

УДК 551.509.314:551.519.9

Статистический анализ матриц сопряженности опасных явлений погоды по территории Удмуртии

Т.А. Загребина

Санкт-Петербургский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с региональными функциями

В последние годы значительно возрос ущерб от метеорологических опасных явлений погоды (ОЯ). По данным, которые были приведены президентом Всемирной метеорологической организации, руководителем Росгидромета А.И.Бедрицким, ежегодный ущерб от воздействия опасных гидрометеорологических явлений и неблагоприятных условий погоды на территории России составляет не менее 30–60 млрд руб. (1–2 млрд долл. США). А с 1980 по 2005 г. более 7000 стихийных бедствий по всему миру привели к гибели почти 2 млн людей и нанесли экономический ущерб более чем на 1 трлн долл. США.

Все это способствовало развитию национальных и региональных стратегических программ с целью уменьшения человеческих жертв и экономических потерь от опасных метеорологических явлений. Так, на третьей международной конференции ВМО, прошедшей в Бонне в марте 2006 г., был поднят вопрос о культуре предотвращения опасности бедствий. Было бы правильно, если бы метеорологические службы играли роль не только в предупреждении и оповещении об ОЯ, но и в контроле организаций, обязанных предпринимать предупредительные меры безопасности, соответствующие той или иной ожидаемой ситуации. Составными частями этой задачи являются: 1) осведомленность о рисках, связанных с ОЯ; 2) увеличение срока заблаговременности предупреждений об ОЯ; 3) своевременное принятие мер безопасности; 4) расчет экономической эффективности метеорологических прогнозов. Выполнение этих задач требует тщательных региональных исследований повторяемости определенных метеорологических явлений и их влияния на отдельные отрасли экономики. В рамках этих задач и были проведены исследования ОЯ на территории Удмуртии, произошедших за 2000–2005 гг.

Ориентация предоставляемых Росгидрометом гидрометеорологических услуг на минимизацию экономических потерь приводит к развитию специального гидрометеорологического обеспечения (СГМО). Отсюда вытекает целесообразность разработки региональных показателей, учитывающих влияние гидрометеорологического фактора на устойчивое развитие отраслей экономики, а также методических основ оценки экономического эффекта гидрометеорологического обеспечения. Задача минимизации экономических потерь непосредственно связана с оценками метеорологической уязвимости хозяйственных объектов и территорий.



Рис. 1. Эмпирическое и теоретическое распределение минимальных суточных температур в Ижевске за 2000–2005 гг.

Для расчета оценки изменчивости условий погоды необходимо определить среднюю климатическую величину метеорологического элемента. Средние климатические величины различных метеорологических элементов (температура, осадки, ветер) позволяют разделить исследуемую территорию на однородные по условиям погоды районы. Выделение однородных районов позволяет в дальнейшем классифицировать их по изменчивости. Ряд распределения статистической величины должен быть проверен вычислением таких статистик, как дисперсия, степень косости, степень крутости, расчет стандартных ошибок. Градации экстремальных температур (рис. 1–2) могут быть определены по 5%-му критерию повторяемости с учетом нормального распределения.

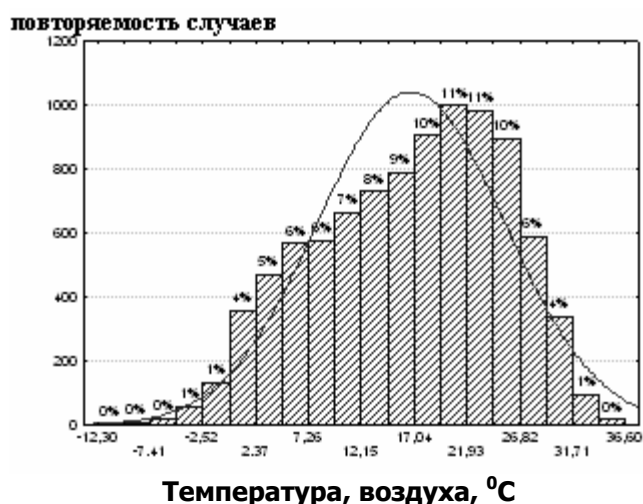


Рис. 2. Эмпирическое и теоретическое распределение максимальных суточных температур в Ижевске за 2000–2005 гг.

Несколько сложнее получить такой критерий для метеорологического элемента, распределение которого не подчиняется нормальному закону, например, для осадков (рис. 3). В этом случае значение средней величины является сильно смещенной оценкой для распределения суточных сумм осадков. В связи с этим необходимы исследования сезонного распределения осадков на станциях рассматриваемой территории. Исследования сезонных распределений осадков на 156 станциях бывшего Советского Союза, проведенные в Гидрометцентре России, показали, что для России мода распределения осадков очень мало меняется по станциям – от 70 до 80% повторяемости, по сезонам это прослеживается в большей степени – 65–90%, что соответствует градации суточных сумм осадков 0–4 мм. Поэтому в качестве порогового значения для суточных сумм осадков был предложен не 5, а 10%-й уровень повторяемости. При этом превышения 10%-го уровня повторяемости считались не в процентах от нормы, а в процентах от моды.

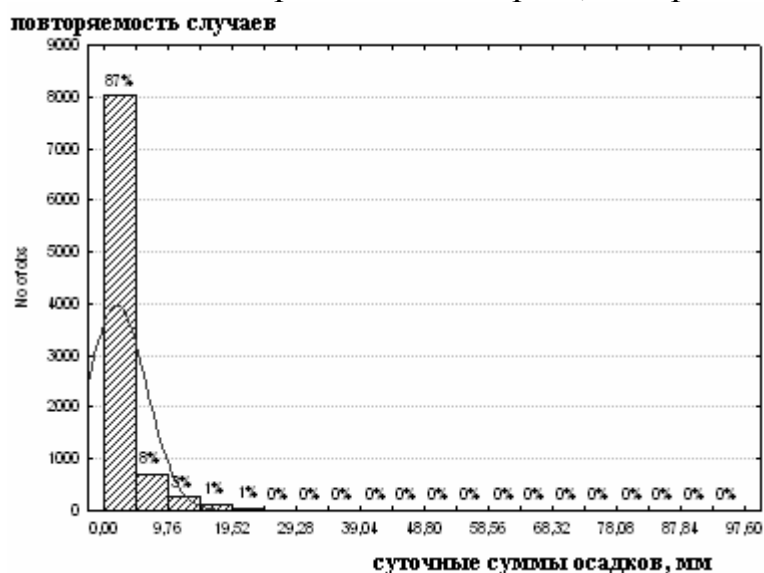


Рис. 3. Эмпирическое и теоретическое распределение суточных сумм осадков в Можге за 2000–2005 гг.

В качестве безразмерного критерия K , определяющего метеорологическую уязвимость по одному метеорологическому элементу, распределение которого подчиняется нормальному закону, предлагается отношение порогового значения экстремума 5%-й повторяемости e к его средней M :

$$K = \frac{e}{M}. \quad (1)$$

Оценки уязвимости от ОЯ рассчитываются в зависимости от интегральных оценок метеорологических элементов. Анализ работоспособности разработанного показателя метеорологической уязвимости территорий проведен на основе оценки коэффициента изменчивости условий погоды K_0 в соответствии с формулой (2). Чтобы учесть только нужные слагаемые, в качестве множителя к каждому из

метеорологических элементов вводится бинарная экспертная оценка E , принимающая значения 0 или 1:

$$K_0 = E_T \cdot K_T \cdot P_T + E_R \cdot K_R \cdot P_R + E_V \cdot K_V \cdot P_V, \quad (2)$$

где: K_T — температура воздуха; K_R — осадки; K_V — скорость ветра; P_T, P_R, P_V — повторяемости метеорологических элементов.

На рис. 4 представлено районирование территории Удмуртии по степени метеорологической уязвимости, рассчитанной по основным метеорологическим показателям.

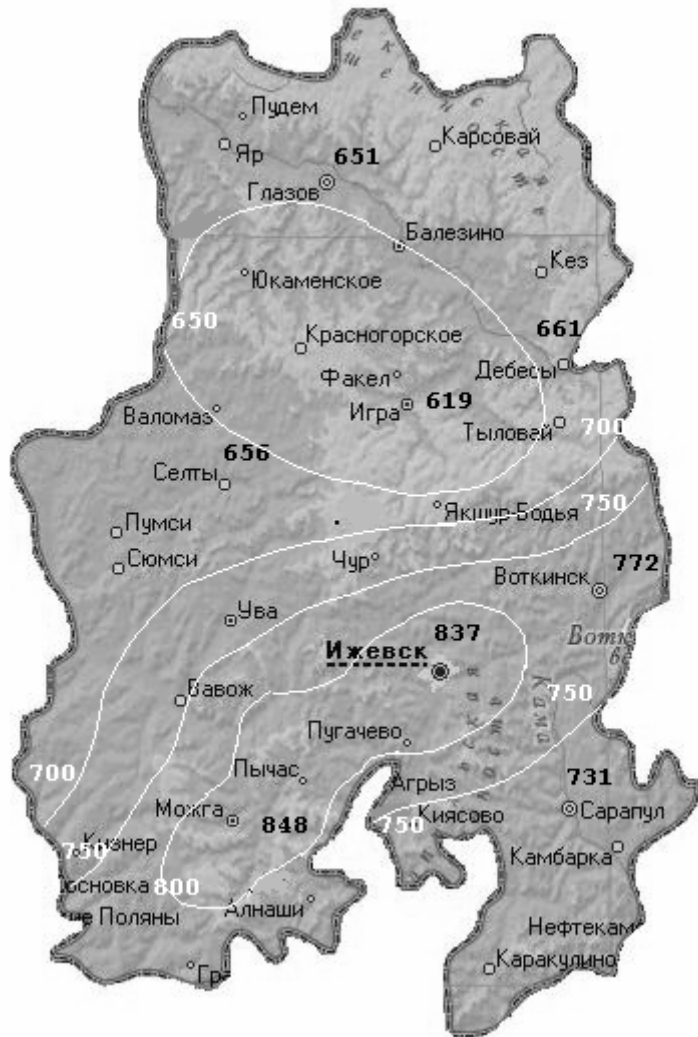


Рис. 4. Распределение коэффициента уязвимости по территории Удмуртии

Наибольшее влияние опасных явлений и неблагоприятных метеорологических условий погоды (НМУ) на экономику отмечается в центральных и южных районах Удмуртии (Можгинский, Вавожский и Кизнерский районы). Достаточно высоки значения показателя изменчивости по станции Воткинск и Ижевск. Значительный разброс значений показателя изменчивости отмечается по территории Воткинского и Завьяловского районов, что необходимо учитывать при определении метеорологической уязвимости отраслей экономики. Несколько снижено влияние ОЯ и НМУ на севере территории.

Полезность прогнозов погоды включает в себя оценку успешности прогнозов и расчет экономической эффективности прогнозов в той или иной отрасли производства. Использование определенных рекомендаций Гидрометслужбы, основанное на стратегии доверия прогнозам, позволяет выбрать потребителю наиболее верное хозяйственное решение.

Наиболее эффективным способом статистического анализа прогностической деятельности является матричный способ. В анализе был задан альтернативный уровень дискретности. Вид дискретности – двумерные матрицы сопряженности методических, инерционных и случайных прогнозов как по отдельным опасным явлениям погоды, так и по всем явлениям в целом. Частоты матриц n_{ij} представляют собой сопряженность фактических (Ф) и прогностических (П) состояний погоды. При преобладании какого-либо вида ошибок (ошибок-страховок или ошибок-пропусков) матрица сопряженности является смещенной. Все инерционные матрицы несмещенные. В случае явлений погоды, имеющих конвективный характер, сравнение лучше проводить с матрицами случайного прогноза.

Для исследований были выбраны следующие категории опасных явлений погоды: 1 – все рассматриваемые опасные явления погоды; 2 – шквал; 3 – заморозки на почве и в воздухе; 4 – заморозки на почве; 5 – сильный дождь; 6 – сильный мороз (температура воздуха -40°C и менее); 7 – сильная жара (температура воздуха $+35^{\circ}\text{C}$ и более). Были получены следующие двумерные эмпирические распределения.

Частоты совпадения имеют различную плотность распределения. Рассеяние частот относительно главной диагонали показывает стохастическую связь зависимостей. Необходимы разносторонняя оценка случайных величин и определенная статистическая систематизация.

Матрицы сопряженности

методических, инерционных и случайных прогнозов опасных явлений погоды за 2000—2005 гг. по территории Удмуртии (категория 1)

$$\begin{vmatrix} 40 & 2 & 42 \\ 2 & 2148 & 2150 \\ 42 & 2150 & 2192 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 40 & 2 & 42 \\ 2 & 2148 & 2150 \\ 42 & 2150 & 2192 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 40 & 2 & 42 \\ 2 & 2148 & 2150 \\ 42 & 2150 & 2192 \end{vmatrix}$$

Матрицы сопряженности

методических, инерционных и случайных прогнозов шквалов за 2000—2005 гг. по территории Удмуртии (категория 2)

$$\begin{vmatrix} 2 & 0 & 2 \\ 0 & 2190 & 2190 \\ 2 & 2190 & 2192 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 0 & 2 & 2 \\ 2 & 2190 & 2190 \\ 2 & 2190 & 2192 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 0 & 2 & 2 \\ 2 & 2190 & 2190 \\ 2 & 2190 & 2192 \end{vmatrix}$$

Матрицы сопряженности

методических, инерционных и случайных прогнозов заморозков на почве и в воздухе за 2000—2005 гг. по территории Удмуртии (категория 3)

$$\begin{vmatrix} 14 & 2 & 16 \\ 0 & 2176 & 2176 \\ 14 & 2178 & 2192 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 1 & 15 & 16 \\ 15 & 2161 & 2176 \\ 16 & 2176 & 2192 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 0 & 16 & 16 \\ 14 & 2162 & 2176 \\ 14 & 2178 & 2192 \end{vmatrix}$$

**Матрицы сопряженности
методических, инерционных и случайных прогнозов заморозков на
почве**

за 2000—2005 гг. по территории Удмуртии (категория 4)

$$\begin{vmatrix} 16 & 0 & 16 \\ 2 & 2174 & 2176 \\ 18 & 2174 & 2192 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 2 & 14 & 16 \\ 14 & 2162 & 2176 \\ 16 & 2176 & 2192 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 0 & 16 & 16 \\ 18 & 2158 & 2176 \\ 18 & 2174 & 2192 \end{vmatrix}$$

**Матрицы сопряженности
методических, инерционных и случайных прогнозов сильного дождя
за 2000—2005 гг. по территории Удмуртии (категория 5)**

$$\begin{vmatrix} 4 & 0 & 4 \\ 0 & 2188 & 2188 \\ 4 & 2188 & 2192 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 0 & 4 & 4 \\ 4 & 2184 & 2188 \\ 4 & 2188 & 2192 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 0 & 4 & 4 \\ 4 & 2184 & 2188 \\ 4 & 2188 & 2192 \end{vmatrix}$$

**Матрицы сопряженности
методических, инерционных и случайных прогнозов сильного мороза
за 2000—2005 гг. по территории Удмуртии (категория 6)**

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 2191 & 2191 \\ 1 & 2191 & 2192 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 2190 & 2191 \\ 1 & 2191 & 2192 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 2190 & 2191 \\ 1 & 2191 & 2192 \end{vmatrix}$$

**Матрицы сопряженности
методических, инерционных и случайных прогнозов сильной жары
за 2000—2005 гг. по территории Удмуртии (категория 7)**

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 2191 & 2191 \\ 1 & 2191 & 2192 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 2190 & 2191 \\ 1 & 2191 & 2192 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 2190 & 2191 \\ 1 & 2191 & 2192 \end{vmatrix}$$

Статистический анализ включал в себя расчет следующих статистических величин: оправдываемость методических ($P_{мет}$), инерционных ($P_{ин}$) и случайных прогнозов ($P_{сл}$). Все эти показатели имеют достаточно высокие значения, но ряд их существенных недостатков не позволяет отразить всей картины статистического распределения. Поэтому использовалась система критериев, включающая: критерий надежности Багрова – H ; критерий точности Обухова – Q ; информационное отношение – V и количество прогностической информации – I , расчет которых основан на статистической энтропии; критерий Пирсона – χ^2 , подтверждающий

нулевую гипотезу с заданным уровнем значимости $\alpha = 0,05$ с использованием критерия Фишера; коэффициент связи Юла – Ψ ; коэффициент качественной корреляции – A ; коэффициент сопряженности Чупрова – K ; меры Гутмана, основанные на расчете условных вероятностей – λ .

Таблица 1

Критерии анализа прогностической информации об опасных явлениях погоды за 2000–2007 гг. по территории Удмуртии

| Категории ОЯ | $P_{\text{мет}}^{\text{мет}}$ | $P_{\text{мет}}$ | $P_{\text{мет}}$ | $H_{\text{мет}}$ | $Q_{\text{мет}}$ | $V_{\text{мет}}$ | $I_{\text{мет}}$, диг | $\chi^2_{\text{мет}}$ | $\Psi_{\text{мет}}$ | $A_{\text{мет}}$ | $K_{\text{мет}}$ | $\lambda_{\text{мет}}$ |
|--------------|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------------|
| 1 | 0,99 | 0,96 | 0,96 | 0,951 | 0,951 | 0,9598 | 0,0388 | 1934,02 | 1 | 0,951 | 41,309 | 0,905 |
| 2 | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,933 | 0,875 | 0,9989 | 0,0188 | 1780,82 | 1 | 0,935 | 38,037 | 0,867 |
| 3 | 1 | 0,99 | 0,99 | 1 | 0,999 | 1 | 0,006 | 1677,29 | 1 | 1 | 35,825 | 1 |
| 4 | 1 | 0,99 | 0,99 | 1 | 0,999 | 0,9999 | 0,002 | 547,39 | 1 | 1 | 11,692 | 1 |
| 5 | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,941 | 0,999 | 0,9337 | 0,0177 | 1825,90 | 1 | 0,942 | 38,999 | 0,882 |
| 6 | 1 | 0,99 | 0,99 | 1 | 0,999 | 1 | 0,006 | 1677,29 | 1 | 1 | 35,825 | 1 |
| 7 | 1 | 0,99 | 0,99 | 1 | 0,999 | 1 | 0,006 | 1677,29 | 1 | 1 | 35,825 | 1 |

На рис. 5 показано превышение оправдываемости методических прогнозов над климатическими. В целом по опасным явлениям погоды это превышение составило 3%.

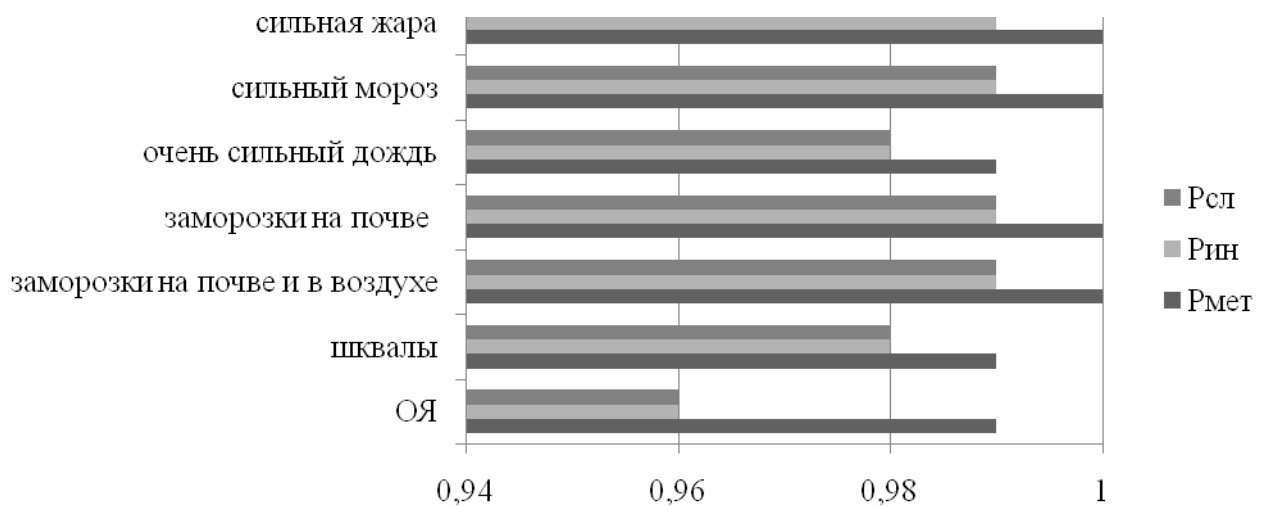


Рис. 5. Вероятностное распределение оправдываемости методических, инерционных и случайных прогнозов

Критерий успешности Багрова характеризует относительное приращение общей оправдываемости и изменяется от 0,931 до 1. Критерий точности Обухова выражает долю успешных прогнозов, которая колеблется от 0,875 до 1.

В критерий Пирсона для дихотомической матрицы была внесена поправка Иэйтса на аппроксимацию дискретного полиномиального распределения. Критерий Пирсона значительно превышает значение 3,84, соответствующее заданному уровню значимости $\alpha = 0,05$ и заданному количеству степеней свободы — γ (рис. 6). Снижение показателя Пирсона до 547,39 вызвано допущенными ошибками прогноза заморозков на почве. Максимальное значение Пирсона соответствует матрице сопряженности первой категории и составляет 1934,02.

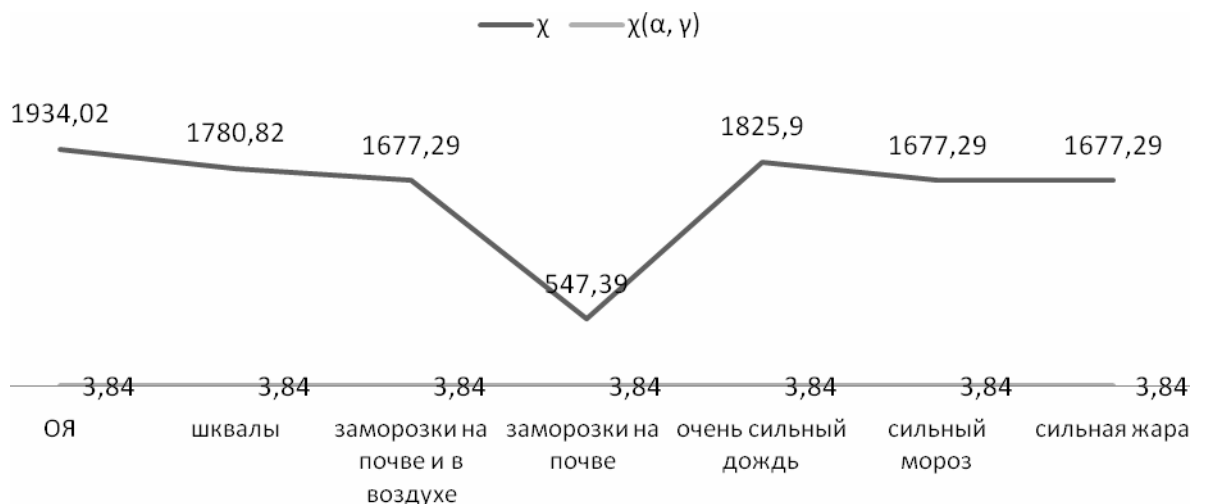


Рис. 6. Превышение значений критерия Пирсона относительно нулевой гипотезы при заданном уровне значимости $\alpha = 0,05$ и заданном

количестве степеней свободы γ

Значения коэффициента связи Юла показывают большую зависимость между заданными признаками категорий. Значения качественной корреляции несколько ниже количественной, но также достаточно высоки. Коэффициент сопряженности Чупрова говорит о большом значении связей с числом степеней свободы. Условные вероятности, представленные мерой Гутмана, изменяются от 0,082 до 1 и наименьшие значения связаны с такими явлениями погоды конвективного характера, как шквал и сильный дождь.

Количество прогностической информации представляет собой снижение природной энтропии. Благодаря прогнозам уменьшается безусловная энтропия по сравнению с природной энтропией. Климатическая и безусловная энтропии выражаются в дитах. Наименьшее значение количества информации отмечается по такому явлению, как заморозки на почве — 0,002 дит (рис. 7). Информационное отношение представляет собой снижение природной энтропии в относительных единицах.

Матричная форма обобщения и анализа прогностической информации является наиболее удобной для оценки успешности прогнозов и определения их экономической полезности. Для определенных экономических расчетов необходимо рассчитать условные вероятности первого p'_{ij} и второго q''_{ij} типа. Условные вероятности первого типа характеризуют меру предупрежденности опасных явлений погоды.

$$q'_{ij} = q(\Phi_i, \Pi_j / \Phi_0). \quad (3)$$

Условные вероятности второго типа характеризуют реализацию текстов прогнозов.

$$q''_{ij} = q(\Phi_i, \Pi_j / \Pi_0).$$

(4)

Как видно из рис. 7, наиболее информационной является матрица сопряженности первой категории. Преобразуем матрицу повторяемости опасных явлений погоды в условные вероятности первого и второго типа.

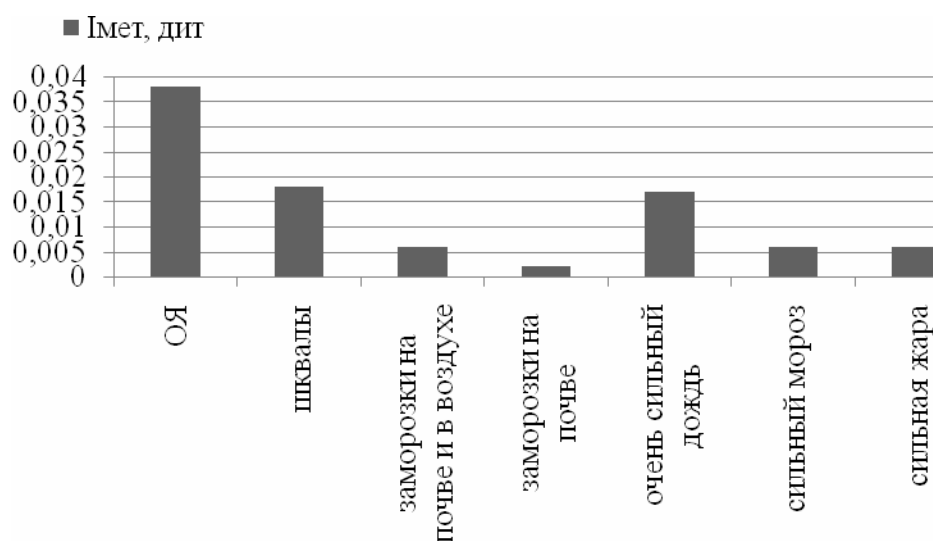


Рис. 7. Количество прогностической информации, дит

Анализ условных вероятностей первого типа показал высокую степень предупрежденности опасных явлений погоды. Сопряженность условных вероятностей второго имеет скошенность в сторону ошибок-стаховок.

Матрицы сопряженности условных вероятностей прогнозов опасных явлений погоды за 2000-2005гг. по территории Удмуртии (категория 1)

$$\begin{matrix} \begin{matrix} \parallel a_{ij} \parallel \\ \begin{matrix} 0,02 & 0,00 & 0,02 \\ 0,00 & 0,98 & 0,98 \\ 0,02 & 0,98 & 1,00 \end{matrix} \end{matrix} & \rightarrow & \begin{matrix} \parallel a'_{ij} \parallel \\ \begin{matrix} 0,95 & 0,05 & 1,00 \\ 0,00 & 1,00 & 1,00 \\ 0,02 & 0,98 & 1,00 \end{matrix} \end{matrix} & \rightarrow & \begin{matrix} \parallel a''_{ij} \parallel \\ \begin{matrix} 0,95 & 0,00 & 0,02 \\ 0,05 & 1,00 & 0,98 \\ 1,00 & 1,00 & 1,00 \end{matrix} \end{matrix} \end{matrix}$$

Для Удмуртской Республики наибольшая доля экономического эффекта СГМО (рис. 8) приходится на топливно-энергетический комплекс (ТЭК), сельское и дорожное хозяйство.

Потребитель прогностической информации характеризуется экономико-метеорологическим отношением

$$A = \frac{C}{L}, \quad (5)$$

где C — затраты потребителя на предупредительные меры; L — прямые потери потребителя, если защитные меры не приняты.

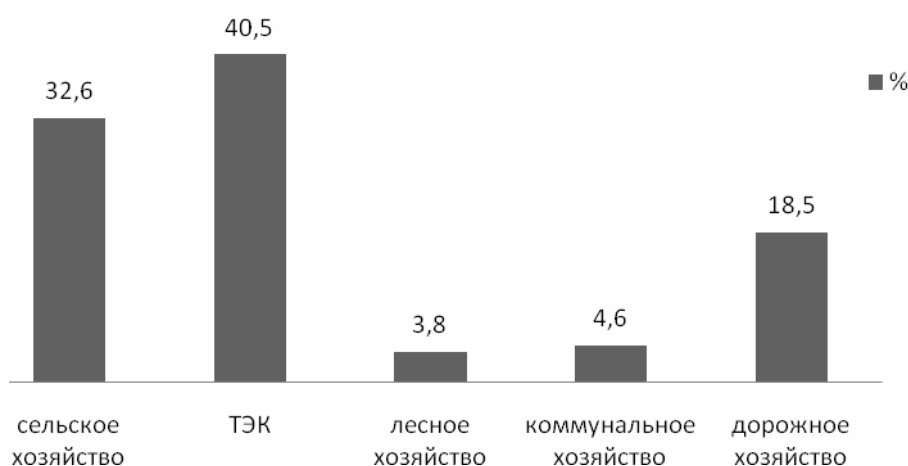


Рис. 8. Распределение экономической эффективности СГМО по основным отраслям экономики Удмуртии в 2000 г.

В матрице потерь $\parallel S_{ij} \parallel$ элементы S_{11} и S_{21} (C — затраты потребителя) принимаются равными, а S_{12} (L — прямые потери) является

постоянной величиной. Тогда, если $p_{10} > A$, то пороговая оправдываемость находится по формуле

$$P_{пор} = 1 - 2A(1 - p_{10}). \quad (6)$$

Если $p_{10} < A$, то пороговая оправдываемость находится по формуле

$$P_{пор} = 1 - 2p_{10}(1 - A). \quad (7)$$

Формула расчета экономического эффекта от использования гидрометеорологической информации потребителем имеет следующий вид

$$\mathcal{E} = \beta \cdot N \cdot [(R_{ин} - R_m) - Z_{пп}], \quad (8)$$

где β — коэффициент долевого участия гидрометслужбы в получении экономического эффекта; N — общее число прогнозов; $Z_{пп}$ — предпроизводственные затраты (стоимость) на прогностическую информацию; $(R_{ин} - R_m)$ — снижение средних потерь при использовании методических прогнозов по сравнению с использованием климатических прогнозов.

Использование заблаговременной прогностической информации при принятии хозяйственных, управленческих решений и осуществлении защитных мер позволяет не только предотвратить убытки, вызванные погодно-климатическими явлениями, но и получить значительную прибыль от реализации рекомендаций специалистов Росгидромета в тех секторах экономики, где учитываются факторы погодно-климатических условий и критерии их влияния на устойчивое развитие экономики отрасли.

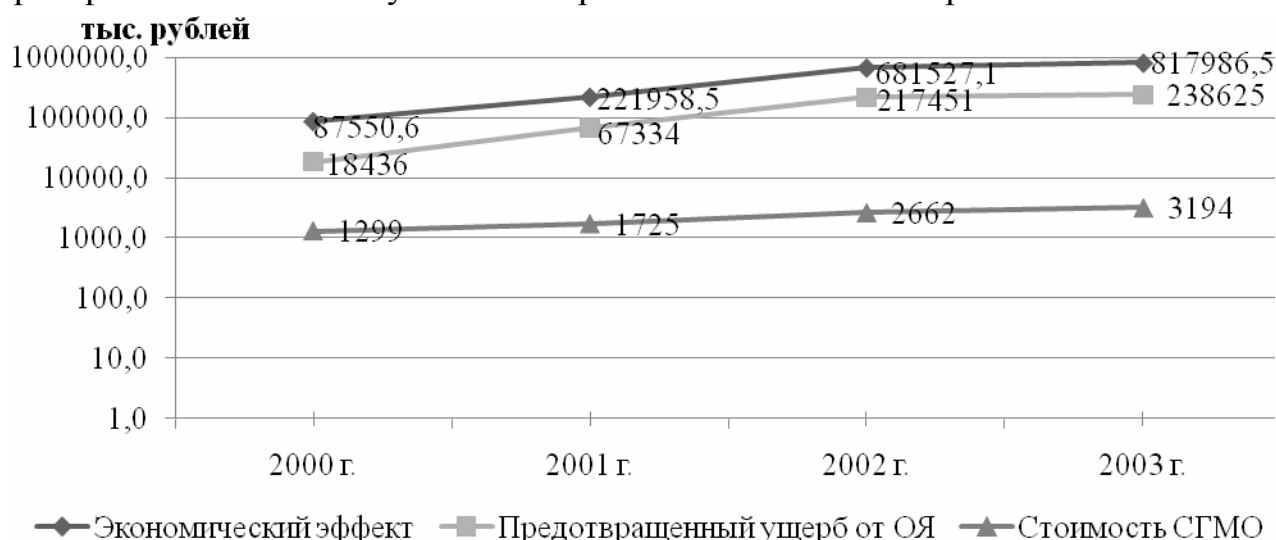


Рис. 9. Экономический эффект, предотвращенный ущерб от ОЯ

и стоимость СГМО по Удмуртии за 2000–2003 гг.

На рис. 9 представлена диаграмма, характеризующая отношение экономического эффекта от использования гидрометеорологической информации в хозяйственной деятельности различных отраслей экономики, в том числе предотвращенного ущерба от опасных явлений погоды, к стоимости СГМО этих отраслей в целом по Удмуртской Республике.

Библиографический список

1. *Бедрицкий А.И.* Проблемы экономически выгодного использования метеорологических прогнозов / А.И. Бедрицкий, А.А. Коршунов, Л.А. Хандожко, М.З. Шаймарданов // Метеорология и гидрология. 1998. № 10. С. 5–18.
2. *Бедрицкий А.И.* Экономическая полезность гидрометеорологического обеспечения / А.И. Бедрицкий, Л.А. Хандожко // Бюл. ВМО. 2001. Т. 50, № 3. С. 266–271.
3. *Коршунов А.А.* Оценка экономической полезности использования информационной продукции Росгидромета / А.А. Коршунов, И.А. Филиппов, Т.А. Загребина // Ген. докл., тез. докл. Междунар. науч.-пром. форум «Великие реки 2004». Н. Новгород, 2004. С. 133–134.
4. *Коршунов А.А.* Опасные гидрометеорологические явления и неблагоприятные условия погоды: некоторые результаты анализа статистики / А.А. Коршунов, И.А. Филиппов // Тр. ВНИИГМИ-МЦД. 2002. Вып. 169. С. 134–147.
5. *Коршунов А.А.* Некоторые аспекты экономической метеорологии / А.А. Коршунов, Л.А. Хандожко, М.З. Шаймарданов // Там же. 2001. Вып. 168. С. 3–11.
6. *Хандожко Л.А.* Выбор оптимального погодо-хозяйственного решения на основе прогноза опасных гидрометеорологических условий / Л.А. Хандожко, А.А. Коршунов, А.А. Фокичева // Метеорология и гидрология. 2003. № 1. С. 5–17.
7. *Хандожко Л.А.* Оптимальные погодо-хозяйственные решения / Л.А. Хандожко. СПб., 1999. 161 с.
8. *Хандожко Л.А.* Практикум по экономике гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства / Л.А. Хандожко. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. 311 с.
9. *Хандожко Л.А.* Сборник задач по экономической метеорологии / Л.А. Хандожко, Г.Н. Чичасов, А.А. Фокичева. М.; СПб.: Гидрометеоиздат, 2007. 31с.
10. *Хандожко Л.А.* Экономическая метеорология / Л.А. Хандожко. СПб.: Гидрометеоиздат, 2005. 490 с.
11. Karl T. et al., 2000, An Introduction to Trends in Extreme Weather Events: Observations, Socioeconomic Impacts, Terrestrial Ecological Impacts, and Model Projections, BAMS. Vol. 81, N 3, 413–416.

12. The Benefit Assessment Method and Analytical Study of Sector-oriented Meteorological Service in China Tairen Zhang // China Meteorological Administration March. 2007.