

МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕРРИТОРИЙ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ПО СТЕПЕНИ СУРОВОСТИ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ

В. В. Попов, И. И. Ульшин, П. А. Тимофеев

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Поступила в редакцию 16.03.2015 г.

Аннотация. В работе рассматриваются методические подходы к применению аппарата нечеткой логики для повышения качества использования гидрометеорологической и климатической информации. На базе анализа классических методов многокритериальной нечеткой оценки разработан научно-методический аппарат для оценки экстремальных свойств климата, предложены новые подходы к решению задачи ранжирования по степени суровости погоды территорий Арктической зоны РФ при обеспечении гидрометеорологической безопасности.

Ключевые слова: Арктическая зона РФ, нечеткая логика, поддержка принятия метеозависимых решений, интегральный индекс экстремальности.

Annotation. In the article methodological approaches to the apply of fuzzy logic to improve the use of hydro-meteorological and climate information are considered. Based on the analysis of the classical methods of multicriteria fuzzy evaluation was developed scientific and methodological apparatus for evaluating the properties of extreme climate. New approaches to the problem of ranking the degree of severity of the weather areas of the Arctic zone of the Russian Federation in ensuring hydrometeorological safety are offered.

Keywords: Arctic zone of the Russian Federation, fuzzy logic, support of the weather-dependent decision making, integral extremeness index.

ВВЕДЕНИЕ

На глобальном уровне решение проблемы обеспечения гидрометеорологической безопасности (ГМБ) и защищенности объектов Министерства обороны РФ в высокоширотных и полярных районах предполагает проведение постоянного мониторинга погодно-климатических условий, тенденции к изменению которых отчетливо проявляются в Арктической зоне РФ (АЗРФ). Данные такого мониторинга являются основой для получения оценок экстремальных свойств гидрометеорологических условий (ГМУ), определения типов состояния погоды и разработки сценариев деятельности войск (сил) и эксплуатации объектов военной инфраструктуры.

Существующие алгоритмы и методики поддержки принятия управленческих решений не всегда учитывают специфические погодно-климатические условия АЗРФ и не позволяют делать правильные выводы и выработать оптимальные рекомендации. В связи с этим целью работы является повышение адекватности функционирования системы поддержки принятия метеозависимых решений (ППМР) в суровых погодных условиях на основе методов нечеткой логики.

В работе предложена математическая модель ППМР, использующая в качестве входной как объективную, так и субъективную информацию (от нечеткой экспертной системы). Реализации данной модели обеспечивают процесс разработки необходимых рекомендаций и принятия управленческих решений.

Актуальность использования предложенной модели обоснована необходимостью существенного повышения эффективности решаемых задач в условиях стохастического влияния ряда неблагоприятных гидрометеорологических и климатических факторов.

ОСОБЕННОСТИ НЕЧЕТКОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СВОЙСТВ КЛИМАТА

Использование методов многокритериального моделирования для решения объемных, трудно формализуемых задач в области оценивания погодно-климатических условий АЗРФ характеризуются, как правило, отсутствием или сложностью формальных алгоритмов решения, неполнотой и нечеткостью исходной информации, нечеткостью достигаемых целей, а также сложностью нахождения компромиссного решения в случаях Парето-неразрешимости исходной задачи [1]. Эти особенности приводят к необходимости использования в процессе решения данного типа задач знаний, которые получают от эксперта в предметной области. На основании полученных знаний разрабатываются нечеткие экспертные системы, осуществляющие сбор и управление информацией. Такие системы осуществляют поддержку принятия решения в выборе оптимального способа достижения эффективной работы лица, принимающего решение (ЛПР) в условиях неполноты и нечеткости информации [2].

Построение нечеткой экспертной системы сводится к выявлению предпочтений ЛПР, а также разработке на этой основе адекватной модели выбора наилучшей в субъективном смысле альтернативы, под которой понимается временной интервал с оптимальными для выполнения поставленных задач ГМУ [3, 4]. Важной особенностью модели поддержки принятия решений описанного типа является необходимость учета субъективных предпочтений ЛПР при выборе наилучшей альтернативы. Эта особенность означает, что различные ЛПР при одной и той же ситуации принятия решений, при использовании од-

ной и той же модели могут получить различный результат [5].

При построении модели установлено, что характерными чертами алгоритмов решения рассматриваемого типа задач методами нечеткой логики является наличие некоторого набора утверждений (правил), каждое из которых представляет собой совокупность событий (условий) и результатов (выводов). После постановки задачи в терминах правил, состоящих из условий и выводов, производится их специальная обработка. Идея обработки состоит в преобразовании (фазификации) нечеткой информации в количественную форму. Информация в данном случае представляется в виде нечеткого множества функций принадлежности. Выбор типа функции принадлежности зависит от решаемой задачи. Операция фазификации, по аналогии с интегральными преобразованиями Лапласа, Фурье и другими, может быть интерпретирована как переход в другое пространство. В новом пространстве производится обработка нечетких переменных с использованием логических операций. Затем полученный результат логической обработки с использованием обратного преобразования (дефазификации) переводится в исходное пространство численных переменных [6, 7].

Алгоритм поддержки нечеткого управления состоит из следующих этапов.

1. Получение исходной информации и ее классификация на объективную и субъективную.

2. Преобразование объективной и субъективной информации в значения функций принадлежности лингвистических переменных и определение множества альтернатив (этап фазификации).

3. Выбор метода (оператора) нечеткой многокритериальной оценки.

4. Определение относительной важности критериев нечеткого оценивания.

5. Сопоставление значений функций принадлежности входных переменных (оператор обобщенной операции) для получения оценки каждой альтернативы.

6. Преобразование значений функций принадлежности оцененных альтернатив в численное значение для принятия решения.

Данный алгоритм поддержки нечеткого управления в работе взят за основу при построении системы ППМР.

Исходные постулаты поддержки принятия решений по оценке погодно-климатических условий на базе нечеткой исходной информации состоят в следующем.

1. В процессе моделирования и принятия решений осуществляется синтез объективной и субъективной информации.

2. Метеоролог разрабатывает и выдает ЛПР необходимые рекомендации.

3. ЛПР осуществляет оценку полученных рекомендаций в естественной форме, принимает соответствующие решения либо делает окончательные заключения.

В работе выделены следующие задачи обеспечения ГМБ:

анализ или прогноз состояния окружающей среды по климатической или фактической гидрометеорологической информации (ГМИ) с использованием элементов нечеткой логики;

классификация конечного числа состояний окружающей среды с различной степенью суровости погодных условий;

выделение для каждого состояния окружающей среды характерных значений гидрометеорологических и климатических величин и явлений;

классификация благоприятных и экстремальных состояний окружающей среды для выполнения задач войск (сил) по предназначению.

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ИНДЕКС ЭКСТРЕМАЛЬНОСТИ

В основе предлагаемой нечеткой экспертной системы ППМР предлагается использование интегрального показателя экстремальности, по которому может быть определен сценарий деятельности войск (сил) при определенных погодных условиях в определенный временной период. Сценарии могут быть определены в ходе дальнейших исследований для пяти градаций, определяемых по значениям интегрального показателя экстремальности. Характер градаций выбирается именно

для АЗРФ, а не территории РФ, как предложено в исследованиях [8, 9]. Предложенный показатель экстремальности основан на следующих частных показателях [8].

1. $PЭЭТ$ – радиационная эквивалентно-эффективная температура:

$$PЭЭТ = 125 \lg[1 + 0,02t + 0,001(t-8)(f-60) - 0,45(33-t)\sqrt{V} + 0,185\beta], \quad (1)$$

где t – температура воздуха, °С; V – скорость ветра, м/с; f – относительная влажность, %; $\beta = I(1-\gamma)$ – поглощенная поверхностью тела солнечная радиация, кВт/м²; I – интенсивность солнечной радиации; γ – альбеда кожи человека ($\gamma = 0,28$).

2. $ЭЭТ$ – эквивалентно-эффективная температура:

$$ЭЭТ = 37 - \frac{37-t}{0,68 - 0,0014f + \frac{1}{1,76 + 1,4V^{0,75}}} - 0,29t \left(1 - \frac{f}{100}\right), \quad (2)$$

3. H_w – индекс ветрового охлаждения по Хиллу:

$$H_w = H_d + (0,085 + 0,102V^{0,3})(61,1 - e)^{0,75}, \quad (3)$$

где $H_d = (0,13 + 0,47V^{0,5})(36,6 - t)$; e – упругость водяного пара, гПа;

4. Q_s – сальдо теплового баланса человека:

$$Q_s = \left(\frac{S \operatorname{ctg} h}{\pi} - \frac{1}{2} D \right) \cdot (1 - \alpha) + M(0,04ЭЭТ - 0,98), \quad (4)$$

где Q_s – сальдо теплового баланса человека, кВт/м²; S – прямая солнечная радиация, кВт/м²; D – рассеянная, кВт/м²; h – высота солнца, M – теплопродукция организма человека, кВт/м².

5. I – индекс патогенности метеорологической ситуации:

$$Q_s = \left(\frac{S \operatorname{ctg} h}{\pi} - \frac{1}{2} D \right) \cdot (1 - \alpha) + M(0,04ЭЭТ - 0,98) \\ I = I_t + I_f + I_v + I_n + I_{\Delta p} + I_{\Delta t}, \quad (5)$$

где I_t – индекс патогенности температуры воздуха; $I_t = 0,02(18-t)^2$ при $t \leq 18$ °С и

$I_t = 0,02(t-18)^2$ при $t > 18$ °С, $I_{\Delta t}$ – патогенность межсуточного изменения температуры Δt ; I_f – индекс патогенности влажности воздуха, f – среднесуточная относительная влажность, %; I_V – индекс патогенности ветра; V – среднесуточная скорость ветра, м/с; I_n – индекс патогенности продолжительности солнечного сияния; $n = 10 - 10S_\phi / S_{\max}$; S_ϕ и S_{\max} – максимально возможная и фактическая продолжительность солнечного сияния по гелиографу соответственно; $I_{\Delta p}$ – индекс патогенности межсуточного изменения атмосферного давления Δp .

Для расчета индекса патогенности метеорологической ситуации (в баллах) используется следующая формула:

$$I = 10 \left(\frac{f-70}{20} \right)^2 + 0,2V^2 + 0,06n^2 + (\Delta p)^2 + 0,3(\Delta t)^2 + I_t \quad (6)$$

6. K_M – климатический потенциал самоочищения атмосферы:

$$K_M = \frac{(P_{ш} + P_f)}{(P_o + P_v)}, \quad (7)$$

где $P_{ш}$ – число дней со штилем, скорость ветра $V = 0 \div 1$ м/с; P_f – число дней с влажностью более 80 %; P_o – число дней с осадками более 0,5 мм; P_v – число дней со скоростью ветра более 6 м/с.

Для определения интегрального индекса экстремальности погодных условий ($K_{инт}$) предлагается следующая формула

$$K_{инт} = \alpha_1 P \Delta T + \alpha_2 \Delta T + \alpha_3 H_w + \alpha_4 Q_s + \alpha_5 I + \alpha_6 K_M, \quad (8)$$

где α_i – коэффициенты относительной важности частных критериев.

Частные показатели оцениваются применительно к деятельности личного состава и эксплуатации вооружения и военной техники при различных ГМУ в рамках АЗРФ.

Для оценки вклада каждого показателя в (8) предлагается базироваться на теории нечеткой логики метод определения коэффициентов относительной важности критериев на основе процедуры парного сравнения критериев экспертами. Данная процедура дает возможность использовать не абсолютные

фиксированные величины функции принадлежности коэффициентов важности, а рассчитывать значения этих функций согласно суждениям экспертов.

Сущность предлагаемого метода заключается в следующем [10]. Значения коэффициентов важности определяются как собственный вектор матрицы \mathbf{B} из решения уравнения

$$\mathbf{B}w = \lambda_{\max} w, \quad (9)$$

и имеют вид $w = \{w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_m\}$.

Значения элементов матрицы \mathbf{B} определяются из табл. 1 согласно мнениям экспертов. Элементы при этом должны удовлетворять условиям: $b_{ii} = 1$; $b_{ij} = 1/b_{ji}$. Число строк в матрице равно числу показателей в (8), а число столбцов – числу оценок важности в табл. 1.

Таблица 1

Шкала оценок важности

Относительная важность пары критериев	Элемент b_{ij}
Равная важность	1
Немного важнее	3
Важнее	5
Заметно важнее	7
Намного важнее	9
Промежуточные значения	2, 4, 6, 8

Искомые значения коэффициентов важности определяются из соотношения $\alpha_i = w_i$.

Таким образом, интегральный показатель экстремальности погодных условий определяется по формуле (8) при условии, что α_j – числовые коэффициенты, характеризующие вклад каждого из частных критериев.

Значения интегрального показателя экстремальности перед определением сценария необходимо нормировать таким образом, чтобы его значения находились в интервале [0, 1].

МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

Разработка рекомендаций на принятие решений при использовании предложенной экспертной системы, осуществляется в несколько этапов.

1. Определение набора локальных территорий и интервалов времени для определения погодных условий на период выполнения задач воинскими формированиями.

Используемый набор из $m \times n$ состояний погодных условий определяется множеством A :

$$A = \{ a_{11}, a_{12}, \dots, a_{ij}, \dots, a_{mn} \}, \quad (10)$$

$$\forall i = \overline{1, m}, \forall j = \overline{1, n},$$

где m – число интервалов времени с однотипными ГМУ, n – число локальных территорий с однотипными ГМУ.

Так как погода в АЗРФ достаточно изменчива, то число интервалов времени приблизительно равно числу дней, отведенных на период выполнения задач воинскими формированиями. Поскольку проведение таких задач, как правило, планируется в сроки не менее 3–5 дней, роль климатической информации приобретает большое значение.

2. Определение оценочных показателей.

Предлагается оценку погодных условий рассматривать как нечеткое множество, представленное выражением:

$$R_{ijk} = \{ \mu_{R_k}(a_{11})/a_{11}, \mu_{R_k}(a_{12})/a_{12}, \dots, \mu_{R_k}(a_{ij})/a_{ij}, \dots, \mu_{R_k}(a_{mn})/a_{mn} \}, \quad (11)$$

где $\mu_{R_k}(a_i) \in [0, 1]$ – функция принадлежности треугольного вида, т. е. нечеткая оценка погодных условий a_{ij} по показателю R_{ijk} , характеризующая степень соответствия условий понятию, определяемому показателем R_{ijk} , $k = 1, p$.

В зависимости от наличия ГМИ эксперты в качестве показателей выделяют: интегральный индекс экстремальности, являющийся основополагающим показателем, состояние вертикального профиля температуры и влажности, состояние вертикального профиля направления и скорости ветра, характеристика барического образования, облачности, осадков.

3. Определение субъективных терминов для оценки состояний окружающей среды.

В качестве показателя для субъективной (нечеткой) оценки состояний погодных условий используется лингвистическая переменная вида $R_{ijk} = \{ \text{полностью удовлетворяет,}$

значительно удовлетворяет, частично удовлетворяет, не оказывает влияния, значительно не удовлетворяет, полностью не удовлетворяет} [10].

Эксперты назначают для показателя термин «полностью удовлетворяет» при условии, что, по их мнению, ГМУ в полной мере благоприятны для выполнения всех видов задач воинскими формированиями. Чем больше ГМУ отличаются от благоприятных, тем более низкую оценку выставляют эксперты показателю, отвечающему за данные условия.

На базе реализаций представленных трех этапов строятся m матриц лингвистических переменных, состоящих из n строк и k столбцов.

4. Оценивание состояния погодных условий на основе значений лингвистической переменной.

5. Проведение сравнения и ранжирования локальных территорий (по экстремальности погодных условий) на основе полученных взвешенных оценок R_j .

Значение соответствующей функции принадлежности элементов множества интерпретируется как характеристика степени того, насколько состояние погодных условий ближе к эталонному. $\mu_l(j)$ вычисляется по формуле:

$$\mu_l(j) = \sup_{a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_n: a_j \geq a_k; I_k} \min_{k=1, p} \mu_{R_k}(a_k). \quad (12)$$

Ранжирование территорий проводится методом экспертного оценивания на основе гидрометеорологической и климатической информации, при котором определяются воздействие ГМУ на объекты военной инфраструктуры и возможности адаптационных мер при изменении погоды и климата. В области допустимых значений выделены пять интервалов, определяющих варианты (типы) экстремальности погодных (климатических) условий для локальных территорий согласно табл. 2. Каждому из погодных (климатических) типов ставятся в соответствие условия и возможности деятельности войск (сил), которые определяются как сценарии деятельности. Экспертная классификация может носить как диагностический, так и прогнозический характер.

Таблица 2

Типы сценариев, определяемых методом экспертного оценивания

Тип состояния климата (сценарий)	Интервал значений интегрального показателя экстремальности
Комфортная ситуация	0,9–1,0
Относительно комфортная ситуация	0,7–0,9
Умеренно экстремальная климатическая ситуация	0,5–0,7
Очень экстремальная климатическая ситуация	0,3–0,5
Чрезвычайно экстремальная климатическая ситуация	0,0–0,3

Для каждого варианта сценария в дальнейших исследованиях необходимо разработать типовой комплекс защитных действий и мероприятий при деятельности войск (сил) и эксплуатации объектов военной инфраструктуры.

Таким образом, для успешного решения задачи оценки степени суровости погодных условий необходим синтез объективной и субъективной информации при моделировании и принятии решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Актуальным при зонировании территорий по гидрометеорологическим и климатическим показателям следует считать использование нечетких экспертных систем.

2. При зонировании климатических территорий оптимальным является путь, при котором выделяются (классифицируются) определенные гидрометеорологические и климатические условия (сценарии суровости погоды и климата), а затем проводится детальный анализ по исследованию качественных и количественных параметров каждого из них.

3. Объективная гидрометеорологическая и климатическая информация для использования в экспертных системах должна быть представлена в виде статистических климатических распределений, таблиц и графиков.

4. При обеспечении ГМБ рекомендуется использовать математическую модель по определению сложности ГМУ, использующую как объективную, так и субъективную информацию (нечеткую экспертную систему), и на ее основе осуществлять поддержку принятия решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев М. Г., Михайлов В. В., Семенов М. Е., Первезенцев Р. Е. Методические аспекты применения аппарата нечеткой логики при обработке и анализе метеорологической информации, необходимой для обеспечения боевой деятельности Вооруженных сил РФ // Вестник Военного авиационного инженерного университета. – 2011. – №3 (14). С. 35–42.
2. Матвеев М. Г., Михайлов В. В., Семенов М. Е. Использование модели Сугено для прогнозирования метеорологических показателей // Вестник Воронежского ун-та. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2011. – № 2. – С. 164–169.
3. Зибров Г. В., Михайлов В. В., Семенов М. Е. Системная модель поддержки принятия метеозависимых решений на применение авиации // Вестник ВАИУ. – 2010. – № 3 (10). С. 30–37.
4. Матвеев М. Г., Михайлов В. В., Семенов М. Е., Сирота Е. А. Модель анализа динамики векторного метеорологического процесса. // Вестник Воронежского ун-та. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2013. – № 1. – С. 89–94.

5. *Матвеев М. Г., Михайлов В. В., Семенов М. Е.* Модификация метода оценки параметров стохастических моделей многомерных рядов метеорологических величин в условиях их коррелированности и малых выборок // *Наукоемкие технологии.* – 2012. – Т. 13, № 3. – С.8–14.

6. *Ярушкина Н. Г.* Основы теории нечетких и гибридных систем: учебное пособие. – М. : Финансы и статистика, 2004. – 320 с.

7. *Орловский С. А.* Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М. : Радио и связь, 1981. – 286 с.

8. *Андреев С. С.* Экология человека. – М. : АПСН СКНЦВШ, 2004. – 247 с.

9. Методические рекомендации по изучению влияния изменений климата на строительство, энергетику, транспорт и здоровье человека. – СПб, 2000. – 16 с.

10. *Борисов А. Н., Крумберг О. А., Федоров И. П.* Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. – Рига : Зинатне, 1990. – 184 с.

Попов Виктор Валентинович – Заместитель начальника 11 кафедры теоретической гидrometeorологии, кандидат географических наук, доцент, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)

Тел.: 8-920-210-92-57

E-mail: copybook07@yandex.ru

Ульшин Игорь Иванович – Начальник 11 кафедры теоретической гидrometeorологии, кандидат физико-математических наук, доцент, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)

Тел.: 8-920-402-06-32

E-mail: ulshin@rambler.ru

Тимофеев Павел Александрович – Начальник Главного гидrometeorологического центра Министерства обороны РФ.

Тел.: 8-905-573-33-05

E-mail: sinoptik78@mail.ru

Popov Viktor Valentinovich –Deputy Head of Theoretical Hydrometeorology Department, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin (Voronezh)

Ulshin Igor Ivanovich – Head of Theoretical Hydrometeorology, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin (Voronezh)

Timofeev Pavel Alexandrovich – Head of Main Hydrometeorological Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation