

В.Ф. Мартазинова, В.С. Мадерич, В.Е. Тимофеев,  
Е.К. Иванова

## **ВОЗМОЖНОСТИ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ НАД АНТАРКТИЧЕСКИМ ПОЛУОСТРОВОМ**

С помощью метода традиционного аналога исследована аналогичность атмосферных процессов во внетропических широтах Южного полушария. Разработана прогностическая схема аномалии средней месячной температуры воздуха для района станции «Академик Вернадский» с месячной заблаговременностью с помощью уравнений линейной регрессии. Оценка прогностической схемы была выполнена на зависимом материале отдельных лет и показала успешность предложенного метода.

**Ключевые слова:** крупномасштабная атмосферная циркуляция, классификация температурного режима, метод «плавающего аналога», уравнения линейной регрессии, метод долгосрочного прогноза погоды, модель циркуляции океана «threetox».

### **Вступление**

Одной из самых актуальных и сложных проблем науки представляется разработка методов долгосрочного прогноза погоды, в виду исключительной важности его в жизни. Исследования, направленные на разработку методов долгосрочного прогноза погоды начались с конца XIX – начала XX века после создания достаточно полной системы инструментальных метеорологических наблюдений. Основной задачей этих исследований для цели создания методов долгосрочного прогноза погоды было изучить общую циркуляцию атмосферы – совокупность крупномасштабных движений в тропосфере и стратосфере.

Наиболее существенные результаты в этот период были получены исследованиями Б.П. Мультановского [10], Уокера, Баура [2], Немайэса [11], Тейсеран де Бора [17]. По средним многолетним картам давления было обнаружено существование квазипостоянных центров действия атмосферы (ЦДА) и показано, что состояние крупномасштабной

атмосферной циркуляции и формирование ею макропогоды определяется в первую очередь положением и интенсивностью центров действия атмосферы. Понятие ЦДА до настоящего времени используется в методах долгосрочного прогноза погоды.

Для Южного полушария проблема долгосрочных прогнозов усугубляется недостаточностью исследований синоптических процессов [1, 3, 4, 12, 15, 16, 18]. До последнего времени это не давало возможности разрабатывать прогнозы погоды значительной заблаговременности (месяц, сезон). Поэтому методик долгосрочных прогнозов для Антарктического полуострова не существует, несмотря на исключительную важность для безопасной навигации, обеспечения мореходства долгосрочным прогнозом температуры и ледовой обстановки, отдельных антарктических станций или метеорологических служб стран-участниц Антарктического договора. Работа посвящена исследованию изменчивости крупномасштабной атмосферной циркуляции Южной полярной области (ЮПО) для обнаружения предикторов долгосрочного прогнозирования погоды на 1-2 месяца вперед. В статье впервые получены данные о закономерности преобразования крупномасштабных атмосферных процессов тропосферы Южного полушария, которая стала основой дальнейшего создания методик долгосрочного прогноза погоды для района Антарктического полуострова.

### Материалы и метод исследования

Исходной информацией для исследования крупномасштабных атмосферных процессов Южного полушария являются ежедневные поля приземного давления воздуха и геопотенциала на уровне 500 гПа между 40-80° ю. ш. из базы данных отдела климатических исследований и долгосрочного прогноза погоды УкрНИГМИ с 1986-2008 гг., ВНИИГМИ-МЦД (г. Обнинск) и ERA-40 за период 1980-2008 гг. Архивы барических полей представлены в узлах регулярной сетки шагом 2,5° по широте  $\Delta\varphi^\circ$  и долготе  $\Delta\lambda^\circ$  и записаны в виде матрицы:

$$X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ \dots \\ X_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{i1} & \dots & x_{K-11} & x_{K1} \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{i2} & \dots & x_{K-12} & x_{K2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{1N} & x_{2N} & \dots & x_{iN} & \dots & x_{K-1N} & x_{KN} \end{pmatrix}, \quad i=1,2,\dots,K, \quad j=1,2,\dots,N, \quad (1)$$

где элементы  $x_{ij}$  матрицы  $X$  соответствуют значению метеорологической величины в  $i$  узле регулярной географической сетки шагом 2,5 градусов по широте и долготе  $j$  - го поля:

$$X_j = \{x_i\}_j = (x_1, x_2, \dots, x_K)_j, \quad i=1, 2, \dots, K, \quad (2)$$

где  $x_i$  – значение метеорологической величины  $x_{ij}$  матрицы  $X$ ,  $K$  – количество узлов регулярной сетки,  $N$  – количество полей в архиве.

В качестве метода исследования крупномасштабной атмосферной циркуляции используется метод аналога синоптических процессов, предложенный в работах [7, 8]. Традиционный подход к аналогичным синоптическим процессам заключается в следующем: если на некоторых участках земной поверхности на протяжении некоторого времени отмечается синоптический процесс, аналогичный тому, что наблюдался в прошлом на той же самой территории и в те же календарные сроки, то текущий процесс будет развиваться аналогично. Однако такой подход, как показано в работе [5] и как подтверждает практика долгосрочного прогноза погоды, не оправдывается, и синоптические процессы через 5-7 дней становятся случайными по отношению друг к другу, т.е. если два процесса на каком-то промежутке времени аналогичны, то в дальнейшем они относятся друг к другу как случайные. Предложенный новый подход [7, 8] к принципу аналогичности снимает традиционные требования аналогичности процессов над одной и той же территорией и требует лишь геометрического подобия двух планетарных высотных фронтальных зон (ПВФЗ), при этом не ограничивает их совпадения во времени и пространстве, позволяя тем самым расширить исследования периодичности атмосферных процессов во времени и пространстве для Южного полушария. Такой подход получил название метода плавающего аналога.

Также использовались ежедневные значения максимальной, минимальной средней суточной и средней месячной температуры воздуха станции «Академик Вернадский» за период 1987-2008 гг. из базы данных Украинского антарктического научного центра и отдела климатических исследований и долгосрочного прогноза погоды УкрНИГМИ. Архив температур записан также в виде матрицы:

$$T = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{21} & \dots & T_{m1} & \dots & T_{M1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{1p} & T_{2p} & \dots & T_{mp} & \dots & T_{Mp} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{1P} & T_{2P} & \dots & T_{mP} & \dots & T_{MP} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $m = (1, 2, \dots, M)$ ,  $p = (1, 2, \dots, P)$ ,  $T_{mp} = \{t_i\}_{mp} = (t_1, t_2, \dots, t_K)_{mp}$  соответствует вектору ежедневных значений температуры воздуха для  $m$ -ого года ( $m = 1987 \div 2008$  гг.)  $p$ -ого месяца на станции «Академик Вернадский»,  $P$  – количество месяцев в году,  $K$  – количество дней в месяце.

Для классификации температурного режима и определения наиболее информативного температурного режима класса на станции ото дня ко дню на протяжении года был использован метод «эталонов» [14]. Эталон класса – это один температурный режим из выборки класса, который наиболее информативный и имеет наибольшее подобие (по критериям аналогичности) с остальными случаями в данном классе. Для этого используются два следующих критерия аналогичности:

1. Критерий геометрического подобия  $\rho$  позволяет оценить совпадение по знаку аномалии двух кривых температурного режима, отклоненных от ежедневных средних многолетних значений:

$$\rho = \frac{n_+ - n_-}{n_+ + n_-}, \quad (4)$$

где  $n_+$  – количество дней в году, где знаки аномалий совпадают,  $n_-$  – количество дней в году, где знаки аномалий не совпадают. Критерий принимает значения  $1 \geq \rho \geq -1$ .

2. Среднеквадратическое отклонение (или Евклидовое расстояние) между двумя полями  $\eta$  оценивает близость по абсолютным значениям двух кривых температурного режима:

$$\eta = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (x_{ij} - x_{in})^2}, \quad (5)$$

где  $x_{ij}$  и  $x_{in}$  – значения температуры воздуха в  $i$ -ом дне температурного режима  $j$ -го и  $n$ -го года класса.

Такой подход к классификации позволяет все многообразие температурных режимов свести к нескольким основным случаям, которые играют важную роль в формировании климатического режима

станции «Академик Вернадский» и построении метода долгосрочного прогноза погоды.

### Сезонный характер температурного режима станции «Академик Вернадский» в последнее десятилетие

Для разработки методов долгосрочного прогноза погоды над Антарктическим полуостровом необходимо изучить его современный температурный режим во все сезоны года. Анализ среднесуточной, максимальной и минимальной температуры на станции «Академик Вернадский» за время ее существования показал значения и изменчивость среднемесячной температуры воздуха от месяца к месяцу на протяжении года (табл. 1). Самый теплый месяц – январь ( $T = 1,2^{\circ} \text{C}$ ), самый холодный месяц – август ( $T = -6,4^{\circ} \text{C}$ ). Наименьшая изменчивость температурного режима от года к году отмечается в летнее время ( $A$  около  $2^{\circ} \text{C}$ ), наибольшая изменчивость средней месячной температуры воздуха приходится на зимний сезон ( $A$  выше  $6^{\circ} \text{C}$ ).

Таблица 1

Значения температур воздуха станции «Академик Вернадский»

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
$T^{\circ}\text{C}$	1,2	1,1	0,0	-1,4	-2,8	-4,4	-5,4	-6,4	-6,1	-3,5	-1,7	0,0	-2,4
$T_{\max}$	2,2	2,3	1,6	0,1	-0,2	-1,1	-2,6	-2,9	-2,5	-1,5	-0,6	1,1	-1,5
$T_{\min}$	-0,4	0	-2,2	-2,3	-5,9	-9,3	-8,5	-9,2	-9,1	-6,5	-2,4	-1	-3,5
$\sigma$	0,8	0,7	1,0	0,7	1,4	2,1	1,8	1,9	2,1	1,4	0,5	0,6	0,6
$A$	2,6	2,3	3,8	2,4	5,7	8,2	5,9	6,3	6,6	5	1,8	2,1	4,4

Если провести классификацию температурного режима станции «Академик Вернадский» на протяжении года с помощью использования метода эталона, то можно выделить три класса (рис. 1). Первый тип температурного режима имеет большее количество случаев: теплые процессы летом сохраняют положительную аномалию средней месячной температуры воздуха на  $1-2^{\circ} \text{C}$ . К холодному периоду начинает проявляться более резкая смена средней суточной температуры воздуха от аномально теплых дней к холодным. Особенно резкие перепады температуры воздуха от суток к суткам отмечаются зимой: в теплые дни температура воздуха может быть выше  $0^{\circ} \text{C}$ , а в последующие сутки ночью может опуститься ниже  $-25^{\circ} \text{C}$ . Эталон температурного режима

этого класса является 2004 год. Второй класс температурного режима летом характеризуется значениями в пределах нормы, а на протяжении всего зимнего периода – незначительной ее изменчивостью ото дня ко дню. Как правило, эти зимы теплые и температура изменяется от 0° С до -5° С. В качестве эталона этого класса можно привести температурный режим 1998 года (рис. 1).

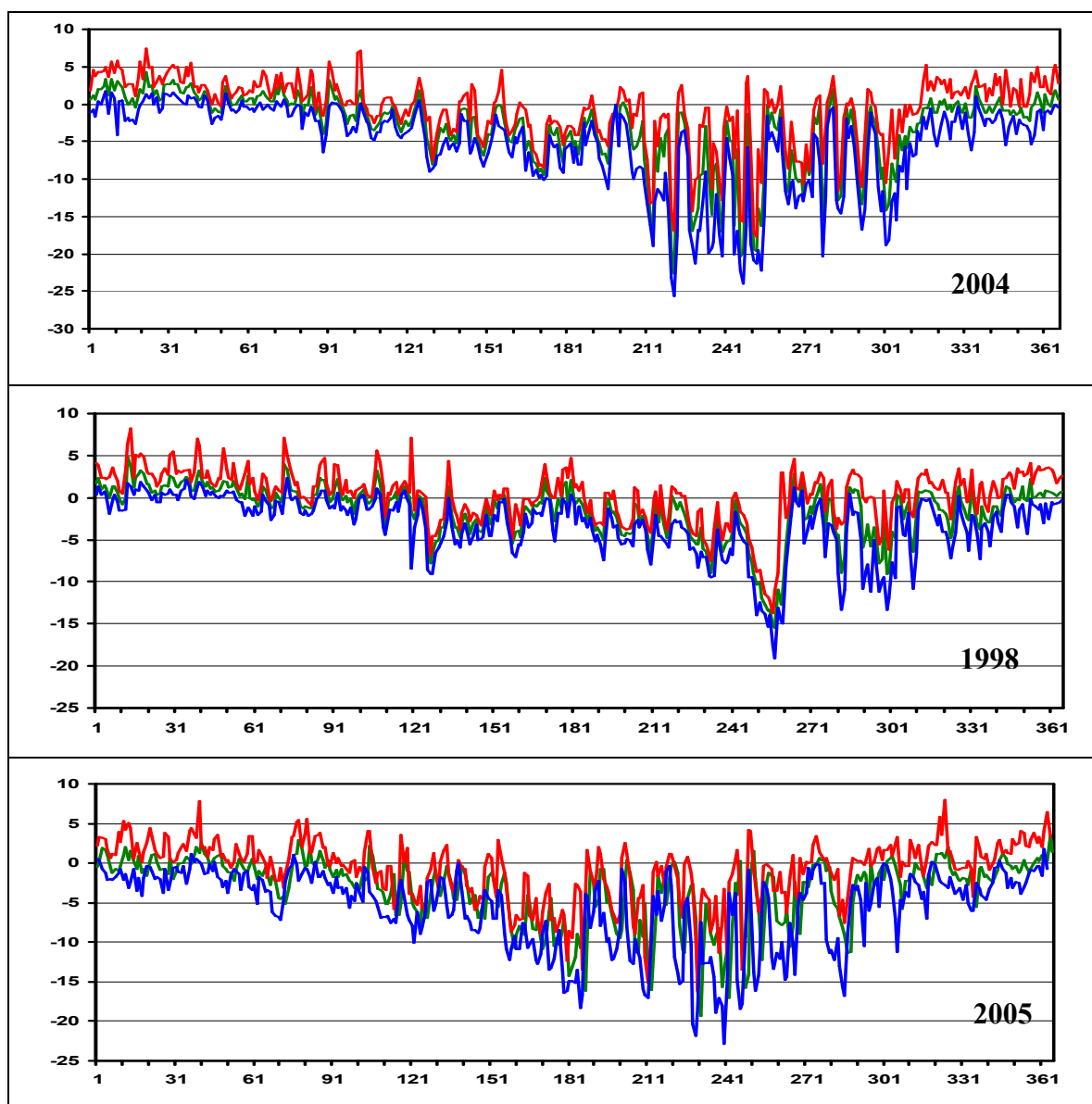


Рис. 1. Типы характера температурного режима на протяжении года на станции «Академик Вернадский»

Третий вид температурного режима зимой относится к аномально холодным процессам на протяжении всего года. Летом ночные температуры воздуха могут опускаться ниже -6° С, а понижение

температуры до  $-20^{\circ}\text{C}$  отмечается с первых дней зимы. В качестве эталона этого класса можно привести зиму 2005 года (рис. 1). Самые низкие температуры воздуха зимой возможны около  $-25^{\circ}\text{C}$ , а самые высокие температуры летом – около  $5^{\circ}\text{C}$ .

Из выделенной классификации температурного режима можно сделать некоторую предсказуемость для долгосрочного прогноза температуры воздуха на станции «Академик Вернадский»:

1) если зима начинается с низких температур воздуха, как в 2005 году, то на протяжении зимнего периода надо ожидать температуру воздуха преимущественно около  $-20\dots-25^{\circ}\text{C}$ ;

2) если зима начинается с температур около  $0^{\circ}\text{C}$ , то следует до середины зимы ожидать устойчивый температурный режим в пределах  $+5\dots-5^{\circ}\text{C}$ . Вторая половины зимы может иметь резкие перепады температуры воздуха или продолжать колебаться в пределах температур первой половины зимы;

3) температура воздуха в весенний период имеет большую изменчивость и по своим минимальным температурам, как правило, не уступает зимнему сезону до такой степени, что первую половину весны можно определить как продолжение зимы;

4) независимо от того, резко или незначительно меняется температура в зимний период ото дня ко дню, весной амплитуда колебания достигает критических температур как низких, так и высоких;

5) самый сложный и стихийный характер температурного режима отмечается ранней весной. Наиболее спокойным сезоном по температурному режиму можно назвать осень.

### **Двухмесячная квазипериодичность атмосферных процессов на Южном полушарии и ее сезонное положение**

Исследование устойчивости исходного поля геопотенциала на уровне 500 гПа для Южного полушария на протяжении 3 месяцев ото дня ко дню шагом по времени  $\tau = 1, 2, 3, \dots, k$  за указанный период времени можно провести с помощью геометрического критерия аналогичности  $\rho$  и записать:

$$\bar{\rho}(\tau) = \frac{1}{K - \tau} \sum_{t=1}^{K-\tau} \rho(t, t + \tau), \quad (6)$$

где

$$\rho(t, t + \tau) = \frac{n(i, i + \tau)_+ - n(i, i + \tau)_-}{N}, \quad (7)$$

где  $K$  – количество полей в архиве за период 1997-2006 гг. Как было отмечено выше, все критерии аналогичности атмосферных процессов, независимо оттого, что они описывают разные подходы сходства, имеют хорошие корреляционные связи между собою. Схожесть исходного поля давления воздуха в пределах первых дней определяется значением  $\rho > 0,3$  и указывает на их схожесть по знаку аномалии до 60-65 % территории на полушере. Это пороговое значение имеет климатическое значение, которое отвечает положению центров действия атмосферы на Южном полушарии. В целом устойчивость исходного поля давления первые дни сохраняется и дальше во все сезоны резко убывает. Общим для всех кривых зимой, летом, а также в целом за год можно отметить повышение  $\rho(\tau)$  на временном интервале  $\tau = 55-60$  дней, что соответствует слабой периодичности полей геопотенциала через два месяца от исходного момента. Устойчивость исходного поля геопотенциала зависит от поры года: зимой устойчивость поля геопотенциала больше, чем летом.

Аналогичность атмосферных процессов на среднем уровне тропосферы Южного полушария исследовалась методом плавающего аналога на трехмесячном интервале, как показано в работе [8] для Северного полушария. Плавание текущего поля давления по предыдущим полям на трехмесячном интервале имело ограничение в смещении по долготе шагом  $\Delta\lambda^\circ = 2,5^\circ$  на запад и восток, которое определялось половиной расстояния между климатическими центрами действия атмосферы, а по широте шагом  $\Delta\varphi^\circ = 2,5^\circ$  оно не превосходило расстояния между зимним и летним положением планетарной высотной фронтальной зоны (ПВФЗ). На каждом временном шаге  $\Delta t = 1$  день по  $\pm\Delta\varphi^\circ$  и  $\pm\Delta\lambda^\circ$  рассчитывалась матрица максимального подобия  $\rho_{(\max)}$  синоптических процессов на Южном полушарии.

$$\rho_{(\max)} = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{12(\max)} & \rho_{13(\max)} & \cdots & \rho_{1K(\max)} \\ & 1 & \rho_{23(\max)} & \cdots & \rho_{2K(\max)} \\ & & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & & & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где  $\rho_{ij(\max)}$  указывает наилучшую меру сходства синоптических процессов исходного с последующим шагом по времени  $j = 1, 2, \dots, K$  день ( $K$  соответствует трехмесячному интервалу от исходного дня). Так



например,  $\rho_{13(max)}$  показывает наилучшее подобие поля давления первого и третьего дней. Также каждое максимальное подобие имеет географическое расположение, которое фиксируется с помощью координат сдвига аналога по  $\pm\Delta\varphi^\circ$  и  $\pm\Delta\lambda^\circ$ .

Анализ построенных автокорреляционных значений  $\rho_{(max)}$  показал, что синоптические процессы в Южном полушарии, также как и в Северном, имеют двухмесячную квазипериодичность. Аналогичные атмосферные процессы с двухмесячной квазипериодичностью имеют сезонное смещение по широте и долготе относительно исходных синоптических процессов (табл. 2).

Таблица 2

Смещение двухмесячной аналогичности атмосферных процессов относительно текущих на среднем уровне тропосферы Южного полушария

Текущий месяц	Месяц- аналог	смещение	
		$\Delta\varphi^\circ$	$\Delta\lambda^\circ$
Март	Январь	+5	-5
Апрель	Февраль	+5	-5
Май	Март	+7,5	-7,5
Июнь	Апрель	+5	-10
Июль	Май	0	0
Август	Июнь	0	+5
Сентябрь	Июль	-5	+10
Октябрь	Август	-5	+12,5
Ноябрь	Сентябрь	-5	+10
Декабрь	Октябрь	-5	+10
Январь	Ноябрь	-5	-10
Февраль	Декабрь	-7,5	-12,5

Как видно из табл. 2, аналогичность атмосферных процессов на Южном полушарии имеет сезонное положение. Это сезонное положение объясняется сезонным градиентом температуры полюс-экватор, суша-океан. Так, например, летом, когда планетарная высотная фронтальная зона на среднем уровне тропосферы выше (ближе к Южному полюсу), чем весной и осенью, тогда аналоги летней атмосферной циркуляции в весеннем сезоне будут расположены на полушарии ниже на  $5...7,5^\circ$  ю. ш.

Двухмесячную квазипериодичность атмосферной циркуляции можно видеть наглядно из графиков средней суточной температуры воздуха станции «Академик Вернадский» для зимнего сезона 2007 года (рис. 2, 3). На этих графиках приведена температура на станции в мае, июне, июле и августе. Двухмесячная квазипериодичность атмосферных процессов июля отмечается в мае, а августа – в июне. Аналогичность атмосферной циркуляции можно видеть через температурный режим июля в мае, августа в июне.

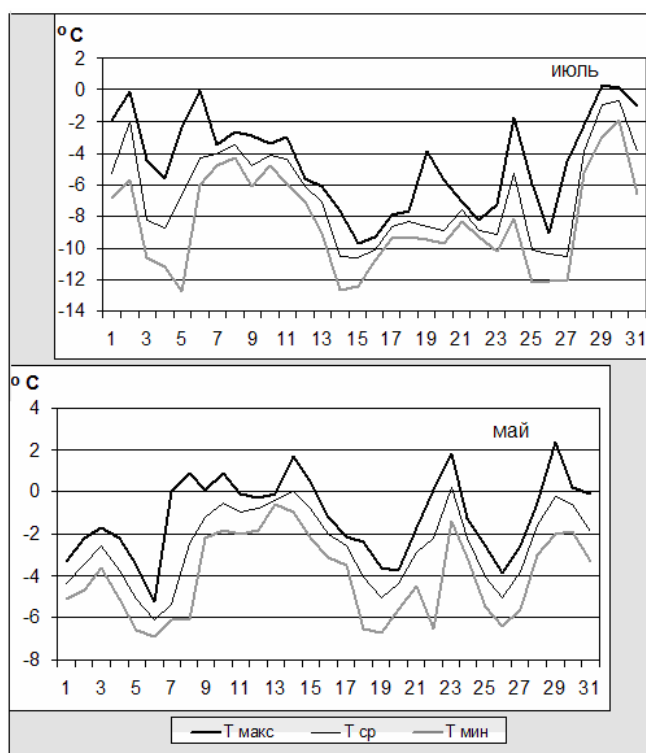


Рис. 2. Температурный режим июля 2007 г. на станции «Академик Вернадский» с двухмесячной квазипериодичностью в мае 2007 г.

Высокое значение аналогичности (сходства) имеет температурный режим июля 2007 г. относительно температурного режима мая 2007 г., при небольшом запаздывании по критерию аналогичности  $\rho = 0,85$ . Как правило, двухмесячная аналогичность атмосферной циркуляции одного сезона хорошо проявляется с помощью даже традиционного метода аналогов (смотри табл. 2). В качестве следующего примера двухмесячной квазипериодичности атмосферных процессов приведем температурный режим следующего летнего месяца – августа 2007 года с периодичностью в июне (рис. 3).

Аналогичность, при небольшом запаздывании двухмесячной квазипериодичности температурного режима августа в июне 2007 г., составила по критерию аналогичности  $\rho = 0,80$ .

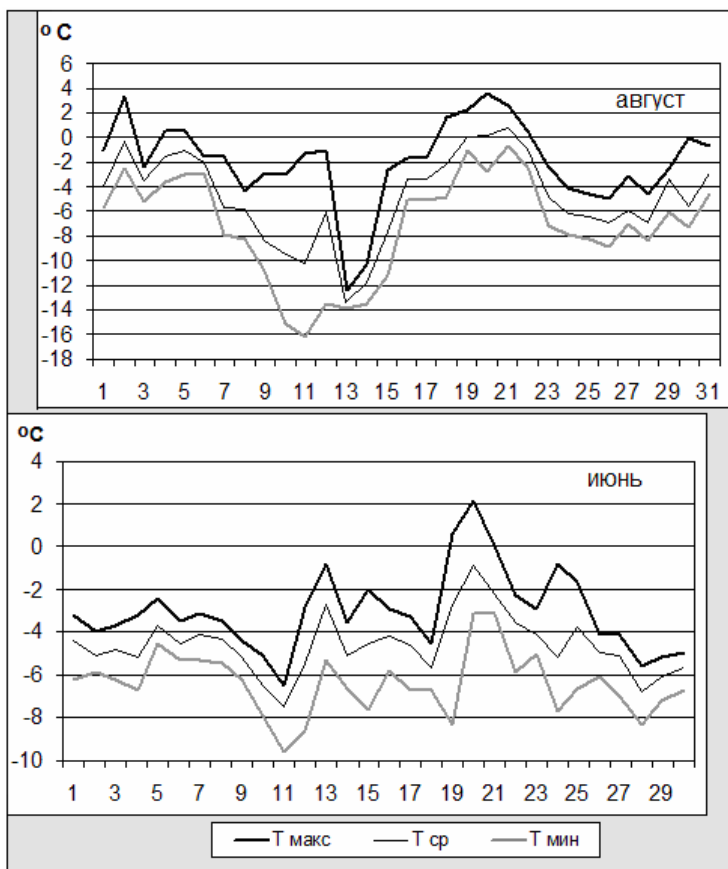


Рис. 3. Температурный режим августа 2007 г. на станции «Академик Вернадский» с двухмесячной квазипериодичностью в июне 2007 г.

Найденная двухмесячная квазипериодичность атмосферных процессов имеет значение для разработки метода долгосрочного прогноза погоды и дает большие возможности для перспективы развития долгосрочного детализированного прогнозирования погоды с месячным упреждением в регионах Антарктиды.

Зная характер изменения атмосферного процесса наперед за месяц, можно ориентироваться, в какие дни в регионах Южного полушария можно ожидать резкие изменения температуры воздуха и осадки в ближайшие 40 дней. В том числе, появляется возможность прогнозировать ледовый покров Антарктического полуострова и станции «Академик Вернадский».

## Модель формирования ледового покрова

Для описания процессов формирования ледового покрова используется модель циркуляции THREETOX [13], дополненная моделью динамики-термодинамики льда [6]. Модель циркуляции является гидростатической моделью со свободной поверхностью, уравнения которой записаны в ортогональной криволинейной системе горизонтальных координат и в смешанной  $z$ -сигма вертикальной системе координат. Турбулентное перемешивание параметризуется с использованием коэффициентов обмена и  $k-\varepsilon$  модели турбулентности. Ледовая модель описывает динамику-термодинамику ледового покрова, реологию ледового покрова, баланс массы, концентрацию ледового покрова и напряжения.

Формирование ледового покрова в шельфовых областях Антарктических морей, например, моря Уэдделла, начинается с образования шуги при отрицательной температуре воздуха. Причиной формирования шуги является переохлаждение внутренних слоев столба воды, тогда как на поверхности еще лед не сформировался. В большинстве моделей этот процесс не описывается и допускается, что вся шуга мгновенно попадает на поверхность, где формируется молодой лед. Но при описании шельфовой конвекции необходимо более детальное описание этого процесса, поскольку при образовании льда происходит не только высвобождение рассола, увеличивающего плотность, но и вовлечение взвеси [19, 20]. Эти процессы могут вносить заметный вклад в поддержание придонных гравитационных течений, принимающих участие в формировании Антарктической Глубинной Воды (АГВ).

Для правильного описания формирования шуги, в соответствии с [19, 20], уравнения модели гидротермодинамики океана [13] дополняются распределенными источниками:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left( (v'_i + v'_f) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_n \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_n \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 c_p} \frac{\partial I}{\partial z} + G_T \quad (9)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left( (v'_i + v'_f) \frac{\partial S}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_n \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_n \frac{\partial S}{\partial y} \right) + G_S \quad (10)$$

где  $t$  – время;  $v'_i$  – коэффициент вертикальной диффузии;  $v'_f$  – фоновое значение коэффициента вертикальной диффузии;  $K_n$  – коэффициент горизонтальной диффузии;  $\rho_0$  – плотность воды при нормальных

условиях;  $c_p$  – теплоемкость воды;  $I(z)$  – поток проникающей солнечной радиации;  $T$  – температура воды;  $S$  – соленость воды;  $G_T$  и  $G_S$  – распределенные источники для температуры и солености соответственно.

Введем еще одно адвективно-диффузионное уравнение, которое описывает перенос шуги внутри водной среды:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left( (v'_i + v'_f) \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) - w_i \frac{\partial C_i}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_n \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_n \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + G_i \quad (11)$$

где  $C_i$  – объемная концентрация льда;  $G_i$  – распределенный источник формирования льда;  $w_i$  – скорость подъема льда на поверхность воды.

Распределенные источники для температуры, солености и льда в водяном столбике зависят от замораживания и таяния кристаллов льда. Допускается, что объемные изменения льда контролируются потоком тепла от существующих уже кристаллов льда в водяном столбе и изменение их теплового баланса приводит к изменению объема льда путем кристаллизации или таяния. Соленость изменяется в соответствии с притоком соли при замерзании частиц или пресной воды при их таянии.

Поток тепла от ледяных кристаллов в окружающую воду имеет вид:

$$Q_i = Nu k_w (T_i - T) / 2r \quad (12)$$

где  $Nu = 6$  – число Нуссельта;  $k_w$  – теплопроводность на границе лед-вода;  $T_i$  – температура кристалла льда;  $r$  – радиус кристалла льда. Температура ледовых кристаллов полагается равной температуре замерзания льда и зависит от температуры окружающей воды и солености.

Приток тепла для уравнения температуры воды описывается как:

$$G_T = \frac{a C_i Q_i}{c_p \rho} \quad (13)$$

где  $a$  – отношение площади поверхности к объему кристалла льда, для сферы  $a = 3/r$ , для цилиндра или диска  $a = 2/r$ ;  $\rho$  – плотность воды.

Повышение солености за счет кристаллизации или опреснения воды за счет таяния описывается как:

$$G_i = \frac{a S C_i Q_i}{L_i \rho} \quad (14)$$

где  $L_i$  – скрытая теплота кристаллизации чистого льда.

Граничные условия для уравнения концентрации шуги:

$$\text{на дне } \frac{\partial C_i}{\partial z} = 0 \quad \text{и на поверхности } v'_i \frac{\partial C_i}{\partial z} = W_{FR},$$

где  $W_{FR}$  задано.

Приведенная модель формирования шуги дополняет уравнения динамики-термодинамики ледового покрова [6] явным описанием процессов формирования молодого льда и может быть пригодной для ориентации состояния ледового покрова в мореплавании при надежном методе долгосрочного прогноза погоды.

### **Схема долгосрочного прогноза аномалии средней месячной температуры воздуха для станции «Академик Вернадский» в холодный и теплый периоды года**

На основе выявленной нами в данном исследовании двухмесячной квазипериодичности атмосферной циркуляции над Южным полушарием и, следовательно, над Антарктическим полуостровом, была разработана прогностическая схема аномалии средней месячной температуры воздуха с месячной заблаговременностью. В данной статье приводится разработанная схема прогноза для района станции «Академик Вернадский» с помощью уравнений линейной регрессии [9]:

$$\Delta T_{t+2} = \alpha \Delta T_t + b, \quad (15)$$

где  $\Delta T_t$  – предиктор, который соответствует значению аномалии среднемесячной температуры воздуха в момент составления прогноза,  $\Delta T_{t+2}$  – прогностическое значение аномалии среднемесячной температуры во втором месяце от исходного  $\Delta T_t$ . Уравнение линейной регрессии было получено методом наименьших квадратов:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta T''_i - \Delta T_i)^2 = \min, \quad (16)$$

где  $\Delta T''_i$  – фактическое значение,  $\Delta T_i$  – прогностическое значение  $\Delta T_{t+2}$  для  $i$ -ого месяца,  $n$  – количество рассчитанных прогнозов. Тогда:

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \sum_{i=1}^n (\Delta T''_i - \alpha \Delta T_i - b)^2 = 0, \quad (17)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^n (\Delta T''_i - \alpha \Delta T_i - b)^2 = 0. \quad (18)$$

Эти условия сводятся к системе уравнений:

$$\sum_{i=1}^n \Delta T''_i \Delta T_i = \alpha \sum_{i=1}^n \Delta T_i^2 + b \sum_{i=1}^n \Delta T_i \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta T''_i = \alpha \sum_{i=1}^n \Delta T_i + nb, \quad (20)$$

Откуда 
$$b = 1/n \sum_{i=1}^n \Delta T''_i - \alpha/n \sum_{i=1}^n \Delta T_i, \quad (21)$$

$$\alpha = n \sum_{i=1}^n \Delta T''_i \Delta T_i - \sum_{i=1}^n \Delta T_i \sum_{i=1}^n \Delta T''_i / n \sum_{i=1}^n \Delta T_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n \Delta T_i \right)^2. \quad (22)$$

Расчетные прогностические схемы различны для теплого и холодного полугодий за счет различной изменчивости температуры воздуха ото дня ко дню в каждом полугодии. Полученная прогностическая схема прогноза аномалии температуры воздуха во второй месяц от исходного в холодный период имеет уравнение регрессии:

$$\Delta T_{t+2} = \alpha \Delta T_t + b = 2,4 \Delta T_t - 1,57, \quad (23)$$

где в качестве предиктора  $\Delta T_t$  используется аномалия средней месячной температуры воздуха исходного месяца в холодный период (апрель-сентябрь). Температура воздуха в холодный период имеет большую изменчивость ото дня ко дню, при этом значения аномалий могут достигать критических значений и потому в прогностическом уравнении (21) коэффициенты  $\alpha$  и  $b$  по абсолютному значению выше значений теплого полугодия:

$$\Delta T_{t+2} = \alpha \Delta T_t + b = 0,71 \Delta T_t + 0,57. \quad (24)$$

В качестве предиктора  $\Delta T_t$  уравнения (24) используется аномалия средней месячной температуры воздуха месяца теплого периода (октябрь-март). Температура воздуха в теплом периоде имеет небольшую изменчивость, потому коэффициенты уравнения (24) близки к нулю.

Оценка прогностических схем была проведена на зависимом и независимом материале отдельных лет и месяцев холодного и теплого периодов. При проверке метода было получено, что знак аномалии на второй месяц от исходного прогнозируется успешно, с вероятностью около 70 % в холодный период и превышает 75 % в теплый период. Надо

отметить, что значения аномалии температуры близкой к  $1^{\circ}\text{C}$ , предсказываются успешно в диапазоне ошибки  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , но данный метод имеет плохую предсказуемость для значений крупных аномалий от  $2-4^{\circ}\text{C}$  и тем самым понижает оценку успешности метода прогноза.

Учитывая, что прогноз экстремальных значений температуры имеет большую практическую ценность и что количество экстремальных значений увеличивается к холодному периоду, а предложенный метод не позволяет успешно прогнозировать экстремальность, схема долгосрочного прогноза среднемесячной температуры воздуха над Антарктическим полуостровом и станцией «Академик Вернадский» была дополнена вспомогательными уравнениями с помощью среднего квадрата разности между прогностической и фактической температурой. Остаточная дисперсия  $D = \sigma^2 - \sigma^2_T$  (где  $\sigma^2$  – дисперсия прогностической температуры,  $\sigma^2_T$  – дисперсия фактической температуры) показывает, что чем значительнее  $D$ , тем больше ошибка экстремальной аномалии температуры. С учетом особенности  $\sigma^2/\sigma^2_T$  были построены уравнения линейной регрессии, позволяющие вычислять экстремальные значения  $\Delta T_{t+2}$ :

$$\Delta T_{t+2} = \varepsilon(\alpha \Delta T_t + b), \quad (25)$$

где предиктор  $T_t$  остается прежним,  $\varepsilon$  – коэффициент экстремальности, рассчитываемый по формуле:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N \Delta T_{kp}^2}{\sum_{k=1}^N \Delta \hat{T}_{kp}^2}}, \quad (26)$$

где  $\Delta T_{kp}$  – фактическая аномалия средней месячной температуры воздуха во втором месяце от исходного на станции из выборки объемом  $N$ ;  $\Delta \hat{T}_{kp}$  – прогнозируемая аномалия средней месячной температуры воздуха во второй месяц от исходного этой же выборки. Коэффициент экстремальности устраняет недостаток линейного уравнения, заключающегося в том, что все прогностические величины колеблются около своей нормы. Однако это улучшение предсказания экстремальности значений достигается ценой некоторого его ухудшения для малых отклонений  $\Delta T_{t+2}$ . Предложенный метод позволяет



прогнозировать экстремальные значения аномалии средней месячной температуры воздуха  $\Delta T_{t+2}$  с упреждением за месяц.

### **Выводы**

В целом можно отметить, что создан метод долгосрочного прогноза аномалии средней месячной температуры воздуха для Антарктического полуострова. В основу предложенного метода легла выявленная закономерность атмосферной циркуляции Южного полушария в виде двухмесячной квазипериодичности по времени и пространству. Оценка успешности прогностической схемы в теплом и холодном периодах показала хорошую оправдываемость в знаке аномалии средней месячной температуры. Расчетная схема прогноза подготовлена для оперативной работы. С помощью закономерности атмосферных процессов на Южном полушарии в дальнейшем планируется перейти к разработке детализированного долгосрочного прогноза погоды, т.е. периодов резких изменений давления, температуры и сильных осадков внутри прогнозируемого месяца с месячной заблаговременностью.

\* \*

1. Атлас Антарктики, Т. 2. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 600 с.
2. Баур Ф. Долгосрочный прогноз погоды // Вопросы предсказания погоды. – Л.: Гидрометеиздат. – 1958. – С. 262-268.
3. Воскресенский А.И., Чуканин К.И. Основные черты циркуляции атмосферы над Антарктидой // Исследования климата Антарктиды. – Л.: Гидрометеиздат. – 1980. – С. 170-176.
4. Дыдина Л.А., Рабцевич С.В., Рыжак Л.Ю., Савицкий Г.Б. Формы атмосферной циркуляции в Южном полушарии // Тр. ААНИИ, 330. – 1976. – С. 5-16.
5. Лоренц Э. Некоторые аспекты предсказуемости поведения атмосферы // Долгосрочные и среднесрочные прогнозы погоды. – М.: Мир, 1982. – С. 7-10.
6. Мадерич В., Бровченко І., Кошебуцький В., Терлецька К. Моделювання циркуляції та процесів формування глибинних вод в морі Ведделла // Тези ІV Міжнар. Антарктич. Конф. ІІІ міжнар. полярн. рік 2007-2008: результати та перспективи – К.: Україна, 2009.
7. Мартазинова В.Ф. К вопросу об использовании аналоговых полей метеоэлементов для прогноза // Тр. УкрНИГМИ, 1987, Вып. 219. – С. 37-42.

8. *Мартазинова В.Ф., Сологуб Т.А.* Определение квазипериодичности атмосферных процессов на Северном полушарии с помощью метода «плавающий аналог» // Тр. УкрНИГМИ. – 1987. – Вып. 219. – С. 42-46.
9. *Мартазинова В., Тимофеев В., Иванова О.* Возможности довгострокового прогнозування погодних умов над Антарктичним півостровом // Тези IV Міжнар. Антарктич. Конф. III міжнар. полярн. рік 2007-2008: результати та перспективи. – К.: Україна, 2009.
10. *Мультиановский Б.П.* Влияние центров действия атмосферы на погоду Европейской России в теплое время года // Геофиз. сб. – 1915. – Т. 2. – Вып. 3. – С. 73-97.
11. *Немайес Д.* Тридцатидневные прогнозы // Вопросы предсказания погоды. – Л.: Гидрометеиздат. – 1958. – С. 192-193.
12. *Рыжаков Л.Ю.* О сезонных особенностях устойчивости и повторяемости форм циркуляции Южного полушария // Бюлл. САЭ, № 94, 1977. – С. 5-10.
13. *Maderich V., Brovchenko, V. Koshebutskyy, K. Terletska* Application of 3D Lagrangian multi-size sediment transport model to the simulation of dense water cascading due to winter shelf convection and turbidity // Geophysical Research Abstracts, 2007., Vol. 9, 07776, 2007.
14. *Martazinova V.* The Classification of Synoptic Patterns by Method of Analogs // J. Environ. Sci. Eng. – 2005. – 7. – P. 61-65.
15. *Martazinova V., Tymofeyev V.E.* Interdecadal changes of tropospheric circulation in Southern extratropics during the recent warming in the Antarctic Peninsula // The 10th International Symposium on Antarctic Earth Science, 10thISAES, Santa Barbara, Geological Survey and The National Academies, USGS OF-2007-1047. Ext. Abs.067, 2007.
16. *Martazinova V.F., Tymofeyev V.E., Ivanova E.K.* Tropospheric circulation in Austral extratropics during the recent warming episode in the Antarctic peninsula // Abs. SCAR/IASC Open Science conf., St. Petersburg, Russia, 2008.
17. *Teisserence de Bort J.* Etude sur l'hiver de 1879-1880 et recherches sur la position des centres d'action de l'atmosphere dans les hivers anormaux // Bureau Centr. Meteorologique de France. – Annales. – 1884. – Pt. 4. – P. 17-62.
18. *Turner J., Colwell S., Marshall G., et al.* Antarctic climate during the last 50 years // Int. J. Climatol., 2005, 25. – P. 279-294.
19. *Sherwood C. R.* Numerical model of frazil ice and suspended sediment concentration and formation of sediment laden ice in the Kara Sea // Journal of Geophysical Research, 2000, Vol. 105, №. 6, P. 14061-14080.

20. *Smedsrud L. H.* A model for entrainment of sediment into sea ice by aggregation between frazil-ice crystals and sediment grains // *Journal of Glaciology*, 2002, Vol. 48, №. 160. – P. 51-61.

*Український науково-дослідницький  
гідрометеорологічний інститут, Київ,  
Інститут проблем математических  
машин и систем НАН України, Київ*

**В.Ф. Мартазінова, В.С.Мадерич, В.Є. Тимофєєв, О.К. Іванова**

**Можливості довгострокового прогнозування погодних умов над Антарктичним півостровом**

*За допомогою методу традиційного аналога досліджена аналогічність атмосферних процесів у позатропічних широтах Південної півкулі. Розроблена прогностична схема аномалії середньої місячної температури повітря для району ст. «Академік Вернадський» з місячною завчасністю за допомогою рівнянь лінійної регресії. Оцінка прогностичної схеми була виконана на залежному матеріалі окремих років і показала успішність запропонованого методу.*

**Ключові слова:** великомасштабна атмосферна циркуляція, класифікація температурного режиму, метод «плаваючого аналогу», рівняння лінійної регресії, метод довгострокового прогнозу погоди, модель циркуляції океану «threetox».

**V.F. Martazinova, V.S. Maderich, V.Y. Tymofeyev, E.K. Ivanova**

**Possibilities of long-range forecast of weather conditions over the Antarctic peninsula**

*Atmospheric processes in the extratropical latitudes of Southern hemisphere are studied by the method of traditional analogue. The forecast scheme for anomaly of the average monthly air temperature with monthly lead for the area of Academic Vernadsky Station is developed by means of equations of linear regression. The estimation of forecast scheme was executed on dependent material of selected years and showed success of the offered method.*

**Keywords:** large-scale atmospheric circulation, classification of temperature regime, method «floating analogue», linear regression equation, method of long-range forecast, model of ocean circulation «threetox».