

що формулювання задачі застосування крігінг-інтерполяції з урахуванням висоти розташування метеостанцій дасть змогу покращити прогноз метеорологічних величин у гірських районах.

\* \*

1. Прусов В.А., Дорошенко А.Ю. Моделирование природных и техногенных процессов в атмосфере. — К.: Наук. думка, 2006. — 542 с.
2. Марчук Г.И. Численные методы в прогнозе погоды. — Л.: Гидрометеоздат, 1967. — 353 с.
3. Oliver M.A. Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems // International Journal of Geographic Information Systems. — 1990. — Vol. 4. — P. 313-332.
4. Каневский М.Ф., Демьянов В.В., Савельева Е.А., Чернов С.Ю., Тимонин В.А. Элементарное введение в геостатику // ВИНТИ. Серия “Проблемы окружающей среды и природных ресурсов”. — М. — 1999. — №11. — 135 с.
5. Справка ArcGIS 10.1: <http://resources.arcgis.com>
6. Офіційний сайт УкрГМІ: <http://uhmi.org.ua/>
7. Doms G.A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model: [www.cosmo-model.org](http://www.cosmo-model.org)
8. [http://www.geostatcam.com/Adobe/G\\_Matheron.pdf](http://www.geostatcam.com/Adobe/G_Matheron.pdf)

Український науково-дослідний  
гідрометеорологічний інститут, Київ

Кацалова Л.Н., Шпиг В.М.

#### Кригинг-интерполяция в задачах прогноза погоды

В статье предложено использование метода кригинг-интерполяции для постмодельной обработки данных прогноза погоды. Описан алгоритм метода. Обоснована целесообразность его использования для решения задач прогноза погоды. Представлены результаты использования кригинг-интерполяции для данных прогноза погоды метеорологической модели COSMO. Проведён анализ полученных результатов.

**Ключевые слова:** прогноз погоды, математическое моделирование, постмодельная обработка, интерполяция, метод кригинга.

Katsalova L.M., Shpyg V.M.

#### Application of kriging-interpolation in weather forecast

*In this article the usage of the kriging-interpolation method for weather forecast model post-processing is proposed. Algorithm of method is described. Reasonability of its usage in weather forecast is justified. Results of the kriging-interpolation application for COSMO model forecast are presented. Analysis of obtained results is carried out.*

**Keywords:** weather forecast, mathematical modeling, post-processing, interpolation, kriging method.

УДК 551.510

**В.Е. Тимофеев**

## МНОГОЛЕТНЕЕ ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В РАЙОНЕ АНТАРКТИЧЕСКОГО ПОЛУОСТРОВА И ЕГО ПРИЧИНЫ

Приведены оценки многолетнего изменения температуры воздуха в районе Антарктического полуострова с детализацией по станции “Академик Вернадский”. Большое внимание уделено оценке однородности рядов. По данным последнего десятилетия отмечено прекращение дальнейшего возрастания температуры воздуха на фоне уменьшения изменчивости температуры воздуха на отдельных станциях по сравнению с серединой XX ст. Среди причин изменений регионального климата указываются атмосферная циркуляция и Эль-Ниньо.

**Ключевые слова:** потепление, климат, температура воздуха, корреляция, тренд, Эль-Ниньо.

#### Введение

Исследование глобального и регионального климата, а также оценок его будущего изменения является наиболее актуальным вопросом современной климатологии. Как известно, повышение глобальной температуры отмечалось в течение XX века и продолжается до настоящего времени. В вековом ходе изменения аномалии глобальной

температуры XX ст. выделяются два периода потепления, которые проявляются и в Северном, и в Южном полушариях [5, 22]. Второй период потепления охватил как Южную полярную область (ЮПО), так и умеренные широты, причем в Южном полушарии он начался несколько раньше, чем в Северном [1].

Наиболее интенсивное потепление в Юж-

ном полушарии отмечено на станциях западного сектора Антарктики, к которому относится и Антарктический полуостров. Функционирующая в районе полуострова станция “Академик Вернадский” показывает одно из наибольших значений повышения приземной температуры воздуха, причем пятилетие, относящееся к году передачи станции “Академик Вернадский” Украине (1996 г.) совпало с пиком регионального потепления [3, 5, 7, 23]. В целом на Антарктическом полуострове так же, как и в большинстве районов планеты, десятилетие 1991–2000 гг. стало наиболее теплым за все годы наблюдений. Как результат, участились отколы шельфовых ледников, ускорилось таяние наземного оледенения; определенным изменениям подверглось состояние водных и наземных экосистем [2, 6, 15].

За периодом потепления в нижней тропосфере в конце XX века последовало десятилетие (2001–2010 гг.) практически стабильной средней годовой температуры воздуха, — она в целом остается выше средней климатической нормы 1961–1990 гг. [5, 7, 19]. В отдельные сезоны этого десятилетия на некоторых станциях Антарктического полуострова появились отрицательные аномалии средней месячной температуры воздуха. Как результат, ряд летних сезонов в акваториях прибрежных станций характеризовался значительной концентрацией морских льдов, затруднившей навигацию, как например, в районе станции “Академик Вернадский” 2012 г.

По результатам многочисленных исследований, итогов выполнения Международного полярного года 2007–08, причиной изменения климата в регионе исследования является атмосферная циркуляция. В частности, повышению температуры воздуха предшествовало усиление зонального потока, количественным показателем которого за рубежом является Антарктическое колебание [11, 12, 16, 17]. На фоне усиления общей зональности в ЮПО в регионе Антарктического полуострова усилился северный-северо-западный перенос, благоприятствующий потеплению, в первую очередь, на северо-восточном склоне, который максимально удален к северу от континента Антарктиды. Кроме того, отмечается большее влияние циклонов и их серий, что в условиях местной орографии приводит к учащению фоновых ветров — дополнительной причине потепления [5].

В предыдущей работе автора [5] показано многолетнее преобразование циркуляции атмосферы, послужившей фоном для изменения регионального климата. Отмечено также, что общие изменения циркуляции в обоих полушариях

происходят синфазно, как например, смещение центров действия. На основании этого вывода, а также других соображений, в работе [9] делается вывод о том, что изменение климата Арктики и Антарктики является результатом действия преимущественно естественных причин.

Это исследование посвящено детализации показателей многолетнего изменения температуры воздуха в районе Антарктического полуострова, где функционирует украинская антарктическая станция “Академик Вернадский”, а также выяснению причин изменения климата.

### Используемые данные и краткое физико-географическое описание

В работе использовались данные средней месячной температуры воздуха из международной базы данных READER, <http://www.antarctica.ac.uk/met/READER/>.

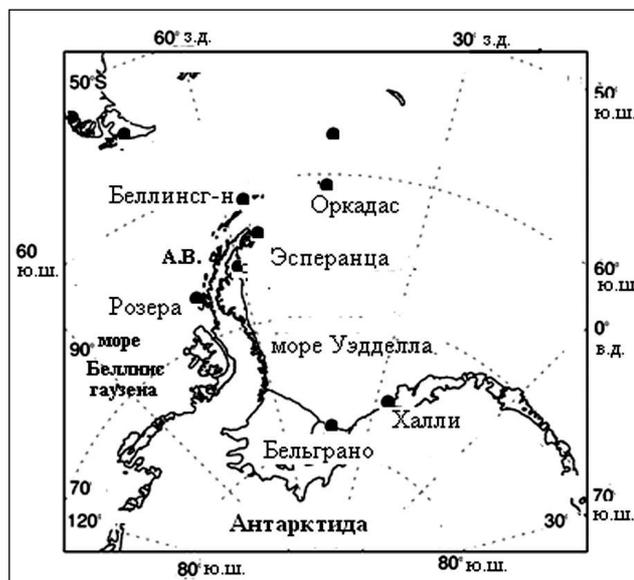


Рис. 1. Схема Антарктического полуострова с расположением научных станций, данные которых используются в работе. Аббревиатура А.В. — “Академик Вернадский”

Использовались данные станций с наиболее длительным рядом измерений: Оркадас, с 1904 г., географические координаты 60°45' ю. ш., 44°43' з. д., “Академик Вернадский” (Фарадей до 1996 г.), 65°14' ю. ш., 64°15' з. д., Беллинсгаузен, 62°12' ю. ш., 58°38' з. д., Эсперанца, 63°24' ю. ш., 56°52' з. д., за период 1951–2010 гг.; Розера, 67°51' ю. ш., 68°15' з. д., 1975–2010 гг., Халли, 75°44' ю. ш., 26°35' з. д., 1956–2010, Бельграно-1, 78° ю. ш., 38°50' з. д., 1995–1978, Бельграно-2, 77°56' ю. ш., 34°15' з. д., 1979–2010 гг. Ряд средней месячной и средней годовой температуры воздуха

ст. Беллинсгаузен, 1968-2010 гг. был дополнен данными ст. Десепшен, 1951-1967 гг., а данные станции Розера – данными станции Adelaide Island, 1962-1975, Marguerite Bay, 1951-1961 гг., с соответствующими постоянными поправками, как рекомендовано в проекте READER. Ряды станции Бельграно-1 и Бельграно-2 не объединялись в связи с переносом на достаточно большое расстояние.

Район исследований характеризуется существенной неоднородностью подстилающей поверхности, наличием горного рельефа, значительной изрезанностью береговой линии, многочисленными островами, а также оледенением разных типов. Перечисленные станции расположены в разных физико-географических условиях: “Академик Вернадский” – у западного берега Антарктического полуострова, на некотором удалении от горной системы (максимальная высота до 2000 м); Беллинсгаузен и Оркадас – на крупных островах в океане вдали от горных хребтов; Эсперанца – у северной оконечности Антарктического полуострова, в районе оазиса Хоуп-Бей (преобладающие высоты не более 400-600 м). Станции Бельграно-1 и Бельграно-2 находятся в краевой зоне шельфового ледника Фильхнера-Ронне, на южном побережье моря Уэдделла, большую часть года покрытого морским льдом. Наиболее суровыми климатическими условиями характеризуются удаленные станции Бельграно и Халли, и их роль в данном исследовании – выяснить, насколько изменение температуры воздуха на них согласуется с многолетним потеплением на Антарктическом полуострове.

### Методика исследования

#### Исследование однородности рядов температуры воздуха на станциях

В процессе исследования установлено, что существуют значительные межгодовые колебания температуры воздуха на станциях исследуемого региона, в особенности в холодный период. Так, среднее квадратическое отклонение увеличивается от лета к зиме, отражая сезонный рост интенсивности циркуляции атмосферы (табл. 1). Амплитуда колебаний температуры воздуха в отдельные месяцы может достигать или даже превосходить значение дисперсии, или значение многолетнего тренда, что ставит задачу проверки репрезентативности многолетних рядов, с выявлением причины возможной неоднородности. Исследование однородности рядов средней месячной температуры воздуха происходит в несколько этапов. На первом, как традиционно принято в климатологии, анализируется многолетний ряд на одной станции, рассчитывается выбранный критерий Стьюдента, проверяется нулевая гипотеза об однородности ряда. При отклонении нулевой гипотезы неоднородные члены исключаются из ряда, заменяются средними значениями, рассчитывается значение многолетнего тренда и сравнивается с тем, которое было получено для исходного (неоднородного) ряда. Годы, в которых проявилась неоднородность, выделяются для дальнейшего исследования. Затем оценивается пространственная однородность – сравниваются данные на двух или более станциях, одна из которых базовая, с известными свойствами рядов температуры воздуха. В этом

Таблица 1

Коэффициенты линейных трендов ( $^{\circ}\text{C}/10$  лет) средней месячной  $T_{\text{Ср.}}$ , минимальной  $T_{\text{мин}}$  и максимальной  $T_{\text{макс}}$  температуры воздуха отдельных месяцев, а также среднего квадратического отклонения (СКО),  $b$ , представленного вместе со средним значением,  $\bar{\sigma}$ . Ст. “Академик Вернадский”, 1951-2010 гг.

| Величина                     | Месяцы года    |                |                 |                 |                |                |
|------------------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
|                              | 1              | 2              | 3               | 4               | 5              | 6              |
| $T_{\text{Ср.}}$             | 0,27**         | 0,28*          | 0,30* (0,13*)   | 0,60* (0,34**)  | 0,63* (0,37*)  | 0,93* (0,76*)  |
| $T_{\text{макс}}$            | 0,24**         | 0,11           | -0,04           | 0,25            | 0,90*          | 0,16           |
| $T_{\text{мин}}$             | 0,65*          | 0,83*          | 0,90*           | 1,30*           | 2,10*          | 2,84*          |
| СКО ( $\bar{\sigma}$ , $b$ ) | 1,15<br>-0,03  | 1,84<br>-0,04  | 2,45<br>-0,06   | 2,80<br>-0,08** | 3,12<br>-0,10* | 3,85<br>-0,10* |
| Величина                     | Месяцы года    |                |                 |                 |                |                |
|                              | 7              | 8              | 9               | 10              | 11             | 12             |
| $T_{\text{Ср.}}$             | 1,03* (0,81*)  | 0,98* (0,82*)  | 0,44*           | 0,34** (0,31**) | 0,12           | 0,13 (0,16)    |
| $T_{\text{макс}}$            | -0,11          | -0,27**        | -0,12           | -0,64*          | -0,10          | 0,05           |
| $T_{\text{мин}}$             | 2,80*          | 2,30*          | 1,76*           | 1,46*           | 1,20*          | 0,62*          |
| СКО ( $\bar{\sigma}$ , $b$ ) | 4,37<br>-0,12* | 3,67<br>-0,14* | 3,18<br>-0,08** | 1,95<br>-0,08** | 1,08<br>-0,10* | 0,62<br>-0,06  |

*Примечание.* Вместе со значением коэффициентов трендов звездочками представлена достоверность аппроксимации: \* – коэффициент значим на 95 % уровне значимости, \*\* – на 90 % уровне значимости. Для  $T_{\text{Ср.}}$  в скобках для отдельных месяцев с выявленной неоднородностью представлен коэффициент тренда однородного ряда.

исследовании роль базовой играла станция “Академик Вернадский”, поскольку место и методика измерений не изменялись, и таким образом, наличие климатологической неоднородности для рядов температуры воздуха практически исключается.

Поскольку одной из задач исследования является анализ регионального потепления, необходимо было выяснить, не изменит ли исключение неоднородных членов ряда величину и/или знак тренда, а также выявить причину неоднородности – статистического или климатологического происхождения. При наличии статистической неоднородности необходимо проанализировать условия атмосферной циркуляции и выявить вклад данного типа синоптических процессов в формирование климата в регионе.

Традиционно, в отечественной климатологии для проверки равенства двух средних по близости дисперсий сравниваемых рядов используется t-критерий Стьюдента при условии, что исходные данные соответствуют нормальному распределению [10]. Существуют альтернативы критерию Стьюдента для ситуации с неравными дисперсиями, что характерно для станций исследуемого региона. Кроме того, размер выборок во многих случаях незначительно отличается, и в этом случае применяется упрощенная формула расчетов двухвыборочного t-критерия:

$$t = \frac{|M_1 - M_2|}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}}},$$

где  $M_1, M_2$  – средние значения,  $\sigma_1, \sigma_2$  – стандартные отклонения,  $N_1, N_2$  – размеры (длина) двух выборок. Количество степеней свободы рассчитывается как  $f = N_1 + N_2 - 2$ .

Полученное значение сравнивается с критическим его табличным значением, для установленного уровня значимости и числа степеней свободы. Если  $t < t_{\text{крит}}$ , то нулевая гипотеза  $H_0$  о принадлежности к одной генеральной совокупности не отвергается.

### Многолетнее изменение температуры воздуха в районе Антарктического полуострова

По данным станции “Академик Вернадский” наибольшую тенденцию к потеплению отражают средняя месячная и минимальная температура воздуха (см. табл. 1). С другой стороны, коэффициент тренда максимальной температуры отрицателен в марте, августе-ноябре, то есть амплитуда температуры воздуха уменьшается в большинстве месяцев года. В течение года не было отмечено ни одного месяца, в котором тренд

средней месячной температуры воздуха изменил знак, только лишь снижалась его величина или уровень значимости тренда – в одном случае. Например, в апреле коэффициент тренда снизился с 0,60 до 0,34 °C/10лет, но тренд остался значимым на 90 %-уровне значимости. В других месяцах исключение неоднородных членов не привело к снижению уровня значимости коэффициентов трендов. Таким образом, исключение неоднородности не снижает оценок достоверности многолетних изменений температуры воздуха, а значит можно утверждать, что тенденция к потеплению значима в этом регионе.

Большинство нарушений неоднородности отмечено в последовательные месяцы: с марта по июнь 1953 г., июне 1958 г., апрель, май и июль 1959 г., а также июнь-август 1987 г. Наличие неоднородных членов в 1950-е годы в течение смежных месяцев или сезонов является указанием на наличие статистической неоднородности, в связи с уникальностью климатических условий и сохранением типа атмосферной циркуляции, очевидно отличительной от современной. Немаловажно, что для тех же месяцев обнаружена неоднородность для ст. Беллинсгаузен.

Один из редких моментов неоднородности в течение периода современного потепления отмечен в зимние месяцы 1987 г., и также связан с аномальными атмосферными процессами, приводящими к похолоданиям. Атмосферные процессы этого года, который является исключением на фоне более теплых лет современного периода, связаны с развитием явления Эль-Ниньо, которое вносит существенный вклад в степень экстремальности климата региона [8, 16, 19, 21].

Однако нас интересовала не столько формальная статистическая процедура проверки однородности ряда, сколько причина появления выбросов. На рис. 2 вместе со средней месячной температурой воздуха и рассчитанным критерием Стьюдента, представлен зональный градиент атмосферного давления между 60 и 70° ю. ш. в секторе 60-90° з. д., т.е. непосредственно примыкающем к западному побережью Антарктического полуострова. В годы регистрации неоднородности (1953, 1959) критерий Стьюдента превышает порог, соответствующий отвержению нулевой гипотезы об однородности, и кроме того, зональный градиент принимает отрицательные значения, т.е. в эти годы преобладал восточный или юго-восточный перенос, обеспечивший существенное похолодание.

Таким образом, в первом приближении была решена задача о происхождении неоднородности, в данном случае из-за уникальной циркуляции,

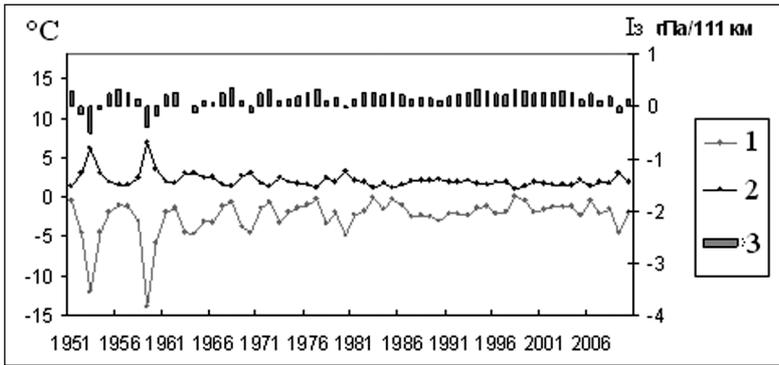


Рис. 2. Исходный ряд средней месячной температуры воздуха (1, °С), станция “Академик Вернадский”, критерий Стьюдента (2), значение зонального индекса циркуляции  $I_z$  (3, гПа/111 км), апрель

которая преобладала в отдельные годы в регионе. Отметим, что в современную климатическую эпоху обнаруживается выравнивание положительного тренда температуры воздуха, и отдельные годы, как например 2009 г., характеризуются похолоданием, однако не столь существенным, как в первые десятилетия наблюдений.

Отметим также, что нас, прежде всего, интересовали годы регистрации подобных аномалий температуры воздуха на пространстве исследуемого региона, чтобы изучить типы атмосферной циркуляции, и сопоставить вероятность их про-

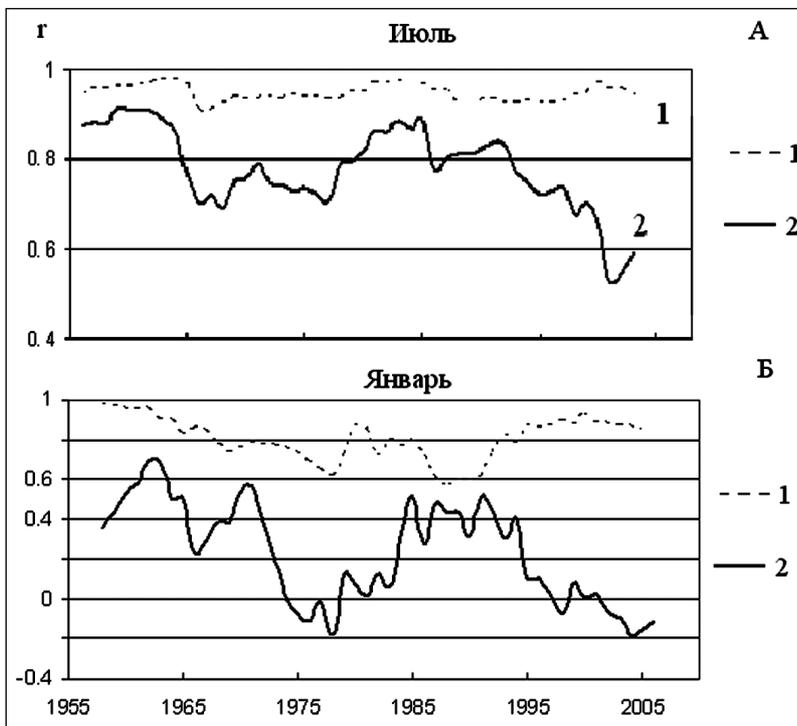


Рис. 3. Коэффициент корреляции средней месячной температуры между станциями Вернадский-Розера (1), Вернадский-Беллинсгаузен (2), январь  
*Рассчитан для постоянного окна 15 лет, со смещением 1 год. Значимый коэффициент корреляции 0,64*

явления между различными климатическими периодами. Выяснение таких ситуаций поможет установить причину изменения климата региона, а также показывает климатический потенциал с вероятностью подобных процессов и в будущем. Поэтому проводилось исследование однородности рядов между парами станций. Поскольку в районе станции “Академик Вернадский” нет других станций с аналогичным по длительности

непрерывным рядом, в качестве базовой могут служить станции Беллинсгаузен и Розера.

Ранее было показано, что ст. Беллинсгаузен расположена в пограничном районе радиуса значимой корреляции, и имеется выборочная корреляция с разными станциями в разные десятилетия. Таким образом, данные этой станции не во все периоды могут быть использованы для климатологической обработки. Скользящая корреляция, выполненная для временного окна 15 лет, показывает наибольшую связность в 1951-1965 гг. (0,9), однако затем она снижается до 0,6 к концу 1980-х (рис. 3а). Таким образом, в условиях современного климата корреляция вновь понижается и это нужно учитывать при выборе базовой станции. Как уже упоминалось, наилуч-

шая степень корреляционной связи по отношению к ст. “Академик Вернадский” существует со ст. Розера и она устойчива во времени и значима даже для коротких временных промежутков в масштабе десятилетия.

Подобные подвижки корреляции отмечены в летний сезон (январь) для пары станции Вернадский-Беллинсгаузен. Из рис. 3б видно общее снижение корреляции в конце 1970-х гг. с возрастанием к 1991-2000 гг. Как и в зимний сезон, летом наилучшая корреляция температуры воздуха на ст. “Вернадский” имеется с данными ст. Розера, она более устойчива во времени, оставаясь статистически значимой. При этом ее минимумы совпадают с максимумами корреляции со станцией Беллинсгаузен, и современный период (потепления) характеризуется поворотом радиуса корреляции к югу в летний сезон.

Таким образом, временной ход корреляции средней месячной температуры между отдельными пара-

ми станцій (ближайшими к ст. “Вернадский”) для зимнего и весеннего сезонов показывает неоднородность связей в отдельные промежутки времени, хотя в целом связь лучше зимой. В современных условиях корреляционная связь со ст. Розера остается значимой и усиливается, а со ст. Беллинсгаузен – уменьшается ниже порога статистической значимости зимой и до отрицательных значений летом. Возможным объяснением может служить изменение циркуляции атмосферы, со смещением траекторий циклонов к северу, с прохождением над станцией Беллинсгаузен их центральных или северных частей, в то время, как станции “Вернадский” и Розера располагаются в южной части циклонов, с большим влиянием антарктической циркуляции. Также можно сделать вывод о более однородной циркуляции в зимний период, т.к. степень пространственной связи между станциями в целом выше в течение зимних месяцев.

Проанализируем изменения средней годовой температуры во второй половине XX – начале XXI ст., когда повышение температуры воздуха района Антарктического полуострова достигло максимума. Наибольшее потепление фиксируется у западного побережья Антарктического полуострова, между 65-70° ю. ш., по данным станций “Академик Вернадский” и Розера (Великобритания), коэффициенты линейного тренда 0,53 и 0,49°С/10 лет.

На примере станции Вернадский и Розера видно, что современное потепление разделено периодом относительного похолодания в начале и середине 1970-х гг. (рис. 4). Как отмечалось выше, такие колебания обусловлены климатическим глобальным сдвигом середины 1970-х гг., вследствие смены знака Эль-Ниньо [14, 20]. На ст. Оркадас также имеются проявления этого сдвига, однако после него повышение температуры воздуха несколько усилилось.

Менее четко климатический сдвиг в середине 1970х гг. проявляется на станции Эсперанца, Беллинсгаузен и Бельграно. Повышение температуры воздуха

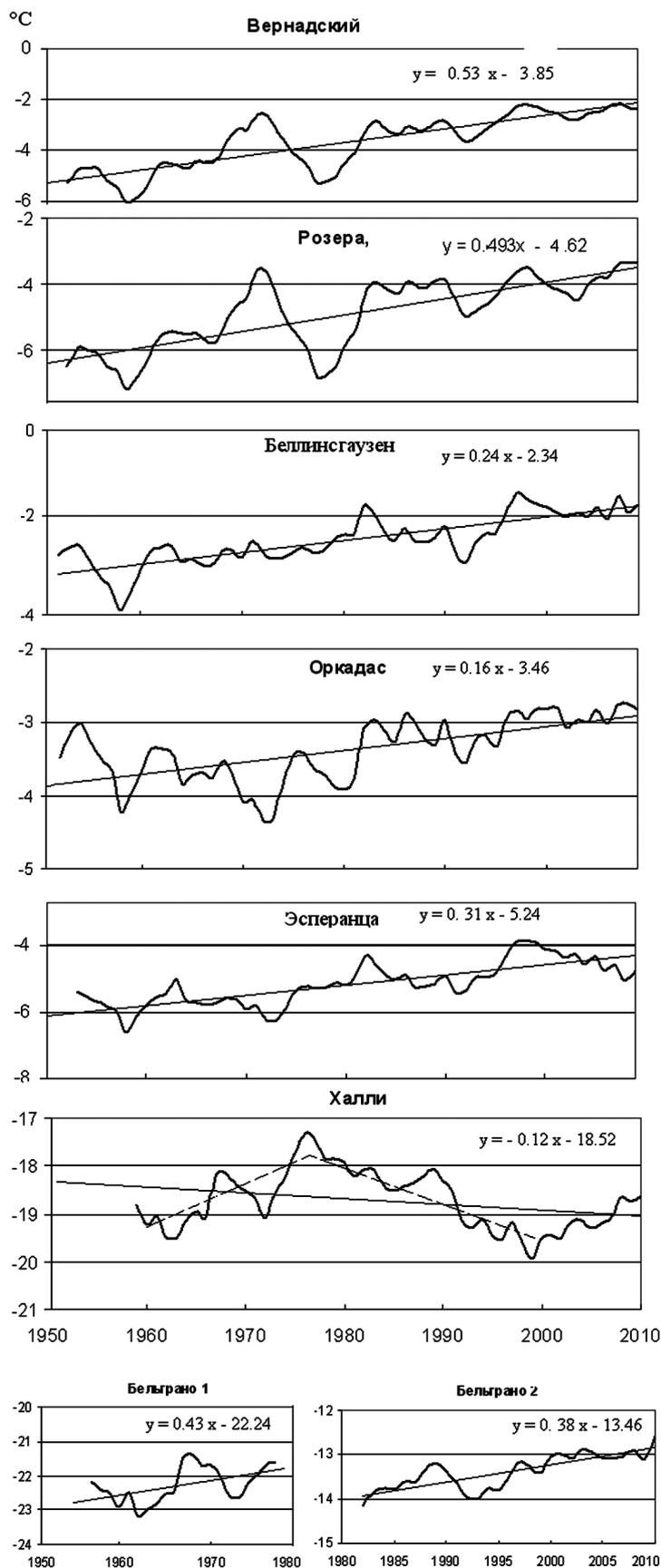


Рис. 4. Многолетнее изменение средней годовой температуры (°С) на станциях Антарктического полуострова, а также Халли (сглаженное 5-летнее среднее, линейный тренд) Для станций Халли пунктиром показаны линейные тренды в отдельные климатические периоды

на двух последних станциях практически равномерное с 1971 г.

Если на станциях Вернадский, Розера и Оркадас повышение температуры в целом согласованно, то значительный тренд по данным станции Бельграно нуждается в проверке, а соседних станций с длительным рядом нет. Можно провести сопоставление с данными климатических моделей, например семейства IPCC AR4 [12].

На ст. Халли, расположенной на восточном побережье моря Уэдделла, также имеется смена знака тренда в 1976 г., однако обратная – к похолоданию, и поскольку климат станции напрямую связан с влиянием континента, нельзя утверждать, что это есть проявление климатического сдвига. Кроме того, современная смена знака тренда в конце 1990-х отмечена на ст. Эсперанца (к похолоданию) и Халли (к потеплению).

Однако, в течение 2001-2010 гг. ход средней годовой температуры воздуха на станциях Антарктического полуострова показывает замедление повышения температуры воздуха или даже его прекращение, особенно заметное по данным станций Беллинсгаузен и Эсперанца. Таким образом, в регионе намечается новый климатический сдвиг, а возможной причиной является очередная смена знака Эль-Ниньо.

Подобие многолетних изменений отмечается на станциях, расположенных в различных орографических условиях – одну группу станций составляют “Академик Вернадский”, Розера и Беллинсгаузен, другую – Оркадас, Эсперанца, Бельграно. Таким образом, значительная разница величины потепления свидетельствует о различии циркуляционного режима к западу и к востоку от Антарктического полуострова, которая усиливается различными физико-географическими особенностями.

Данные ст. Оркадас, наиболее удаленной от континентов, и Эсперанца показывают в среднем меньшие значения потепления, чем на первых двух станциях. Различный сезонный ход значительных трендов температуры воздуха

на станциях региона расположенных в разных географических зонах, связан с наличием центров действия пониженного давления в морях Беллинсгаузена и Уэдделла и разделяющего их гребня вблизи меридиана 60-70° [3, 5].

И, наконец, исследуем столетний ряд температуры воздуха и атмосферного давления по данным ст. Оркадас, а также индекса Эль-Ниньо. Из рис. 5 следует, что ход атмосферного давления на ст. Оркадас характеризуется хорошо выраженной периодичностью около 60 лет, причем одна часть цикла приходится на период относительного похолодания, а другая – на период потепления. Столетний ход средней годовой температуры воздуха на ст. Оркадас показывает две фазы повышения температуры воздуха (кроме периодов 1905-1930, 1961-1980 гг.). Второй эпизод потепления во второй половине столетия отмечен с середины 1970-х г. Начиная с этого десятилетия, прослеживается воздействие глобального потепления, и, как указывалось выше, начало периода современного потепления связывается с подвижкой глобального климата, в связи с усилением теплой фазы Эль-Ниньо [13]. Это изменение хорошо видно на нижнем графике рис. 5, где представлено изменение индекса Южного колебания. Значимая асинхронная корреляция индекса Южного колебания существующей

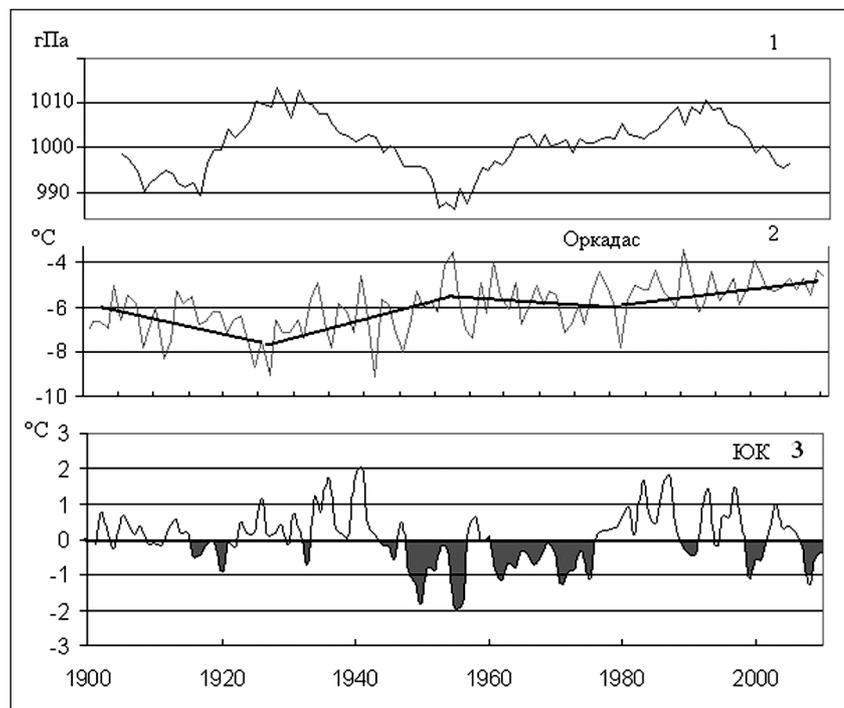


Рис. 5. Столетний ход атмосферного давления, гПа (1) и средней годовой температуры воздуха (°C) на ст. Оркадас (2), а также средней годовой аномалии индекса Южного Колебания (°C, 3), 1904-2010 гг.

Для средней годовой температуры воздуха приведен линейный тренд, с точками перегиба по отдельным климатическим периодам. Для графиков 1 и 4 применено сглаживание с фильтром 11 лет

ет со средней годовой температурой воздуха на ст. Оркадас, для первого 60-летнего периода 0,46, и второго 60-летнего периода 0,57, с некоторым сдвигом во времени, до 7 лет.

Таким образом, предполагается, что потепление как в начале, так и в конце XX столетия в районе Субантарктических островов связано с проявлением глобальных изменений. Отметим также общую тенденцию к убыванию индекса в последнее десятилетие, с чередованием лет с положительной и отрицательной аномалиями.

При этом первая фаза потепления в XX веке совпадает с фазой понижения давления. Смена знака температурного тренда в середине 1950-х гг. совпадает со сменой знака тенденции атмосферного давления к возрастанию, однако вторая фаза современного потепления происходит на еще одной смене знака давления, к понижению, в конце 1990-х г. Таким образом, в конце XX ст. нарушается взаимосвязь многолетней тенденции основных метеорологических величин.

#### Обсуждение

Температура воздуха в исследуемом районе подвержена значительным колебаниям, интенсивность которых возрастает от лета к зиме вследствие усиления взаимодействия между морской и континентальной воздушными массами. Большие колебания температуры воздуха в отдельные месяцы делают значительным их вклад в величину тренда, что может снизить достоверность линейной аппроксимации. Поэтому для сравнения оценок многолетнего хода температуры воздуха между отдельными месяцами и сезонами целесообразно анализировать преобразованные ряды, нормированные на амплитуду [8]. Так, проведенный анализ показал выраженный сезонный ход потепления для ст. “Академик Вернадский”, с максимумом в летние и зимние месяцы, и минимумом — в переходные.

Необходимо учитывать возросшую степень обусловленности климата Антарктического полуострова Эль-Ниньо — Южным колебанием в современных климатических условиях. При построении схем прогноза необходимо учитывать наличие асинхронной связи между индексом Эль-Ниньо и средней месячной температурой воздуха на станции региона, в связи с запаздыванием сигнала на сезонном временном масштабе.

Из литературы известно, что понижение давления в южной полярной области усиливает западный перенос, как следствие преобладания теплой фазы Эль-Ниньо [18]. Однако, как показано в [5, 7], в конце XX — начале XXI ст. проис-

ходят новые изменения, в частности смена знака многолетнего тренда атмосферного давления на возрастание, а также связанное с этим изменение знака регионального индекса циркуляции, что в целом обуславливают изменение тенденции температуры воздуха, в частности прекращение дальнейшего потепления.

#### Выводы

Большинство проявлений статистической неоднородности в рядах температуры воздуха связано со значительными похолоданиями вследствие уникальных условий атмосферной циркуляции. При этом исключение неоднородных членов не изменяет общей тенденции к повышению температуры воздуха, то есть потепление статистически значимо в районе исследования и вызвано устойчивым изменением одного или нескольких климатообразующих факторов.

Наиболее интенсивное повышение приземной температуры воздуха в конце XX — начале XXI ст. регистрируется у западного побережья Антарктического полуострова, в том числе по данным ст. “Академик Вернадский”. На фоне общей тенденции к потеплению отмечены более короткопериодные внутридесятилетние колебания температуры воздуха, связанные с Эль-Ниньо. Современное региональное потепление происходит на фоне повышения индекса Южного колебания, проявившегося в виде известной климатической подвижки в 1970-х гг. вследствие повышения температуры поверхности Тихого океана.

В последнее десятилетие (2001–2010 гг.) на большинстве станций региона наметилась тенденция к замедлению повышения средней годовой температуры воздуха и средней температуры отдельных месяцев.

\* \*

1. *Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е.* Климатические изменения в Арктике и северной полярной области // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2010. — №1(84). — С. 67-80.
2. *Грищенко В.Ф., Тимофеев В. Е.* Реакции компонентов гляциосферы на изменения климата в районе Антарктического полуострова // Укр. Антарктич. журнал. — 2005. — № 3. — С. 99-107.
3. *Груза Г.В., Ранькова Е.Я., Рочева Е.В.* Крупномасштабные колебания атмосферной циркуляции в Южном полушарии и их влияние на изменение климата в некоторых регионах планеты в XX столетии // Метеорология и гидрология. — 2007. — N. 7. — С. 5-17.
4. *Кононова Н.К., Луценко О.В., Макарова М.Е., Орлов И.А.* Циркуляция атмосферы в Антарктике в конце

- XX – начале XXI веков // Материалы гляциологических исследований. – 2007. – Вып.103. – С. 142-147.
5. *Мартазинова В.Ф., Тимофеев В.Е., Иванова Е.К.* Атмосферная циркуляция Южной полярной области и климат Антарктического полуострова (монография). – К. – 2010. – 92 с.
  6. *Масленников В.В.* Климатические колебания и морская экосистема Антарктики. – М: Изд. ВНИРО. – 2003. – 285 с.
  7. *Соколов О.В., Мезенцева Л.И.* Климатические тренды параметров общей циркуляции атмосферы в Южном полушарии во второй половине XX века // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2007. – №2 (76). – С. 26-48.
  8. *Тимофеев В.Е.* Некоторые особенности многолетнего изменения температуры воздуха на Антарктическом полуострове // Фізична географія та геоморфологія, 3(64), 2011. – С. 169-176.
  9. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М.* Изменения климата Арктики и Антарктики – результат действия естественных причин // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2007. – №2(85). – С. 52-61.
  10. *Школьный Е.П., Гончарова Л.Д., Миротворская Н.К.* Методы обработки и анализа гидрометеорологической информации. – О.: ТЕС. – 2000. – 420 с.
  11. *Connolley W.M.* Variability in annual mean circulation in Southern High latitudes // Climate Dynamics. – 1997. – № 13. – P. 745-756.
  12. *Fogt R.L., Perlwitz J., Monaghan A.J., Bromwich D.H., Jones J.M., Marshall G.J.* Historical SAM variability. Part II: 20th Century SAM variability and trends from reconstructions, observations, and the IPCC AR4 models. J Clim. – 2009. –doi:10.1175/2009JCLI2786.
  13. *Huang H. P., Seager R. Kushnir Y.* The 1976/77 climate transition in precipitation over the Americas and the influence of tropical sea surface temperature. Climate Dynamics. – 2005. – 24(7-8). – P. 721-740.
  14. *Stammerjohn S.E., Martinson D.G., Smith RC Yuan X., Rind D.* Trends in Antarctic annual sea ice retreat and advance and their relation to EL Nino-Southern Oscillation and Southern Annular Mode variability // J Geophys Res. – 2008. – 113. doi:10.1029/2007JC004269.
  15. *Ingolfsson O., Hjort C.* Glacial history of the Antarctic Peninsula since the Last Glacial Maximum – a synthesis // Polar Research. – 2002. –N 21(2). – P. 227-234.
  16. *Kwok R, Comiso JC (2002)* Spatial patterns of variability in Antarctic surface temperature: connections to the Southern Hemisphere Annular Mode and the Southern Oscillation. Geophys Res Lett 29. doi:10.1029/2002GL015415.
  17. *Marshall G.J, Battista S., Naik S.S., Thamban M.* Analysis of a regional change in the sign of the SAM-temperature relationship in Antarctica // Climate Dynamics. – 2011. – 36. – P. 277-287.
  18. *Turner J.* The El-Nino and Antarctica // Int. J. of Climatol. – 2004. – V. 24. – P. 1-32.
  19. *Turner J, Bindshadler R, Convey P, di Prisco G. et al.* Antarctic Climate Change and the Environment. SCAR, Scott Polar Research Institute. – Cambridge. – 2009. – 526 p.
  20. *Trenberth K.E., Hoar T.* The 1990–1995 El-Nino –Southern Oscillation events: Longest on Record // Geoph. Res. Letter. – 1996. – N 23. – P. 57-60.
  21. *Trenberth K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. et al.* Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge UK and New York, NY, USA. – 2007. – 23-432 p.
  22. *Van den Broeke M.R, van Lipzig N.P.* Response of wintertime Antarctic temperatures to the Antarctic Oscillation: results of a regional climate model. In: Domack E, Leventer A, Burnett A, Bindshadler R, Convey P, Kirby M (eds) Antarctic Peninsula climate variability: historical and paleoenvironmental perspectives // Ant Res Ser. – 2003. – 79. – AGU, Washington, DC. – P. 43-58.

*Український науково-дослідний  
гідрометеорологічний інститут, Київ*

### **В.Е. Тимофеев**

#### **Багаторічна зміна температури повітря в районі Антарктичного півострова та її причини**

*Наведено оцінки багаторічної зміни температури повітря в районі Антарктичного півострова з деталізацією по станції “Академік Вернадський”. Велику увагу приділено оцінці однорідності рядів. За даними останнього десятиліття відмічено припинення подальшого зростання температури повітря, на тлі зменшення мінливості температури повітря на окремих станціях порівняно з серединою XX ст. Серед причин змін регіонального клімату вказано на атмосферну циркуляцію та Ель-Ніньо.*

**Ключові слова:** потепління, клімат, температура повітря, кореляція, тренд, Ель-Ніньо.

### **V.E. Tymofeyev**

#### **Multi-years' changes in the air temperature at the Antarctic Peninsula and the possible reasons**

*The estimates of long-term changes in air temperature in the Antarctic Peninsula region are presented, with details on Academic Vernadsky station. Much attention is paid to the assessment of homogeneity in timeseries. Cessation of the further growth in the air temperatures is detected by the data of the latest decade, and significant correlations, on the background of decrease in the air temperature variability at individual stations since the mid-twentieth century. Among the causes of regional climate atmospheric circulation and El Niño are considered.*

**Keywords:** warming, climate, air temperature, correlation, trend, El Niño.