

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени М. И. КАЛИНИНА

Л. А. ХАНДОЖКО

ОЦЕНКА УСПЕШНОСТИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

Учебное пособие

Под редакцией проф. В. И. ВОРОБЬЕВА

Ленинградский
Гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА
Л-д 195196 Малоохтинский пр., 98

ЛЕНИНГРАД
1977

УДК 55.509.5

*Одобрено Ученым советом
Ленинградского гидрометеорологического института*

В учебном пособии, являющемся частью курса «Гидрометеорологическое обеспечение народного хозяйства», рассматриваются применяемые в настоящее время количественные способы оценки оправдываемости (успешности) различных метеорологических прогнозов.

Рассмотрены критерии оценки качества прогнозов в зависимости от их содержания, продолжительности действия и назначения. Уделено внимание анализу ошибок прогноза и выбору матрицы «весов» в многофазных прогнозах.

Подобное учебное пособие написано впервые. Оно предназначено для студентов-метеорологов гидрометеорологических институтов и государственных университетов. Приведенный в нем обобщенный материал будет полезным при оценке успешности метеорологических прогнозов в оперативной практике и научных исследованиях.

**Учебное пособие подготовлено в Ленинградском
гидрометеорологическом институте**

© Ленинградский политехнический институт (ЛПИ), 1977 г.

ВВЕДЕНИЕ

Значение метеорологических прогнозов для нужд народного хозяйства общеизвестно. Постоянно растут требования к совершенствованию прогностической информации: улучшению качества прогнозов, дальнейшему приближению содержания прогнозов к специфике потребителя и необходимости постепенного перехода к вероятностной форме прогноза.

Во всем многообразии вопросов, так или иначе связанных с использованием прогностической информации, особое значение приобретает задача оценки успешности прогнозирования, выявления наиболее надежных способов прогнозов метеорологических элементов и явлений погоды. В конечном итоге оценка успешности прогнозов должна производиться применительно к конкретной области приложения прогнозов. Однако здесь имеются определенные трудности, связанные с тем, что потребитель не всегда и не везде еще располагает экономическими сведениями, необходимыми прогнозисту для установления такого вида оценки.

Поэтому, в большинстве случаев, оценка успешности метеорологических прогнозов выполняется безотносительно к конечному результату, то есть экономической эффективности прогнозов. Разнообразие погодных условий, их предельных значений и допусков для тех или иных народнохозяйственных задач, способов и методов прогнозирования, особенностей оперативной работы привели к созданию большого числа критериев оценки. Некоторые из них широко используются в оперативной практике, другие — в научно-исследовательской работе. Применение критериев, естественно, должно носить избирательный характер в зависимости от вида прогноза, выбранного метеорологического элемента или явления погоды и тех задач, целей, которые должны быть решены, достигнуты оценкой успешности прогнозирования. Приведенные в пособии, на этот счет, положения имеют рекомендательный характер и далеко не исчерпывают всех других возможных модификаций оценки.

В ряде лабораторных работ по синоптической метеорологии требуется рассчитать ошибки прогноза и установить степень соответствия прогноза фактически наблюдавшимся погодным условиям. Применительно к этим и другим задачам в настоящем посо-

бии для удобства пользования критерии оценки краткосрочных и долгосрочных двухфазовых и многофазовых прогнозов даются раздельно. Особо рассматривается оценка успешности штормовых предупреждений. В зависимости от поставленной перед студентами задачи критерии оценки и возможные дополнительные условия выбираются по усмотрению преподавателя.

Пособие может быть использовано при решении ряда задач в курсовом и дипломном проектировании, а также при выполнении научных исследований по метеорологическому профилю.

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

Глава 1

ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

1.1. Общая характеристика метеорологических прогнозов и штормовых предупреждений

Исходным рабочим материалом для составления метеорологических прогнозов являются многочисленные и разнообразные метеорологические наблюдения. Такая первичная информация, необходимая для прогнозиста, должна отвечать определенным требованиям. Главными из них являются: 1) использование унифицированных современных средств и способов наблюдения и передачи с минимально допустимыми ошибками и потерей информации; 2) получение таких данных метеорологических наблюдений (у поверхности земли и на высотах), которые адекватно отражали бы состояние атмосферы и протекающие в ней физические процессы, чтобы можно было сделать правильное заключение о текущей и будущей погоде; 3) передача информации унифицированным цифровым кодом, позволяющим дешифровать метеорологические сводки с однородным содержанием; 4) обладать большой скоростью и мобильностью передачи в центры сбора.

Однако перечисленные требования выполняются не полностью, что прямо сказывается на качестве прогнозов. Это особенно относится ко второму пункту. Действительно над океанами, где пространственная плотность информации чрезвычайно мала, не всегда можно сделать правильное заключение о текущей погоде. Тем большая сложность возникает при расчете прогноза погоды.

Метеорологический прогноз содержит в сжатой форме информацию о будущем состоянии погоды, необходимую для экономически оптимального выполнения производственных задач с учетом гидрометеорологических условий.

Метеорологические прогнозы разделяются по назначению на два основных вида: **общие прогнозы погоды** (прогнозы общего пользования), передаваемые для всех граждан по радио, телевидению, помещаемые в газетах, и **специализированные прогнозы погоды**, которые составляются для отдельных отраслей народного хозяйства.

Специализированные прогнозы представляют собой основное содержание повседневной работы службы погоды. Время их составления и передачи регламентируются соответствующими соглашениями, которые устанавливаются между прогностическими подразделениями и потребителями прогнозов погоды. Однако прогнозы опасных и особо опасных условий погоды (ураганные ветры, наводнения, снегопады и сильные метели, сильные пыльные и черные бури и другие явления погоды), представляющих стихийные бедствия, должны передаваться для населения и народнохозяйственных организаций незамедлительно.

Многообразие требований, предъявляемых к прогнозам различными отраслями народного хозяйства, привели к существенному различию специализированных прогнозов между собой. Различается содержание прогноза по характеристике тех метеорологических элементов и явлений погоды, которыми интересуется данная отрасль. Так, в авиационных прогнозах в первую очередь обращается внимание на облачность; дальность видимости, туман, грозы; в морских прогнозах — на направление и скорость ветра, волнение на море; в сельскохозяйственных прогнозах — на осадки, увлажнение почвы, заморозки и т. д. Прогнозы отличаются между собой по заблаговременности, по продолжительности действия, по периодам «перекрытия» одного прогноза другим, по охвату территории и другим условиям.

Специализированные прогнозы могут быть постоянными, сезонными и временными (в течение нескольких дней, недель), разрабатываемые для выполнения отдельных срочных и важных хозяйственных мероприятий. Кроме того, могут быть разовые специализированные прогнозы по заявкам. Консультации ряда народнохозяйственных организаций о предстоящей погоде также следует рассматривать как специализированные прогнозы, выраженные в более подробной, устной форме.

К специализированным прогнозам относятся и штормовые предупреждения, составляемые в связи с угрозой возникновения опасных явлений погоды. К этим прогнозам потребитель относится с особой требовательностью и вниманием.

К специализированным прогнозам предъявляются следующие требования.

1. Прогнозы должны передаваться потребителю с достаточной для него заблаговременностью. Заблаговременность прогноза — есть промежуток времени от момента передачи прогноза потребителю до начала его осуществления, действия. Потребитель постоянно требует увеличения заблаговременности, ибо в этом видит практическую полезность прогнозов. Однако с увеличением заблаговременности уменьшается оправдываемость прогнозов. Минимум заблаговременности специализированных прогнозов устанавливается потребителем на основании опыта использования прогнозов, а максимум — прогностическим подразделением, исходя из существующих возможностей прогнозирования. Здесь определенно

лишь одно: чем больше длительность прогноза, тем больше должна быть его заблаговременность. Так, долгосрочные прогнозы большой длительности, например на месяц, сезон, имеют заблаговременность полмесяца, месяц. До сих пор для долгосрочных прогнозов не совсем удачно применяется термин «прогнозы малой или большой заблаговременности».

2. Прогнозы должны иметь устойчиво высокую оправдываемость, то есть высокую степень соответствия прогнозируемой погоды и фактической, полученную по достаточно большому числу прогнозов. Прогнозист должен вполне квалифицированно различать существо ошибок прогноза, учитывать их различное влияние на производство.

3. Выдаваемый потребителю текст (содержание) прогноза должен обладать таким свойством, при котором прогнозист не имеет возможности заранее оказывать влияние на оправдываемость прогноза. От этого недостатка свободны прогнозы, сформулированные в вероятностной форме.

4. Потребителю необходимы такие утверждения в осуществлении погоды, которые не оставляли бы места для домыслов и позволяли бы наиболее оптимально их использовать в математико-экономических моделях производства. Для этого также необходима вероятностная форма прогноза. Однако в настоящее время в оперативной практике службы погоды пока еще используется категорическая форма прогноза.

К штормовым предупреждениям предъявляются три основных требования: 1) большая заблаговременность, достаточная для принятия потребителем эффективных предупредительных мер защиты; 2) высокая оправдаемость, позволяющая экономически эффективно использовать предупредительные меры и 3) экстренность передачи — своевременное доведение его до всех потребителей и населения.

Своевременно установить развитие опасных условий погоды и заблаговременно оповестить об этом, значит предупредить возможные тяжелые последствия, в первую очередь, среди населения.

После выпуска специализированного прогноза синоптик иногда вносит коррективы — уточнение прогноза. Это нежелательные действия, но иногда необходимые. Если поступающая информация указывает на такое развитие синоптического процесса, которое может привести к возникновению опасных явлений, то ранее выданный текст прогноза следует уточнить и срочно оповестить всех потребителей, включая, при необходимости, население.

Для некоторых явлений погоды (грозы, ливневые осадки и т. п.) в прогнозах по району могут применяться термины «местами», «временами», а по пункту — «возможен». Оценка успешности таких прогнозов выполняется качественно (по знаку).

Важное место в работе прогнозиста отводится своевременному предупреждению об особо опасных для народного хозяйства гидрометеорологических явлениях. К ним относятся такие, которые по

своей интенсивности, величине, срокам наступления, продолжительности и площади распространения могут серьезно затруднить деятельность отдельных отраслей хозяйства или нанести значительный ущерб народному хозяйству и населению.

К особо опасным метеорологическим явлениям относятся:

а) ветры и шквалы — при скорости 25 м/с и более, а для прибрежных районов северных и дальневосточных морей — 30 м/с и более;

б) град — с диаметром градин более 20 мм, а также интенсивный град меньшего диаметра, причинивший значительный ущерб народному хозяйству;

в) гололед — при отложении льда на проводах и сооружениях 20 мм и более;

г) изморозь — при отложении 50 мм и более; сложное отложение льда — 35 мм и более; мокрый снег — при отложении 35 мм и более;

д) гололедица — при наличии льда или замерзшей воды на дорожных покрытиях, вызывающих прекращение движения автомобильного транспорта;

е) дожди с количеством осадков 30 мм, а для Черноморского и Приморского (ДВК) побережий 50 мм и более за 24 часа и менее; ливни с интенсивностью 20 мм за час;

ж) метели — продолжительность 24 часа и более при скорости ветра 15 м/с и более;

з) снегопады — при количестве выпавших осадков 20 мм и более за 24 часа и менее; а по районам отгонного животноводства — при увеличении высоты снежного покрова на 15 см и более;

и) температура воздуха:

— повышение до $+35^{\circ}$ и выше (по районам Средней Азии до 45° и выше) или понижение до -30° и ниже (для северных и северо-восточных районов до -50° и ниже), при резком изменении средней суточной температуры на 10° и более;

— понижение в субтропических районах до -5° и ниже;

к) туман — при видимости 100 м и менее, вызывающий прекращение движения автомобильного и железнодорожного транспорта на дорогах союзного и республиканского значения;

л) грозы — при грозовых разрядах в землю, вызывающих лесные пожары и приносящие ущерб народному хозяйству, особенно линиям связи и электропедачи;

м) пыльные бури — продолжительностью 6 часов и более при скорости ветра 15 м/с и более;

н) смерчи — пыльные на суше, вызывающие разрушения различных сооружений.

К особо опасным агрометеорологическим явлениям относятся:

а) почвенная засуха и суховеи, охватывающие более 10% посевной площади и пастбищ на обслуживаемой территории (район, область, край, республика) и вызывающие ухудшение состояния сельскохозяйственных культур и трав;

б) переувлажнение почвы продолжительными дождями, вызывающие прекращение или перерывы в сельскохозяйственных работах на 10 и более дней, вымокание посевов, пересев культур вследствие загнивания и гибели семян, прорастание зерна в валках при уборке зерновых культур на значительных площадях (более 10% общих посевных площадей обслуживаемой территории);

в) выдувание посевов с верхним слоем почвы и занос растений песком и почвой на значительных площадях (более 10% общих посевных площадей обслуживаемой территории);

г) заморозки при понижении минимальной температуры воздуха до 0° и ниже в теплый период года, приведшие к повреждению или гибели технических, овощных, плодовых и других культур на больших площадях (более 25% общих посевных площадей обслуживаемой территории);

д) замерзание, вымокание и выпревание озимых сельскохозяйственных культур на больших площадях (более 25% общих посевных площадей обслуживаемой территории);

е) ледяная корка и наст на больших площадях, занятых озимыми посевами и пастбищной растительностью, вредные для перезимовки озимых посевов и выпаса скота на пастбищах отгонного животноводства и оленеводства.

К особо опасным гидрометеорологическим явлениям на морях и океанах относятся:

а) падение и подъемы уровня моря значительно ниже или выше проектных отметок, вызывающие затопление портов и береговых сооружений или нарушение деятельности флота;

б) цунами высотой более 2 м;

в) волнение в море, опасное для судов и береговых сооружений;

г) установление ледяного покрова в сроки, близкие (± 5 дней) к самым крайним значениям за многолетний период наблюдений;

д) образование или распространение льда в районах, расположенных необычно далеко от средней многолетней границы льдов в данном бассейне;

е) напоры льда, причиняющие разрушения портовым и другим гидротехническим сооружениям;

ж) обледенение судов, угрожающее безопасности их плавания;

з) образование склянки (резуна) в районах плавания деревянных судов;

и) образование туманов парения в заливах и бухтах, продолжительностью сутки и более, при видимости 100 м и менее;

к) резкие изменения температуры воды, солености, обеднение кислородом, обогащение сероводородом, вызывающие заморы рыбы, мальков, гибель икры, необычные миграции рыбы и т. п.

л) водяные смерчи, опасные для морского флота и рыбного промысла.

м) «Тягун» в бухтах и портах, опасный для стоянок судов у причалов.

1.2. Классификация прогнозов погоды по степени точности

Различная точность современных прогнозов погоды в первую очередь зависит от методики, положенной в основу прогнозирования данного элемента или явления погоды, комплекса погодных условий или других характеристик состояния погоды. Потребитель получает прогноз в стандартной, официальной форме изложения. Схема формулировки прогноза не зависит от методики прогнозирования. Каждой формулировке соответствует определенное будущее состояние погоды. Существующие формулировки охватывают все состояния погоды.

Метеорологические прогнозы можно разделить на методические и неметодические. Первые — являются результатом применения некоторого физически обоснованного метода. Для разработки вторых, иногда называемых формальными, не требуется какой-либо аналитической или расчетной работы синоптика. К ним относятся случайные, климатологические и инерционные прогнозы. Их используют для сравнительной оценки методических прогнозов. Если апробируемый метод, дает успешность на уровне климатологических, случайных или инерционных, то использовать его в оперативной работе нет смысла.

По характеру формулировки результатов метеорологические прогнозы могут быть категорическими и вероятностными.

1.2.1. Случайные прогнозы

Случайный прогноз составляется без использования какой-либо методики. При этом случайным образом выбирается какая-либо фаза (градация, значение) метеозлемента или явления из совокупности, в которой распределение фаз (градаций, значений) соответствует климатическому. Такие прогнозы не требуют метеорологической информации. Они составляются наугад, «вслепую». Однако из опыта оперативной работы известно, что в ряде сложных синоптических ситуаций, когда трудно найти однозначное решение, формулировки прогнозов могут также оказаться случайными. Оправданность случайных прогнозов используется в качестве некоторого критерия при оценке успешности методических прогнозов.

1.2.2. Инерционные прогнозы

Прогнозы, в которых указывается (сохраняется) исходное, начальное состояние погоды называются инерционными. Свойство инерции атмосферных процессов в некоторых случаях используется в прогностических целях. Это самый простой прогноз, учитывающий текущую погоду. Согласно инерционному прогнозу, любое исходное состояние погоды можно рассматривать как прогностическое.

С увеличением продолжительности инерционного прогноза его оправдываемость в среднем уменьшается и ошибка приближается к ошибке случайного прогноза. При циклонических процессах, с быстрой сменой воздушных масс и атмосферных фронтов, инерционные прогнозы будут иметь меньшую оправдываемость, чем при устойчивой, антициклональной погоде. В последние годы над европейской территорией Союза (ЕТС) отмечается снижение успешности инерционных прогнозов, связанное с неустойчивым режимом погоды.

Свойство инерции атмосферных прогнозов широко используется не только в краткосрочных прогнозах погоды (экстрополяционные прогнозы, например, в авиации), но и в долгосрочных. Оно может быть использовано или непосредственно, или в качестве одного из факторов. Свойством инерции определяется устойчивость процессов во времени. Степень инерционности процесса можно определить по автокорреляционной функции. Автокорреляция характеризует связь между значениями изучаемого метеорологического элемента в различные моменты времени.

Коэффициент автокорреляции определяется по следующей формуле:

$$r_l = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(x_{i-l} - \bar{x})}{\sigma_x^2 N}, \quad (1.1)$$

где x_i — значение метеорологического элемента в момент i ; x_{i-l} — значение метеорологического элемента в момент $i-l$; σ_x^2 — дисперсия x ; N — число случаев.

При малых значениях параметра запаздывания l коэффициент r_l близок к единице и положителен. С увеличением l коэффициент r_l обычно уменьшается. Меняя l , можно рассчитать автокорреляционную функцию, графическое изображение которой — коррелограмма — позволяет установить наиболее выгодный для прогноза сдвиг во времени. Оправдываемость инерционных прогнозов используется в качестве критерия оценки методических прогнозов.

1.2.3. Климатологические прогнозы

Климатологическим называется такой прогноз, когда в качестве прогностической величины (фазы, градации) берется среднее многолетнее значение — норма. Для его составления также не

требуется специальной работы синоптика, а необходимо знать только результаты статистической обработки данных метеорологических наблюдений. Оправдываемость климатологических прогнозов также используется в качестве критерия оценки целесообразности применения того или иного прогностического метода.

1.2.4. Категорические прогнозы

Прогнозы, в которых указывается только фаза (градация, значение) метеоэлемента или явления называются категорическими. В формулировке такого прогноза фаза (градация, значение) метеоэлемента или явления дается в виде одного числа или одного интервала, с заранее установленными границами. По форме такие прогнозы содержат категорические утверждения, которые в действительности не имеют 100% обеспеченности. Поэтому категорические прогнозы называют еще условными или ненадежными. Под ненадежностью прогнозов здесь понимается лишь то, что не каждый из них является идеальным.

Категорические прогнозы будут формальными, если каждый раз предсказывается одна и та же фаза погоды.

Все современные официальные прогнозы как общие, так и специализированные составляются в категорической форме.

Формулировка категорического прогноза включает ряд элементов и явлений погоды, согласно порядка установленного Наставлением по службе прогнозов.

Каждый элемент и явление погоды может оцениваться раздельно, что представляет наибольший интерес в разработках новых методов прогнозирования. В оперативной практике для подведения итогов работы, определения квалификации прогнозиста, оценка успешности прогнозирования выполняется по прогнозу в целом как единому прогностическому комплексу.

1.2.5. Вероятностные прогнозы

Прогнозы погоды, в которых указана достоверная граница их осуществления, называются вероятностными. Вероятностные прогнозы содержат вероятности осуществления всех фаз (значений, градаций) прогнозируемого метеоэлемента или явления. Всякий прогноз, в сущности, содержит некоторую вероятность осуществления ожидаемой фазы погоды. Однако, чем совершеннее форма прогноза тем меньше неопределенность в его формулировке. При возрастании качества вероятностного прогноза в пределе он стремится к категорическому (к полной достоверности утверждения). В то же время современные категорические прогнозы можно рассматривать как простейший вид, частный случай вероятностных прогнозов.

Вероятностные прогнозы наиболее совершенная форма прогнозов. Никакие другие виды прогнозов не являются столь пригодными и перспективными для производственной деятельности как вероятностные прогнозы.

Если иметь достаточно длинную серию однородных по тексту и методам прогнозирования категорических прогнозов, то можно составить матрицу сопряженности или матрицу вероятностей осуществления всех фаз прогнозируемого явления или элемента погоды. В этом случае все категорические прогнозы можно представить в виде вероятностных. Однако такой категорический прогноз становится вероятностным только в среднем, тогда как настоящий вероятностный прогноз рассчитывается прогнозистом на основании конкретной синоптической ситуации. Средний же вероятностный прогноз не дает представления о той погоде, которая может наступить в конкретном случае.

1.3. Назначение метеорологических прогнозов и штормовых предупреждений

Развитие современного производства немыслимо без всестороннего учета и рационального использования природных ресурсов и, в частности, состояния окружающей атмосферы. Текущее выполнение производственных задач и их планирование в различных отраслях народного хозяйства с учетом прогнозов погоды и штормовых предупреждений позволяют существенно уменьшить потери от неблагоприятных условий погоды (сэкономить строительные материалы, энергоресурсы, сократить простои транспорта и т. д.). Получаемый при этом экономический эффект определяется не только качеством прогнозов погоды и штормовых предупреждений, но и тем, насколько рационально эти сведения используются потребителем при принятии хозяйственных решений.

Академик АН Узбекской ССР В. А. Бугаев, обсуждая основные задачи Всемирной службы погоды, в частности, отмечал, что в настоящее время «внимание науки должно быть привлечено не только к тому, как правильно составлять прогнозы, но и как правильно применять их в деле».

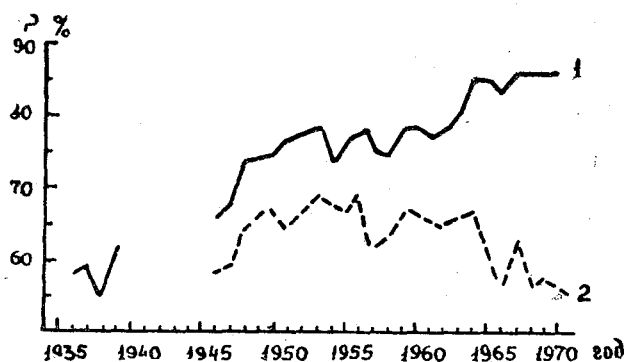


Рис. 1.1. Среднегодовая успешность суточных прогнозов погоды по Москве (согласно В. А. Бугаеву):
1 — прогнозы Гидрометцентра СССР; 2 — инерционные прогнозы

Штормовые предупреждения об опасных явлениях погоды представляют большую ценность, если они составлены вовремя и доведены до потребителя с надлежащей заблаговременностью. Однако повседневное прогнозирование, с точки зрения экономики, в государственном масштабе наиболее эффективно. Поэтому важно то обстоятельство, что успешность прогнозирования погоды имеет в целом тенденцию роста. Это хорошо иллюстрируется на рис. 1.1.

Приведем некоторые примеры экономической эффективности гидрометеорологической прогностической информации.

Ежедневные прогнозы температуры воздуха для теплосети города Москвы позволяют уменьшить на 4—5% и более расход топлива за отопительный сезон, т. е. сэкономить от 4 до 8 млн. рублей в год. В пересчете на ТЭЦ страны экономия может составить от 80 до 150 млн. рублей в год.

Агрометеорологические рекомендации по срокам внесения минеральных удобрений на полях с озимыми культурами нечерноземной зоны ЕТС может дать дополнительно, согласно расчетам В. В. Синельщикова и Е. С. Улановой, 8—10 миллионов центнеров зерна.

По подсчетам ЦНИИМФа экономия времени в денежном выражении только для 300 судов морского флота, совершивших плавание в 1965 г. рекомендованными путями, составила около 900 тыс. рублей.

Экономическая эффективность противолавинного обеспечения автодорог в Киргизии (с учетом прогнозов погоды) за период 1969—1974 гг. оценивалась от 590 до 1120 тыс. рублей в год.

Эти примеры достаточно хорошо иллюстрируют целевое назначение прогностической информации.

Глава 2

ОЦЕНКА УСПЕШНОСТИ КРАТКОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ ПОГОДЫ

2.1. Общие условия оценки

Краткосрочный прогноз погоды содержит комплекс метеорологических элементов и явлений погоды на период до 48 часов или на любые другие меньшие отрезки времени.

Оценить успешность прогнозирования можно на основании большого числа прогнозов, когда каждый из них получил свою оценку.

В соответствии с существующим Наставлением¹ каждый прогноз оценивается альтернативно — прогноз оправдался или не оправдался. При этом все элементы и явления погоды также оцениваются раздельно и аналогично получают свою альтернативную оценку.

Допустимые отклонения прогнозов от фактических состояний погоды, указанные в Наставлении, получены на основании многолетнего опыта работы службы погоды совместно с различными потребителями с учетом природной изменчивости метеозаэлементов в различных физико-географических условиях.

Ошибка прогноза будет определяться величиной отклонения предсказанных погодных характеристик от наблюдаемых.

Примем, что Π_i — прогнозируемое значение метеорологического элемента или характеристика (состояние) явления, а Φ_j — фактическая реализация погоды (осуществление) за период прогнозирования или на определенный момент времени.

Если

$$\Pi_i - \Phi_j = 0, \quad (2.1)$$

то прогноз соответствует фактической погоде — идеальная реализация

¹ Наставление по службе прогнозов, разд. 2, ч. III. Л., Гидрометеониздат, 1957.

В силу несовершенства современных прогнозов равенство (2.1) выполняется редко. Это подтверждает тот факт, что современные прогнозы не идеальны и по своей природе имеют вероятностный характер осуществления.

Как правило, прогноз погоды в той или иной мере не соответствует фактической погоде, т. е.

$$P_i - \Phi_j = \Delta(P_i, \Phi_j), \quad (2.2)$$

где $\Delta(P_i, \Phi_j)$ — ошибка прогноза.

Можно заранее принять

$$\Delta(P_i, \Phi_j) = \Delta(P_i, \Phi_j)_d$$

в качестве допустимой ошибки, величина которой устанавливается многолетним опытом конкретного потребителя.

Тогда, если

$$\Delta(P_i, \Phi_j) \leq \Delta(P_i, \Phi_j)_d, \quad (2.3)$$

прогноз считается оправдавшимся и, если

$$\Delta(P_i, \Phi_j) > \Delta(P_i, \Phi_j)_d \quad (2.4)$$

— неоправдавшимся.

Согласно Наставления, все метеорологические элементы и явления, указанные в прогнозе погоды, оцениваются отдельно с учетом формул (2.3), (2.4). Прогноз же в целом оценивается по альтернативной схеме: прогноз оправдался (P_o), если все метеорологические элементы и явления погоды спрогнозированы в пределах допустимых ошибок; прогноз не оправдался (P_n), если хотя бы один из компонентов прогноза имел ошибку большую допустимой. Такая жесткая оценка прогноза исключает возможность ее завышения.

В ряде случаев представляется необходимым дать оценку успешности прогнозов отдельного явления погоды или установить успешность прогнозирования только какого-то одного метеоэлемента, например температуры. Такая оценка требует специальной обработки материалов прогнозирования из числа уже ранее составленных прогнозов.

Все фазовые прогнозы можно разделить на две категории: **альтернативные и многофазовые**. Альтернативный (двухфазовый) прогноз имеет одно из двух взаимоисключающих содержаний: наличие или отсутствие данного состояния погоды (например, ветер двух градаций, облачность двух градаций, другие явления погоды с фазами «наличие» или «отсутствие»). Многофазовый прогноз содержит более двух фаз (например, ветер более двух градаций, облачность более двух градаций, температура более двух градаций и т. п.).

Оценка успешности прогнозирования должна производиться по достаточно большой совокупности прогнозов. Удовлетворительные результаты могут быть получены при $N \geq 30$ и хорошие при $N \geq 100$. Представительность статистического ряда необходима для того, чтобы получить достоверные значения оценки во всем диапазоне изменений данного метеорологического элемента.

Все частоты n_{ij} из общей совокупности прогнозов N должны быть соответствующим образом представлены в так называемой матрице сопряженности (таблице оправдываемости). Это обязательное условие оценки прогнозов. Ниже приводится общий вид такой таблицы (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Матрица сопряженности прогнозов
(таблица оправдываемости прогнозов)

Фактическая погода Φ_j	Прогноз Π_i				Сумма
	Π_1	Π_2	...	Π_m	
Φ_1	n_{11}	n_{12}	...	n_{1m}	n_{10}
Φ_2	n_{21}	n_{22}	...	n_{2m}	n_{20}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$	$\vdots$
Φ_n	n_{n1}	n_{n2}	...	n_{nm}	n_{n0}
Сумма	n_{01}	n_{02}	...	n_{0m}	N

На основании такой таблицы производится расчет всех критериев успешности прогнозирования. В табл. 2.1 n_{ij} — числовые величины частот соответствующей группы сопряженности $\Pi_i \sim \Phi_j$, где первая цифра при n указывает номер строки, вторая — номер столбца, n_i — прогноз данной градации и Φ_j — фактическая погода тех же градаций.

Для оценки успешности альтернативных прогнозов можно составить более простую таблицу оправдываемости (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Общий вид таблицы оправдываемости альтернативных прогнозов

Фактическая погода Φ_j	Прогноз Π_i		Сумма
	явление будет Π	явления не будет $\bar{\Pi}$	
Явление было, Φ	n_{11}	n_{12}	n_{10}
Явления не было, $\bar{\Phi}$	n_{21}	n_{22}	n_{20}
Сумма	n_{01}	n_{02}	N

В табл. 2.2 обозначены числа случаев, соответствующие сочетанию (Π_i, Φ_j). В частности:

n_{11} — число случаев оправдавшихся прогнозов наличия явления — явление прогнозировалось и наблюдалось;

n_{22} — число случаев оправдавшихся прогнозов отсутствия явления — явление не прогнозировалось и не наблюдалось;

n_{12} — число случаев не оправдавшихся прогнозов отсутствия явления — явление не прогнозировалось, но наблюдалось. Это так называемые ошибки первого рода — ошибки риска.

n_{21} — число случаев не оправдавшихся прогнозов наличия явления — явление прогнозировалось, но не наблюдалось. Это ошибки второго рода — ошибки страховки.

n_{01} — число случаев прогнозов наличия явления;

n_{02} — число случаев прогнозов отсутствия явления;

n_{10} — число случаев отсутствия явления;

n_{20} — число случаев отсутствия явления;

N — общее число прогнозов.

Чтобы установить успешность прогнозирования данного явления погоды или некоторого альтернативного состояния ее, следует рассчитать ряд показателей (критериев). Важен при этом выбор объективной шкалы значений оценки, что является принципиальным условием. В этом отношении субъективные значения оценки следует считать неудовлетворительными. Это подтверждает опыт, проведенный американским метеорологом Вэллингтоном с 84 прогнозами, которые субъективно оценивались шестью специалистами. Оценки ставились от 0 до 10. Результаты имели поразительное расхождение. Коэффициенты корреляции между оценками экспертов изменялись от 0,32 до 0,58 со средней величиной 0,45.

В настоящее время широко используются такие критерии оценки оправдываемости прогнозов как общая оправдываемость прогнозов, оправдываемость случайных, климатологических и инерционных прогнозов, критерий надежности прогнозов по Н. А. Багрову, критерий точности прогнозов по А. М. Обухову, критерий успешности прогнозов по С. Петерсену, количество прогностической информации, информационное отношение и другие показатели. Все они являются объективными критериями и широко используются в научных исследованиях и в оперативной практике.

Единого критерия, пригодного для оценки успешности любых прогнозов, не существует.

2.2. Назначения оценки прогнозов погоды

Оценка успешности прогнозов погоды позволяет установить следующие важные положения.

1. Насколько успешность данного метода отличается от успешности случайных, инерционных или климатологических прогнозов.

Иногда используется прием сравнительной оценки по отношению к идеальным прогнозам. Все это позволяет выявить лучшие методы прогнозирования.

2. При каких условиях (метеорологических, синоптических и других) данный метод имеет наилучшие результаты и при каких — ошибки прогнозирования наиболее велики. Здесь очень важно изучить ошибки прогнозов при синоптических условиях, вызывающих значительные убытки в ряде отраслей народного хозяйства.

3. Направление дальнейших исследований с целью совершенствования метода прогнозирования.

4. Эффективность работы прогнозиста.

5. Изменение успешности прогнозирования в различные периоды с целью выявления достижений науки.

Возможны и другие направления использования оценок прогнозов, связанные со спецификой и целью исследования. Укажем некоторые из них.

1. Оценка влияния на ошибки прогнозов метеорологических элементов и явлений погоды направления перемещения и эволюции барических образований, того или иного синоптического процесса, формы циркуляции и т. п. Такая дифференцированная оценка успешности прогнозов требует большого числа их случаев.

2. Определение ошибок прогнозов самих синоптических объектов: перемещения атмосферных фронтов, барических образований и их эволюции. Результаты оценки таких прогнозов можно, например, представить в виде табл. 2.3.

Таблица 2.3

Число случаев и процент отклонений центров циклонов на прогностических картах по сравнению с фактическими

Способы прогноза	Отклонения, км						Всего	
	0 — 200		201 — 400		401 и более			
	число случаев	процент	число случаев	процент	число случаев	процент	число случаев	процент
Способ а								
Способ б								
.....								
Способ к								

Это может быть дополнительной оценкой приземных и высотных прогностических карт погоды.

3. Если прогностическая карта охватывает обширную территорию, то возникает необходимость определить ошибки прогнозов

в зависимости от географического района. Разделение территории (районирование) задача особая и сложная. Однако иногда районирование выполняется приближенно и положение отдельных районов и их границ носит заданный, условный характер. Районирование может быть выполнено с учетом региональных особенностей подстилающей поверхности, повторяемости барических образований и других факторов. Одна из возможных схем районирования приведена на рис. 2.1.

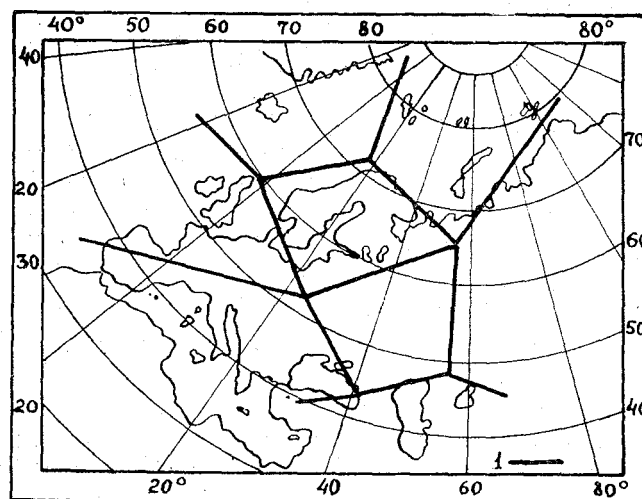


Рис. 2.1. Схема деления территории по географическому признаку:
1 — условные границы районов

Оценка успешности прогнозов по отдельным районам при всей условности районирования весьма полезна. В этом случае представляется возможным выявить возмущающее влияние физико-географических факторов на атмосферные процессы.

4. При наличии большого числа прогнозов можно оценить успешность прогнозов по месяцам или сезонам.

В итоге можно использовать схему-алгоритм дифференцированной оценки успешности прогнозов (рис. 2.2).

В качестве определяющего фактора может быть принята: траектория барического образования или наличия барического образования, характеристики барического поля на высотах и т. п.

Поскольку оценка успешности в конечном итоге преследует цель улучшения качества прогнозирования, то последующая дифференция условий будет зависеть от изучаемого метеорологического элемента или явления погоды. В качестве примера приведем некоторые из условий:

1) оценка успешности прогнозов температуры в различных частях барического образования, от особенностей его эволюции (стадий), от состояния облачности, почвы и т. д.;

2) оценка успешности прогнозов заморозков в зависимости от адвекции температуры, состояния почвы, эволюции антициклона и т. п.;

3) оценка успешности прогнозов гроз в зависимости от типа атмосферного фронта или воздушной массы, от особенностей распределения вертикальных движений и адвекции температуры в тропосфере и т. п.;

4) оценка успешности долгосрочных прогнозов в зависимости от формы циркуляции, интенсивности зональной или меридиональной циркуляции и других особенностей макропроцесса.

Трудно перечислить все возможные варианты условий, однако учет их крайне необходим при выявлении причин ошибок прогнозирования и поиска путей совершенствования прогнозов.

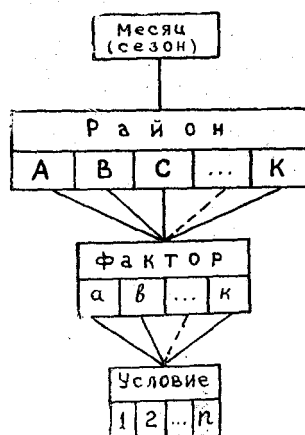


Рис. 2.2. Схема — алгоритм дифференцированной оценки успешности прогнозов

2.3. Требования, предъявляемые к оценке прогнозов погоды

Оценка прогнозов погоды предусматривает два рабочих этапа. На первом этапе производится сбор необходимого материала. Это могут быть прогнозы, которые составлялись в оперативных условиях. Здесь не допускаются пропуски случаев — прогнозов или произвольные частичные выборки на усмотрения оценщика. Кроме того, могут быть использованы прогнозы, выполненные по архивным материалам для проверки метода прогнозирования. Ряд для такой оценки должен быть независимым от того ряда данных, на основании которого разрабатывался метод прогнозирования. В этом случае он должен быть однородным, обладать высоким качеством и включать данные за все ситуации, для которых этот метод применим.

На втором этапе производится расчет критериев оценки. Предъявляемые при этом требования сводятся к следующим:

1. Объективность оценки, т. е. независимость оценки от прогнозиста. Это важное требование, предъявляемое к оценкам прогнозов, заключается в том, чтобы прогнозист не имел возможности «подгонки» формулировок текстов под условия благоприятного исхода.

Стратегия прогнозиста на среднюю удачу делает его прогнозы преимущественно формальными и мало пригодными для хозяйственных целей.

2. Чувствительность оценки — она должна различать близкие, но разные прогнозы.

3. Простота оценки — она должна быть достаточно простой, чтобы ее можно было использовать в оперативной практике.

4. Правильный выбор неметодического способа прогнозирования, сравнение с которым позволяет установить предпочтительность одних методов прогноза относительно других.

Существующие критерии оценки в большинстве своем отвечают предъявляемым требованиям.

2.4. Оценка успешности альтернативных прогнозов погоды

1. Общая оправдываемость прогнозов определяется по формуле

$$p = \frac{n_{11} + n_{22}}{N}. \quad (2.5)$$

Величина p в формуле (2.5) выражается в процентах или в долях единицы. Этот показатель не является достаточно общим и надежным критерием успешности прогнозов. Можно выбрать, например, такой район прогнозирования и такое явление погоды, когда формальные прогнозы (допустим каждый день в течение лета прогнозируется отсутствие грозы) получают большую общую оправдываемость, чем методические. Использование только показателя p может приводить к существенным недооценкам прогноза резких смен погоды и редких явлений, предсказание которых крайне важно для многих отраслей народного хозяйства.

Пример 2.1. Необходимо оценить успешность прогнозов гроз за три летних месяца.

Получена следующая таблица оправдываемости (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Оправдываемость прогнозов гроз за июнь — август

Фактическая погода Φ_j	Прогноз Π_i		Сумма
	гроза Π	без грозы $\bar{\Pi}$	
Гроза была Φ	15/0	1/16	16
Грозы не было $\bar{\Phi}$	8/0	68/76	76
Сумма	23	69	92

Примечание: в знаменателе дроби — число n_{ij} в случае формального прогноза.

На основании формулы (2.5) по данным табл. 2.4 получаем

$$p = \frac{15+68}{92} \times 100 = 90,2\%.$$

В случае формального прогноза отсутствия грозы находим, что

$$p_{\Phi} = \frac{0+76}{92} \times 100 = 82,6\%.$$

В рассматриваемом примере оправдываемость формальных прогнозов равна успешности климатологических прогнозов. Методические прогнозы правильно ориентировали потребителя на возникновение грозы в 15 случаях и в 1 случае гроза была пропущена. Формальные прогнозы в 16 случаях пропустили грозу. Преимущество методического прогноза здесь очевидно.

Пример 2.2. Рассмотрим теперь другую таблицу оправдываемости прогнозов гроз (табл. 2.5) и покажем, что в этом случае формальные прогнозы будут иметь более высокую общую оправдываемость, чем методические (табл. 2.5).

Таблица 2.5

Оправдываемость прогнозов гроз за июнь — август

Фактическая погода Φ_j	Прогноз Π_i		Сумма
	П	П	
Гроза была Φ	4/0	2/6	6
Грозы не было $\bar{\Phi}$	11/0	75/86	86
Сумма	15	77	92

На основании табл. 2.5 имеем

$$p = 85,8\%; \quad p_{\Phi} = 93,4\%.$$

Чтобы выявить успешность методических прогнозов, используя критерий «общая оправдываемость», необходимо установить их преимущество перед случайными.

Общая оправдываемость случайных прогнозов определяется по формуле

$$p_c = \frac{E_c}{N} = \frac{n_{01}n_{10} + n_{02}n_{20}}{N^2}, \quad (2.6)$$

где E_c — число случайно оправдавшихся прогнозов.

При этом величина E_c находится следующим образом:

$$E_c = \frac{n_{10} n_{01}}{N} + \frac{n_{20} n_{02}}{N}. \quad (2.7)$$

В итоге для оценки успешности прогнозов можно использовать отношение $\delta_p = \frac{p}{p_c}$ или разность $\Delta p = p - p_c$.

Пример 2.3. На основании табл. 2.4 для методических прогнозов находим

$$p_c = \frac{16 \times 23 + 76 \times 69}{92^2} = 66,3\%.$$

Как видим, методические прогнозы имеют преимущество в общей оправдываемости по сравнению со случайными прогнозами на величину $\Delta p_c = 23,9\%$.

Используя данные табл. 2.5, имеем

$$p_c = 79,3\% \quad \text{и} \quad \Delta p_c = 6,5\%.$$

Эти результаты показывают, что использование в оперативных условиях первого способа прогнозирования более предпочтительно.

2. Критерий надежности прогнозов по Н. А. Багрову записывается в виде

$$H = \frac{p - p_c}{1 - p_c}. \quad (2.8)$$

Если $H=1$ — все прогнозы оправдывались; в случае $H=0$ — прогнозы имеют случайное распределение (на уровне случайных) и $H=-1$ — все прогнозы ошибочны.

Пример 2.4. Сравним успешности двух методов прогнозов гроз, оправдываемости которых приведены в табл. 2.4 и 2.6, используя критерий надежности по Н. А. Багрову.

Таблица 2.6

Оправдываемость прогнозов гроз за июнь — август

Фактическая погода Φ_j	Прогноз Π_i		Сумма
	Π	$\bar{\Pi}$	
Гроза была Φ	10/0	6/16	16
Грозы не было $\bar{\Phi}$	10/0	66/76	76
Сумма	20	72	92

На основании данных табл. 2.4 для методических прогнозов находим

$$H = \frac{0,902 - 0,663}{1 - 0,663} = 0,709.$$

Для методических прогнозов по данным табл. 2.6 получаем

$$H = \frac{0,826 - 0,684}{1 - 0,684} = 0,449.$$

На этом основании можно сделать вывод, что первый метод (табл. 2.4) заметно лучше второго ($\Delta H = 0,260$).

3. Критерий точности прогнозов по А. М. Обухову имеет вид

$$Q = 1 - \left(\frac{n_{10}}{n_{10}} + \frac{n_{21}}{n_{20}} \right). \quad (2.9)$$

Пример 2.5. Рассчитаем в соответствии с формулой (2.9) успешность методических и формальных прогнозов по данным, приведенным в табл. 2.5 и 2.6. Результаты расчетов представлены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Расчет величины Q

Методический прогноз		Формальный прогноз	
Данные таблицы 2.5	Данные таблицы 2.6	Данные таблицы 2.5	Данные таблицы 2.6
0,539	0,493	0	0

В случае идеальных прогнозов $Q=1$, для случайных $Q=0$ и если все прогнозы ошибочны, величина $Q=-1$.

Из табл. 2.7 следует, что в обоих случаях формальные прогнозы находятся на уровне случайных. Сравнение показывает, что первый метод (табл. 2.5) имеет небольшое преимущество ($\Delta Q = 0,046$) относительно второго.

4. Критерий успешности прогнозов по С. Петерсену

$$S = \frac{n - E}{N - E}. \quad (2.10)$$

В формуле (2.10) $n = n_{11} + n_{22}$, а E — ожидаемое число оправдавшихся прогнозов. Значение E может быть получено на основании оценок оправдываемости неметодических прогнозов: случай-

ного (E_c), инерционного ($E_{\text{и}}$) и климатологического ($E_{\text{к}}$). Значение E_c определяется по формуле (2.7), а $E_{\text{к}}$ рассчитывают по формуле

$$E_{\text{к}} = \frac{1}{m} N, \quad (2.11)$$

где m — число градаций явления Φ .

Пример 2.6. По данным табл. 2.5 для оценки методических прогнозов относительно случайных получаем

$$S_c = \frac{79 - 73}{92 - 73} = 0,316$$

То же по табл. 2.6

$$S_c = \frac{76 - 63}{92 - 63} = 0,448.$$

Преимущество второго метода перед первым составляет величину $\Delta S_c = 0,132$.

Оценка методических прогнозов относительно климатологических дает следующие результаты. В табл. 2.5 и 2.6 число $m=2$. Отсюда $E_{\text{к}}=46$. Тогда, согласно данным табл. 2.5

$$S_{\text{к}} = \frac{79 - 46}{92 - 46} = 0,717.$$

и соответственно, по данным табл. 2.6, имеем

$$S_{\text{к}} = \frac{76 - 46}{92 - 46} = 0,652.$$

Сравнение этих результатов указывает на небольшое преимущество первого метода перед вторым ($\Delta S_{\text{к}} = 0,065$).

5. Количество прогностической информации и информационное отношение.

Все явления погоды имеют климатическую (природную) вероятность осуществления. В этом, как уже отмечалось, проявляется вероятностный характер прогнозов, содержащих условные вероятности, т. е. вероятности осуществления явления, градации или значения метеоэлемента при наличии некоторого заранее известного условия. В качестве такого условия может быть предварительно зафиксированное положение барического образования, наличие где-то зоны осадков и т. п. Не будучи идеальными, прогнозы, таким образом, содержат неопределенность в осуществлении или так называемую статистическую энтропию. Если о некотором явлении известно все, то энтропия его равна нулю. Неопределенность

в явлении тем больше, чем больше число его равновероятных состояний.

Для всякого явления, градации или значения метеоэлемента можно определить его **климатическую** неопределенность, рассчитав статистическую энтропию H по формуле

$$H(\Phi) = - \sum_{j=1}^n p(\Phi_j) \log p(\Phi_j), \quad (2.12)$$

где $p(\Phi_j)$ — безусловная вероятность осуществления явления Φ_j ,

$$p(\Phi_j) = n_{j0}/N.$$

Формула (2.12) выражает **безусловную** энтропию. Задача методического прогноза сводится к тому, чтобы уменьшить безусловную вероятность в осуществлении прогнозируемого явления. При этом энтропия системы ($\Pi_i \sim \Phi_j$) будет меньше климатической. Она называется **условной** энтропией и определяется по формуле

$$H(\Pi) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(\Pi_i) H(\Pi_i/\Phi_j). \quad (2.13)$$

В формуле (2.13) имеем:

$$p(\Pi_i) = n_{0i}/N,$$

$$H(\Pi_i/\Phi_j) = - \sum_{j=1}^n p(\Pi_i/\Phi_j) \log p(\Pi_i/\Phi_j). \quad (2.14)$$

Единица измерения энтропии зависит от выбора основания логарифма. Если оно равно 10, то H измеряется в дедах, если же двум, — то в битах.

Запишем далее формулы (2.12) и (2.13) в частостях

$$H(\Phi) = - \left(\frac{n_{10}}{N} \log \frac{n_{10}}{N} + \frac{n_{20}}{N} \log \frac{n_{20}}{N} + \dots + \frac{n_{n0}}{N} \log \frac{n_{n0}}{N} \right). \quad (2.15)$$

В случае альтернативного прогноза ($n=m=2$) имеются только два первых слагаемых.

Для числа фаз $n=m>2$ величина $H(\Pi)$ определяется по формуле

$$\begin{aligned} H(\Pi) = & - \left[\frac{n_{01}}{N} \left(\frac{n_{11}}{n_{01}} \log \frac{n_{11}}{n_{01}} + \frac{n_{21}}{n_{01}} \log \frac{n_{21}}{n_{01}} + \dots + \frac{n_{n1}}{n_{01}} \log \frac{n_{n1}}{n_{01}} \right) + \right. \\ & + \frac{n_{02}}{N} \left(\frac{n_{12}}{n_{02}} \log \frac{n_{12}}{n_{02}} + \frac{n_{22}}{n_{02}} \log \frac{n_{22}}{n_{02}} + \dots + \frac{n_{n2}}{n_{02}} \log \frac{n_{n2}}{n_{02}} \right) + \dots + \\ & \left. + \dots + \frac{n_{0m}}{N} \left(\frac{n_{1m}}{n_{0m}} \log \frac{n_{1m}}{n_{0m}} + \frac{n_{2m}}{n_{0m}} \log \frac{n_{2m}}{n_{0m}} + \dots + \frac{n_{nm}}{n_{0m}} \log \frac{n_{nm}}{n_{0m}} \right) \right]. \quad (2.16) \end{aligned}$$

Если $n=m=2$, то формула (2.16) принимает вид

$$H(\Pi) = - \left[\frac{n_{01}}{N} \left(\frac{n_{11}}{n_{01}} \log \frac{n_{11}}{n_{01}} + \frac{n_{21}}{n_{01}} \log \frac{n_{21}}{n_{01}} \right) + \frac{n_{02}}{N} \left(\frac{n_{12}}{n_{02}} \log \frac{n_{12}}{n_{02}} + \frac{n_{22}}{n_{02}} \log \frac{n_{22}}{n_{02}} \right) \right]. \quad (2.17)$$

Уменьшение условной энтропии в прогностической модели ($\Pi_i \sim \Phi_j$) по сравнению с климатической выражается величиной

$$J(\Pi/\Phi) = H(\Phi) - H(\Pi), \quad (2.18)$$

которая называется **количеством прогностической информации**. Относя $J(\Pi/\Phi)$ к единице климатической энтропии явления $H(\Phi)$ получим так называемое **информационное отношение**

$$v = \frac{J(\Pi/\Phi)}{H(\Phi)} = 1 - \frac{H(\Pi)}{H(\Phi)}. \quad (2.19)$$

Эта величина показывает какую часть неопределенности климатологических прогнозов устраняет информация методического прогноза

Пример 2.7. В качестве объекта прогнозирования рассмотрим погодные условия в угольном карьере, представленные в виде двух фаз: первая Φ — туман, дымка, мгла и задымленность, вторая $\bar{\Phi}$ — отсутствие тумана, дымки, мглы и задымленности. Оценим успешность информационных прогнозов двух указанных фаз погодных условий на ночные часы (24—06) по условиям погоды, которые устанавливаются в карьере в вечерние часы (18—24).

Исходные данные для этого представлены в виде матрицы сопряженности (табл. 2.8).

Таблица 2.8

Матрица сопряженности для прогноза условий погоды по двум фазам в Коркинском угольном карьере

Фактическая погода Φ_j	Прогноз Π_i		Сумма
	Π	$\bar{\Pi}$	
Φ	60	21	81
$\bar{\Phi}$	1	252	253
Сумма	61	273	334

Безусловная (климатическая) энтропия явления Φ будет равна

$$H(\Phi) = - \left(\frac{81}{334} \log \frac{81}{334} + \frac{253}{334} \log \frac{253}{334} \right) = \\ = - (0,242 \log 0,242 + 0,757 \log 0,757) = 0,2407.$$

Условная (прогностическая) энтропия системы $(\Pi_i \sim \Phi_j)$ будет равна

$$H(\Pi) = - \left[\frac{61}{334} \left(\frac{60}{61} \log \frac{60}{61} + \frac{1}{61} \log \frac{1}{61} \right) + \right. \\ \left. + \frac{273}{334} \left(\frac{21}{273} \log \frac{21}{273} + \frac{252}{273} \log \frac{252}{273} \right) \right] = 0,1027.$$

Количество прогностической информации

$$J(\Pi/\Phi) = 0,2407 - 0,1027 = 0,138$$

и информационное отношение

$$v = \frac{0,138}{0,2407} = 0,573.$$

Отсюда видно, что в данном случае экстраполяция погоды с вечерних часов на ночные уменьшает климатическую неопределенность почти наполовину.

Пример 2.8. Рассчитаем величины $J(\Pi/\Phi)$ и v для двух способов прогнозирования, представленных в табл. 2.5 и 2.6.

По данным табл. 2.5, находим:

$$H(\Phi) = - \left(\frac{6}{92} \log \frac{6}{92} + \frac{86}{92} \log \frac{86}{92} \right) = 0,1046,$$

$$H(\Pi) = - \left[\frac{15}{92} \left(\frac{4}{15} \log \frac{4}{15} + \frac{11}{15} \log \frac{11}{15} \right) + \right. \\ \left. + \frac{77}{92} \left(\frac{2}{77} \log \frac{2}{77} + \frac{75}{77} \log \frac{75}{77} \right) \right] = 0,0847,$$

$$J(\Pi/\Phi) = 0,1046 - 0,0847 = 0,0199,$$

$$v = \frac{0,0199}{0,1046} = 0,190.$$

По данным табл. 2.6, получаем следующее:

$$H(\Phi) = - \left(\frac{16}{92} \log \frac{16}{92} + \frac{76}{92} \log \frac{76}{92} \right) = \\ = - [0,1739(-0,7595) + 0,8260(-0,0830)] = 0,2005,$$

$$H(\Pi) = - \left[\frac{20}{92} \left(\frac{10}{20} \log \frac{10}{20} + \frac{10}{20} \log \frac{10}{20} \right) + \right. \\ \left. + \frac{72}{92} \left(\frac{6}{72} \log \frac{6}{72} + \frac{66}{72} \log \frac{66}{72} \right) \right] = 0,1628.$$

$$J(\Pi/\Phi) = 0,2005 - 0,1628 = 0,0377,$$

$$v = \frac{0,0377}{0,2005} = 0,188.$$

6. Обобщенные критерии успешности прогнозов по Г. А. Карпееву.

При оценке успешности методических прогнозов путем сравнения их с неметодическими выбор последних остается произвольным. Тем самым затрудняется сравнение результатов, полученных по различным критериям. Г. А. Карпеевым было предложено нормировать критерии А. М. Обухова и Н. А. Багрова относительно случайного прогноза и получить таким образом сравнимые данные.

Представим таблицу оправдываемости прогнозов 2.2 в вероятностной форме, то есть перейдем в ней от элементов n_{ij} , представляющих собой число случаев, к вероятностям $p_{ij} = n_{ij}/N$ (табл. 2.9).

Таблица 2.9

Оправдываемость прогнозов погоды в вероятностной форме
(по данным табл. 2.6)

Φ_j	Π_i		
	Π	$\bar{\Pi}$	$p(\Phi_j)$
Φ	$p(\Phi, \Pi) = \frac{n_{11}}{N} = 0,109$	$p(\Phi, \bar{\Pi}) = \frac{n_{12}}{N} = 0,065$	$p(\Phi) = \frac{n_{10}}{N} = 0,174$
$\bar{\Phi}$	$p(\bar{\Phi}, \Pi) = \frac{n_{21}}{N} = 0,109$	$p(\bar{\Phi}, \bar{\Pi}) = \frac{n_{22}}{N} = 0,717$	$p(\bar{\Phi}) = \frac{n_{20}}{N} = 0,826$
$p(\Pi_i)$	$p(\Pi) = \frac{n_{01}}{N} = 0,218$	$p(\bar{\Pi}) = \frac{n_{02}}{N} = 0,782$	$\sum p(\Pi_i) = \sum p(\Phi_j) = 1$

Тогда критерии успешности p , p_c , H и Q запишем в следующем виде.

1. Общая оправдываемость прогнозов

$$p = p(\Phi, \Pi) + p(\bar{\Phi}, \bar{\Pi}). \quad (2.20)$$

2. Общая оправдываемость случайных прогнозов

$$p_c = p(\Phi) \cdot p(\Pi) + p(\bar{\Phi}) \cdot p(\bar{\Pi}). \quad (2.21)$$

3. Критерий надежности прогнозов по Н. А. Багрову

$$H = \frac{p(\Phi, \Pi) + p(\bar{\Phi}, \bar{\Pi}) - [p(\Phi)p(\Pi) - p(\bar{\Phi})p(\bar{\Pi})]}{1 - [p(\Phi)p(\Pi) - p(\bar{\Phi})p(\bar{\Pi})]} = \frac{p - p_c}{1 - p_c}. \quad (2.22)$$

4. Критерий точности прогнозов по А. М. Обухову

$$Q = \frac{p - p_c}{1 - p_1}. \quad (2.23)$$

Значение p_1 в (2.23) равно

$$p_1 = p^2(\Phi) + p^2(\bar{\Phi}). \quad (2.24)$$

Формулы (2.22) и (2.23) нормированы относительно случайного события, т. е. когда $p(\Phi, \Pi) = p(\Phi)p(\Pi)$. Для случайных прогнозов критерии H и Q равны нулю, а для идеальных — единице.

Пример 2.9. Рассчитаем обобщенные критерии на основании данных, приведенных для методических прогнозов в табл. 2.5 и 2.6.

Получаем следующие результаты (по табл. 2.5):

$$\begin{aligned} p_{11} &= 0,043, & p_{12} &= 0,022, & p_{10} &= 0,065, \\ p_{21} &= 0,120, & p_{22} &= 0,815, & p_{20} &= 0,935, \\ p_{01} &= 0,163, & p_{02} &= 0,837. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} p &= 0,858, & p_c &= 0,793, & p_1 &= 0,878, \\ H &= 0,314, & Q &= 0,533. \end{aligned}$$

На основании табл. 2.6 имеем:

$$\begin{aligned} p &= 0,826, & p_c &= 0,684, & p_1 &= 0,713, \\ H &= 0,449, & Q &= 0,494. \end{aligned}$$

В итоговой табл. 2.10 приведены результаты расчета всех критериев, что позволяет установить преимущество одного из методов прогнозирования.

Таблица 2.10

Критерии успешности по двум методам прогнозирования

Критерии	p , %	p_c , %	H	Q	J	v , %
Первый метод						
A	85,8	79,3	0,286	0,539	0,0199	19,0
B	0,858	0,793	0,318	0,533	—	—
Второй метод						
A	82,6	68,4	0,449	0,493	0,0377	18,8
B	0,826	0,684	0,449	0,494	—	—

Примечание: A — ненормированные критерии,
 B — нормированные критерии (обобщенные критерии по Г. А. Карпееву).

Сопоставление критериев успешности двух методов прогнозирования позволяет сделать заключение: несмотря на то, что первый метод прогнозирования имеет общую оправдываемость на 3,2% больше, чем второй, все же, судя по остальным критериям и разностям Δp , ΔH и ΔQ , второй метод, видимо, предпочтительнее.

2.5. Оценка успешности штормовых предупреждений

Штормовые предупреждения об опасных и особо опасных метеорологических явлениях представляют собой чрезвычайно важную информацию для потребителя. Это своего рода прогноз, установленный потребителем критических условий погоды.

Штормовые предупреждения, так же как и прогнозы погоды, могут быть как альтернативными, так и многофазовыми.

В оперативной работе каждое штормовое предупреждение оценивается синоптиком в соответствии с Наставлением¹.

При оценке штормовых предупреждений следует учитывать три возможных случая: 1) штормпредупреждение дано и оправдалось; 2) штормпредупреждение дано и не оправдалось; 3) штормовое состояние погоды не предсказывалось, но фактически наблюдалось.

Чтобы определить успешность штормовых предупреждений необходимо установить вероятности каждого из трех случаев. Кроме того, успешность штормовых предупреждений будет зависеть от заблаговременности с которой они даны. Штормовое предупреждение с нулевой заблаговременностью есть штормовое оповещение,

¹ Наставление по службе прогнозов, разд. 2, ч. 5. М., Гидрометеиздат, 1962.

не представляющее для потребителя ожидаемой практической ценности.

Таблица оправдываемости штормовых предупреждений имеет вид (табл. 2.11).

Таблица 2.11

Таблица оправдываемости штормовых предупреждений

Фактическая погода Φ_j	Штормовое предупреждение Π_i		Сумма
	Дается штормовое предупреждение, Π	Штормовое предупреждение не дается, $\bar{\Pi}$	
Штормовая погода, Φ	n_{11}	n_{12}	n_{10}
Не было штормовой погоды, $\bar{\Phi}$	n_{21}	n_{22}	n_{20}
Сумма	n_{01}	n_{02}	N

Распределение частот n_{ij} в табл. 2.11 дает полное представление о характере ошибок и успешности штормовых предупреждений в целом. Здесь n_{11} — число случаев, когда штормовые предупреждения давались и согласно требований Наставления оправдались по характеру явления и допустимой ошибке заблаговременности; n_{21} — число случаев, когда штормовые предупреждения давались, но прогнозы не осуществились, то есть штормовой погоды фактически не было; n_{12} — число случаев, когда наблюдалась штормовая погода, а штормовое предупреждение дано не было. В последнем случае потребитель, не получив заблаговременного предупреждения о развитии опасных условий погоды, может понести значительные материальные убытки, поскольку у него не было времени на проведение защитных мер.

Частота n_{22} — число случаев, когда штормовая погода не прогнозировалась и фактически не наблюдалась. На основании данных табл. 2.11 можно рассчитать следующие критерии успешности штормовых предупреждений.

1. Общая оправдываемость штормовых предупреждений

$$p_{шт} = \frac{n_{11} + n_{22}}{N}. \quad (2.25)$$

Значение $p_{шт}$ может быть выражено в долях единицы или в процентах. Критерий $p_{шт}$ не отражает характер распределения ошибок штормовых предупреждений, а поэтому рассматривается лишь как приближенный.

2. Предупрежденность — отношение оправдавшихся штормовых предупреждений n_{11} к общему числу штормовых явлений n_{10}

$$r = \frac{n_{11}}{n_{10}}. \quad (2.26)$$

Этот критерий в большей мере отражает успешность штормовых предупреждений и находит широкое практическое применение.

3. Отношение условной вероятности $\left(\frac{n_{11}}{n_{01}}\right)$ к безусловной $\left(\frac{n_{10}}{N}\right)$

$$\lambda = \frac{n_{11}}{n_{01}} : \frac{n_{10}}{N}.$$

Чем больше λ , тем более чувствителен метод к относительно редким, но практически опасным явлениям погоды.

Пример 2.10. Оценить успешность штормовых предупреждений о туманах за холодную половину года (октябрь — март) (табл. 2.12).

Таблица 2.12

Фактическая погода Φ_j	Штормовое предупреждение Π_i		Сумма
	Π	$\bar{\Pi}$	
Φ	25	5	30
$\bar{\Phi}$	8	144	152
Сумма	33	149	182

1. Общая оправдываемость $p_{шт}$

$$p_{шт} = \frac{25+144}{182} = 0,928 = 92,8\%.$$

2. Предупрежденность r

$$r = \frac{25}{30} = 0,833 = 83,8\%.$$

3. Отношение λ

$$\lambda = \frac{25}{33} : \frac{30}{182} = 4,59.$$

2.6. Оценка успешности многофазовых прогнозов погоды

Формулировки прогнозов таких метеорологических элементов и явлений погоды, как температура, ветер, давление воздуха, геопотенциальная высота, облачность и т. п. содержат более двух возможных градаций (фаз) и относятся к многофазовым.

Чтобы определить успешность этих прогнозов, надо знать ошибки прогнозирования по всем градациям прогноза.

В свое время была предложена балловая оценка краткосрочных многофазовых прогнозов. В зависимости от степени отклонения предсказанного значения метеорологического элемента от наблюдаемого прогноз погоды оценивался определенным баллом. При полном совпадении ставился высший балл, если ошибка выходила за пределы допустимой — нуль. Сумма баллов переводилась в проценты по формуле

$$p = \frac{n}{N} 100,$$

где n — сумма баллов фактическая;

N — максимально возможная сумма баллов.

Однако такой подход к оценке прогнозов не получил широкого распространения. Как уже указывалось, наиболее полно отражает результаты прогнозирования таблица вероятностей, полученная на основании таблицы оправдываемости 2.1.

Характеристикой успешности могут быть вероятности вида:

$$r_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_{j0}} = \frac{p(\Phi, \Pi)_{ij}}{p(\Phi)_j}, \quad (2.27)$$

где $p(\Phi, \Pi)$ — безусловная вероятность осуществления текста прогноза Π .

Если вероятности r_{ij} при $i \neq j$ есть ошибки прогноза, то доля удачных прогнозов определяется разностью

$$r_{ij} = 1 - \sum_{j \neq i} r_{ij}. \quad (2.28)$$

Лучший метод дает большую долю удачных прогнозов.

При оценке общей оправдываемости многофазовых прогнозов необходимо знать не только распределение ошибок прогнозирования, но и их значения.

Пусть имеется трехфазовый прогноз. Разобьем весь диапазон прогнозируемого элемента на три градации таким образом, что попадание в каждую из них равновероятно. Общее число прогнозов неким образом распределится в девяти ячейках матрицы сопряженности. Правильная оценка оправдываемости может быть только при наличии так называемой матрицы весов.

Прогнозам приписывается определенный вес (значимость): неоправдавшимся — некоторая отрицательная величина или нуль, а всем оправдавшимся — положительная величина, например 1, 10, 100.

Таблица 2.13

Φ_j	Π_i		
	Π_1	Π_2	Π_3
Φ_1	100	50	0
Φ_2	25	100	25
Φ_3	0	50	100

Приведенная в табл. 2.13 матрица весов получена из условия, что климатические вероятности всех фаз одинаковы. Несимметричность данной матрицы весов объясняется тем, что такие ошибки как «промах» (ошибки первого рода) имеют более серьезные последствия, чем ошибки именуемые «ложной тревогой» (ошибки второго рода). Указанная матрица весов наиболее применима для таких прогнозов, когда Π_2 ориентирует на некоторые средние условия погоды, а Π_1 и Π_3 — на существенные отклонения от них в обе стороны. При таком подходе с учетом матрицы весов оценка качества прогнозов зависит от уровня квалификации прогнозиста и возможностей применяемого способа прогнозирования.

Разделение всей области прогнозируемого элемента на градации можно осуществить с помощью задания некоторой системы квантилей (заданных уровней вероятности). Система p -процентных квантилей $(x_{p_1}, \dots, x_{p_k})$, где $0 < p_1 < \dots < p_k < 1$, позволяет разбить всю область на $k + 1$ градацию (Π_i, Φ_j).

Медиана — 50%-ный уровень ($x_{\frac{1}{2}}$) позволяет получить две градации, система квантилей $(x_{\frac{1}{3}}, x_{\frac{2}{3}})$ — три градации (например, «ниже нормы», «норма», «выше нормы»), система квантилей $(x_{\frac{1}{3}}, x_{\frac{1}{2}}, x_{\frac{2}{3}})$ — четыре градации.

Матрица весов при разбиении на две градации может иметь вид

$$(s_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.29)$$

что соответствует, например, условиям аномальных значений прогнозируемого элемента. При разделении на четыре градации матрица весов принимает иное выражение

$$(s_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.30)$$

Можно использовать матрицу весов вида

$$(s_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.31)$$

что является предельно жестким условием общей оправдываемости альтернативных прогнозов.

Или, например, матрицы такого вида:

$$(s_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (2.32)$$

$$(s_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 0 \\ 1/2 & 1 & 1/2 \\ 0 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}; \quad (2.33)$$

$$(s_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 2/3 & 1/3 & 0 \\ 2/3 & 1 & 2/3 & 1/3 \\ 1/3 & 2/3 & 1 & 2/3 \\ 0 & 1/3 & 2/3 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.34)$$

Каждая матрица весов (2.27)–(2.34) $s = (s_{ij})$ есть некоторая система оценки прогнозов. Заметим, что приведенные системы оценок далеко не единственные. Выбор матрицы весов зависит от распределения прогнозируемого метеорологического элемента, от числа градаций и поставленных задач оценки успешности прогнозирования.

М. Г. Тер-Мкртчян дает более обобщенную матрицу весов. Ошибки прогноза разделены на два вида: несовпадение основных

градаций и неверный прогноз тенденции. В каждой ячейке матрицы «вес» s_{ij} определяется в виде произведения

$$s_{ji} = (1 - a_{ij})(1 - b_{ij}),$$

где a_{ij} и b_{ij} — соответственно «штрафы», налагаемые при единичном прогнозе Π_{ij} . Если полагать $a=x=1/2$, $b=y=2/3$, то матрица весов имеет вид

$$(s_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1/6 & 0 \\ 1/2 & 1 & 1/3 & 1/6 \\ 1/6 & 1/3 & 1 & 1/2 \\ 0 & 1/6 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.35)$$

Если «штрафы» a и b одинаковы, то матрицу весов можно записать в виде

$$(s_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & \sqrt{2}-1 & (\sqrt{2}-1)^2 & 0 \\ \sqrt{2}-1 & 1 & \sqrt{2}-1 & (\sqrt{2}-1)^2 \\ (\sqrt{2}-1)^2 & \sqrt{2}-1 & 1 & \sqrt{2}-1 \\ 0 & (\sqrt{2}-1)^2 & \sqrt{2}-1 & 1 \end{pmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{pmatrix} 1 & 0,41 & 0,17 & 0 \\ 0,41 & 1 & 0,41 & 0,17 \\ 0,17 & 0,41 & 1 & 0,41 \\ 0 & 0,17 & 0,41 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.36)$$

Кроме того, может быть использована матрица весов вида

$$(s_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.37)$$

Общая оправдываемость методического многофазового прогноза определяется по формуле

$$P_m = \frac{100}{N} \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} n_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+m}^n \alpha_{ij} n_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i-m}^n \alpha_{ij} n_{ij} \right), \quad (2.38)$$

где индекс $j=i+m$ — указывает на частоты правее диагонали $n_{11} - n_{nm}$ (см. табл. 2.1), а $j=i-m$ — левее этой диагонали; $\alpha_{ij} = s_{ij}$ — веса.

Для пятифазового прогноза, например, $m=n=5$ и $\alpha(m)=\alpha(n)=3$ формула (2.38) будет иметь вид

$$p_m = \frac{100}{N} [(\alpha_{11}n_{11} + \alpha_{22}n_{22} + \alpha_{33}n_{33} + \alpha_{44}n_{44} + \alpha_{55}n_{55}) + \\ + (\alpha_{12}n_{12} + \alpha_{23}n_{23} + \alpha_{34}n_{34} + \alpha_{45}n_{45}) + \\ + (\alpha_{21}n_{21} + \alpha_{32}n_{32} + \alpha_{43}n_{43} + \alpha_{54}n_{54})]. \quad (2.39)$$

Порядок суммирования по формуле (2.39) показан на рис. 2.3. Оправдываемость случайных многофазовых прогнозов определяется по формуле

$$p_c = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(\Phi_j) n(\Pi_i), \quad (2.40)$$

где $n(\Pi_i)$ — число случаев прогнозирования i -й фазы.

$$p(\Phi_j) = \frac{1}{N} \left[n_{j0} + \frac{1}{2} (n_{j0-1} + n_{j0+1}) \right]. \quad (2.41)$$

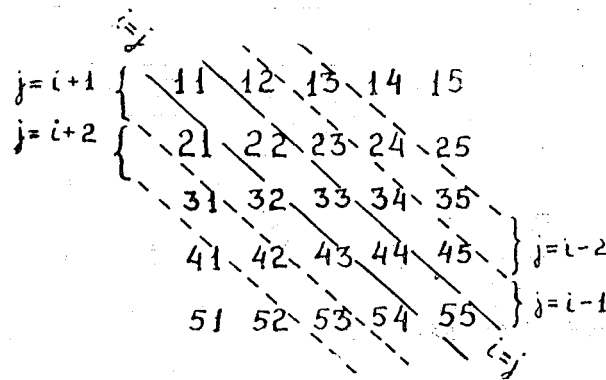


Рис. 2.3. Порядок суммирования элементов матрицы $a_{ij}n_{ij}$

В качестве критерия успешности принимается неравенство

$$p_m > p_c. \quad (2.42)$$

Чем больше p_m по сравнению с p_c , тем большего доверия заслуживает методический прогноз.

Пример 2.11. Рассчитаем p_m и p_c прогноза осадков данных по градациям: Π_1 — слабые, Π_2 — умеренные, Π_3 — сильные, Π_4 —

очень сильные. В табл. 2.14 приведены соответствующие частоты n_{ij} .

Таблица 2.14

Сопряженность (оправдываемость) прогноза осадков

Φ_j	Π_i				Сумма
	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	
Φ_1	35	20	15	5	75
Φ_2	15	55	15	5	90
Φ_3	10	10	35	5	60
Φ_4	5	5	5	10	25
Сумма	65	90	70	25	250

Веса α_{ij} представлены в табл. 2.15.

Таблица 2.15

Распределение весов — матрица весов α_{ij}

Φ_j	Π_i			
	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4
Φ_1	1	0,5	0	0
Φ_2	0,5	1	0,5	0
Φ_3	0	0,5	1	0,5
Φ_4	0	0	0,5	1

По формуле (2.41) находим:

$$p(\Phi_{10}) = \frac{1}{250} \left[75 + \frac{1}{2} (0 + 90) \right] = 0,480,$$

$$p(\Phi_{20}) = \frac{1}{250} \left[90 + \frac{1}{2} (75 + 60) \right] = 0,630,$$

$$p(\Phi_{30}) = \frac{1}{250} \left[60 + \frac{1}{2} (90 + 25) \right] = 0,470,$$

$$p(\Phi_{40}) = \frac{1}{250} \left[25 + \frac{1}{2} (60 + 0) \right] = 0,220$$

Определяем оправдываемость случайного прогноза

$$p_c = \frac{100}{250} (0,480 \times 65 + 0,630 \times 90 + 0,470 \times 70 + 0,220 \times 25) = 50,5\%.$$

Находим затем p_m

$$p_m = \frac{100}{250} [(35 \times 1 + 55 \times 1 + 35 \times 1 + 10 \times 1) + (20 \times 0,5 + 15 \times 0,5 + 5 \times 0,5) + (15 \times 0,5 + 70 \times 0,5 + 5 \times 0,5)] = 68,0\%.$$

Методический прогноз в итоге выше случайного на 17,5%.

Зная ошибки прогноза метеорологического элемента и фактическую его изменчивость, можно найти ряд статистических характеристик успешности прогнозирования. Для этого необходимо знать: f_n — прогнозируемое значение метеорологического элемента, f_m — исходное значение и f_ϕ — фактическое его значение на момент прогноза.

1. Средняя абсолютная ошибка прогноза (с точностью до 0,1)

$$\delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |f_n - f_\phi|_i.$$

2. Средняя абсолютная фактическая изменчивость (с точностью до 0,1)

$$\delta_\phi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |f_\phi - f_m|_i.$$

3. Средняя относительная ошибка (с точностью до 0,01)

$$\varepsilon = \frac{\delta}{\delta_\phi}.$$

Чем меньше ε , тем лучше прогноз. Если $\varepsilon = 0$ — прогноз идеальный, $\varepsilon > 1$ — прогноз хуже инерционного.

4. Средняя абсолютная величина прогностической изменчивости (с точностью до 0,1)

$$\delta_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |f_n - f_m|_i$$

сравнивается с фактической изменчивостью δ_ϕ .

5. Коэффициент отклонения прогноза от фактического значения (с точностью до 0,01)

$$\eta = \frac{\delta_n}{\delta_\phi}.$$

Эта величина должна быть близкой к единице. Если $\eta < 1,0$, то прогноз дает систематическое занижение ($\delta f_n = f_{n_i} - f_{\phi_i} < 0$), если $\eta > 1,0$ — завышение.

6. Коэффициент корреляции между прогностическими и фактическими изменениями (с точностью по 0,01)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (f_{\phi} - f_{\pi})(f_{\pi} - f_{\pi})_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_{\phi} - f_{\pi})_i \sum_{i=1}^N (f_{\pi} - f_{\pi})_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (f_{\pi} - f_{\pi})^2 - \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (f_{\pi} - f_{\pi})_i \right]^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (f_{\phi} - f_{\pi})^2 - \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (f_{\phi} - f_{\pi})_i \right]^2}}$$

При идеальном прогнозе $r=1$.

7. Средняя ошибка прогноза (с точностью до 0,1)

$$a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_{\pi} - f_{\phi})_i.$$

8. Средняя квадратическая ошибка прогноза (с точностью до 0,1)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_{\pi} - f_{\phi})^2}{N}},$$

чем меньше δ , тем лучше прогноз.

9. Средняя квадратическая фактическая изменчивость (с точностью до 0,1)

$$\sigma_{\phi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_{\phi} - f_{\pi})^2}{N}}.$$

10. Относительная среднеквадратическая ошибка (с точностью до 0,01)

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{\sigma_{\phi}}.$$

При идеальном прогнозе $\varepsilon_1=0$, при плохом $\varepsilon_1 > 1,0$.

Оправдываемость прогноза ветра характеризуется следующими величинами.

11. Средний модуль векторной разности между прогностическим и фактическим ветром (с точностью до 1)

$$c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \vec{v}_n - \vec{v}_\phi \right|_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\sqrt{(u_n - u_\phi)^2 + (v_n - v_\phi)^2} \right)_i,$$

где $\vec{v}_n$ и $\vec{v}_\phi$ — векторы прогностического и фактического ветра с компонентами u и v ; $\vec{c} = \vec{v}_n - \vec{v}_\phi$ — векторная ошибка прогноза. Чем больше c , тем хуже прогноз. При идеальном прогнозе $c=0$.

12. Отношение среднего модуля векторной разности между прогностическим и фактическим вектором к среднему модулю скорости фактического ветра (с точностью до 0,01)

$$\alpha = \frac{c}{c_\phi},$$

$$\text{где } c_\phi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \vec{v}_\phi \right|_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\sqrt{u_\phi^2 + v_\phi^2} \right)_i.$$

При идеальном прогнозе $\alpha=0$. Чем больше α , тем хуже прогноз.

13. Отношение среднего модуля векторной разности между прогностическим и фактическим ветром к среднему модулю фактической изменчивости вектора ветра (с точностью до 0,01)

$$\alpha_1 = \frac{c}{\Delta c_\phi},$$

где

$$\Delta c_\phi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \vec{v}_\phi - \vec{v}_n \right|_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\sqrt{(u_\phi - u_n)^2 + (v_\phi - v_n)^2} \right)_i.$$

При идеальном прогнозе $\alpha_1=0$. Чем больше α_1 , тем хуже прогноз.

Оценка прогнозов направления и скорости перемещения барических образований выполняется путем расчета следующих синоптико-статистических характеристик.

14. Среднее фактическое перемещение за сутки

$$\bar{s}_\phi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \vec{s}_\phi \right|_i.$$

15. Среднее перемещение за сутки по прогнозу

$$\bar{s}_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \vec{s}_n \right|_i.$$

Определение перемещения производится на картах погоды за сутки с точностью до 50 км.

16. Отношение

$$\beta = \frac{\bar{s}_n}{s_\phi}$$

При идеальном прогнозе $\beta=1$. Если $\beta<1$, то имеет место систематическое занижение прогнозируемой скорости, при $\beta>1$ — систематическое завышение.

7. Средний угол между прогностическими и фактическими направлениями перемещения (в градусах)

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\alpha|_i$$

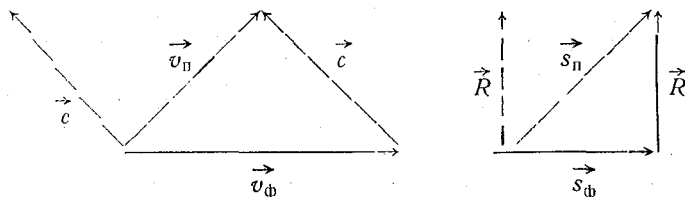
18. Среднее расстояние между положениями центров на прогностической и фактической картах

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\vec{R}|_i$$

где $\vec{R} = \vec{s}_n - \vec{s}_\phi$ — векторная ошибка прогноза.

Чем меньше $\vec{R}$, тем лучше прогноз.

При расчете векторных ошибок $\vec{c} = \vec{v}_n - \vec{v}_\phi$ и $\vec{R} = \vec{s}_n - \vec{s}_\phi$ разность двух векторов получается путем обращения направления вычитаемого вектора и последующего сложения первого и второго (обращенного) векторов. При этом итоговый вектор будет направлен в сторону уменьшаемого



Контролем правильности вычитания является $\vec{v}_n = \vec{c} + \vec{v}_\phi$ или $\vec{s}_n = \vec{R} + \vec{s}_\phi$. Учитывая свойство разности векторов $|a - b| \geq |a| - |b|$, следует помнить, что векторы одинаковой величины не дают нулевой разности, если угол между ними не равен нулю. С другой стороны $|a - b| = |a| - |b|$, если угол между векторами a и b равен нулю.

Векторные ошибки могут быть вычислены графически на миллиметровке или с помощью специальных планшетов.

Успешность численного прогноза обычно характеризуется средней относительной ошибкой ε . Критерий ε принимается показателем успешности для всей области прогнозирования. Однако относительная ошибка содержит ограниченную информацию о степени соответствия полей прогностических и фактических тенденций.

Учитывая, что суточные тенденции атмосферного давления можно с достаточным основанием аппроксимировать нормальным распределением, И. В. Бут предложил для суждения об аналогии полей тенденций учитывать пять параметров: два средних значения, два стандартных отклонения и коэффициент корреляции. Анализ ошибок позволил в итоге установить три критерия успешности численных прогнозов давления.

Первый критерий $\bar{x} - \bar{y}$ — разность средних значений фактических и прогностических тенденций характеризует сдвиг кривой распределения прогностических тенденций относительно кривой фактических тенденций в направлении оси x .

Второй критерий $\frac{\sigma_x}{\sigma_y}$ — отношение стандартных отклонений дает представление о соотношении интенсивности очагов фактических и прогностических тенденций и их изаллобарических градиентов.

Третий критерий R_{xy} — коэффициент корреляции характеризует аналогию структур изаллобарических полей.

Совокупность взятых трех критериев содержит значительно больше информации о степени аналогии прогностических и фактических полей тенденций, чем относительная ошибка ε .

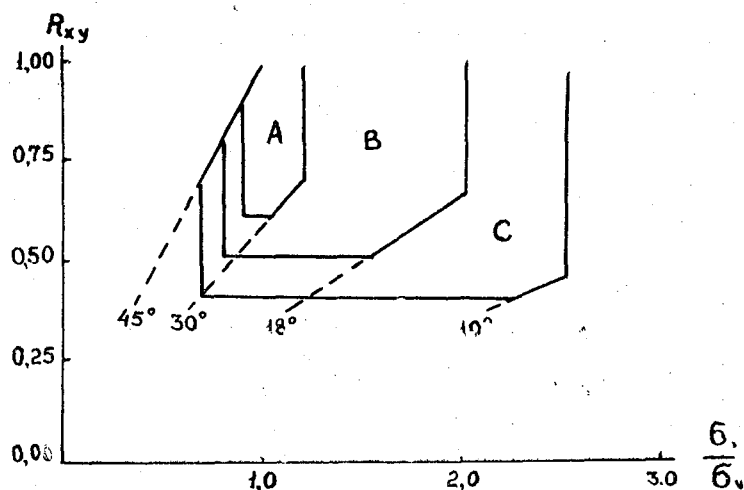


Рис. 2.4. Номограмма для оценки успешности численного прогноза

На рис. 2.4 приведена номограмма для оценки успешности численного прогноза. Каждой точке плоскости (на оси x дана ли-

нейная шкала $\frac{\sigma_x}{\sigma_y}$, на оси y — линейная шкала R_{xy}) соответствует определенное значение функционала $F = R_{xy} \cdot \frac{\sigma_x}{\sigma_y}$, выраженного в градусах тангенса угла наклона, образованного линией регрессии. Выделены области прогнозов различной успешности. Области A соответствует балловая оценка 5, области B — 4 и области C — 3.

2.7. Оценка вероятностных прогнозов

Вероятностный прогноз при наличии, например, трех градаций будет содержать соответственно вероятности его осуществления p_1, p_2 и p_3 (при условии $p_i \geq 0$ и $\sum p_i = 1$).

Оценка прогнозов в этом случае может производиться по формуле

$$p_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (p_{ij} - f_{ij})^2, \quad (2.43)$$

где p_{ij} — прогнозируемые вероятности; f_{ij} — принимает значение 1 или 0 в зависимости от того произошло ли событие в градации j или не произошло.

Величина p_v колеблется в пределах от 0 (все прогнозы правильны) до 2 (все прогнозы ошибочны).

Пример 2.12. В табл. 2.16 даны прогнозируемые значения вероятности наступления «дождя» и «без осадков». В столбцах (наблюдаемая вероятность — f_{ij}) ставится 1, если дождь действительно наблюдался и 0 — если не наблюдался.

Таблица 2.16

Вероятность прогнозов «дождя» и «без осадков»

Случай (номер прогноза)	Дождь		Без осадков	
	прогнозируемая вероятность	наблюдаемая вероятность	прогнозируемая вероятность	наблюдаемая вероятность
1	0,7	0	0,3	1
2	0,9	1	0,1	0
3	0,8	1	0,2	0
4	0,4	1	0,6	0
5	0,2	0	0,8	1
6	0,0	0	1,0	1
7	0,0	0	1,0	1
8	0,0	0	1,0	1
9	0,0	0	1,0	1
10	0,1	0	0,9	1

Найдем критерий успешности вероятностного прогноза

$$p_v = 1/10 (0,7^2 + 0,7^2 + 0,1^2 + 0,1^2 + 0,2^2 + 0,2^2 + 0,6^2 + 0,6^2 + 0,2^2 + 0,2^2 + 0,0^2 + 0,0^2 + 0,0^2 + 0,0^2 + 0,0^2 + 0,0^2 + 0,0^2 + 0,0^2 + 0,1^2 + 0,1^2) = 0,19.$$

Теперь можно рассчитать его оправдываемость

$$p_0 = (1 - p_v) \cdot 100 = 81\%.$$

Показатель p_v пригоден для оценки вероятностных прогнозов при числе фаз не более трех. Если $m=n>3$ контроль прогнозов становится малоэффективным.

Контроль вероятностных прогнозов можно производить иначе. Если в матрице сопряженности с p_{ij} каждому элементу приписать веса s_{ij} , то в качестве оценки прогноза $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ при осуществлении фазы Φ_j можно взять линейную функцию величин $p_1, p_2, \dots, p_n$

$$\theta_j = s_{1j} p_1 + s_{2j} p_2 + \dots + s_{nj} p_n. \quad (2.44)$$

Если осуществлялась фаза Φ_1 , то в качестве весов следует взять элементы первой строки весовой матрицы (s_{ij}). Аналогично при осуществлении других фаз. Например, для $m=n=3$ и $s_{ij}=s$ (1; 0,25; 0) можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= p_1 + \frac{1}{4} p_2, \\ \theta_2 &= p_2 + \frac{1}{2} (p_1 + p_3), \\ \theta_3 &= p_3 + \frac{1}{4} p_2. \end{aligned} \right\} \quad (2.45)$$

В случае пятифазового прогноза (с центральной фазой, определяющей норму), который можно получить из трехфазового деления весов, матрица весов, предложенная Н. А. Багровым, будет иметь вид, приведенный в табл. 2.17.

Таблица 2.17

Матрица весов пятифазового прогноза

Φ_j	Π_i				
	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5
Φ_1	1	1/2			
Φ_2	1	1	3/8		
Φ_3	1/2	2/3	1	2/3	1/2
Φ_4			3/8	1	1
Φ_5				1/2	1

Оценка качества вероятностных прогнозов должна производиться в этом случае по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= p_1 + \frac{1}{2} p_2, \\ \theta_2 &= p_1 + p_2 + \frac{3}{8} p_3, \\ \theta_3 &= \frac{1}{2} p_1 + \frac{2}{3} p_2 + p_3 + \frac{2}{3} p_4 + \frac{1}{2} p_5, \\ \theta_4 &= \frac{3}{8} p_3 + p_4 + p_5, \\ \theta_5 &= \frac{1}{2} p_4 + p_5. \end{aligned} \right\} \quad (2.46)$$

Итоговый критерий можно записать в виде

$$p_s = \sum_{i=1}^n \theta_i \geq 1.$$

В случае $p_s = 1$ — прогнозы идеальные; чем больше p_s , тем ниже успешность прогнозирования.

Эта система оценок пригодна и для категорических прогнозов.

Для оценки качества вероятностных прогнозов, совпадающей с оценкой потребителя, Д. М. Сонечкиным предлагается использовать стохастическую аппроксимацию. Исходными данными при этом могут служить как количественные, так и качественные показатели экономической оценки использования прогнозов, которые периодически поступают к прогнозисту от потребителей прогнозов. Предлагается метод расчета матрицы весов, обеспечивающей оптимальную оценку качества вероятностных прогнозов.

Для каждого потребителя такой способ оценки требует специальной подготовки материалов и расчета на ЭВМ.

Глава 3

ОЦЕНКА УСПЕШНОСТИ ДОЛГОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ ПОГОДЫ

3.1. Особенности содержания и общие условия оценки

Долгосрочные прогнозы погоды различаются по содержанию в зависимости от их заблаговременности. Так в прогнозах на три дня «ход погоды» может быть расписан более подробно и по содержанию включенной информации близок к краткосрочному прогнозу. Каждый такой прогноз в оперативной прогностической практике оценивается в соответствии с Наставлением по службе прогнозов¹. В прогнозах на 6—7 дней (на естественный синоптический период) указания о погоде носят более общий характер — дается режим погоды. В качестве графического прогностического материала составляется схема процессов.

В других методах прогноза, например на 8—10 дней, прогнозируется карта распределения среднего атмосферного давления за каждый элементарный синоптический процесс, основные траектории циклонов и антициклонов, преобладающие направления ветра, скорости ветра, преобладающие и экстремальные значения температуры воздуха и другие характеристики погоды.

В прогнозах на месяц и на сезон даются наиболее важные режимные характеристики в виде преобладающих ветров, аномалий давления, температуры, осадков и ряда других метеорологических элементов.

Долгосрочные прогнозы, как и краткосрочные, могут оцениваться в целом, то есть оправдался единичный прогноз, содержащий комплекс метеорологических элементов, или нет. Это, главным образом, относится к прогнозам малой заблаговременности (продолжительности). В зависимости от задачи оценки могут быть выделены из прогнозов отдельные элементы погоды и изучена успешность их прогнозирования. В прогнозах на месяц и сезон оцениваются в основном аномалии количества осадков и температуры.

¹ Наставление по службе прогнозов. Терминология и оценка оправдываемости долгосрочных прогнозов погоды. Л., Гидрометеиздат, 1954.

При оценке долгосрочных прогнозов, особенно на длительный период (месяц, сезон, год), возникают особые условия оценки успешности таких прогнозов. Скажем, имеется прогноз температуры на весну. Чтобы оценить его практическую пригодность необходимо апробировать достаточно большое число весен, чтобы гарантировать достоверность оцениваемого ряда. Это основная трудность, с которой сталкиваются исследователи.

Вторая трудность связана с тем, что приходится оценивать не сами значения метеорологических элементов, а их режимные характеристики, требующие самостоятельного расчета и обеспеченности результатов. Над территориями, слабо освещенными в метеорологическом отношении, всегда присутствуют ошибки в расчете аномалий давления, температуры и других метеозлементов. в определении экстремальных значений метеорологических элементов и в других подобных случаях.

Третья трудность связана с выбором такого способа оценки прогнозов, который учитывал бы климатическое распределение вероятностей прогнозируемого метеорологического элемента, величину и значение ошибок прогноза, ход метеорологического элемента внутри прогнозируемого периода (или тенденцию), заблаговременность и другие специфические особенности долгосрочных прогнозов.

Существующие критерии успешности долгосрочных прогнозов не отвечают полностью указанным требованиям, однако позволяют вполне удовлетворительно установить преимущество одного метода по сравнению с другим.

Расчету оценки критериев оправдываемости прогнозов предшествует подготовка и представление ошибок прогноза в виде таблиц, графиков или матриц оправдываемости. Последние дают наиболее обобщенную характеристику ошибок.

В зависимости от задач оценки весь ряд ошибок прогнозирования можно разбить или на три градации — так называемые «градации по знаку»: норма, ниже нормы, выше нормы — или на большее число градаций. Важно при этом, чтобы все градации были обеспечены достаточным числом случаев. Это требование хорошо удовлетворяется, если число градаций k определяется по формуле

$$k = 5 \log N \quad (3.1)$$

или

$$k = \sqrt{N} \quad (3.1')$$

Ширина градации l находится из условия

$$l = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{k}, \quad (3.2)$$

где $A_{\max}$ и $A_{\min}$ — экстремальные значения данного метеорологического элемента. При оценке аномалий метеорологических элементов не требуется обязательного представления данных в виде таблиц оправдываемости.

3.2. Критерии оценки долгосрочных прогнозов погоды

3.2.1. Оценка прогнозов с помощью матриц оправдываемости

В этом случае общий подход оценки соответствует рассмотренному уже применительно к краткосрочным прогнозам.

Пусть имеется трехфазный инерционный прогноз Π_1 , Π_2 и Π_3 , соответствующий фазам погоды Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 . Поскольку выбор Π_i и осуществление Φ_j будут случайными, то каждая пара Π_i и

Φ_j осуществляется с некоторой вероятностью $p_{ij} = \frac{n_{ij}}{N}$, а $\sum_{ij} p_{ij} = 1$.

События Π_i и Φ_j будут статистически связанными, если есть некоторая ненадежность прогнозов, и однозначно связанными при идеальных прогнозах. Отсюда же вытекает, что $p_{0i} = \frac{n_{0i}}{N}$ — вероятности выбора формулировки прогнозов, а $\sum p_{0i} = 1$. Аналогично $\sum_j p_{j0} = 1$, где $p_{j0} = \frac{n_{j0}}{N}$.

Если дан прогноз Π_i , то осуществление явления Φ_j , соответствующего тексту прогноза, следует ожидать с вероятностью

$$q_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_{0j}} = \frac{p_{ij}}{p_{0i}} = \frac{p(\Phi, \Pi)_j}{p(\Pi)_i} = p(\Phi_i \Pi)_{ij}. \quad (3.3)$$

Замена безусловных вероятностей p_{ij} на условные q_{ij} и составляет смысл работы прогнозиста.

Очевидно,

$$\sum_j q_{ij} = 1.$$

В матрице оправдываемости долгосрочных прогнозов важной характеристикой надежности будут вероятности

$$r_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_{j0}} = \frac{p_{ij}}{p_{j0}}, \quad (3.4)$$

характеризующие возможности выбора формулировки прогноза Π_i в случае, когда фаза Φ_j осуществилась. Также очевидно, что

$$\sum_i r_{ij} = 1.$$

Пусть имеются распределения r_{ij} для данного явления, полученные двумя различными методами прогнозирования I и II.

Тогда тот метод лучше, у которого при всех $i \neq j$ вероятные ошибки меньше. Так неравенство

$$r_{ij}(i \neq j) I < r_{ij}(i \neq j) II \quad (3.5)$$

указывает на преимущество первого метода перед вторым. Если неравенство выполняется не при всех $i \neq j$ и имеются противоположные неравенства, то установить таким способом преимущество какого-то метода невозможно.

Характеристиками надежности метода прогноза являются также собственные значения $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ матрицы (r_{ij}) .

Метод прогноза будет случайным, если все строки матрицы (r_{ij}) имеют одинаковые вероятные ошибки. Если формулировка прогноза Π_i выбирается с вероятностью p_{j0} , то метод прогнозирования будет климатологическим.

Пример 3.1. Рассмотрим данные инерционных прогнозов среднемесячных температурных аномалий T в Ленинграде за 20 лет (пример по А. С. Монину). На предстоящий месяц предсказывается такая градация Φ_j , какая фактически осуществлялась в данном месяце.

Примем $n=3$.

Градация Φ_1 составляет интервал $T < -1^\circ$ (холодные месяцы).

Градация Φ_2 — интервал $|T| \leq 1^\circ$ (нормальные месяцы).

Градация Φ_3 — интервал $T > 1^\circ$ (теплые месяцы).

Прогноз дается в виде одной из формулировок Π_1, Π_2 или Π_3 . Значение вероятностей p_{ij} приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Климатические (безусловные) вероятности p_{ij} осуществления инерционных прогнозов среднемесячной температурной аномалии в Ленинграде по данным 20-летнего ряда

Φ_j	Π_i			$p_{j0} = \sum_{i=1}^3 p_{ij}$
	Π_1	Π_2	Π_3	
Φ_1	0,08	0,07	0,08	0,23
Φ_2	0,08	0,13	0,14	0,35
Φ_3	0,08	0,15	0,19	0,42
$p_{0i} = \sum_{j=1}^3 p_{ij}$	0,24	0,35	0,41	1,0

Климатические вероятности, соответственно равные 0,23, 0,35 и 0,42, показывают, что в Ленинграде чаще отмечаются положительные аномалии, чем отрицательные.

Согласно формуле (3.3), рассчитывается таблица условных вероятностей (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Условные вероятности q_{ij}

Φ_j	Π_i		
	Π_1	Π_2	Π_3
Φ_1	0,3(3)	0,20	0,20
Φ_2	0,3(3)	0,37	0,34
Φ_3	0,3(3)	0,43	0,46
$\sum_{j=1}^3$	1,00	1,00	1,00

В табл. 3.2 значения q_{ij} находятся по данным табл. 3.1:

$$q_{11} = \frac{p_{11}}{p_{01}} = \frac{0,08}{0,24} = 0,33,$$

$$q_{12} = \frac{p_{12}}{p_{02}} = \frac{0,07}{0,35} = 0,20,$$

$$q_{13} = \frac{p_{13}}{p_{03}} = \frac{0,08}{0,41} = 0,20 \text{ и т. д.}$$

Вероятности $q_{11}=0,33$, $q_{22}=0,37$ и $q_{33}=0,46$ свидетельствуют о малой надежности инерционного метода.

По формуле (3.4) рассчитывается таблица вероятностей r_{ij} (табл. 3.3):

Таблица 3.3

Вероятности r_{ij}

Φ_j	Π_i				
	Π_1	Π_2	Π_3	$\sum_i r_{ij} \ (i \neq j)$	$\tilde{r}_{ij} = 1 - \sum_{i \neq j} r_{ij}$
Φ_1	0,35	0,30	0,35	0,65	0,35
Φ_2	0,23	0,37	0,40	0,63	0,37
Φ_3	0,19	0,35	0,46	0,54	0,46

В табл. 3.3 значения r_{ij} находятся по данным табл. 3.1:

$$r_{21} = \frac{p_{21}}{p_{20}} = \frac{0,08}{0,35} = 0,23,$$

$$r_{22} = \frac{p_{22}}{p_{20}} = \frac{0,13}{0,35} = 0,37,$$

$$r_{23} = \frac{p_{23}}{p_{20}} = \frac{0,14}{0,35} = 0,40 \text{ и т. д.}$$

В колонке $\sum_i r_{ij} (i \neq j)$ приведены вероятные ошибки прогнозов, а r_{ij} показывают долю удачных прогнозов. Эти данные указывают на низкую успешность инерционных прогнозов аномалий температуры в Ленинграде.

Сравнение $r_{ij} (i \neq j)$ методического прогноза с $r_{ii} (i \neq j)$ инерционного позволяет установить уровень оправдываемости первого по сравнению со вторым. В целом, если при всех i и $i \neq j$ выполняется неравенство

$$r_{ij}(I) \leq r_{ij}(II) \quad (3.6)$$

и хотя бы при одной паре значения i и j тоже выполняется неравенство, то, очевидно, первый метод прогноза лучше второго. Если же при некоторых i и j выполняются эти неравенства, а при остальных i и j — противоположные неравенства, то абсолютное сравнение успешности двух методов невозможно и отдать предпочтение какому-то из них можно лишь исходя из запросов конкретного потребителя.

3.2.2. Индекс аналогичности по Н. А. Багрову

Под аналогичностью метеорологических полей понимается сходство их геометрических очертаний (географического распределения изолиний, градиентов) и близость их числовых значений средних уровней.

На основании анализа векторных полей Н. А. Багров предложил в качестве индекса аналогичности корреляционную матрицу

$$Y = \begin{pmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{yx} & r_{yy} \end{pmatrix}, \quad (3.7)$$

где r_{ij} — коэффициенты корреляции двух векторов по составляющим x и y .

Как показал анализ фактического материала, значения r_{ij} в этой матрице существенно различны. Наибольшие значения имеют величины r_{xx} и r_{yy} , а другие — r_{xy} и r_{yx} сравнительно малы и ими можно пренебречь. Тогда (3.7) принимает вид

$$Y = \begin{pmatrix} r_{xx} & 0 \\ 0 & r_{yy} \end{pmatrix}. \quad (3.8)$$

В соответствии с матрицей (3.8) можно установить аналогичность метеорологических полей не только по конфигурации изолиний, но и по значениям градиентов. Однако в виде матрицы (3.8) индекс Y в практической работе вычислять громоздко.

Поэтому используются упрощенные индексы вида

$$Y = \begin{pmatrix} \rho_{xx} & 0 \\ 0 & \rho_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_{\varphi} & 0 \\ 0 & \rho_{\lambda} \end{pmatrix}$$

или

$$Y = \rho_z = \rho_\varphi + \rho_\lambda \quad (3.9)$$

Техника вычисления формулы (3.9) сводится к следующему.

1. Над районом прогнозирования выбирается постоянная сетка точек, которые образуются пересечением параллелей и меридианов, проведенных через 5° .

2. Между каждой парой последовательных точек (например, для барического поля) определяется знак составляющих градиента отдельно по параллелям и меридианам для двух сравниваемых карт. При определении градиентов по параллелям из значения в восточной точке вычитается значение в западной точке и запи-

сывается $+1$, если $\frac{\partial p}{\partial \lambda} > 0$ или $\frac{\partial H}{\partial \lambda} > 0$ и -1 , если $\frac{\partial p}{\partial \lambda} < 0$ или

$\frac{\partial H}{\partial \lambda} < 0$. Градиенты по меридианам определяются вычитанием из значения в южной точке соответствующего значения в северной

точке. При этом записывается $+1$, если $\frac{\partial p}{\partial \varphi} > 0$ или $\frac{\partial H}{\partial \varphi} > 0$ и -1 ,

если $\frac{\partial p}{\partial \varphi} < 0$ или $\frac{\partial H}{\partial \varphi} < 0$.

Аналогичным образом возможно вычисление знаков градиентов любых метеорологических элементов.

3. Данные ($+1$ и -1) сводятся в таблицу (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Сводная таблица (схема) результатов расчета знака составляющих градиентов по параллелям и меридианам

Номер точки сетки	Прогностическое поле		Фактическое поле	
	Разности по параллелям, $\Delta\lambda$	Разности по меридианам, $\Delta\varphi$	Разности по параллелям, $\Delta\lambda$	Разности по меридианам, $\Delta\varphi$
1				
2				
3				
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
108				
109				
110				
⋮				
⋮				

4. Производится сопоставление двух полей. В случае, если знаки составляющих градиентов по параллелям двух сравниваемых полей совпадают, ставится знак плюс, если не совпадают, ставится знак минус. Затем подсчитывается количество случаев совпадения (n_+) и несовпадения их (n_-) и определяется параметр ρ_φ

$$\rho_\varphi = \frac{n_{\varphi+} - n_{\varphi-}}{n_{\varphi+} + n_{\varphi-}}. \quad (3.10)$$

Аналогично находится ρ_λ (по данным сравнения составляющих градиентов по меридианам)

$$\rho_\lambda = \frac{n_{\lambda+} - n_{\lambda-}}{n_{\lambda+} + n_{\lambda-}}. \quad (3.11)$$

В итоге по формуле (3.9) находится индекс аналогичности $Y = \rho_y$.

В тех случаях, когда прогнозируются аномалии метеорологических элементов расчет ρ выполняется проще: попарно сопоставляются знаки прогностического и фактического значения аномалий метеорологического элемента. Оценка знака производится по формуле

$$\rho = \frac{n_+ - n_-}{n_+ + n_-} = \frac{n_+ - n_-}{N}. \quad (3.12)$$

Параметр ρ сходен с коэффициентом ассоциации и колеблется в пределах от -1 до $+1$, в то время как параметр ρ_y изменяется в пределах от -2 до $+2$.

Если $\rho > 0$, то прогноз знака аномалии оправдался более чем на 50% станций. Это указывает на наличие сходства между метеорологическими полями. Чем больше ρ приближается к единице, тем больше будет подобие сравниваемых метеорологических полей и тем выше успешность прогноза.

При $\rho < 0$ прогноз оправдался менее чем на 50% станций. В случае $\rho = -1$ прогноз знака аномалии ни на одной станции не оправдался.

Если $\rho = 0$, то прогноз знака оправдался на 50% всех станций.

Для установления аналогичности сравниваемых процессов С. Т. Пагавой был предложен количественный критерий, показывающий на какой части территории естественного синоптического района знаки барических полей сопоставляемых процессов совпадают. Процессы считались аналогичными, если знаки барических полей совпадали на 58% территории и более. Сравнение случайных процессов показало, что совпадение знаков барических полей наблюдается на 57% территории. Это позволило принять, что если знаки барических полей совпадали на 44—57% территории, то сравниваемые процессы считались неаналогичными. Если площадь совпадения знаков барических полей составляла 43% и меньше, то сравниваемые процессы считались обратными.

Для установления, какой из двух прогнозов с оценками ρ_1 и ρ_2 лучше, необходимо вычислить $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$ и найти среднюю квадратическую величину из двух способов прогнозов

$$\sigma = \sqrt{\bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2}, \quad (3.13)$$

где $\bar{\sigma}_1 = \frac{\sigma_1}{\sqrt{n_1}}$ и $\bar{\sigma}_2 = \frac{\sigma_2}{\sqrt{n_2}}$.

Здесь σ_1 и σ_2 — средние квадратические величины прогнозируемых аномалий соответственно по первому и второму способам, n_1 и n_2 — число случаев (месяцев) в одном и другом способах прогнозирования.

В качестве критерия относительного качества принимается неравенство

$$\Delta\rho \geq (2 \div 3) \sigma. \quad (3.14)$$

Выполнение неравенства (3.14) по двум видам прогнозов с оценками ρ_1 и ρ_2 указывает на то, что отличие способов прогнозирования является не случайным. При $\rho_1 > \rho_2$ — первый способ предпочтительнее второго. Сравнение с инерционным прогнозом позволяет установить практическую целесообразность разработок методических прогнозов.

Более статистически значимое различие принимается при условии

$$\Delta\rho > 3\sigma. \quad (3.15)$$

Оценка прогноза величины аномалии производится по формуле

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_i}{\sigma_i} \right)^2, \quad (3.16)$$

где N — общее число станций, по которым проверяется прогноз; δ_i — ошибка прогноза аномалии на отдельной станции; σ_i — среднее квадратическое отклонение фактических аномалий от нормы на этой же станции.

Значения σ для каждой станции рассчитываются заранее по формуле

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_{\Phi})^2.$$

Здесь n — число лет; A_{Φ} — фактическая аномалия, равная

$$A_{\Phi} = A_i - \bar{A},$$

где A_i — среднее месячное значение метеорологического элемента; $\bar{A}$ — среднее многолетнее значение метеорологического элемента — норма

Оценка прогноза аномалии по Q показывает насколько велики были ошибки прогноза с учетом фактической изменчивости метеорологического элемента по отдельным станциям в рассматриваемый месяц.

Если $Q > 0$ — ошибка методического прогноза больше ошибки климатологического прогноза; $Q = 1$ — погрешности равны; $Q < 0$ — ошибка методического прогноза меньше ошибки климатологического прогноза.

Совместная оценка прогнозов по ρ и Q позволяет установить качественные градации успешности прогнозов аномалий (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Оценка прогнозов по ρ и Q

№ п/п	ρ	Q	Оценка прогнозов
1	$\rho \geq 0$	$Q \leq 1$	хорошие прогнозы
2	$\rho \geq 0$	$Q > 1$	удовлетворительные прогнозы по знаку
3	$\rho < 0$	$Q \leq 1$	удовлетворительные прогнозы по величине
4	$\rho < 0$	$Q > 1$	плохие прогнозы

Параллельно с этим рассматривается общая оправдываемость $\rho(\rho)$ по всем случаям, когда $\rho \geq 0$ и $\tilde{\rho}(\rho, Q)$ при совместной оценке по ρ и Q . В качестве примера приведена табл. 3.6.

Таблица 3.6

Оправдываемость прогнозов аномалий температуры с n -дневной заблаговременностью в зависимости от интенсивности зональной циркуляции $L \geq L_0$ и $L < L_0$

Параметры оценки	Холодное полугодие		Теплое полугодие		Год	
	$L \geq L_0$	$L < L_0$	$L \geq L_0$	$L < L_0$	$L \geq L_0$	$L < L_0$
Количество всех случаев						
Количество оправдавшихся случаев при $\rho \geq 0$, $\rho(\rho)$, %						
Количество оправдавшихся случаев по ρ и Q , $\tilde{\rho}(\rho, Q)$, %						

Примечание: L_0 — среднее значение зональной циркуляции.

Оправдываемость прогнозов величины аномалий может производиться при различных значениях допустимой погрешности. Например, аномалии давления от 0 до 5 мбар через 1 мбар (0—5, 1—6, 2—7 и т. д.), аномалии температуры от 0 до 4° через 1° (0—4, 1—5, 2—6 и т. д.).

Могут быть установлены и другие градации в зависимости от практических или научных задач.

3.2.3. Коэффициент аналогичности по А. П. Козыреву

Прогностические (x) и фактические (y) значения метеорологического элемента снятые в фиксированных точках можно представить в виде рядов числовых значений. Прокоррелировав эти ряды, получим уравнение регрессии

$$u = ax + b.$$

В случае абсолютного совпадения обоих полей ($x_i = y_i$) будем иметь коэффициент корреляции $r_{xy} = 1$ и коэффициенты $a = 0$ и $b = 0$. Если конфигурация изолиний и географическое распределение градиентов примерно одинаковы, то $r_{xy} \simeq 1$, $a \simeq 1$ и $b \neq 0$.

По величине отклонений коэффициента регрессии a от единицы и свободного члена b от нуля можно судить об аналогичности сравниваемых полей. В итоге коэффициент аналогичности, согласно А. П. Козыреву, записывается в виде

$$\alpha = (1 - a)^2 \sigma_y^2 + (\bar{y} - \bar{x})^2, \quad (3.17)$$

где σ_y^2 — среднее квадратическое отклонение поля y от поля x ; $\bar{x}$ и $\bar{y}$ — средние значения (уровни) поля x и y .

Слагаемое $(1 - a)^2 \sigma_y^2$ характеризует сходство в конфигурации изолиний и географическом распределении градиентов сравниваемых полей. Второе слагаемое показывает различие в величинах их средних уровней. При полной аналогии двух полей $\alpha = 0$. Чем больше величина α отличается от нуля, тем значительнее различаются сравниваемые поля.

3.2.4. Коэффициент схождения карт аномалий метеорологических элементов

Степень схождения двух карт аномалий Н. А. Багров предлагает рассчитывать по формуле

$$F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{-\frac{3}{4} \frac{\delta^2}{\sigma^2}}. \quad (3.18)$$

Для случайных прогнозов коэффициент схождения $F = 0,5$, для климатологических $F = 0,632$.

Формула (3.18) пригодна для сравнения прогностических и фактических полей аномалий температуры, давления и других метеорологических элементов.

В качестве коэффициента сходства может быть также использована величина

$$A = \sum_{i=1}^N \frac{a_{и} - a_{п}}{\sigma_{ип}}, \quad (3.19)$$

где $a_{и}$ — аномалия (температуры, давления) в исходный месяц; $a_{п}$ — аномалия прогнозируемая; $\sigma_{ип}$ — среднее квадратическое отклонение аномалии (по многолетним данным двух смежных месяцев).

Формулы (3.18, 3.19) могут привлекаться и для подбора аналогов к прогнозируемому месяцу.

3.2.5. Эффективность метода прогнозирования погоды

Под эффективностью понимается превышение обеспеченности методических прогнозов над климатологическими. Погрешности прогноза, например средней месячной температуры воздуха ΔT , можно представить в виде интегральной кривой (рис. 3.1).

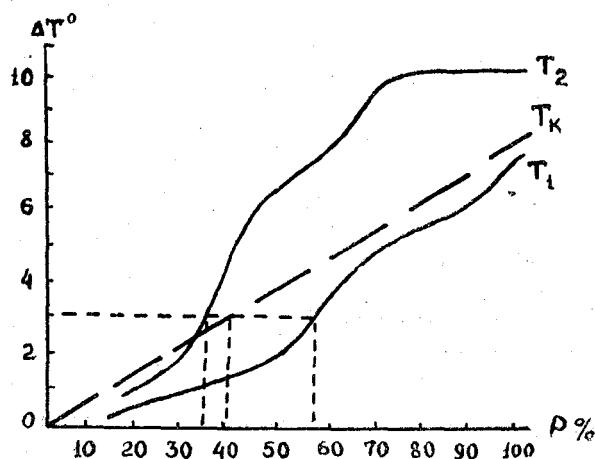


Рис. 3.1. Кривые обеспеченности методических (T_1 , T_2) и климатологических (T_k) прогнозов.

При допустимой ошибке 3° методический прогноз T_1 эффективнее климатологического (T_k) на величину $\Delta p = p_{T1} - p_{Tk} = 57\% - 42\% = 15\%$. Метод T_2 при той же ошибке менее эффективнее климатологического на величину $\Delta p = -7\%$. В целом при всех

возможных ошибках метод T_1 остается эффективным, в противоположность метода T_2 , практическая непригодность которого очевидна.

Превышение обеспеченности можно представить в табличном виде. Например, в табл. 3.7 дана обеспеченность климатологического прогноза, а в табл. 3.8 — методического. В последней таблице в знаменателе приведена эффективность (в %) методических прогнозов как превышение их обеспеченности над климатологическими прогнозами.

Таблица 3.7

Обеспеченность климатологических прогнозов величины аномалии давления (в %)

Месяц	Допустимая погрешность (мбар)					
	до ± 1	до ± 2	до ± 3	до ± 4	до ± 5	до ± 6
Январь	19	39	47	59	68	76
Февраль	17	33	45	57	66	73
...	...	...	...	...	...	...

Таблица 3.8

Обеспеченность (в числителе) и эффективность (в знаменателе) прогнозов величины аномалии давления (в %)

Месяц	Допустимая погрешность (мбар)					
	до ± 1	до ± 2	до ± 3	до ± 4	до ± 5	до ± 6
Январь	21/2	41/2	53/6	65/6	75/7	83/7
Февраль	18/1	35/2	50/5	61/4	71/5	78/5
...	...	...	...	...	...	...

3.2.6. Балловая оценка долгосрочных прогнозов

В ААНИИ в 1961 г. было предложено оценивать успешность долгосрочных прогнозов на 3—10 суток по десятибалльной шкале (10 баллов = 100%). Так для оправдываемости прогноза распределения барических полей предусматривается следующий порядок расчета.

1. По прогностическим и фактическим картам давления за период прогноза вычисляются соответственно прогностические и фактические разности давления для каждой пары опорных станций (или для пары узлов регулярной сетки).

Расхождения между прогностическими и фактическими разностями давления
(в мбар) и перевод их в баллы оценки оправдываемости прогнозов

Сентябрь—ноябрь										
Пары станций для определения разностей давления	Предсказанная и наблюдаемая разности имеют одинаковые знаки или одна из них равна нулю					Предсказанная и наблюдаемая разности имеют разные знаки				
	Оценка оправдываемости									
	10	7	4	0	10	7	4	0		
Алазея — мыс Валькаркай	0—6	7—12	13—18	19 и более	1—3	4—6	7—9	10 и более		
Алазея-Средне—Колымск	0—5	6—10	11—15	16 »	1—2	3—4	5—7	8 »		
О. Андрея—о. Котельный	0—5	7—12	13—18	19 »	1—3	4—5	7—9	10 »		
О. Андрея—б. Тикси	0—6	7—12	13—18	19 »	1—3	4—6	7—9	10 »		
Верхоянск—Алазея	0—8	9—16	17—25	26 »	1—5	6—8	9—12	13 »		
Верхоянск—м. Шалаурова	0—6	7—12	13—18	19 »	1—3	4—6	7—9	10 »		
Мыс Выходной—о. Диксон	0—8	9—16	17—25	26 »	1—5	6—8	9—12	13 »		
Мыс. Выходной—м. Желания	0—5	6—10	11—15	16 »	1—2	3—4	5—7	8 »		
Мыс Выходной—Салехард	0—8	9—16	17—25	26 »	1—5	6—8	9—12	13 »		
Мыс Выходной—б. Тихая	0—8	9—16	17—25	26 »	1—5	6—8	9—12	13 »		

2. Определяется расхождение между прогностическими и фактическими изменениями барических полей.

3. По переводной таблице (часть такой формы, например для арктического района, приведена в табл. 3.9) находится оценка оправдываемости в баллах по каждой паре станций. Пределы допустимых расхождений между разностями давления взяты из такого расчета, чтобы ошибка в прогнозе ветра для данного интервала этих разностей давления не превышала 5 м/с.

Результаты расчета сводятся в таблицу вида

№ п/п	Пары станций	Разность давления		Ошибка прогноза, мбар	Ошибка прогноза в баллах, p_{6i}
		прогностиче- ская, мбар	фактиче- ская, мбар		
1	A-B	3,2	2,9	0,3	10
2	C-D	-3,0	0,3	$\pm 3,3$	7
3	E-F	-5,8	-2,4	3,4	10
.	...	...	...	...	...
.	...	...	...	...	...
.	...	...	...	...	...
.	...	...	...	...	...

Сумма баллов

$\Sigma =$

$$\text{Оценка } \bar{p}_6 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_{6i}$$

$\bar{p}_6 =$

Балловая оценка такого вида была разработана для арктического района.

3.2.7. Другие виды оценок долгосрочных прогнозов погоды

Некоторые оценки долгосрочных прогнозов могут носить особый, часто исследовательский характер. Например, проверка успешности прогноза скорости перемещения циклонов в течение ЭСП.

В ряде случаев оценки успешности долгосрочных метеорологических прогнозов используется подход, широко применяемый в гидрологии. Оправдываемость каждого в отдельности прогноза определяется величиной допустимой ошибки. Статистически оправдано допустимую ошибку устанавливать в зависимости от изменчивости предсказываемого метеорологического элемента или явления за период действия прогноза.

В случае прогнозов малой заблаговременности за допустимую ошибку принимается вероятное изменение предсказываемой переменной за период действия прогноза

$$\Delta\Phi_{\text{доп}} = 0,674 \sigma_{\Delta}, \quad (3.20)$$

а в случае прогнозов большой заблаговременности — вероятное ее отклонение от нормы

$$\Delta\Phi_{\text{доп}} = 0,674 \sigma_x. \quad (3.21)$$

В формуле (3.20) σ_{Δ} — среднее квадратическое отклонение изменения переменной x от среднего ее изменения за период действия прогноза, а в формуле (3.21) σ_x — среднее квадратическое отклонение предсказываемой переменной. Для долгосрочных прогнозов на сроки более двух-трех месяцев в качестве допустимой погрешности принимают $0,8 \sigma_x$ или σ_x .

Величина σ_{Δ} в выражении (3.20) находится по формуле

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i - \overline{\Delta x})^2}{N}}, \quad (3.22)$$

где Δx_i — изменение предсказываемой переменной за период действия прогноза; $\overline{\Delta x}$ — среднее изменение (норма изменений) за тот же период; N — число случаев прогнозов или членов ряда.

Процент больших ошибок в ряде случаев позволяет установить качественную меру успешности прогнозирования:

- 1) число больших ошибок не превышает 5% общего числа прогнозов — метод отличный;
- 2) 6—10 — метод хороший;
- 3) 10—20% — метод удовлетворительный;
- 4) более 20% — метод неудовлетворительный.

Кроме того, используется отношение S/σ_x , позволяющее более строго определить успешность прогнозирования с учетом климатической изменчивости явления. Здесь S — среднеквадратическая ошибка корреляционной связи в проверочных прогнозах.

Значения S и σ_x находятся по следующим формулам:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x - x_n)^2}{N - n}}, \quad (3.23)$$

где x , x_n — соответственно фактическая и прогнозируемая величина переменной; n — число постоянных коэффициентов в прогностическом уравнении, а

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{N - 1}}, \quad (3.24)$$

где $\bar{x}$ — средняя величина переменной за многолетний ряд наблюдений (норма).

Можно также рассчитать отношение S/σ_{Δ} при малопериодных прогнозах. Чем меньше отношения S/σ_x и S/σ_{Δ} , тем точнее прогноз. Если они равны единице ($S=\sigma_x$ или $S=\sigma_{\Delta}$), то следовательно, метод не дает уменьшения ошибок по сравнению с отклонениями от нормы.

При соответствующих значениях N установлены допустимые значения $\frac{S}{\sigma_x}$ (табл. 3.10)

Таблица 3.10

Допустимые значения $\frac{S}{\sigma_x}$ для долгосрочных прогнозов различной заблаговременности

Число прогнозов	Малая заблаговременность	Большая заблаговременность
при $N \leq 15$	$\frac{S}{\sigma_x} = 0,57$	$\frac{S}{\sigma_x} = 0,70$
при $15 < N \leq 25$	$\frac{S}{\sigma_x} \leq 0,62$	$\frac{S}{\sigma_x} \leq 0,75$
при $N > 25$	$\frac{S}{\sigma_x} \leq 0,67$	$\frac{S}{\sigma_x} \leq 0,80$

ЛИТЕРАТУРА

1. Гирс А. А. Основы долгосрочных прогнозов погоды. Л., Гидрометеиздат, 1960. 560 с. (Гл. VI—VII).
2. Багров Н. А. Индекс аналогичности векторных полей. — «Труды ЦИП», 1963, вып. 123, с. 4—18.
3. Зверев А. С. Синоптическая метеорология. Л., Гидрометеиздат, 1968. 774 с. (Гл. 16—17).
4. Карпеев Г. А. О критериях успешности альтернативных прогнозов. — «Изв. АН СССР. Физика атмосферы», 1966, т. 2, № 8, с. 777—785.
5. Карпеев Г. А. О критериях успешности долгосрочных прогнозов метеорологических полей. — «Труды ГМЦ», 1968, вып. 28, с. 11—17.
6. Монин А. С. Об использовании ненадежных прогнозов. — «Изв. АН СССР, сер. геофиз.», 1962, № 2, с. 218—228.
7. Обухов А. М. К вопросу об оценке успешности альтернативных прогнозов. — «Изв. АН СССР, сер. геофиз.», 1955, № 4, с. 339—349.
8. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды, ч. 1. Л., Гидрометеиздат, 1964. 519 с. (гл. VIII).
9. Практикум по синоптической метеорологии. Л., Гидрометеиздат, 1972. 336 с. (Приложения 3—4).
10. Наставление по службе прогнозов, разд. 2, ч. 3. Л., Гидрометеиздат, 1957. 40 с.
11. Наставление по службе прогнозов, разд. 2, ч. 5. М., Гидрометеиздат, 1962. 18 с.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
Глава 1. Прогностическая метеорологическая информация	
1.1. Общая характеристика метеорологических прогнозов и штормовых предупреждений	5
1.2. Классификация прогнозов погоды по степени точности	10
1.2.1. Случайные прогнозы	10
1.2.2. Инерционные прогнозы	11
1.2.3. Климатологические прогнозы	11
1.2.4. Категорические прогнозы	12
1.2.5. Вероятностные прогнозы	12
1.3. Назначение метеорологических прогнозов и штормовых предупреждений	13
Глава 2. Оценка успешности краткосрочных прогнозов погоды	
2.1. Общие условия оценки	15
2.2. Назначение оценки прогнозов погоды	18
2.3. Требования, предъявляемые к оценке прогнозов погоды	21
2.4. Оценка успешности альтернативных прогнозов погоды	22
2.5. Оценка успешности штормовых предупреждений	32
2.6. Оценка успешности многофазовых прогнозов погоды	35
2.7. Оценка вероятностных прогнозов	46
Глава 3. Оценка успешности долгосрочных прогнозов погоды	
3.1. Особенности содержания и общие условия оценки	49
3.2. Критерии оценки долгосрочных прогнозов погоды	51
3.2.1. Оценка прогнозов с помощью матриц оправдываемости	51

	Стр.
3.2.2. Индекс аналогичности по Н. А. Багрову	54
3.2.3. Коэффициент аналогичности по А. П. Козыреву	59
3.2.4. Коэффициент сходства карт аномалий метеорологических эле- ментов	59
3.2.5. Эффективность метода прогнозирования погоды	60
3.2.6. Балловая оценка долгосрочных прогнозов	61
3.2.7. Другие виды оценок долгосрочных прогнозов погоды	63
Литература	65

ЛЕОНИД АНДРЕЕВИЧ ХАНДОЖКО
Оценка успешности метеорологических прогнозов

Учебное пособие

Редактор *З. Б. Ваксенбург*

Корректоры: *И. М. Морозова, Л. В. Ломакина*

М-20253 Сдано в набор 5/IV 1977 г. Подписано к печати 16/VIII 1977 г.
Зак. 124 Формат 60×90¹/₁₆ Бумага тип. № 2 Тираж 800 Уч.-изд. л. 4,25
Темплан 1977 г., поз. 3300
Издание ЛПИ имени М. И. Калинина, 195251, Ленинград, Политехническая, 29
Типография 6 ВОК ВМФ Цена 26 коп.
