ — убыточно. Следует иметь в виду, что величина R в формуле (1.75) характеризует, в итоге, экономию материальных средств S_m , по абсолютной величине равную

$$S_m = n_{11} u_{\pi} - [s_{12} n_{12} + c_0(n_{11} + n_{21})]. \quad (1.77)$$

Выполнив аналогичные расчеты для инерционных прогнозов, можно оценить экономический эффект оперативных прогнозов.

1.5. Прогнозы погоды и защита природной среды

Производство постоянно сопровождается сбросом отходов в воздух, почву и воду. В окружающую среду поступают десятки миллионов тонн вредных газообразных, жидких и твердых при-

месей. Нарушается биогеохимическое равновесие в природе. Хозяйственная деятельность людей стала оказывать на эволюцию природы большее воздействие, чем протекающие в ней процессы. «Покорение природы» достигло таких масштабов, при которых деградация природной среды оказалась близкой к неуправляемому процессу.

Нарастающее из года в год загрязнение создало актуальную проблему века — защиту и охрану природной среды, которая приобрела международный характер.

Загрязнение природной среды вызывает ускоренный износ основных фондов и материалов, снижение урожайности и питательной ценности сельскохозяйственных культур, ухудшение состояния и продуктивности леса, загрязнение и потерю продуктивности естественных водоемов, повышение заболеваемости людей и т. п. Иллюстрацией к этому являются количественные оценки ущерба от загрязнения, выполненные в некоторых странах: Великобритания (1954 г.) — 250 млн. фунтов стерлингов; Франция (1957 г.) — 2,4 млрд. франков; ФРГ (Северный Рейн — Вестфалия, 1965 г.) — 33 млн. нем. марок; США (1950—1951 гг.) — 1,5 млрд. долл. в год (около 10 долларов на одного жителя), 1965 г. — 11 млрд. долларов и в 1968 г. — 16 млрд. долларов.

Состояние окружающей среды оценивается по содержанию в ее подсистемах вредных химических соединений и различных примесей путем сравнения с гигиеническими нормами — предельно допустимыми концентрациями (ПДК). По комплексу химических веществ определяется так называемый индекс опасности загрязнения.

Существуют два принципиально различных пути борьбы с загрязнениями. Первый — очистка вредных выбросов посредством применения различных технологических конструкций. Второй — более радикальный и более экономичный — безотходное производство, утилизация всех (или большинства) вредных для биосферы веществ (подобно производству асбеста в г. Асбест).

В основу экономического обоснования защиты природной среды положено компромиссное решение, при котором сохраняется природная система с управляемым природопользованием и развивается производство. Условие целесообразности организации безотходного производства определяется неравенством

$$(П_2 - П_1 + \Delta R) > 0, \quad (1.78)$$

где $П_1$ — приведенные затраты на дополнительную полученную продукцию в безотходном производстве; $П_2$ — приведенные затраты на получение аналогичной продукции в традиционном процессе; ΔR — уменьшение ущерба от загрязнения природной среды при использовании безотходной технологии.

При решении проблемы защиты и охраны окружающей среды первостепенное значение приобретает вопрос охраны жизни и здо-

ровья человека. Огромную опасность таят в себе смоги в крупных городах. Трагическую известность приобрели фотохимические смоги Лос-Анжелеса. Выделяемые только автомобилями вредные вещества содержат около 60% токсичных примесей.

На рис. 1.5 показана функция ущерба, связывающая рост потери трудоспособности (ПТ) в человеко-часах с увеличением концентрации окиси углерода C_{CO} .

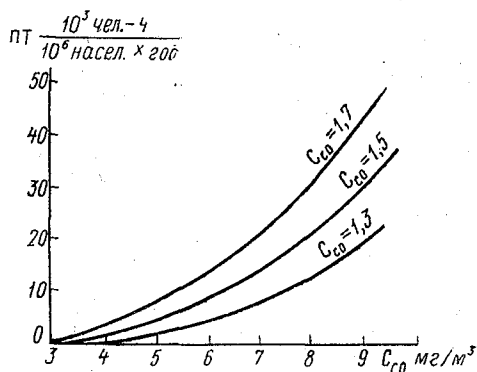


Рис. 1.5. Функция ущерба, связывающая потерю трудоспособности ПТ с концентрацией окиси углерода C_{CO} . (По Дж. Нельсону и Р. Е. Ли).

Особое значение приобретает прогноз опасных метеорологических условий, способствующих загрязнению. Регулирование выбросов, особенно значительных (при отключении и ремонте очистительных систем), должно выполняться в соответствии с прогнозом загрязнения воздуха. В последние годы такие прогнозы составляются во многих городах Союза по методике, разработанной в ГГО и других НИИ Гидрометслужбы.

Глава 2

ПРИНЯТИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

2.1. Общие положения

Метеорологические прогнозы, поступающие к потребителю, помогают ему планировать производственные операции с учетом ожидаемой погоды. Его интерес к прогностической информации определяется тем, насколько выполняемые им хозяйственные мероприятия зависят от условий погоды. При постоянной и полной зависимости хозяйственных работ от условий погоды прогнозы ее учитываются наиболее тщательно.

Связь потребителя с прогностическим центром может быть представлена некоторой функциональной моделью, отражающей систему «метеорологическая информация — потребитель» (рис. 2.1). Функциональная модель содержит два основных структурных блока. Первый блок — управляемый хозяйственный объект, чувствительный к погоде. Второй блок содержит комплекс метеорологических и неметеорологических условий (факторов), воздействующих на хозяйственный объект, которые являются источниками соответственно метеорологической и неметеорологической информации. К неметеорологической информации относятся место, объем и характер работ, материальные и людские ресурсы, технико-экономические показатели и т. п.

Производственный процесс оказывается под влиянием, с одной стороны, потока условий (объективно существующих природных и производственных факторов), с другой — потока информации о них, необходимой для экономически оптимального управления этим процессом.

Полезность метеорологической информации определяется не только ее качеством, но и тем, насколько умело, эффективно она используется потребителем. В первую очередь потребитель стремится избежать воздействия особо опасных явлений погоды, которые могут вызвать крупные убытки. Эта задача решается на основании штормовых предупреждений и постоянных консультаций с оперативным прогностическим центром. Последние позво-

ляют конкретизировать возможные изменения погодных условий и вовремя вносить коррективы в производственные операции.

Ориентируясь на ежедневные прогнозы погоды, потребитель планирует такой ход текущих хозяйственных мероприятий, при котором они выполняются наиболее экономично и, конечно, отвечают его плановым заданиям.

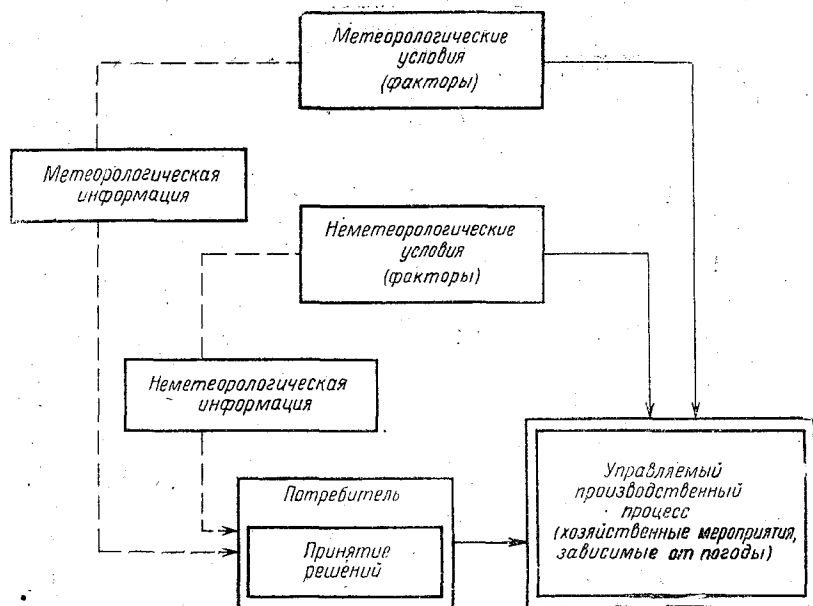


Рис. 2.1. Функциональная модель «метеорологическая информация — потребитель».

Принимаемые решения могут быть самые различные. Они зависят от специфики потребителя и используемой метеорологической информации. Решения (L_i) потребителя могут быть альтернативными (двухфазовыми), рассчитанными на их реализацию в сравнительно короткий период времени — до недели — (рис. 2.2а) или на продолжительное время — недели, месяцы — (рис. 2.2б). Например, применять или не применять предупредительные меры, разрешать или запрещать выполнение определенных работ и т. п.

В некоторых случаях принимается одно из нескольких возможных многофазовых решений, рассчитанных на короткий (рис. 2.2в) или продолжительный (рис. 2.2г) отрезок времени выполнения хозяйственных мероприятий. Так, на основании прогноза погоды могут выдаваться различные решения о выполнении непродолжительных работ в морском порту, в промышленном и жилом строительстве, при выполнении транспортных работ и т. д. К многофазовым решениям, ориентированным на длитель-

ный период, можно, например, отнести планирование подкормки яровых культур на основании прогноза влагообеспеченности на вторую половину периода вегетации.

Решения потребителя, следующие одно за другим, в поисках благоприятного хода, процесса или развития длительных операций, можно назвать последовательно многофазными (рис. 2.2д). Это, например, решения, принимаемые в период проводки судов в ледовых условиях, при использовании рекомендаций оптимальных путей следования судов в море и т. д.

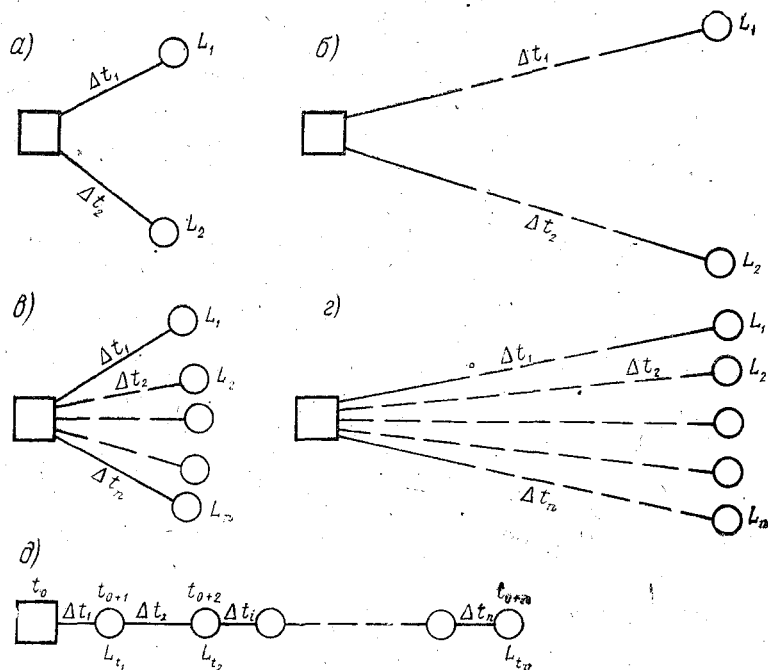


Рис. 2.2. Основные виды решений потребителя:

t_0 — начальный момент принятия решения; Δt — период заблаговременности решения

Поскольку осуществление прогнозируемой погоды носит вероятностный характер, то принимаемые потребителем решения, рассчитанные на идеальный прогноз, не всегда имеют благоприятный исход. Задача состоит в том, чтобы неудачные решения свести к минимуму. Это возможно, если принимать оптимальные решения.

Каждое решение потребителя отвечает определенному состоянию ожидаемой погоды. Множества возможных хозяйственных решений и обуславливающих их состояний погоды являются содержанием математико-экономической модели оптимизации.

2.2. Функции полезности: функции выигрышей и потерь по метеорологическим причинам

Весь спектр прогнозируемых (Π_i) и фактических (Φ_j) значений метеорологических элементов и явлений погоды можно представлять в виде последовательного непрерывного ряда значений или ряда градаций, или фаз погоды. Матрица сопряженности $\Pi_i \sim \Phi_j$ (табл. 2.1) позволяет рассчитать вероятности (p_{ij}) осуществления каждой фазы погоды. Тем самым все категорические прогнозы переводятся в вероятностную форму, что необходимо потребителю для последующего выбора оптимальной хозяйственной стратегии.

Таблица 2.1

Матрица сопряженности $\Pi_i \sim \Phi_j$

Фактическая погода, Φ_j	Прогноз, Π_i				$\sum_{i=1}^n p_i$
	Π_1	Π_2		Π_n	
Φ_1	p_{11}	p_{12}	...	p_{1n}	p_{10}
Φ_2	p_{21}	p_{22}	...	p_{2n}	p_{20}
...	...	...	...	...	...
Φ_m	p_{m1}	p_{m2}	...	p_{mn}	p_{m0}
$\sum_{j=1}^m p_j$	p_{01}	p_{02}	...	p_{0n}	1

Для сравнительной оценки может быть получена аналогичная матрица сопряженности при использовании случайных, инерционных и климатических прогнозов.

Каждой ожидаемой фазе погоды Π_i соответствует определенное решение потребителя L_i по управлению хозяйственными мероприятиями.

Пусть потребитель принимает n возможных решений. Хозяйственные мероприятия при этом выполняются при m возможных фактических состояниях погоды Φ_j . Естественно полагать, что одно и то же решение может реализоваться при всех возможных фазах погоды.

Целевая задача потребителя заключается в том, чтобы найти наибольшее соответствие хозяйственных мероприятий погодным условиям и тем самым получить наибольший экономический выигрыш или нести наименьшие убытки. Далеко не все решения потребителя будут удачными и дадут желаемый результат. Для

выявления «чувствительности» объекта управления к влиянию погоды необходимо установить распределение получаемой меры полезности, которая отвечает определенным сочетаниям решений L_i и фактически наблюдавшимся условиям погоды Φ_j (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Матрица меры полезности Θ_{ij}						
Фактическая погода, Φ_j	Решения потребителя (L_i) ориентироваться на ожидаемую фазу погоды (Π_i)					
	$L_1 \sim \Pi_1$	$L_2 \sim \Pi_2$	...	$L_i \sim \Pi_i$	...	$L_n \sim \Pi_n$
Φ_1	Θ_{11}	Θ_{12}	...	Θ_{1i}	...	Θ_{1n}
Φ_2	Θ_{21}	Θ_{22}	...	Θ_{2i}	...	Θ_{2n}
...	...	...	...	...	...	...
Φ_m	Θ_{m1}	Θ_{m2}	...	Θ_{mi}	...	Θ_{mn}

Распределение $\Theta_{ij} = \Theta(L_i, \Phi_j)$ есть функция полезности принимаемых решений потребителя. Функцией полезности метеорологической информации называется зависимость меры полезности Θ_{ij} принимаемых решений данного потребителя от степени соответствия ожидаемой и фактической погоды. Характер и вид функции полезности полностью определяются спецификой потребителя.

Функция полезности может быть представлена в матричной и аналитической формах. Матрица Θ_{ij} , представленная в виде табл. 2.2, является квадратной матрицей, в которой число n хозяйственных решений совпадает с числом m установленных фаз погоды. Возможны прямоугольные матрицы Θ_{ij} . Например, потребитель может принять одно из двух решений: «посадка самолета разрешается» или «посадка самолета не разрешается» на основании одной из трех ожидаемых фаз погоды — дождь слабый, умеренный или сильный.

Значения Θ_{ij} могут иметь смысл выигрышей или потерь, обусловленных погодой. Тогда метеорологические потери будут определяться величиной

$$s_{ij} = \max_i \Theta_{ij} - \Theta_{ij}, \quad (2.1)$$

где $\max_i \Theta_{ij}$ — максимальное значение Θ_i для заданной фазы погоды Φ_j ($j = \text{const}$).

Метеорологические выигрыши, в свою очередь, определяются как разность между значениями Θ_{ij} и минимально возможным мин Θ_{ij} для заданной фазы погоды Φ_j ($j = \text{const}$):

$$g_{ij} = \Theta_{ij} - \min_i \Theta_{ij}, \quad (2.2)$$

Таким образом, метеорологические потери и выигрыши дают матрицы потерь и выигрышей, которые получены, как видим, путем простого изменения начала отсчета заданной функции. В этом случае функция вида $s_{ij} = s(L_i, \Phi_j)$ называется функцией потерь, а функция $g_{ij} = g(L_i, \Phi_j)$ — функцией выигрышей.

Для некоторых потребителей составляется матрица расходов (платежная матрица) $\{r_{ij}\}$, где

$$r_{ij} = s_{ij} - g_{ij}. \quad (2.3)$$

При $r_{ij} > 0$ имеют место расходы, при $r_{ij} < 0$ — прибыль. Такую матрицу можно назвать смешанной.

Элементы матриц потерь, выигрышей и расходов выражают в денежных или в условных единицах. Один и тот же потребитель может иметь несколько матриц потерь, а именно столько, сколько метеорологических элементов и явлений погоды он учитывает раздельно в своей деятельности. Разные потребители по одному и тому же метеорологическому элементу или явлению погоды будут иметь разные матрицы, что связано с различием в специфике их деятельности.

Наиболее широкое использование в практике находит функция потерь. Это объясняется тем, что на сферы деятельности большинства народнохозяйственных организаций преобладающее влияние оказывают метеорологические помехи, а так называемые «хорошие условия погоды» в основном отвечают уровню нулевых потерь.

Зная прогностическое Π_i значение метеорологического элемента X , на которое ориентируется потребитель, и фактическое Φ_j значение этого элемента, можно в первом приближении функцию потерь s определить разностью

$$s(L, \Phi) = s[\Phi(X) - \Pi(X)]. \quad (2.4)$$

Функция потерь описывает экономическое значение метеорологической информации для данного потребителя. Она может меняться со временем, что связано со степенью модернизации производства и совершенствования защитных мер от неблагоприятной погоды.

Наконец, функция потерь для данного потребителя будет иметь сезонные изменения. Следует иметь в виду, что для представления функции потерь $s(L, \Phi)$ в матричной форме требуется довольно большой ряд значений s_{ij} , обеспечивающий статистическую надежность результатов.

Для многих народнохозяйственных организаций функции потерь изучены еще слабо, а некоторым из них такие функции вообще неизвестны.

В своей хозяйственной деятельности потребитель ориентируется сразу на несколько метеорологических элементов и явлений погоды. Потребителя могут одновременно интересовать и температура, и видимость, и ветер. Поэтому необходимо разрабатывать комплексные факторы погоды специализированного назначения. Это, в свою очередь, позволит свести многомерные задачи оптимизации к одномерным. Например, В. П. Дмитриенко предложил использовать в агрометеорологии так называемый коэффициент продуктивности гидрометеорологических элементов. В частности, им был получен коэффициент продуктивности температуры воздуха и осадков $K(t, r)$. Это позволило найти зависимость себестоимости 1 ц зерна кукурузы C от $K(t, r)$ в виде

$$C = 1,5C_0[1 - K(t, r)],$$

где C_0 — начальная себестоимость при наиболее низких значениях $K(t, r)$.

Показатель $K(t, r)$ характеризует вклад температуры воздуха и осадков в формирование сельскохозяйственной продукции и имеет определенное аналитическое выражение.

На основании значений $C_{ij} \approx \Theta_{ij}$ устанавливается функция потерь для данного потребителя по комплексному гидрометеорологическому фактору $K(t, r)$.

К такого рода комплексам относятся параметры, характеризующие ветровую и гололедно-ветровую нагрузку, показатель жесткости погоды по Бодману и другие.

Функции потерь вида (2.4) называются разностными. Это указывает на то, что потери при $(\Phi - \Pi) = \text{const}$ имеют одну и ту же величину при всех значениях Φ , т. е. зависят только от величины и знака ошибки.

Рассмотрим некоторые функции потерь.

1. Линейная функция потерь

$$s(L, \Phi) = \begin{cases} A_1(\Phi - \Pi) & \text{при } \Phi > \Pi, \\ A_2(\Pi - \Phi) & \text{при } \Phi \leq \Pi. \end{cases} \quad (2.5)$$

Величина потерь меняется линейно в зависимости от ошибки $(\Phi - \Pi)$. Однако приращение потерь будет различаться при $\Phi > \Pi$ и $\Phi < \Pi$. Например, существенно различные последствия имеет знак ошибки прогноза температуры для теплоцентралей города. Так, если температура прогнозируется ниже, а фактически наблюдалась выше ($\Phi > \Pi$), то это приведет к большему, чем необходимо, расходу топлива. В городе возникает так называемый «перетоп». Убытки, связанные с перерасходом топлива, понесла только теплоцентраль. В случае, если температура прогно-

зировалась выше фактически наблюдавшейся ($\Phi < \Pi$), то топливо расходуется меньше необходимого. Возникает более опасная по последствиям ситуация — «недотоп». На предприятиях города, в коммунальных хозяйствах, в учреждениях складываются крайне неблагоприятные условия работы вплоть до аварийных. Потери во втором случае во много раз больше первых. Рассмотренные потери схематически изображены на рис. 2.3. Такое распределение характерно для разностной линейной асимметричной функции потерь.

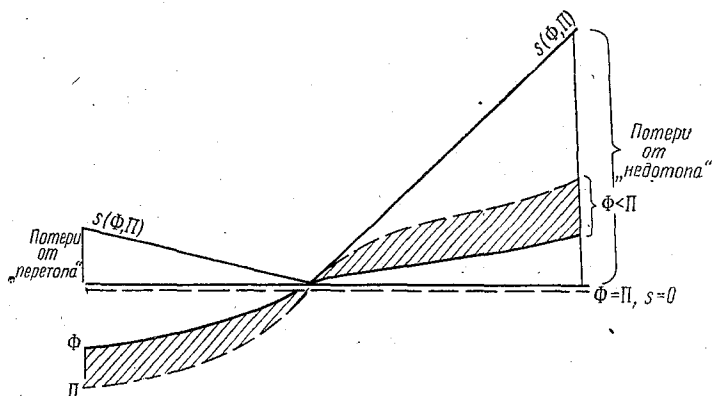


Рис. 2.3. Распределение потерь s при различных ошибках прогноза температуры $\Phi - \Pi$ для теплоцентралей.

2. Квадратическая функция потерь

$$s(L, \Phi) = \begin{cases} B_1(\Phi - \Pi)^2 & \text{при } \Phi > \Pi, \\ B_2(\Phi - \Pi)^2 & \text{при } \Phi \leq \Pi. \end{cases} \quad (2.6)$$

Функции потерь, представленные формулами (2.5) и (2.6) при $\Phi = \Pi$ имеют нулевой пороговый уровень.

Нулевой пороговый уровень — такое значение метеорологического элемента или интенсивности явления, которое соответствует выбранному началу отсчета.

3. Линейная функция потерь с ненулевым пороговым уровнем ε

$$s(L, \Phi) = \begin{cases} A_1(\Phi - \Pi - \varepsilon) & \text{при } \Phi \geq (\Pi + \varepsilon), \\ 0 & \text{при } |\Phi - \Pi| < \varepsilon, \\ A_2(\Pi - \Phi - \varepsilon) & \text{при } \Phi \leq (\Pi - \varepsilon). \end{cases} \quad (2.7)$$

4. Квадратическая функция потерь с ненулевым пороговым уровнем ε .

$$s(L, \Phi) = \begin{cases} B_1(\Phi - \Pi - \varepsilon)^2 & \text{при } \Phi \geq (\Pi + \varepsilon), \\ 0 & \text{при } |\Phi - \Pi| < \varepsilon, \\ B_2(\Pi - \Phi - \varepsilon)^2 & \text{при } \Phi \leq (\Pi - \varepsilon). \end{cases} \quad (2.8)$$

5. Линейно-квадратическая функция потерь

$$s(L, \Phi) = \begin{cases} A(\Pi - \Phi) & \text{при } \Phi \leq \Pi, \\ B(\Phi - \Pi)^2 & \text{при } \Phi > \Pi. \end{cases} \quad (2.9)$$

Коэффициенты A и B — практическая «цена» отрицательных и положительных отклонений фактической погоды Φ_j от погоды по прогнозу Π_i , на которую ориентируется потребитель.

Нулевой пороговый уровень или просто пороговый уровень — заранее установленное значение метеорологического элемента (комплекса) или интенсивности явления, принимаемое потребителем за опасный предел. Например, заморозок — критическое значение температуры воздуха или поверхности почвы, ниже которого наблюдается поражение определенного вида сельскохозяйственной культуры; штормовой ветер — критическое значение скорости ветра для конкретного потребителя, выше которого отмечается значительный рост ущерба; минимум погоды — предельно допустимые значения высоты облачности, видимости и ветра, обеспечивающие безопасность взлета и посадки самолета и другие.

2.3. Условия оптимального поведения потребителя

2.3.1. Решения и стратегия потребителя

Потребитель, получив необходимую метеорологическую и неметеорологическую информацию, принимает решение (L_i) о дальнейших действиях по выполнению хозяйственных мероприятий. Решения могут касаться прекращения или начала определенных работ или производственных операций, внесения корректив в их ход. Любые из этих решений потребитель выносит, прежде всего, заблаговременно на основании ожидаемой погоды (Π_i). Заблаговременность решений зависит от продолжительности и характера выполняемых производственных операций. Крупные разовые хозяйственные мероприятия часто требуют большой заблаговременности решения, скажем за месяц и более. Оперативные хозяйственные мероприятия требуют ежедневных решений.

С учетом всей информации потребитель стремится выработать такое решение, которое способствует экономически оптимальному

режиму данной производственной операции или любого другого хозяйственного предприятия. Такое решение потребителя называется оптимальным. К нему он стремится всякий раз, чтобы в определенных ситуациях действовать единственно правильным образом. В действительности не каждое его решение может оказаться наилучшим. Однако потребитель каждый раз на основании метеорологической и неметеорологической информации стремится выработать вполне определенную линию своего поведения, некую производственную стратегию (S). Решение потребителя есть его одноразовое поведение, а стратегия — некоторый принцип его поведения, выработанный алгоритм действий, направленный на оптимизацию производственных задач.

Если ожидаемой фазе погоды соответствует только одно решение, то такая стратегия носит детерминированный характер и называется чистой стратегией. Например, выработка тепла ТЭЦ планируется в полном соответствии с ожидаемыми изменениями температуры.

В большинстве производственных задач выбор решения чаще всего сводится к стохастической процедуре. Решение, отвечающее ожидаемой фазе погоды, выбирается из совокупности, набора возможных решений. Такая стратегия называется смешанной. Множество возможных решений является свойством экономической модели «метеорологическая информация — потребитель». При большом числе фаз погоды потребитель имеет большую степень свободы в выборе решения.

Любая стратегия потребителя в народном хозяйстве должна обеспечивать оптимальные экономические затраты или выгоды. Оптимальной стратегией (S_0) для данного потребителя называется такая, которая дает ему постоянный экономический эффект по сравнению с другими стратегиями (S_i). Стратегия, основанная на интуиции, качественных заключениях, решениях «на глаз», может оказаться неудачной или даже убыточной. Принимая решения, потребитель может использовать как оперативные методические прогнозы погоды, так и климатологическую информацию.

2.3.2. Критерии оптимальности

Чтобы установить, насколько решения потребителя оптимальны, необходимо привлечь для рассмотрения некоторые критерии оптимальности решений. Выбор критерия оптимальности зависит от специфики хозяйственной деятельности потребителя. В качестве критерия оптимальности используются такие показатели, как средние потери $R(S)$ и средний выигрыш $G(S)$, дисперсия потерь $D(S)$, вероятность крупных потерь, средний квадрат потерь. При определенной оптимальной стратегии иногда используется принцип минимакса и максимина, а также векторная оптимизация стратегий.

Рассмотрим некоторые из них. Значения s_{ij} , g_{ij} и p_{ij} будем представлять в дискретной форме. Наиболее широко используются показатели средних потерь и среднего выигрыша. Зная матрицу метеорологических потерь $s_{ij} = s(L_i, \Phi_j)$ и матрицу вероятностей $p_s = p(L_i, \Phi_j)$, можно найти математическое ожидание потерь (средние потери) для каждой стратегии

$$R(S) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m s_{ij} p_s(L_i, \Phi_j) \quad (2.10)$$

Оптимальная стратегия S_0 должна обеспечивать минимизацию средних потерь

$$R(S_0) = \min_{\langle S \rangle} R(S), \quad (2.11)$$

где $\langle S \rangle$ множество стратегий.

При известных $g_{ij} = g(L_i, \Phi_j)$ и $p_s = p(L_i, \Phi_j)$ можно найти средний выигрыш для каждой стратегии S_i

$$G(S) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_{ij} p_s(L_i, \Phi_j). \quad (2.12)$$

Оптимальная стратегия S_0 в этом случае должна обеспечивать максимизацию среднего выигрыша

$$G(S_0) = \max_{\langle S \rangle} G(S). \quad (2.13)$$

Критерии $R(S)$ и $G(S)$ связаны между собой соотношением

$$G(S) = \Theta - R(S), \quad (2.14)$$

где Θ — постоянная величина. Следовательно, оптимальная стратегия, минимизирующая средние потери, в то же время будет максимизировать средний выигрыш.

Для некоторых потребителей представляет интерес не столько средняя величина потерь, сколько разброс этих потерь относительно средней. Организация производства ставится в зависимость от стабильности результатов хозяйственной деятельности. Статистической характеристикой разброса потерь является их дисперсия

$$D(S) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [s_{ij} - R(S)]^2 p_s(L_i, \Phi_j). \quad (2.15)$$

Оптимальная стратегия S_0 должна обеспечивать условие

$$D(S_0) = \min_{\langle S \rangle} D(S). \quad (2.16)$$

В качестве критерия оптимальности может быть использована вероятность потерь, превышающих некоторый заранее заданный уровень R' . Оптимальная стратегия в этом случае будет такая, при которой выполняется условие

$$p(S_0) (R > R') = \min_{\langle S \rangle} p(S) (R > R'). \quad (2.17)$$

Поиск оптимальной стратегии потребителя со сложными внутренними и внешними связями по одному критерию не всегда дает удовлетворительные результаты. Поэтому в сложной отрасли необходим поиск оптимальной стратегии по нескольким критериям.

Критерии оптимальности (2.10), (2.12), (2.15), (2.17) и другие использовались многими авторами для оценки хозяйственных решений потребителя. Так Г. А. Карпеев использовал условие (2.10) для оценки экономического эффекта плавания судов по оптимальным маршрутам. Л. С. Гандин решал задачу минимизации повторяемости крупных потерь в соответствии с условием (2.17).

Минимизация средних потерь рассматривалась А. П. Федосеевым применительно к выбору агрометеорологических рекомендаций сельскому хозяйству и Е. Е. Жуковским, выполнившим анализ оптимального использования некоторых агрометеорологических прогнозов. Задача оптимального использования гидрометеорологических прогнозов решалась М. М. Ворончуком путем минимизации среднеквадратических потерь.

2.4. Стратегия потребителя в условиях неопределенности ожидаемой погоды

2.4.1. Стратегия потребителя, рассчитанная на минимизацию крупных потерь

Пусть потребитель имеет матрицу потерь $\{s_{ij}\}$ (табл. 2.3). Ориентируясь на погоду Π_i , он может задать такой исход своих решений, при которых s не превышает некоторую величину s^* при осуществлении погоды Φ_j .

Таблица 2.3

Матрица потерь $\{s_{ij}\}$

Фактическая погода, Φ_j	Потребитель ориентируется на погоду, Π_i						Макс s_{ij} i
	Π_1	Π_2	...	Π_i	...	Π_n	
Φ_1	s_{11}	s_{12}	...	s_{1i}	...	s_{1n}	макс s_{1i}
Φ_2	s_{21}	s_{22}	...	s_{2i}	...	s_{2n}	макс s_{2i}
...	...	...	...	...	...	...	
Φ_j	s_{j1}	s_{j2}	...	s_{ji}	...	s_{jn}	макс s_{ji}
...	...	...	...	...	...	...	
Φ_m	s_{m1}	s_{m2}	...	s_{mi}	...	s_{mn}	макс s_{mi}
макс s_{ij} i	макс s_{j1}	макс s_{j2}		макс s_{ji}		макс s_{jn}	

В условиях полной неопределенности ожидаемой погоды оптимальная стратегия потребителя будет основываться на принципе минимакса, который записывается в виде

$$R(S_0) = \min_i \max_j s_{ij}. \quad (2.18)$$

Принцип минимаксимальных потерь (2.18) указывает на необходимость выбора наименьшей величины s_{ij} из всех максимальных ее значений при каждом решении L_i (нижняя строка в табл. 2.3). Такая стратегия потребителя называется минимаксовой стратегией.

В условиях полной неопределенности ожидаемой погоды возможен другой принцип выбора оптимального решения. Для этого составляется так называемая матрица последствий ошибочных решений $\{\hat{g}_{ij}\}$.

Пусть имеется матрица выигрышей $\{g_{ij}\}$, полученная потребителем по трем фазам погоды (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Матрица выигрышей $\{g_{ij}\}$

Фактическая погода, Φ_j	Потребитель ориентируется на погоду, Π_i			Макс g_{ij} i
	Π_1	Π_2	Π_3	
Φ_1	$g_{11} = 5$	$g_{12} = 4$	$g_{13} = 2$	макс $g_{1i} = 5$
Φ_2	$g_{21} = 2$	$g_{22} = 3$	$g_{23} = 5$	макс $g_{2i} = 5$
Φ_3	$g_{31} = 0$	$g_{32} = 3$	$g_{33} = 4$	макс $g_{3i} = 4$

Примечание: значения g_{ij} в данном примере приведены в условных единицах.

Преобразуем матрицу $\{g_{ij}\}$ (табл. 2.4) в матрицу $\{\hat{g}_{ij}\}$ (табл. 2.5), для чего построчно составим разности

$$\hat{g}_{ij} = \max_i g_{ij} - g_{ij} \quad (2.19)$$

Матрицу $\{\hat{g}_{ij}\}$ иногда называют матрицей сожалений. Действительно, элементы ее выражают убытки, связанные с выбором ошибочного решения. Тем самым они отражают последствия принятых решений сравнительно с теми последствиями, которые потребитель имел бы, если бы было известно точное состояние погоды Π_i .

Наиболее благоприятным решением будет ориентация потребителя на условия погоды Π_2 , при которой имеется мин макс $\hat{g}_{ij}$.

Остальные решения отвергаются. Тем самым предотвращаются чрезмерно высокие потери, сопровождающие ошибочные решения,

Матрица последствий ошибочных решений $\{\hat{g}_{ij}\}$

Фактическая погода, Φ_j	Потребитель ориентируется на погоду, Π_i		
	Π_1	Π_2	Π_3
Φ_1	0	1	3
Φ_2	3	2	0
Φ_3	4	1	0
макс $\hat{g}_{ij}$ i	4	2	3

Выбор оптимального решения будет отвечать и оптимальной для данных условий стратегии, поскольку потребитель будет постоянно ориентироваться на установленный минимакс $\hat{g}_{ij}$. Такой подход к выбору оптимальной стратегии предложен Сэвиджем и называется принципом минимакса последствий ошибочных решений.

Смысл этого принципа, как видим, состоит в том, чтобы не допустить высоких потерь, к которым могут привести ошибочные решения.

2.4.2. Стратегия потребителя в условиях частичной неопределенности ожидаемой погоды

Будем полагать, что фазы состояния погоды имеют определенные вероятности их наступления, равные $p_{10}, p_{20}, \dots, p_{n0}$. Это позволяет вычислить математические ожидания выигрышей $M_1, M_2, \dots, M_n$

$$M(g) = \sum_{j=1}^n p_{j0}(g_j). \quad (2.20)$$

Воспользуемся для примера данными табл. 2.4. Если невозможно установить вероятности осуществления Φ_j , то в грубом приближении потребитель принимает

$$p(\Phi_1) = p(\Phi_2) = p(\Phi_3) \approx 0,33.$$

Тогда для Π_i получим:

$$M_g^{\Pi_1} = 5 \cdot 0,33 + 2 \cdot 0,33 + 0 \cdot 0,33 = 2,31,$$

$$M_g^{\Pi_2} = 4 \cdot 0,33 + 3 \cdot 0,33 + 3 \cdot 0,33 = 3,30,$$

$$M_g^{\Pi_3} = 2 \cdot 0,33 + 5 \cdot 0,33 + 4 \cdot 0,33 = 3,63.$$

Как видим, оптимальной будет стратегия постоянной ориентации на Π_3 .

Допустим теперь, что Φ_j имеет разные вероятности осуществления. Примем $p(\Phi_1) = 0,6$; $p(\Phi_2) = 0,2$; $p(\Phi_3) = 0,2$.

Тогда, при $p(\Pi_i) \simeq p(\Phi_j)$ соответственно получим:

$$M_g^{\Pi_1} = 5 \cdot 0,6 + 2 \cdot 0,2 + 0 \cdot 0,2 = 3,4,$$

$$M_g^{\Pi_2} = 4 \cdot 0,6 + 3 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,2 = 3,6,$$

$$M_g^{\Pi_3} = 2 \cdot 0,6 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 = 3,0.$$

В этом случае оптимальной будет стратегия постоянной ориентации на Π_2 . Максимизация $M_g^{\Pi_i}$ дает основание потребителю выбрать стратегию постоянной ориентации на одну и ту же фазу погоды. Это позволяет снизить вероятность крупных потерь или повысить вероятность больших выигрышей.

2.5. Стратегия использования климатологической информации

Для принятия хозяйственных решений потребителю необходимо заблаговременно знать ожидаемое значение метеорологического элемента или явления погоды. В зависимости от характера выполняемых работ потребитель использует краткосрочные или долгосрочные прогнозы погоды, а также многие климатические параметры, особенно средние многолетние значения метеорологических элементов (нормы).

Допустим, что хозяйственные мероприятия потребителя находятся в зависимости от значений некоторого метеорологического элемента X , представляющего собой непрерывную случайную величину с заданной плотностью вероятности $f(x)$. Точные значения X в каждый момент времени есть Φ_j . Заранее они потребителю неизвестны. Поэтому он может принимать решения, ориентируясь на ожидаемое значение метеорологического элемента (или явление погоды) x'_i , выбранное им самостоятельно, или на прогнозируемое значение x_i^* , полученное из оперативного подразделения службы погоды. Кроме того, потребителю известно среднее многолетнее значение X , равное $\bar{x}$.

В зависимости от специфики потребителя и выбранной его ориентации на x'_i , x_i^* или $\bar{x}$ несовпадение фактических Φ_j и предполагаемых значений X соответственно равных x'_i , x_i^* , $\bar{x}$ приведет к ошибкам:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= \Phi_j - x'_i, \\ \Delta_2 &= \Phi_j - x_i^*, \\ \Delta_3 &= \Phi_j - \bar{x}, \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

которые в каждом случае приводят к экономическим потерям s_{ij} . Рассмотрим вначале общий подход использования климатологической информации.

2.5.1. Ориентация потребителя на климатическую норму

Имея климатологическую информацию $I(x_{\text{кл}})$, потребитель может выбрать стратегию S постоянной ориентации на норму $\bar{x}$:

$$S_n = I(\bar{x}) = \text{const}, \quad (2.22)$$

где $\bar{x}$ — среднее значение метеорологического элемента, определяющее стратегию хозяйственного учета климатологической информации.

Примем, что климатическая повторяемость различных значений $X = \Phi$ удовлетворительно описывается нормальным законом

$$\varphi(\Phi) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Phi - \bar{\Phi})^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.23)$$

За критерий оптимальности, т. е. эффективности действий потребителя, примем величину средних потерь, равную

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} \int s(L, \Phi) \psi(\Phi, \Pi) d\Phi d\Pi, \quad (2.24)$$

где $\psi(\Phi, \Pi)$ — совместный закон распределения переменных Φ и Π .

Интегрируя в (2.24) линейно-разностную функцию потерь (2.5) по плотности распределения (2.23) при $x = \bar{x} = \text{const}$, получим формулу для расчета средних потерь

$$R_n = (A_1 + A_2) \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}}. \quad (2.25)$$

Многие потребители на практике достаточно широко используют такой подход к учету климатической информации. Однако заметим, что ориентация на норму во многих случаях не может обеспечить принятие достаточно эффективного хозяйственно-экономического решения.

2.5.2. Климатически оптимальная стратегия

Имея климатическую информацию, потребитель может выбрать иную стратегию: он ориентируется не на x , а на некоторое значение $x = x_{\text{кл}} = \text{const}$, при котором достигается минимизация средних потерь. Тогда его стратегию запишем в виде

$$S_{\text{кл}} = I(x_{\text{кл}}) = \text{const} \quad (2.26)$$

и назовем климатически оптимальной.

Е. Е. Жуковский показал, что величина $x_{\text{кл}}$, минимизирующая средние потери, может быть получена из уравнения

$$\int_{-\infty}^x \Phi(\Phi) d\Phi = \frac{1}{1+k}, \quad (2.27)$$

где k — коэффициент неравноценности потерь, равный $\frac{A_1}{A_2}$.

Если принять, что $k=1$, т. е. $A_1=A_2$ — потери равноценны как в случае $\Pi < \Phi$, так и в случае $\Pi > \Phi$, то при любом законе распределения X климатически оптимальной стратегией является ориентация на медиану x_M .

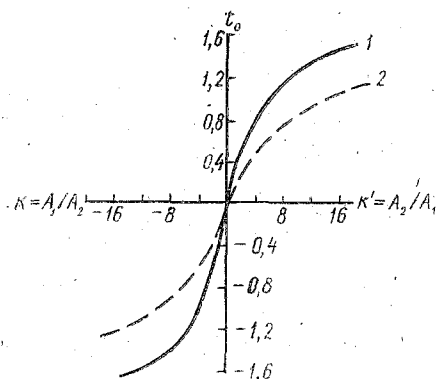


Рис. 2.4. Зависимость параметра t_0 от коэффициента k :

1 — для линейных потерь; 2 — для квадратических потерь

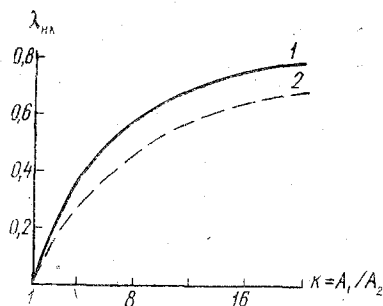


Рис. 2.5. Эффективность климатически оптимальной стратегии по сравнению с ориентацией на норму:

1 — для линейных потерь; 2 — для квадратических потерь

Для нормального распределения X уравнение (2.27) приобретает вид

$$\Phi(t) = \frac{1}{2} \frac{1-k}{1+k}, \quad (2.28)$$

где $t = (x_{\text{кл}} - \bar{x})/\sigma$ — смещение $x_{\text{кл}}$ относительно $\bar{x}$, выраженное в долях среднего квадратического отклонения σ ; Φ — интеграл вероятности.

При $k = \frac{A_1}{A_2} > 1$, когда отрицательные отклонения опаснее положительных, определяемое из уравнения (2.28) оптимальное $t = t_0$ будет меньше нуля. Потребитель при этом условии должен

ориентироваться на $x_{\text{кл}} = (\bar{x} + t_0\sigma) < \bar{x}$. Если $k = \frac{A_1}{A_2} < 1$ (положительные отклонения более опасны), то $t = t_0 > 0$ и потребителю следует ориентироваться на $x_{\text{кл}} > \bar{x}$.

На рис. 2.4 представлена зависимость t_0 от весовых коэффициентов A_1 и A_2 .

Чем больше разница в весовых коэффициентах A_1 и A_2 , тем экономически эффективнее климатически оптимальная стратегия по сравнению с ориентацией на норму.

При климатически оптимальной стратегии средние потери вычисляются по формуле

$$R_{\text{кл}} = R_{\text{н}} \exp\left(-\frac{t_0^2}{2}\right). \quad (2.29)$$

Отсюда видно, что при любых $t_0 \neq 0$ климатически оптимальная стратегия $S_{\text{кл}}$ выгоднее, чем $S_{\text{н}}$. Выигрыш при этом можно оценить с помощью показателя

$$\lambda_{\text{нк}} = 1 - \exp\left(-\frac{t_0^2}{2}\right) = \frac{R_{\text{н}} - R_{\text{кл}}}{R_{\text{н}}}. \quad (2.30)$$

С увеличением неравноценности потерь k показатель $\lambda_{\text{нк}}$ монотонно растет (рис. 2.5).

2.6. Стратегия полного доверия прогнозам погоды

Пусть имеется некоторый промежуток времени в $N = 100$ дней, в течение которого отмечается n_{10} дней с неблагоприятной погодой. Затраты на предупредительные меры за сутки обходятся в сумму c_0 , а убытки за сутки, если предупредительные меры не приняты, — Z .

Рассмотрим два возможных случая, когда в течение n_{10} дней предупредительные меры не принимаются¹.

1. Общие убытки за n_{10} дней Zn_{10} больше общей стоимости предупредительных мер за 100 дней, т. е.

$$Zn_{10} > 100c_0 \quad (2.31)$$

или

$$p_{\text{кл}} > \frac{c_0}{Z}. \quad (2.32)$$

В этом случае потребителю следует ежедневно применять предупредительные меры и общие затраты его будут равны $100c_0$.

¹ Томпсон Дж. Оперативные недочеты категорических прогнозов погоды. — Бюллетень американского метеорологического общества, 1952, № 6, с. 223—226.

2. Общие убытки за n_{10} дней меньше, чем затраты за 100 дней на предупредительные меры, т. е.

$$Zn_{10} < 100c_0 \quad (2.33)$$

или

$$p_{кл} < \frac{c_0}{Z}. \quad (2.34)$$

В этом случае потребителю не следует ежедневно применять предупредительные меры и общие затраты его будут составлять Zn_{10} .

Такова стратегия использования климатологической информации $p_{кл}$ наступления опасного явления при известных потребителю значениях c_0 и Z .

Очевидно, что при полном доверии альтернативным прогнозам потребитель будет иметь следующие затраты:

c_0n_{11} — общая стоимость предупредительных мер в n_{11} случаях правильных прогнозов наличия явления;

c_0n_{21} — общая стоимость напрасно принятых предупредительных мер в n_{21} случаях неоправдавшихся прогнозов наличия явления (ошибки второго рода);

Zn_{12} — общий убыток в n_{12} случаях неоправдавшихся прогнозов отсутствия явления (ошибки первого рода).

В n_{22} случаях оправдавшихся прогнозов отсутствия явления $c_0=0$ и $Z=0$.

Таким образом, общие затраты при использовании прогнозов определятся величиной $c_0n_{01} + Zn_{12}$. Сопоставим их с теми затратами, которые имеет потребитель в случае $p_{кл} > \frac{c_0}{Z}$. В итоге выгода G от использования прогнозов будет равна

$$G = 100c_0 - (c_0n_{01} + Zn_{12}),$$

или

$$\frac{G}{Z} = \frac{c_0}{Z} (100 - n_{01}) - n_{12}. \quad (2.35)$$

На рис. 2.6 дана зависимость между $\frac{G}{Z}$ и $\frac{c_0}{Z} < 0,1$ при различных частотах n_{12} и n_{21} при $n_{10} = 10$.

Если $\frac{c_0}{Z} = \text{const}$ и $n_{12} = n_{21}$, то с уменьшением ошибок прогноза отношение $\frac{G}{Z}$ увеличивается, т. е. растет превышение выгод над убытками. Если $n_{12} \neq n_{21}$, то $\frac{G}{Z}$ увеличивается с увеличением n_{21} или уменьшением n_{12} .

Сопоставим далее затраты при использовании прогноза с теми, которые имеет потребитель в случае $p_{кл} < \frac{c_0}{Z}$.

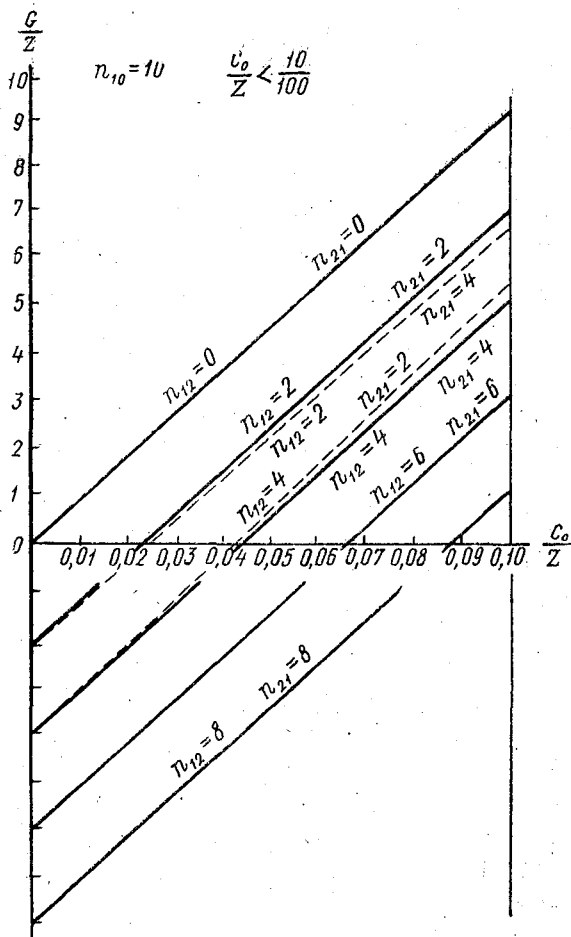


Рис. 2.6. Зависимость показателя экономического эффекта $\frac{G}{Z}$ от отношения затрат к убытку $\frac{c_0}{Z}$ при условии $p_{кл} > \frac{c_0}{Z}$ (По Г. Бийвуту и В. Блессеру).

Тогда

или

$$G = Zn_{10} - (c_0 n_{01} + Zn_{12}),$$

$$\frac{G}{Z} = n_{10} - \left(\frac{c_0}{Z} n_{01} + n_{12} \right). \quad (2.36)$$

Как видно из рис. 2.7 (здесь $\frac{c_0}{Z} > 0,1$ и $n_{10} = 10$), при $\frac{c_0}{Z} = \text{const}$ и $n_{12} = n_{21}$ отношение $\frac{G}{Z}$ увеличивается с уменьшением n_{12} и n_{21} .

В случае $n_{12} \neq n_{21}$ отношение $\frac{G}{Z}$ увеличивается с увеличением n_{21} при $\frac{c_0}{Z}$ в пределах 0,1—0,5 и уменьшается при $\frac{c_0}{Z} > 0,5$.

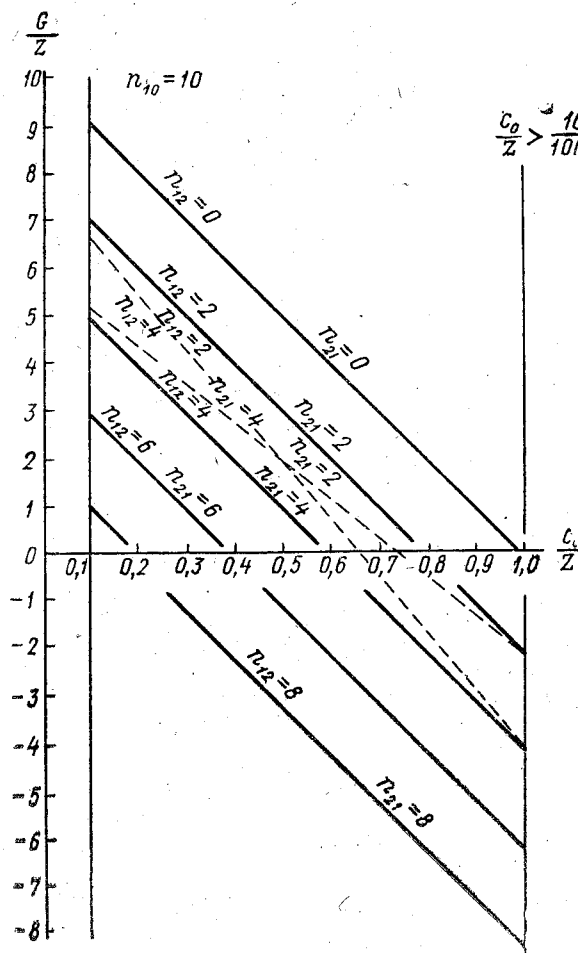


Рис. 2.7. Зависимость показателя экономического эффекта $\frac{G}{Z}$ от отношения затрат к убыткам $\frac{c_0}{Z}$ при условии $p_{кл} < \frac{c_0}{Z}$ (По Г. Бийвуту и В. Блеекеру).

Таким образом, стратегия потребителя в данном случае сводится к тому, что по известной матрице оправдываемости альтернативных прогнозов и известных c_0 и Z устанавливается оптимальное значение $\frac{G}{Z}$.

Рассмотрим далее стратегию потребителя, для которого ошибки первого и второго ряда дают равноценный экономический ущерб. Найдем некоторое критическое значение оправдываемости методических прогнозов, позволяющее дать ответ на вопрос: что экономически выгоднее при имеющейся оправдываемости — прогнозы или норма.

Если $p_{\text{кл}} > \frac{c_0}{Z}$, то общие затраты будут равны $c_0 N$, в случае $p_{\text{кл}} < \frac{c_0}{Z}$ общие затраты составят $Z n_{10}$. Приравняем общие затраты при климатологическом и методическом прогнозах.

Для первого случая, когда $p_{\text{кл}} > \frac{c_0}{Z}$ запишем

$$c_0 N = c_0 n_{01} + Z n_{12}. \quad (2.37)$$

С учетом $p = \frac{n_{11} + n_{22}}{N}$ из (2.37) получим оправдываемость p_0 , характеризующую условия равноценности затрат потребителя при использовании методических и климатологических прогнозов

$$p_0 = 1 - \frac{c_0}{Z} (1 - p_{\text{кл}}). \quad (2.38)$$

Для второго случая, когда $p_{\text{кл}} < \frac{c_0}{Z}$, запишем

$$Z n_{10} = c_0 n_{01} + Z n_{12}. \quad (2.39)$$

Отсюда

$$p_0 = 1 - 2p_{\text{кл}} \left(1 - \frac{c_0}{Z} \right). \quad (2.40)$$

Следовательно, чтобы затраты потребителя при ориентации на прогнозы погоды были меньше, чем при использовании климатических вероятностей $p_{\text{кл}}$, оправдываемость прогнозов p должна быть больше p_0 .

Из анализа формулы (2.38) следует, что чем меньше $\frac{c_0}{Z}$ и больше $p_{\text{кл}}$, тем требуется более высокая оправдываемость методических прогнозов по сравнению с климатологическими прогнозами, чтобы потребитель мог извлечь из методических

прогнозов большую пользу, чем из климатологических прогнозов. В свою очередь формула (2.40) показывает, что получить выгоду от методических прогнозов можно при условии увеличения $\frac{c_0}{Z}$ и уменьшения $p_{\text{кл}}$.

2.7. Оптимальное использование прогностической информации

В условиях современной хозяйственной деятельности из всей метеорологической информации наибольшую оперативную ценность имеют прогнозы погоды. Несмотря на известную степень их ненадежности потребитель получает возможность более уверенно принимать решения по планированию хозяйственных работ, операций, мероприятий и т. п. Однако выбор стратегии должен строиться с учетом хозяйственно-экономических особенностей отрасли хозяйства. Ориентация на прогнозы экономически полезна, если критерии оптимальности подтверждают преимущество прогнозов по сравнению с климатической информацией.

2.7.1. Стратегия использования прогностической информации непрерывных моделей

Пусть стратегия потребителя задана в виде полного доверия прогнозу

$$S_{\pi} = I(x^*). \quad (2.41)$$

При несмещенном прогнозе $\bar{x}^* = \bar{x}$, как показано Е. Е. Жуковским, средние потери рассчитываются по формуле

$$R_{\pi} = R_n \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma^*}{\sigma}\right)^2 - 2r \frac{\sigma^*}{\sigma}}, \quad (2.42)$$

где σ^* и σ — средние квадратические отклонения, относящиеся соответственно к прогностическим x^* и фактическим Φ значениям X ; r — коэффициент корреляции между x^* и Φ .

При низких значениях коэффициента корреляции, меньших некоторого уровня

$$r_{\text{нп}} = \frac{1}{2} \frac{\sigma^*}{\sigma}, \quad (2.43)$$

действия потребителя, который строго придерживается формулировки прогноза, будут менее выгодны, чем ориентация на норму, поскольку $R_{\pi} > R_n$, а тем более — на климатически оптимальные условия, так как $R_n > R_{\text{кл}}$.

На рис. 2.8 эта область эффективности стратегии обозначена цифрой 1.

Если коэффициент корреляции лежит в пределах

$$r_{\text{нп}} < r < r_{\text{кп}},$$

то стратегия полного доверия прогнозу дает некоторый выигрыш по сравнению с ориентацией на норму, но менее эффективна, чем климатически оптимальная стратегия. Здесь $r_{\text{кп}}$ определяется по формуле

$$r_{\text{кп}} = \frac{1 + \left(\frac{\sigma^*}{\sigma}\right)^2 - \exp(-t_0^2)}{2} \cdot \frac{\sigma}{\sigma^*}, \quad (2.44)$$

где t_0 — безразмерный параметр, получаемый из уравнения (2.28). В тех случаях, когда $r > r_{\text{кп}}$ величина $R_{\text{п}}$ становится меньше $R_{\text{кл}}$, а следовательно, стратегия полного доверия прогнозу имеет смысл.

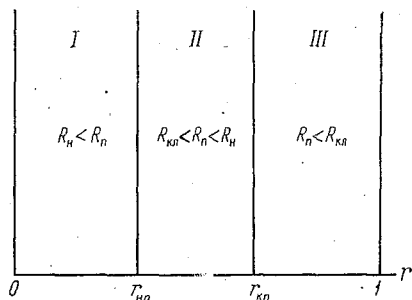


Рис. 2.8. Области различной эффективности стратегии полного доверия прогнозу:

I — $S_{\text{п}}$ хуже $S_{\text{н}}$; II — $S_{\text{п}}$ лучше $S_{\text{н}}$, но хуже $S_{\text{кл}}$; III — $S_{\text{п}}$ лучше $S_{\text{кл}}$.

В случае прогноза, составленного на основании уравнения регрессии — регрессионного прогноза — при известных r и $\sigma^* = r\sigma$, получим

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{п}} &= R_{\text{н}} \sqrt{1 - r^2}, \\ r_{\text{нп}} &= 0, \\ r_{\text{кп}} &= \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{t_0^2}{2}\right)}, \end{aligned} \right\} \quad (2.45)$$

Стратегия полного доверия регрессионному прогнозу всегда лучше, чем ориентация на норму. Чтобы определить в данном

случае преимущество S_{Π} по сравнению с $S_{\text{кл}}$, необходимо, используя те же прогнозы, избрать стратегию, которая обеспечивала бы минимум средних потерь.

Рассмотрим теперь случай, когда потребитель, получив прогноз, принимает решение, ориентируясь не на значение x^* , указанное в тексте, а на некоторую величину x_0^* , рассчитанную специальным образом. В этом случае его стратегия может быть записана в виде

$$S_0 = I(x_0^*). \quad (2.46)$$

Такая стратегия использования прогнозов погоды в целях достижения минимума средних потерь называется прогностически оптимальной.

Получив прогноз, потребитель может ориентироваться не на него, а на другое значение метеозлемента, определяемое по формуле

$$x_0^* = M(\Phi/x^*) + t_0\sigma \sqrt{1-r^2}, \quad (2.47)$$

где $M(\Phi/x^*)$ — условное математическое ожидание Φ , определяемое уравнением регрессии

$$M(\Phi/x^*) = \bar{x} + r\sigma \frac{x^* - \bar{x}}{\sigma^*}. \quad (2.48)$$

При регрессионном прогнозе, когда $\bar{x}^* = \bar{x}$ и $\sigma^* = r\sigma$, формула (2.48) принимает вид

$$M(\Phi/x^*) = x^*, \quad (2.49)$$

и для такого прогноза

$$x_0^* = x^* + t_0\sigma \sqrt{1-r^2}. \quad (2.50)$$

Стратегия S_0 состоит в том, что потребитель принимает решение, ориентируясь на значение x_0^* . Средние потери при этом рассчитываются по формуле

$$R_0 = R_{\Pi} \exp\left(-\frac{t_0^2}{2}\right) \sqrt{1-r^2}. \quad (2.51)$$

Сопоставляя R_0 с $R_{\text{кл}}$, видно, что при $r \neq 0$, S_0 всегда эффективнее $S_{\text{кл}}$. Получаемый при этом выигрыш равен

$$\lambda_{\text{кО}} = 1 - \sqrt{1-r^2} = \frac{R_{\text{кл}} - R_0}{R_{\text{кл}}}. \quad (2.52)$$

2.7.2. Стратегия использования прогностической информации дискретных моделей

Множество значений фактической погоды Φ можно представить дискретным рядом в виде m фаз $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m$, которым соответствует n формулировок прогнозов $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$.

Категорические прогнозы, составляемые в настоящее время, не дают количественной характеристики того, насколько достоверны утверждения синоптика. Имея категорический прогноз, потребитель не готов к изменениям погоды, которые не предусмотрены в прогнозе. Скажем, потребитель получил два текста прогноза: категорическое утверждение «...ожидается дождь» и вероятностное — «...ожидается дождь с вероятностью 30%». Естественно, решения потребителя могут быть неодинаковы. Более полное представление об ожидаемой погоде дает вероятностная форма прогноза. Такой прогноз Π должен содержать указание, что некоторое значение элемента или явление погоды Φ осуществится с вероятностью p .

Матрица оправдываемости категорических прогнозов позволяет преобразовать эти прогнозы в вероятностную форму.

Будем полагать, что потребитель имеет в своем распоряжении матрицу сопряженности $\{p_{ij}\}$ (матрицу оправдываемости прогнозов), определяющую совместные вероятности различных фаз погоды и формулировок (многофазовых прогнозов (табл. 2.1)).

Кроме того, потребителю известна матрица потерь s_{ij} , на основании которой он может принять одно из n решений $L_1, L_2, \dots, L_n$ (табл. 2.3).

В матрице потерь все элементы $s_{ij} > 0$ отражают те или иные метеорологические потери потребителя в тех случаях, когда потребитель ориентировался на погоду Π_i , а фактически была погода Φ_j . При $s_{ij} = 0$ потери отсутствуют.

На основании матрицы сопряженности $\{p_{ij}\}$ составим матрицу условных вероятностей

$$q_{ij} = \frac{p(\Phi, \Pi)_{ij}}{p(\Pi)_i} = \frac{p_{ij}}{p_{0i}}, \quad (2.53)$$

где $p_{ij} = p(\Phi, \Pi)$ — совместная вероятность фазы погоды Φ_j и прогноза Π_i ; $p_{0i} = p(\Pi)_i$ — вероятность формулировок прогноза Π_i .

В случае альтернативного прогноза потребитель может выбрать одно из двух решений, в случае трехфазного — одно из трех и так далее. Самое простое решение — поверить прогнозу. В этом случае осуществление фазы погоды Φ_j можно ожидать с вероятностью q_{ij} . Тогда математическое ожидание потерь выразится формулой

$$\bar{R} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m s_{ij} q_{ij}. \quad (2.54)$$

Однако стратегия полного доверия категорическому прогнозу, как уже отмечалось, далеко не всегда оптимальна. Поэтому для нахождения оптимальной стратегии потребитель, получив формулировку прогноза Π_i , может принять решение L_{ih} из расчета осуществления иной фазы погоды.

Тогда в формуле (2.54) останутся те значения условных вероятностей q_{ij} , которые соответствуют формулировке прогноза, а потери s_{ik} — те, которые соответствуют решению L_{ik} . Математическое ожидание потерь в этом случае определяется по формуле

$$\overline{R}(\Pi_i/L_h) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m s_{ih} q_{ij}, \quad (2.55)$$

где индекс k при s указывает на тот столбец в матрице $\{s_{ij}\}$, который соответствует решению потребителя.

Пусть потребитель получил формулировку прогноза Π_1 из возможных формулировок Π_n . В этом случае для каждого из решений потребителя $L_1, L_2, \dots, L_n$ математические ожидания средних потерь $\bar{R}_h$ определяются соответственно по формулам:

$$\bar{R}(\Pi_1/L_1) = \sum_{i=1}^m s_{i1} q_{i1} = s_{11} q_{11} + s_{21} q_{21} + \dots + s_{m1} q_{m1}; \quad (2.56)$$

$$\bar{R}(\Pi_1/L_2) = \sum_{i=1}^m s_{i2} q_{i2} = s_{12} q_{11} + s_{22} q_{21} + \dots + s_{m2} q_{m1}; \quad (2.57)$$

$$\bar{R}(\Pi_1/L_n) = \sum_{i=1}^m s_{in} q_{i1} = s_{1n} q_{11} + s_{2n} q_{21} + \dots + s_{mn} q_{m1}. \quad (2.58)$$

На основании формул (2.56)–(2.58) выбирается $\bar{R}(\Pi_1/L_h)$, отвечающее минимуму потерь, а следовательно, и оптимальному решению $L_0(\Pi_1)$.

Если потребитель получил формулировку прогноза Π_2 , то выполняется аналогичная процедура и $\bar{R}_k$ определяется по формулам:

$$\bar{R}(\Pi_2/L_1) = \sum_{i=1}^m s_{i1} q_{i2} = s_{11} q_{12} + s_{21} q_{22} + \dots + s_{m1} q_{m2}; \quad (2.59)$$

$$\overline{R}(\Pi_2/L_2) = \sum_{i=1}^m s_{i2} q_{i2} = s_{12} q_{12} + s_{22} q_{22} + \dots + s_{m2} q_{m2}; \quad (2.60)$$

$$\bar{R}(\Pi_2/L_n) = \sum_{i=1}^m s_{in} q_{i2} = s_{1n} q_{12} + s_{2n} q_{22} + \dots + s_{mn} q_{m2}. \quad (2.61)$$

Значение $\bar{R}(\Pi_2/L_n)$ позволяют найти оптимальное решение $L_0(\Pi_2)$.

Наконец, если потребитель получил формулировку Π_n , то $\bar{R}_k$ находятся по следующим формулам:

$$\bar{R}(\Pi_n/L_1) = \sum_{j=1}^m s_{1j} q_{jn} = s_{11} q_{1n} + s_{21} q_{2n} + \dots + s_{m1} q_{mn}; \quad (2.62)$$

$$\bar{R}(\Pi_n/L_2) = \sum_{j=1}^m s_{2j} q_{jn} = s_{12} q_{1n} + s_{22} q_{2n} + \dots + s_{m2} q_{mn}; \quad (2.63)$$

$$\bar{R}(\Pi_n/L_n) = \sum_{j=1}^m s_{nj} q_{jn} = s_{1n} q_{1n} + s_{2n} q_{2n} + \dots + s_{mn} q_{mn}. \quad (2.64)$$

Формулы (2.62) — (2.64) позволяют найти оптимальное решение $L_0(\Pi_n)$.

В итоге, для каждой из возможных формулировок прогнозов находим оптимальное решение:

Формулировка прогноза	Оптимальное решение	Минимальные потери
Π_1	$L_0(\Pi_1)$	$\bar{R}_0(\Pi_1)$
Π_2	$L_0(\Pi_2)$	$\bar{R}_0(\Pi_2)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
Π_i	$L_0(\Pi_i)$	$\bar{R}_0(\Pi_i)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
Π_n	$L_0(\Pi_n)$	$\bar{R}_0(\Pi_n)$

Полученные по формулам (2.56) — (2.64) значения $R_0(\Pi_i)$ можно представить в виде матрицы вероятных потерь R_{ij} (табл. 2.6), в каждом столбце которой устанавливается минимальное значение $R_{\min}$.

Таблица 2.6

Матрица вероятных потерь при трехфазовом прогнозе

Решение потребителя, L_k	Прогноз, Π_i		
	Π_1	Π_2	Π_3
$L_1(\Pi_1)$	$R_{11} = \bar{R}(\Pi_1/L_1)$	$R_{12} = \bar{R}(\Pi_2/L_1)$	$R_{13} = \bar{R}(\Pi_3/L_1)$
$L_2(\Pi_2)$	$R_{21} = \bar{R}(\Pi_1/L_2)$	$R_{22} = \bar{R}(\Pi_2/L_2)$	$R_{23} = \bar{R}(\Pi_3/L_2)$
$L_3(\Pi_3)$	$R_{31} = \bar{R}(\Pi_1/L_3)$	$R_{32} = \bar{R}(\Pi_2/L_3)$	$R_{33} = \bar{R}(\Pi_3/L_3)$
$R_{\min} = R_0(\Pi_{ik})$	$\bar{R}_0(\Pi_{1k})$	$\bar{R}_0(\Pi_{2k})$	$\bar{R}_0(\Pi_{3k})$

Рассмотренная оптимальная стратегия, таким образом, записывается в виде

$$S_0 = I(L_0)_\Pi. \quad (2.65)$$

В своей практической деятельности потребитель требует такой метод прогнозирования, который в целом давал бы минимальные потери по сравнению с любыми другими методами. Для этого необходимо знать «потребительскую» ценность данной прогностической методики, которая может быть получена путем сравнения методов по их общим минимальным потерям $\bar{R}_0$

$$\bar{R}_0 = \sum_{i=1}^n p_{0i} \bar{R}_0(\Pi_{ik}) \quad (2.66)$$

или

$$\bar{R}_0 = \frac{1}{N} [n_{01} \bar{R}_0(\Pi_{1k}) + n_{02} \bar{R}_0(\Pi_{2k}) + \dots + n_{0n} \bar{R}_0(\Pi_{nk})], \quad (2.67)$$

где n_{0i} — частоты формулировок прогнозов; $R_0(\Pi_{ik})$ — минимальные потери при оптимальных решениях $L_0(\Pi_i)$; N — общее число прогнозов.

Тот из методов прогнозирования, который обеспечивает минимальное значение мин $\bar{R}_0$, является экономически более полезным для данного потребителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель Е. С. Исследование операций. М., «Сов. радио», 1972. 552 с.
2. Гидрометеорология и народное хозяйство. М., Гидрометеоздат, 1976. 352 с.
3. Жуковский Е. Е., Чудновский А. Ф. Методы оптимального использования метеорологической информации при принятии решений. Л., Гидрометеоздат, 1978. 52 с.
4. Зверев А. С. Синоптическая метеорология. Л., Гидрометеоздат, 1977. 711 с.
5. Ланге О. Оптимальные решения. М., «Прогресс», 1967. 285 с.
6. Эффективность гидрометеорологического обслуживания народного хозяйства. Л., Гидрометеоздат, 1973. 164 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение	3
--------------------	---

Глава 1. Экономическая эффективность метеорологических прогнозов

1.1. Виды метеорологических прогнозов	9
1.2. Параметры оценки экономической эффективности прогнозов погоды	10
1.3. Оценка экономической эффективности метеорологических прогнозов	18
1.3.1. Оценка полезности прогнозов погоды по методу приведенных затрат	21
1.3.2. Оценка полезности прогнозов погоды при полном доверии к ним	22
1.3.3. Оценка полезности прогнозов погоды по отношению экономии к затратам	25
1.3.4. Оценка альтернативных прогнозов погоды	26
1.3.5. Оценка экономического эффекта прогнозов погоды с помощью критериев А. М. Обухова и Н. А. Багрова	30
1.4. Частные оценки экономической эффективности метеорологических прогнозов	32
1.4.1. Экономическая эффективность прогнозов погоды для авиации	32
1.4.2. Экономическая эффективность прогнозов погоды для морского и речного флота	36
1.4.3. Экономическая эффективность прогнозов погоды для сельского хозяйства	42
1.4.4. Экономическая эффективность прогнозов погоды для железнодорожного и автомобильного транспорта	46
1.4.5. Экономическая эффективность прогнозов погоды для энергетики и связи	47
1.4.6. Экономическая эффективность прогнозов погоды для строительства и коммунального хозяйства	48
1.5. Прогнозы погоды и защита природной среды	49

Глава 2. Принятие оптимальных решений на основе метеорологических прогнозов

2.1. Общие положения	52
2.2. Функции полезности: функции выигрышей и потерь по метеорологическим причинам	55

	Стр.
2.3. Условия оптимального поведения потребителя	60
2.3.1. Решения и стратегия потребителя	60
2.3.2. Критерии оптимальности	61
2.4. Стратегия потребителя в условиях неопределенности ожидаемой погоды	63
2.4.1. Стратегия потребителя, рассчитанная на минимизацию крупных потерь	63
2.4.2. Стратегия потребителя в условиях частичной неопределенности ожидаемой погоды	65
2.5. Стратегия использования климатологической информации	66
2.5.1. Ориентация потребителя на климатическую норму	67
2.5.2. Климатически оптимальная стратегия	67
2.6. Стратегия полного доверия прогнозам погоды	69
2.7. Оптимальное использование прогностической информации	74
2.7.1. Стратегия использования прогностической информации непрерывных моделей	74
2.7.2. Стратегия использования прогностической информации дискретных моделей	76
Литература	80

ЛЕОНИД АНДРЕЕВИЧ ХАНДОЖКО

Оценка экономической эффективности метеорологической информации

Учебное пособие

Редактор *З. Б. Ваксенбург*

Корректор *Л. В. Ломакина*

М-13279. Сдано в набор 20/IV 1979 г. Подписано к печати 4/XII 1979 г.
 Зак. 373. Формат бумаги 60×90¹/₁₆. Бумага мн. аппаратов. Тираж 800 экз.
 Объем 5,1 п. л. уч.-изд. л. 5. Темплан 1979 г., поз. 1275. Цена 20 коп.
 Издание ЛПИ имени М. И. Калинина, 195251, Ленинград, Политехническая, 29.

Типография 6 ВОК ВМФ