

Н.О. Моисеева, В.А. Ременсон, Е.А. Румянцева

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СИНОПТИЧЕСКОЙ КЛИМАТОЛОГИИ
В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ СТАТИСТИЧЕСКОЙ
ИНТЕРПРЕТАЦИИ ВЫХОДНОЙ ПРОДУКЦИИ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ**

N.O. Moiseeva, V.A. Remenson, E.A. Rumiantceva

**APPLICATION OF THE SYNOPTIC CLIMATOLOGY METHOD
IN AUTOMATED SYSTEMS OF THE STATISTIC INTERPRETATION
OF THE OUTPUT PRODUCTION OF THE PREDICTIVE HYDRODYNAMIC
MODELS OF THE ATMOSPHERE**

Рассмотрены возможности применения современных оперативных численных глобальных, региональных и мезомасштабных моделей атмосферы для прогнозов элементов погоды, в том числе опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлений.

Ключевые слова: гидродинамические модели атмосферы, статистическая интерпретация, синоптическая климатология, синоптические объекты, элементы погоды, опасные гидрометеорологические явления.

In this paper opportunities of the modern operational numerical global, regional and mesoscale models of the atmosphere to forecast weather elements, including forecast of dangerous and unfavourable phenomena, are considered.

Keywords: hydrodynamic atmospheric models, statistical interpretation, synoptic climatology, synoptic objects, weather elements, dangerous hydrometeorological phenomena.

В настоящее время в области краткосрочного и среднесрочного прогнозирования элементов погоды и опасных гидрометеорологических явлений достигнуты значительные успехи, которые связаны с успешным решением следующих задач:

- разработки в ведущих метеорологических центрах Всемирной метеорологической организации (ВМО) современных глобальных, региональных и мезомасштабных гидродинамических моделей общей циркуляции атмосферы;
- создания в крупных метеорологических центрах уникальных прогностических технологий, позволяющих внедрить эти модели в практику статистической, физико-статистической и синоптической интерпретации выходной продукции ГДМА;
- организации непрерывного функционирования глобальных международных систем наблюдений, телесвязи и обработки данных [4].

Применяемые методы интерпретации гидродинамических прогнозов делят на две группы. К первой группе относят способы синоптической интерпретации [4]. В них входит анализ результатов гидродинамической модели и подготовка на их основе

прогностических карт с положением атмосферных фронтов, облаков, зон осадков, полей приземной температуры воздуха, ветра и других элементов погоды. Вторая группа включает в свой состав методы статистической и физико-статистической (объективной) интерпретации продукции ГДМА. В данных методах интерпретации используют регрессионный, дискриминантный и кластерный анализы. При этом подходе проводится расчет синхронных (статистических) связей между прогностическими полями, получаемыми по ГДМА (предикторами) и элементами погоды (предиктантами). Для использования системы статистической интерпретации необходимо создание соответствующей базы данных, включающей архивы: фактических значений прогнозируемых метеорологических величин в пунктах прогноза, а также полей циркуляции атмосферы по данным объективного анализа и численного прогноза за длительный период времени. В нашей стране наиболее успешно задача применения методов объективной интерпретации продукции ГДМА для среднесрочных прогнозов погоды в технологии расчета элементов погоды (РЭП) используется в Гидрометцентре России.

Прогностическая технология РЭП программно реализует адаптивный алгоритм самообучающейся по исходной дате и координатам пункта на дату прогноза по заданной заблаговременности с учетом процессов макромасштаба, спрогнозированных ГДМА.

Прогностическая технология РЭП реализована более чем для 5000 городов мира и детализирована для территории России (1300 городов). Расчеты проводятся в оперативные сроки с использованием архивно-информационной базы данных, включающих метеорологические наблюдения и результаты численных анализов и прогнозов метеорологических полей.

Математическое и программное обеспечения прогностического алгоритма расчета элементов погоды включают блоки центрального типирования атмосферных макропроцессов; формирования обучающих выборок; численных статистических моделей прогнозов метеорологических величин и явлений погоды.

Статистическая модель центрального типирования атмосферных процессов строится для каждой даты и пункта прогноза по ограниченному географическому району с расположением пункта прогноза в центре сеточной области. Статистические выборки ранжируются по показателю схожести (аналогичности) к текущему макропроцессу, предсказанному ГДМА. Для формирования статистических обучающих выборок привлекаются даты, принадлежащие одному и тому же скользящему периоду, к которому принадлежит день прогноза. Продолжительность периода принимается равной трем неделям.

В алгоритме реализуются статистические модели регрессионного анализа, дискриминантного анализа, кластерного анализа и другие статистические методы. Адаптивные численные статистические модели строятся с использованием синхронных статистических связей между характеристиками прогностических метеорологических полей и каждым из элементов погоды в отдельности или комплексом элементов. В число виртуальных предикторов включают метеорологические величины, дифференциальные и интегральные характеристики метеорологических полей и другие показатели, которые могут быть получены на основе выходной продукции глобальных и региональных ГДМА.

В настоящее время по технологии РЭП рассчитывают:

- среднесрочные прогнозы минимальной и максимальной температуры воздуха и ее аномалий с заблаговременностью до 7 суток;
- декадные прогнозы средней температуры воздуха и ее аномалий;
- прогнозы вероятности и количества осадков по дням для территории России;
- прогнозы аномально холодной и аномально жаркой погоды с заблаговременностью 48–144 ч в критериях опасных явлений погоды.

На основе выходной продукции этого технологического комплекса могут быть разработаны специальные прогнозы для ограниченного числа опасных явлений погоды (ОЯ) и неблагоприятных гидрометеорологических явлений (НГЯ). Непосредственно для прогноза ОЯ и НГЯ в Гидрометцентре России разработан программный комплекс прогноза конвективных ОЯ (ливней, шквалов, града, совокупности ОЯ с детализацией типа и интенсивности) с заблаговременностью не менее 24 часов на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра. Особенностью комплекса является единая реализация технологий регионального прогнозирования погоды, в том числе прогноза ОЯ и НГЯ конвективного характера с ежечасной дискретностью и расчетом прогностических карт за период в 12 часов. Этот программный комплекс включает прогнозы:

- ливней в трех градациях;
- шквалов в трех градациях;
- града в градациях НГЯ и ОЯ;
- конвективных комплексов НГЯ и ОЯ с детализацией типа явления;
- максимального количества осадков;
- шквалов любой интенсивности;
- максимальной скорости ветра при шквале.

В дополнение к технологическим комплексам численного прогнозирования элементов погоды используются методы синоптической интерпретации выходной продукции ГДМА [4]. Этот метод остается особенно актуальным при разработке среднесрочных прогнозов элементов погоды, НГЯ и ОЯ с заблаговременностью от 3 до 7–10 суток, т.к. подавляющее большинство физико-статистических моделей прогнозов дают удовлетворительные результаты только на 1–2 суток. В то же время поля приземного атмосферного давления и геопотенциальных высот уже в настоящее время удовлетворительно прогнозируются численными моделями на 5–6 суток, а при использовании многомодельного метода [2] срок прогнозирования может быть увеличен до 7–8 суток. Представляется целесообразным объединить модели физико-статистического прогнозирования элементов погоды с методом синоптической интерпретации ГДМА на средние сроки. При использовании метода синоптической интерпретации ГДМА примем во внимание, что в настоящее время на сроки более 3 суток удовлетворительно прогнозируется не столько состояние атмосферы, сколько процесс конкретного масштаба, а именно: на 3–5 суток — положение синоптических образований у поверхности земли, на 7–10 суток — положение крупномасштабных барических образований в средней тропосфере.

По существу, в технологии РЭП уже успешно решена задача объединения обоих методов интерпретации выходной продукции ГДМА в процедуре формирования прогностических выборок по принципу аналогичности к текущему макропроцессу,

предсказанному гидродинамической схемой для регионов с пространственными масштабами более 2000 км. По определению, данному в работе [1], основной целью синоптической климатологии является нахождение связей между локальными и региональными климатами и атмосферной циркуляцией, синоптический климатологический анализ должен включать два этапа: определение типов атмосферной циркуляции и оценки элементов погоды для выделенных типов.

В связи с тем, что в основу синоптического метода прогнозирования погоды положены статистические связи между основными синоптическими объектами и связанными с ними синоптическими процессами и элементами погоды, представляется целесообразным выявить связи между ними. В данной статье в число основных синоптических объектов включены циклоны, антициклоны, ложбины, гребни, седловины, малоискривленные барические поля.

При применении численных методов типизации синоптических ситуаций у поверхности Земли для определения областей повышенного и пониженного атмосферного давления и направления переноса воздушных масс в работе [3] показано, что можно ограничиться двумя характеристиками барического поля: лапласианом атмосферного

давления $\nabla^2 p$ и градиентом давления воздуха $\frac{\partial p}{\partial n}$.

Лапласиан приземного давления характеризует циклоничность (антициклоничность) поля давления, а следовательно, конвергенцию (дивергенцию) воздушных потоков и вертикальные движения на верхней границе пограничного слоя и в значительной части тропосферы, а градиент давления — горизонтальную адвекцию температуры и влажности воздуха. Лапласиан давления присутствует практически во всех регрессионных и дискриминантных моделях прогнозирования конвективных ОЯ, а градиент давления используется в моделях прогнозирования траекторий воздушных частиц, упорядоченных вертикальных движений воздуха, внутримассовой облачности, конвективных ОЯ.

Лапласиан приземного давления рассчитывается по формуле

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}, \quad (1)$$

где x и y — оси системы координат, ось x направлена на восток, ось y — на север; p — атмосферное давление, приведенное к уровню моря.

Величина модуля горизонтальной составляющей градиента давления $|\text{grad } p|$ и его направление α_x определяются по соотношениям:

$$|\text{grad } p| = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}, \quad (2)$$

$$\alpha_x = \arcsin\left(\frac{|p_y|}{|\text{grad } p|}\right) + k(90^\circ), \quad k = 0(1)3, \quad (3)$$

где $p_x = \partial p / \partial x$, $p_y = \partial p / \partial y$ — составляющие градиента приземного давления по осям x и y выбранной системы координат; α_x — угол между осью x и изобарой.

На рис. 1 приведена географическая сетка точек для вычисления производных и лапласианов поля приземного давления.

Составляющие градиента приземного давления (p_x, p_y) и слагаемые лапласиана (p_{xx}, p_{yy}) будем вычислять с использованием следующих конечно-разностных аналогов соотношений (1) и (2):

$$p_x = \frac{1}{8h} [(p_{i-1, j+1} - p_{i-1, j-1}) + 2(p_{i, j+1} - p_{i, j-1}) + (p_{i+1, j+1} - p_{i+1, j-1})], \quad (4)$$

$$p_y = \frac{1}{8h} [(p_{i-1, j+1} - p_{i+1, j+1}) + 2(p_{i-1, j} - p_{i+1, j}) + (p_{i-1, j-1} - p_{i+1, j-1})], \quad (5)$$

$$p_{xx} = \frac{1}{4h^2} [(p_{i-1, j+1} + p_{i-1, j-1} - 2p_{i-1, j}) + 2(p_{i, j+1} + p_{i, j-1} - 2p_{i, j}) + (p_{i+1, j+1} + p_{i+1, j-1} - 2p_{i+1, j})], \quad (6)$$

$$p_{yy} = \frac{1}{4h^2} [(p_{i-1, j+1} + p_{i+1, j+1} - 2p_{i, j+1}) + 2(p_{i-1, j} + p_{i+1, j} - 2p_{i, j}) + (p_{i-1, j-1} + p_{i+1, j-1} - 2p_{i, j-1})], \quad (7)$$

где h — шаг сетки.

На рис. 2 представлены графические модели типовых синоптических объектов, которые могут быть получены с использованием соотношений (4)–(7).

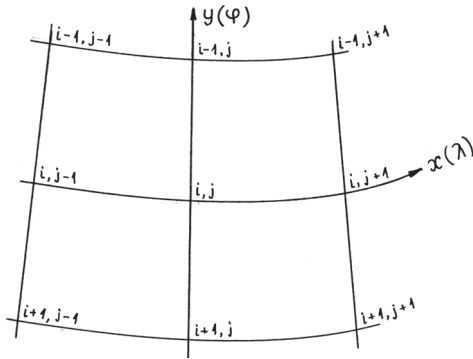


Рис. 1. Географическая сетка точек для вычисления производных и лапласианов поля атмосферного давления

С\Т	Безградиентное поле	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	С
Ц	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)
Л	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)
Ац	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)
Г	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)
МП	.	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)
Са	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)	(H)
СБ	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)

Рис. 2. Графические модели синоптических объектов [3]

В табл. 1 и 2 приведены критерии для определения основных типов синоптических объектов (образований).

Таблица 1

Критерии для численного определения основных типов синоптических объектов (барических образований)

№ п/п	Барические образования	$p_{xx}(\lambda\lambda)$	$p_{yy}(\varphi\varphi)$
1	Циклон	$p_{xx} > \delta p_1$	$p_{yy} > \delta p_1$
2	Ложбина	$ p_{xx} \leq \delta p_1 $ $p_{yy} > \delta p_1$	$p_{xx} > \delta p_1$ $ p_{yy} \leq \delta p_1 $
3	Гребень	$p_{yy} < -\delta p_1$ $ p_{xx} \leq \delta p_1 $	$ p_{yy} \leq \delta p_1 $ $p_{xx} < -\delta p_1$
4	Антициклон	$p_{xx} < -\delta p_1$	$p_{yy} < -\delta p_1$
5	Малоискривленные поля давления	$ p_{xx} \leq \delta p_1 $	$ p_{yy} \leq \delta p_1 $
6	Седловина	$p_{xx} > \delta p_1$ $p_{yy} < -\delta p_1$	$p_{yy} < -\delta p_1$ $p_{xx} > \delta p_1$

Таблица 2

Критерии для численного определения основных направлений изобар

№ п/п	Основные направления	Критерии	
		p_x	p_y
1	СВ, В	$p_x > \delta p_2$	$p_y \geq \delta p_2$
2	ЮВ, Ю	$p_x \geq \delta p_2$	$p_y < \delta p_2$
3	ЮЗ, З	$p_x < \delta p_2$	$p_y \delta p_2$
4	СЗ, С	$p_x \leq \delta p_2$	$p_y > \delta p_2$
5	Штиль	$ p_x \leq \delta p_2$	$ p_y \leq \delta p_2$

При определении величин лапласиана и градиента давления по данным наблюдений в узлах сетки значительные ошибки могут возникать при наличии малоградиентных барических полей, поэтому необходимо заранее определить величину погрешностей, при которых поля считаются «плоскими», «малоискривленными» и «безградиентными». Эти ситуации будут соответствовать переходным состояниям между циклоническими и антициклоническими образованиями (малая искривленность).

Выбор критериев для численного определения дифференциальных характеристик полей атмосферного давления δp_1 и δp_2 осуществлялся путем проведения численных экспериментов. Для удобства использования критериальных значений умножим правые части соотношений (4) и (5) на $8h$, а соотношения (6) и (7) — на $4h^2$. С учетом этих упрощений было проведено несколько сотен численных экспериментов, которые позволили определить, что минимальная ошибка идентификации типов барических образований наблюдается при $\delta p_1 \approx 0,6$ гПа. Для направлений изобар $\delta p_2 \approx 0,9$ гПа.

При использовании широтно-долготной сетки координат приходится учитывать изменение шага сетки вдоль широтных кругов (вдоль оси x) от экватора к полюсу, а также то, что в используемых метеорологических архивах данные по широте представлены через 5° , а по долготе — через 10° . Для того чтобы получить данные по долготе через 5° , перед вычислением p_x, p_y, p_{xx}, p_{yy} необходимо провести линейную интерполяцию значений давления на промежуточные меридианы, кратные 5° со смежных

меридианов, кратных 10° , а для выравнивания шагов по меридианам и параллелям использовать переменный шаг по широтным кругам. Для широтных зон шаги по широте и долготе принимались равными следующим значениям: $(0^\circ - 45^\circ) - 5^\circ$, $(50^\circ - 65^\circ) - 10^\circ$, $(70^\circ - 75^\circ) - 20^\circ$, $(75^\circ - 80^\circ) - 30^\circ$, $(80^\circ - 85^\circ) - 60^\circ$.

В ВКА им. А.Ф. Можайского было показано, что вместо 45 типовых моделей синоптических объектов, графическое изображение которых показано на рис. 2, достаточно ограничиться множеством из 16 типовых ситуаций, сформировав следующие классы: «циклоны – ложбины», «антициклоны – гребни», «малоискривленные поля» и «седловины». Кроме того, для первых трех классов можно объединить и направления изобар, а именно: «СВ-В», «ЮВ-Ю», «ЮЗ-З», «СЗ-З» и «безградиентные поля» (адвекция отсутствует). Для четвертого класса, включающего все типы седловин, направления изобар целесообразно вообще не учитывать в связи с малой повторяемостью объектов данного класса.

Выбранные 16 типов синоптических объектов дают вполне удовлетворительные результаты при нахождении статистических связей между характеристиками поля атмосферного давления и элементами погоды. В этом случае по двум характеристикам поля атмосферного давления (p_x, p_y, p_{xx}, p_{yy}) с учетом критериев, представленных в таблицах (1) и (2), можно однозначно определить тип барического образования (синоптического объекта) $s_l [l = 1(1)16]$ в любой точке сетки. Для увеличения объема статистических выборок, которые используются при разработке физико-статистических моделей прогнозирования метеорологических величин и элементов погоды, была проведена типизация синоптических объектов для 612 точек Северного полушария (шаг сетки 5×5 градусов) на основе архива ВНИИГМИ-МЦД (шифр «КТРНГДФЛ») за 1964–1988 гг. Объем исходной выборки составлял 9130 полей атмосферного давления по сеточной области, включающей 684 узла. Исходный файл, содержащий информационный массив, представлялся в следующем виде

$$\{(p_{0(684)}, \varphi, \lambda), \quad i = 1(1)9130\}, \quad (8)$$

где i — порядковый номер записи поля давления в 684 точках за один срок; φ, λ — географические координаты точки, отображенные в номера узлов ($m = 1(1)19$ — число широтных кругов, $l = 1(1)36$ — число меридианов).

В результате типизации, выполненной с использованием значений слагаемых лапласианов (p_{xx}, p_{yy}) и составляющих градиентов давления (p_x, p_y) с учетом критериев, представленных в табл. 1 и 2, для каждого из сезонов получен календарь типов синоптических объектов в виде информационного массива

$$\{(TIP_{(612)}, \varphi, \lambda), \quad i = 1(1)9130\}. \quad (9)$$

Размерность исходного информационного массива $p_{0(684)}$ уменьшилась при переходе к массиву $TIP_{(612)}$ вследствие использования дифференциальных характеристик при типизации синоптических объектов.

После процедуры типизации синоптических объектов, множество которых было разделено на 16 подмножеств, решалась задача прикладного синоптико-климатического

районирования территории Северного полушария с использованием алгоритма последовательной иерархической кластеризации Уорда – Уишарта. В результате кластеризации на территории Северного полушария в зависимости от сезона года было выделено от 47 до 94 однородных синоптико-климатических районов (ОСКР). Для каждого из ОСКР найдены координаты статистических центров и для этих центров составлен календарь типов синоптических объектов. В качестве примера на рис. 3 представлена карта ОСКР для зимнего сезона.

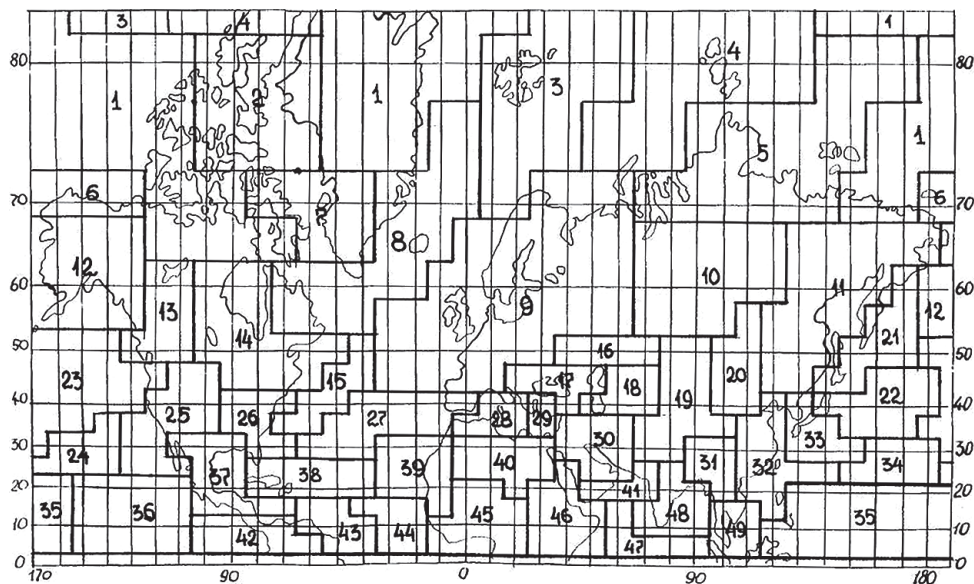


Рис. 3. Карта однородных синоптико-климатических районов. Зима. Северное полушарие

Литература

1. Беркович Л.В., Ткачева Ю.В. Гидродинамический краткосрочный прогноз погоды в пунктах // Сб. трудов «80 лет Гидрометцентру России». — М.: «Триада ЛТД», 2010. — С. 136–146.
2. Девяткин А.М., Моисеева Н.О., Ременсон В.А., Удриш В.В. Современные технологии численного прогнозирования барических полей в интересах метеорологического обеспечения планирования действий войск (сил) // Тр. III Всерос. науч. конф. «Проблемы военно-прикл. геофизики и контроля состояния природ. среды». — СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. Т. 1. — С. 102–113.
3. Садовников А.В. Характеристика синоптических процессов над территорией Советского Союза: учебное пособие. — Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1973. — 118 с.
4. Сборник трудов «80 лет Гидрометцентру России». — М.: «Триада ЛТД», 2010. — 401 с.