

**МЕТОДИКА ТИПИЗАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ
ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ НА ШЕЛЬФЕ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ
И ПРОВЕРКА ЕЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ**

Математическое моделирование давно и успешно используется для изучения океанологических процессов. Особенно велика его роль при рассмотрении открытых участков акватории морей, расположенных на значительном удалении от берегов. Например, на основе применения математическое моделирование В.Х. Герман с соавторами разработал методику расчета для открытых районов морей режимно-статистических характеристик колебаний уровня моря [3]. Данный элемент гидрологического режима выбран не случайно. Он является интегральным показателем динамических процессов в море, которые в значительной мере обусловлены атмосферными процессами. Суть подхода сводится к сопоставлению вероятности возникновения вынуждающей силы (полей давления и ветра), отклику океана на эту силу, полученному по модели. И хотя идея, заложенная в основу, весьма интересна, применение методики на практике не дает ожидаемых результатов в полной мере.

Проведенное в работе [2] сравнение характеристик, рассчитанных по методике, с натурными данными выявило их неудовлетворительное совпадение. Возможные причины анализируются в упомянутой работе. Основная из них заключается в использовании рекомендованных, но недостаточно подходящих для поставленной задачи исходных данных.

В своей методике авторы основывались на одной из существующих типизаций атмосферных процессов (Атласы волнения и

ветра морей СССР [1]), использование которой, как и многих других, для данной задачи затруднено следующими обстоятельствами:

- большинство опубликованных работ по результатам типизации [1, 5–8 и др.] относится к 1960–1970 гг., т.е. их использование для задач в настоящее время некорректно;

- в работах по типизациям не указывается весь комплекс характеристик барических образований, т.е. статические (для каждого момента времени), динамические (изменение статических характеристик во времени) и генетические (показывающие преемственность и взаимосвязь);

- часть характеристик представлена на мелкомасштабных картах-схемах, при оцифровывании которых для последующего моделирования вносятся существенные ошибки;

- не указываются характеристики природных явлений, сопутствующих конкретным типам, что не позволяет в последующем корректно представлять взаимосвязанные процессы, например, синоптических и приливных колебаний уровня моря.

Использование опубликованных в последнее время данных по типизации атмосферных процессов над морями Российской Арктики [4] снимает лишь первое замечание.

Как следствие, все это негативно сказывается на результатах математического моделирования и, в конечном счете, на получаемых режимно-статистических характеристиках. Учитывая изложенные замечания, становится очевидной необходимость создания такой методики классификации атмосферных процессов, результаты которой были бы применимы при математическом моделировании океанологических процессов, в первую очередь, динамики вод и льдов. Особенно это актуально в связи с нарастанием темпов освоения арктического шельфа.

В связи с вышеизложенным в 2002 г. была разработана методика типизации атмосферных процессов, определяющих развитие океанологических процессов (в первую очередь, связанных с динамикой вод и льдов). В 2003 г. в продолжение работ по теме были проведены пробные расчеты по методике.

Сформулируем требования, предъявляемые на различных этапах к классификации для последующего эффективного использования ее результатов.

Исходные данные должны охватывать оптимальную территорию и их дискретность – отображать явления малых пространственно-временных масштабов.

Проведение работ сводится к следующему:

- все они должны быть максимально автоматизированы;
- следует рассматривать все составляющие исходных данных за выбранный период;
- разделение на классы (типы) должно основываться на объективных критериях и методах оценки.

Конечные результаты типизации должны быть наглядными для визуального анализа (таблицы, графики, схемы) и легко применимы для дальнейшего математического моделирования процессов разного временного и пространственного масштабов.

Кроме этого, они должны отражать следующие характеристики типов:

- статические (пространственная структура процесса в конкретный момент времени);
- динамические (изменение статических характеристик во времени);
- генетические (взаимосвязи типов между собой и с другими природными процессами);
- статистические.

Основой для классификации было выбрано приземное давление. В качестве источников исходных данных могут использоваться как бумажные носители (карты СК–1С или СК–4С, журналы наблюдений на ГМС), так и электронные архивы и базы данных наблюдений на ГМС или результатов интерполяции в узлы регулярной сетки. Получаемые в итоге классификации типовые поля приземного атмосферного давления, представленные в виде карт или схем и как функции по пространству и времени, удовлетворяют предъявленным требованиям. Необходим также учет сопутствующих природных явлений. В полной мере осуществить это за-

труднительно, но на первом этапе можно ограничиться приливными условиями.

На основе вышесказанного в качестве объекта описания, своеобразной элементарной единицы, было выбрано отдельное барическое образование (БО) – циклон или антициклон, совокупность которых в каждый момент времени и определяет барический рельеф в районе исследований.

Барический рельеф представляется как поле отклонений Pa от нормы (ΔPa), равной в настоящей работе 1012,5 гПа. Выбор данного значения обусловлен следующим. Нормальное атмосферное давление ($Pa_{\text{норм}}$), согласно [9], равно 1013,25 гПа. В соответствии с общепринятым правилом проведения изобар через 5 гПа значение $Pa_{\text{норм}}$ находится в интервале 1010–1015 гПа. Следовательно, границу циклона можно представить изобарой 1010 гПа, а антициклона – 1015 гПа. В результате область 1010–1015 гПа является своеобразным связующим звеном между различными БО, и давление в этой зоне может определяться сразу несколькими соседствующими БО.

Отклонения свыше 2,5 гПа в меньшую или большую сторону расцениваются как наличие в районе циклона (ов) или антициклона (ов) соответственно. Колебания ΔPa в пределах $\pm 2,5$ гПа считаются случайными и самостоятельно не рассматриваются. Отдельным БО является область барического поля с отклонениями Pa одного знака, по модулю равными или превышающими 2,5 гПа, и отделенная зоной случайных колебаний ΔPa от остального поля.

Отдельное БО аппроксимируется некоторой поверхностью, обладающей следующими свойствами:

1) линия, образующаяся при сечении поверхности горизонтальной плоскостью, т.е. изобара, аппроксимируется эллипсом с произвольными координатами центра и произвольным углом поворота осей;

2) характеристики указанных эллипсов линейно меняются с ростом модуля ΔPa ;

3) полуоси эллипсов взаимосвязаны с модулем ΔPa по такому закону $\Delta Pa = f(X)$, где X соответствует значению оси, что свойства функции можно определить следующим:

- областью определения функции является вся ось абсцисс;
- функция непрерывна во всей области определения;
- ось абсцисс является асимптотой;
- значение модуля ΔPa максимально при $X=0$;
- максимальное значение модуля ΔPa одинаково для обеих полуосей;

4) все параметры поверхности могут изменяться во времени.

Рассмотрим математическое представление данной поверхности в декартовой системе координат. Ось X направлена на восток, ось Y – на север, ось Z – вертикально вверх. Причем для соблюдения одинаковой размерности и масштаба всех осей, по вертикальной оси применяется замена переменных. Вместо величины ΔPa в гПа берется величина Z в метрах, связанная с ΔPa соотношением

$$Z = \frac{\Delta Pa}{\bar{\rho}_a}, \quad (1)$$

где $\bar{\rho}_a$ средняя плотность воздуха.

Соответственно оси X и Y совпадают с осью Z по масштабу и размерности. При такой постановке задачи уравнение поверхности будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{((X - X_0)\cos\alpha - (Y - Y_0)\sin\alpha)^2}{a^2} + \frac{((Y - Y_0)\cos\alpha - (X - X_0)\sin\alpha)^2}{b^2} = 1, \quad (2)$$

где

$$X_0 = A_1 Z + A_2; \quad (3)$$

$$Y_0 = A_3 Z + A_4; \quad (4)$$

$$\alpha = A_5 Z + A_6. \quad (5)$$

Функция для полуосей $\Delta Pa = f(X)$ имеет вид:

вариант I

$$Z = \frac{1}{A_8 K^2 + A_7}, \quad (6)$$

при $A_7 \neq 0$, $A_7 A_8 > 0$ и $Z_{\max} = 1/A_7$ при $K = 0$ (K значение полуоси);

вариант II

$$Z = A_7 \exp(A_8 K^2), \quad (7)$$

при $A_7 A_8 \neq 0$, $A_8 < 0$ и $Z_{\max} = A_7$ при $K = 0$ (K значение полуоси).

После решения уравнений (6) и (7) относительно K и учитывая описанные выше свойства поверхности, полуоси a и b будут выражаться через Z следующим образом:

вариант I

$$a^2 = \frac{1 - A_7 Z}{A_8 Z}, \quad (8)$$

$$b^2 = \frac{1 - A_7 Z}{A_9 Z}; \quad (9)$$

вариант II

$$a^2 = \frac{\ln(Z/A_7)}{A_8}, \quad (10)$$

$$b^2 = \frac{\ln(Z/A_7)}{A_9}. \quad (11)$$

В уравнениях (3)–(11) коэффициенты A_i определяют форму поверхности в один момент времени. Физический смысл всех этих коэффициентов очевиден. Внимательно рассмотрим изменения A_i во времени. Для большинства из них можно взять линейную зависимость. Иным представляется характер изменений во времени координат центра БО X_0 и Y_0 , а точнее коэффициентов A_2 и A_4 . Здесь более подходит описание полиномом второй степени для более точного отражения траекторий БО, отличных от прямой. В

общем виде уравнения зависимости коэффициентов A_i от времени будут записаны следующим образом:

$$A_i = B_{li} t + B_{0i}, \quad (12)$$

где i принимает значения от 1 до 9, кроме значений 2 и 4;

$$A_i = C_{2i} t^2 + C_{1i} t + C_{0i}, \quad (13)$$

где i принимает значения 2 и 4.

В конечном итоге имеем 20 коэффициентов, определяющих пространственно-временную изменчивость БО.

Пробная классификация имела целью проверку работоспособности заложенных в методику основных принципов и теоретических выкладок, а также выявление ошибок и путей их исправления. Для пробной классификации была выбрана акватория Баренцева моря – район, ограниченный соответственно $67\text{--}82^\circ$ с.ш. и $20\text{--}60^\circ$ в.д. Приземное атмосферное давление задавалось по электронному архиву натуральных данных, интерполированных в узлы регулярной сетки. Дискретность по пространству составляла $0,5^\circ$ по широте и $1,5^\circ$ по долготе, по времени – 12 ч (сроки в 12 и 24 ч). Давление бралось за десятилетний период – с 1991 по 2000 г. Для типизации был выбран один из наиболее ледовитых месяцев – апрель.

Для реализации апробирования было разработано специальное программное обеспечение на языке DIGITAL Visual Fortran. Были проведены тестовые расчеты статических характеристик и последующее восстановление полей давления. Сравнение с исходными данными показало удовлетворительную согласованность полей. Далее в ряду исходных данных выявлялись отдельные БО. Всего было определено 50 циклонов и 28 антициклонов. Для всех выявленных БО на каждый момент времени исходных данных были рассчитаны статические характеристики – коэффициенты A_i из формул (3) и (8)–(11). По ним уже соответствующие динамические характеристики, т.е. коэффициенты из формул 12 и 13. На основе полученных массивов коэффициентов проводилась классификация БО. В связи с большим количеством коэффициентов и не очень длинным рядом

БО в качестве основных параметров были выбраны знак отклонения давления в БО, т.е. деление на циклоны и антициклоны, и траектории их перемещения. Разделение по размерам, интенсивности и т.д. не проводилось. В результате были выделены 4 типа циклонов и 2 типа антициклонов. Коэффициенты этих типов и повторяемость типов приводятся в табл. 1 и 2. На рис. 1 показаны траектории их перемещения над акваторией Баренцева моря.

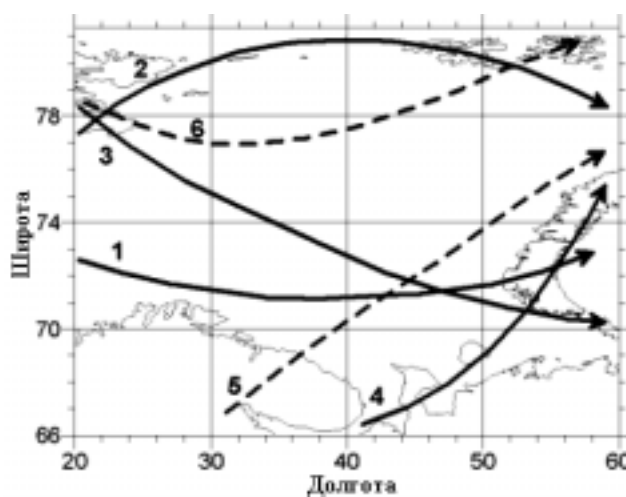


Рис. 1. Траектории перемещения типовых барических образований:

сплошные стрелки – траектории циклонов; пунктирные – антициклонов; цифры обозначают типы БО

В целом проверка работоспособности разработанной методики типизации атмосферных процессов для целей математического моделирования океанологических процессов на шельфе арктических морей прошла успешно. По поводу отдельных вопросов, касающихся математической интерпретации БО, можно сказать следующее.

Предложенные уравнения удовлетворительно описывают реальные БО, причем из двух функций для полуосей a и b в конечном счете был выбран вариант II (формулы (10) и (11)).

Таблица 1.

Коэффициенты типов барических образований

Статический коэффициент	Динамический коэффициент	Типы					
		циклоны				антициклоны	
		1	2	3	4	5	6
A ₁	B ₀	39,92	1,09	51,20	-7,46	-115,50	34,47
	B ₁	-0,67	-0,03	-0,91	0,53	1,21	-1,72
A ₂	C ₀	335,79	-1050,12	2846,56	1240,88	7564,77	1048,99
	C ₁	48,73	50,85	-91,37	24,97	-145,92	-33,76
	C ₂	-0,50	-0,28	0,86	-0,14	0,85	0,91
A ₃	B ₀	-18,02	6,18	12,03	-12,82	52,87	-30,28
	B ₁	0,42	-0,10	-0,23	0,56	-0,56	1,91
A ₄	C ₀	-19,35	3647,79	406,80	308,77	-2065,17	1405,42
	C ₁	-2,54	-66,13	16,56	-20,13	51,32	26,01
	C ₂	0,13	0,35	-0,11	0,40	-0,22	-0,72
A ₅	B ₀	-1,62	0,00	0,00	-0,52	0,00	0,00
	B ₁	0,03	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
A ₆	B ₀	-21,88	-14,00	-3,75	3,00	-42,00	15,00
	B ₁	0,36	0,19	0,10	0,04	0,63	-0,42
A ₇	B ₀	-12,13	-25,74	-38,24	-23,26	19,28	6,07
	B ₁	-0,16	0,14	0,15	0,20	-0,01	0,21
A ₈	B ₀	-1,08E-06	-1,98E-06	-2,18E-07	-9,05E-07	2,79E-07	-2,82E-06
	B ₁	-8,59E-10	9,00E-09	-1,64E-08	-1,22E-08	-1,47E-08	3,31E-08
A ₉	B ₀	-1,41E-06	-5,92E-06	-3,82E-07	-9,56E-06	-4,95E-07	-3,00E-06
	B ₁	4,45E-09	2,35E-08	-1,62E-08	1,07E-07	-8,96E-09	6,62E-09

Расчеты статических и динамических коэффициентов по предложенным формулам подтвердили правильность теоретических предпосылок. Единственное замечание касается коэффициента A₆, для описания его изменчивости во времени лучше использовать полином второй степени, как для A₂ и A₄.

Выбор нулевого уровня, т.е. $P_{a_{норм}}=1012,5$ гПа, был не очень корректным, так как по обе стороны данной изобары в некоторых случаях наблюдался одинаковый характер кривизны изобар. Это замечание относится к случаям и циклонической, и антициклониче-

ской завихренности. Для решения данной проблемы необходим или более гибкий подход к нулевому уровню, или интерпретация БО не поверхностью, а вихрем с соответствующими характеристиками.

Таблица 2.

Повторяемость типов барических образований

Тип		<i>N</i>	%
Циклоны	1	12	15,4
	2	17	21,8
	3	8	10,3
	4	10	12,8
	не определены	3	3,8
Антициклоны	5	13	16,7
	6	13	16,7
	не определены	2	2,6
Всего		78	100,0

Для программного обеспечения и алгоритмов расчетов использованы далеко не все возможности для упрощения и автоматизации работ.

При корректном проведении работ с учетом сделанных замечаний результаты типизации могут использоваться для математического моделирования океанологических процессов и определения режимно-статистических характеристик океанологических параметров в открытых районах моря. Представление БО в виде пространственно-временной функции позволяет задавать приземное атмосферное давление в узлах модельной сеточной области, независимо от ее вида, размера и шага по пространству и времени. Интерпретация барического рельефа набором функций по пространству и времени позволяет легко получать наглядное представление о типах атмосферных процессов путем построения соответствующих карт-схем. Кроме этого, в ходе проведения классификации по сути выявляется пространственно-временная структура БО, различные компоненты их энергетики, что само по себе представляет интерес для метеорологов и синоптиков. Возможно, результаты типизации атмосферных процессов будут применяться и в других

областях, особенно связанных с математическим моделированием природных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас волнения и ветра Баренцева моря. –Мурманск: Изд. Мурманского УГМС, 1965. – 81 с.
2. *Виноградов Р.А.* Проблемы оценки некоторых чрезвычайных ситуаций природного характера при освоении арктического шельфа: Тез. докл. пятой международной конференции Проблемы управления безопасностью сложных систем. –М.: 1998. –С. 124–126.
3. *Герман В.Х., Рыбак Б.Х., Филиппов Ю.Г.* Расчет режимно-статистических характеристик колебаний уровня в шельфовой зоне моря // Тр. ГОИН. –1981. –Вып. 156. –С. 41–49.
4. *Дмитриев А.А.* Динамика атмосферных процессов над морями Российской Арктики. –СПб.: Гидрометеиздат, 2000. –234 с.
5. *Исаев Э.А.* Каталог синоптических процессов над Атлантическим океаном и Евразией. –1960. –128 с.
6. *Соркина А.И.* Типы атмосферной циркуляции и связанных с ней ветровых полей над северной частью Тихого океана. –1963. –98 с.
7. *Соркина А.И.* Основные типы атмосферной циркуляции над северной частью Атлантического океана и изменения в режиме циркуляции за последние десятилетия // Тр. Всесоюзного совещания по морской метеорологии. –1966. –92 с.
8. *Соркина А.И., Михайлова Э.И.* Типы атмосферной циркуляции над северной частью Индийского океана // Тр. ГОИН.–1972. –Вып. 114. –96 с.
9. Физический энциклопедический словарь. Т. I (А–Д). –М.: Советская энциклопедия, 1960. –664 с.