

УДК 551.583

## Зміни кліматичних тенденцій в районі Антарктичного півострова

В. О. Кравченко, О. М. Євтушевський \*

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Оцінки зв'язків зимової температури в районі Антарктичного півострова з тропічними температурними аномаліями свідчать про довготривалі зміни в інтенсивності тропічних впливів. Ці зміни пов'язані зі стійкістю меридіонального ланцюга стаціонарних планетарних хвиль, вздовж якого розповсюджуються тропічні збурення в секторі Тихого океану, впливаючи на клімат Антарктичного півострова. Період найбільш відчутних тропічних ефектів припадає на 1980-і–1990-і роки, і в цей час спостерігалися найбільш швидкі темпи зимового потепління на станції Фарадей/Вернадський. Одна із складових змін зимової температури на півострові — 16-річна періодичність з амплітудою близько 1°C — також дає внесок у регіональні зміни клімату.

**Ключові слова:** Антарктичний півострів, зимова температура, тропічні температурні аномалії, Тихий океан, зміни клімату

© В. О. Кравченко, О. М. Євтушевський. 2017

**Вступ**

Потепління в районі Антарктичного півострова зареєстровано із середини 1950-х років, і найвища його швидкість спостерігалася в зимові місяці червень–серпень. На початок 2000-х зимове потепління тут досягло  $\sim 6^\circ\text{C}$ , а температурний тренд становив  $1.1^\circ\text{C}/10$  р. [4, 6, 12, 15]. В той же час, літні температури зростали в декілька разів повільніше,  $\sim 0.3^\circ\text{C}/10$  р. Для порівняння, глобальне потепління за 1956–2005 рр. відбувалося в середньому зі швидкістю  $\sim 0.1^\circ\text{C}/10$  р. [21].

Кліматичні зміни в районі Антарктичного півострова є особливо виразними на фоні глобальних змін, як видно з рис. 1. Це дані аналізу поверхневих температур GISTEMP NASA (<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/maps/> [10]). У другій половині 20-го століття зимове потепління на Антарктичному півострові було найвищим на земній кулі (показано стрілкою на рис. 1, зліва). В останнє десятиліття у всьому антарктичному регіоні спостерігається зворотна тенденція — зниження зимової температури. На полярних широтах Антарктичного півострова  $\sim 70^\circ\text{S}$  від'ємний тренд у 2006–2015 рр. становив близько  $-1^\circ\text{C}/10$  р. (стрілка на рис. 1, справа).

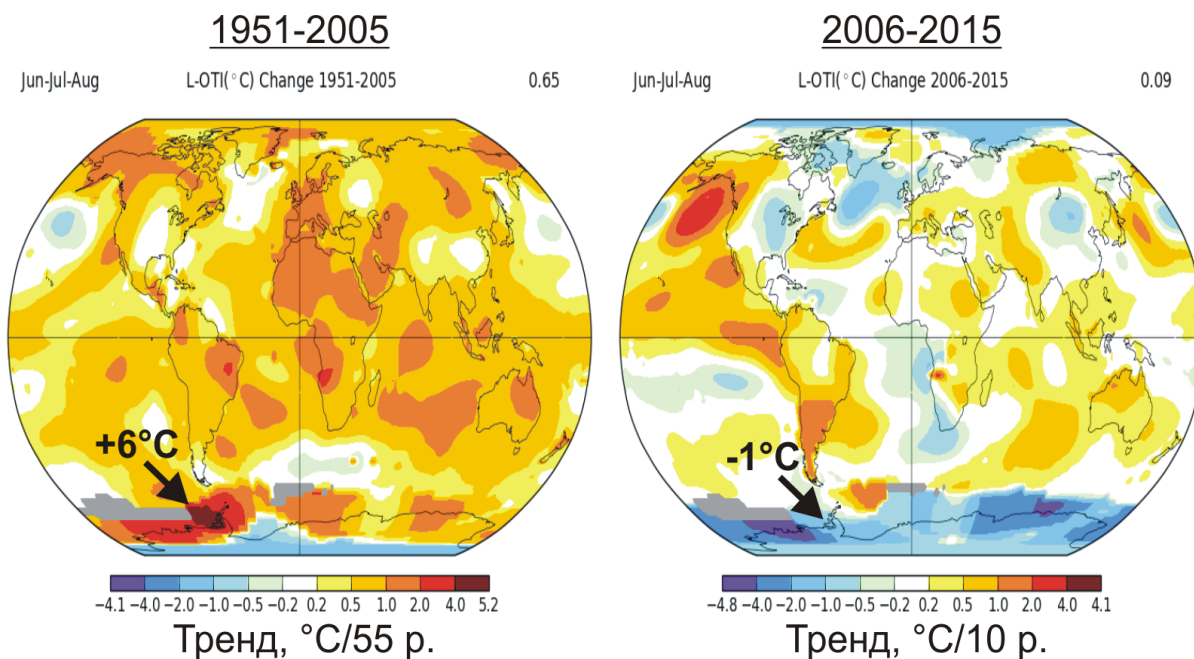
На станції Фарадей/Вернадський (Великобританія: 1950–1995 рр. /Україна: з 1996 р.), розташованій у західній частині Антарктичного півострова, зимовий температурний тренд за період 1950–2005 рр. дорівнював  $1.05 \pm 0.25^\circ\text{C}/10$  р. (пунктирна пряма на рис. 2), тоді як за період 1950–2016 рр.  $0.91 \pm 0.36^\circ\text{C}/10$  р. Наведені значення трендів є статистично значущими на рівні  $2\sigma$ . Зниження тренду у другому випадку свідчить про внесок останнього десятиліття у

гальмування довготривалого потепління. Це видно з ходу суцільної кривої на рис. 2 — довготривале лінійне зростання зимової температури (пунктирна лінія) припинилося у 2000-і роки. Помітне навіть деяке, статистично незначуще, зниження температури. Ці оцінки отримано за даними проекту SCAR READER ([19]; див. веб-сторінку Британської антарктичної служби <https://legacy.bas.ac.uk/met/READER/data.html>). За іншими оцінками середньорічні температури на півострові з кінця 1990-х років знижуються зі статистично значущою швидкістю —  $0.47 \pm 0.25^\circ\text{C}/10$  р., а найбільш швидке похолодання припадає на літо у південній півкулі [5]. Згідно з [13], відносно похолодання останнього десятиліття найбільш помітне у північній частині півострова в осінній та зимовий сезони. Тенденції, відзначені в [5, 13], загалом, узгоджуються з даними для останнього десятиліття на рис. 1 (справа).

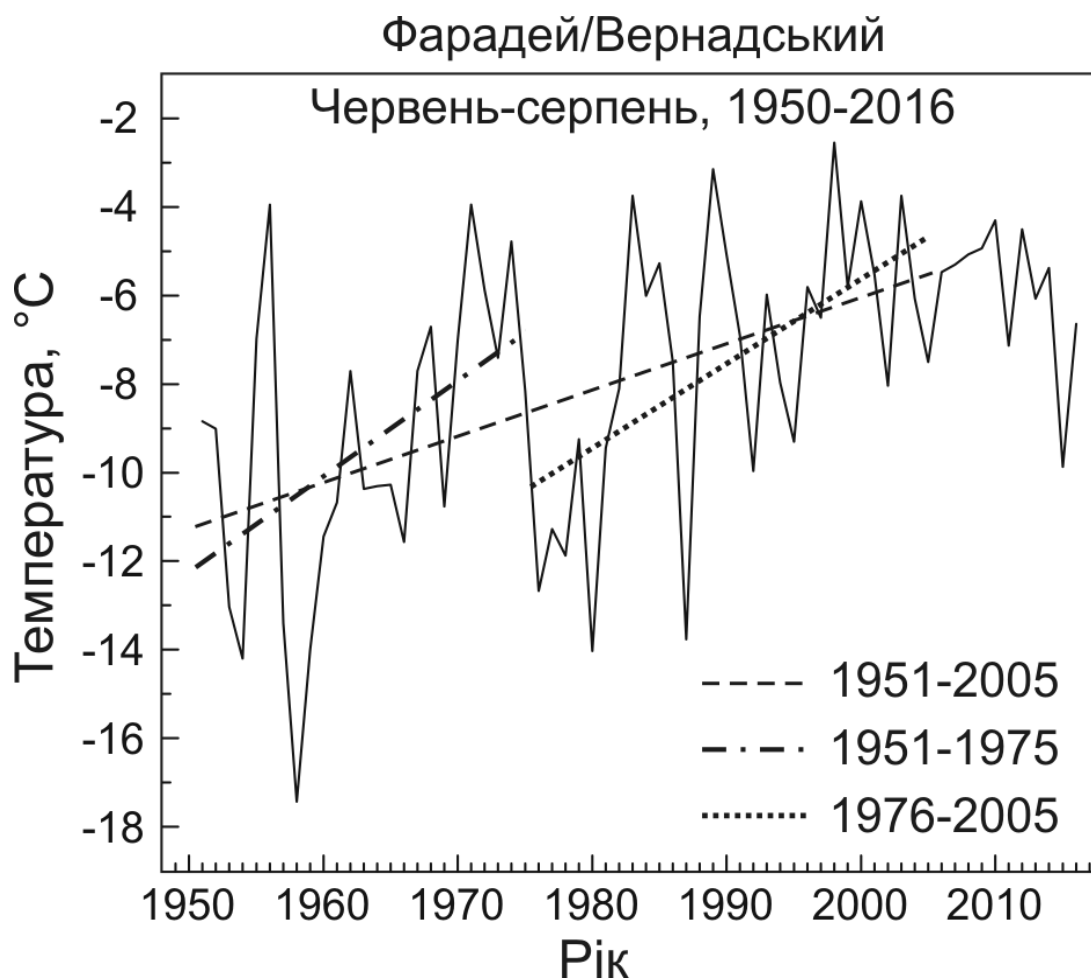
Різне зниження зимової температури на станції Фарадей/Вернадський відбулося між першою та другою половинами 1970-х років, в середньому, від  $-6^\circ\text{C}$  до  $-11^\circ\text{C}$  (рис. 2). До та після середини 1970-х потепління відбувалося із значно більшою швидкістю, ніж в середньому для другої половини 20-го століття ( $1.1^\circ\text{C}/10$  р.) за попередніми публікаціями:  $2.2 \pm 1.7^\circ\text{C}/10$  р. та  $1.9 \pm 1.1^\circ\text{C}/10$  р., відповідно, у 1950–1975 та 1976–2005 рр. (штрих-пунктирна та точкова лінії на рис. 2). У нерівномірність потепління в районі Антарктичного півострова дає внесок і періодична складова: 30-річна періодичність відзначена за змінами середньорічної температури на станціях півострова [3], а 16-річний період виявлено у коливаннях зимової температури [2, 7]. На коротших часових масштабах спостерігаються впливи квазіперіодичних явищ Ель Ніньйо (2–8 років [1, 6, 20]).

Встановлено, що довготривалі температурні ко-

\*E-mail: o\_evtush@ukr.net



**Рис. 1.** Глобальний розподіл зміни зимової температури (для південної півкулі — червень–серпень) за 1951–2005 рр. (зліва) та за 2006–2015 рр. (справа) за даними аналізу поверхневої температури в Інституті космічних досліджень Годдарда (США), проєкт GISTEMP NASA (<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/maps/>)



**Рис. 2.** Міжрічні варіації (1950–2016 рр., суцільна крива) та лінійні тренди температури на станції Фарадей/Вернадський у зимові місяці червень–серпень

ливання спостерігаються і в глобальних масштабах. З 1850 р. відзначено три періоди глобального зростання температури, яке двічі припинялося та змінювалося тенденцією глобального похолодання: в кінці 19-го століття та в 1940-х–1950-х рр. [21]. Ознаки припинення потепління спостерігаються також з початку 21-го століття, що видно і з порівняння розподілів температурних трендів для зимового сезону на рис. 1 (зліва та справа). Таким чином, глобальне потепління носить ступінчастий характер, який пояснюють поєднанням антропогенних впливів, змін сонячної активності та природних коливань кліматичної системи [1, 21].

Регіональні кліматичні зміни пов'язують із змінами атмосферної циркуляції, які у південній півкулі значною мірою спричиняються варіаціями так званих кліматичних мод [1, 5]: аномалій температури (явища Ель Ніньйо) та тиску (Південне коливання) — ЕНПК — у тропіках, різниці тиску між середніми та високими широтами (Південна кільцева мода, ПКМ), а також великомасштабних квазістаціонарних хвильових структур — меридіональних (Тихоокеанічна–Південно-американська мода, ТПАМ) та зональних (квазістаціонарні хвилі із зональними хвильовими числами 1–3, КСХ1–КСХ3).

Визначено, що на потепління в районі Антарктичного півострова у літній сезон впливає посилення зональної циркуляції через висхідний тренд індексу ПКМ [17]. У свою чергу, індекс ПКМ виявився залежним від тенденції збільшення площі озонної діри у 1980–1990-і роки. Весняна аномалія ПКМ та циркуляції у стратосфері, яка виникає при зниженні температури внаслідок втрат озону, має властивість повільно знижуватися із стратосфери в тропосферу, викликаючи посилення західного вітру на поверхні у літні місяці. Цей процес супроводжується перенесенням теплих повітряних мас з океану в бік півострова.

За даними [8], в осіннє потепління на півострові дає внесок тропічний вплив у секторі Тихого океану, де в цей сезон спостерігається помітне довготривале зростання поверхневої температури. Аномалії в температурі поверхні океану (ТПО) передаються меридіональним ланцюгом хвиль у високі широти та впливають, зокрема, на температурний тренд у районі півострова. Такий вплив призводить до зменшення площі морського льоду восени, особливо на захід від півострова, з подальшим підняттям температури у зимовий та весняний сезони. В роботі [16] було відзначено, що у весняні місяці потепління є характерним для всієї західної Антарктики і воно також має джерелом тропічну частину Тихого океану та явища ЕНПК. Коливання ТПО та тропічної конвекції через хвильовий ланцюг ТПАМ досягають полярного регіону.

В цій роботі розглянуто температурні аномалії в районі Антарктичного півострова та проаналізовано можливі джерела довготривалих змін зимової температури.

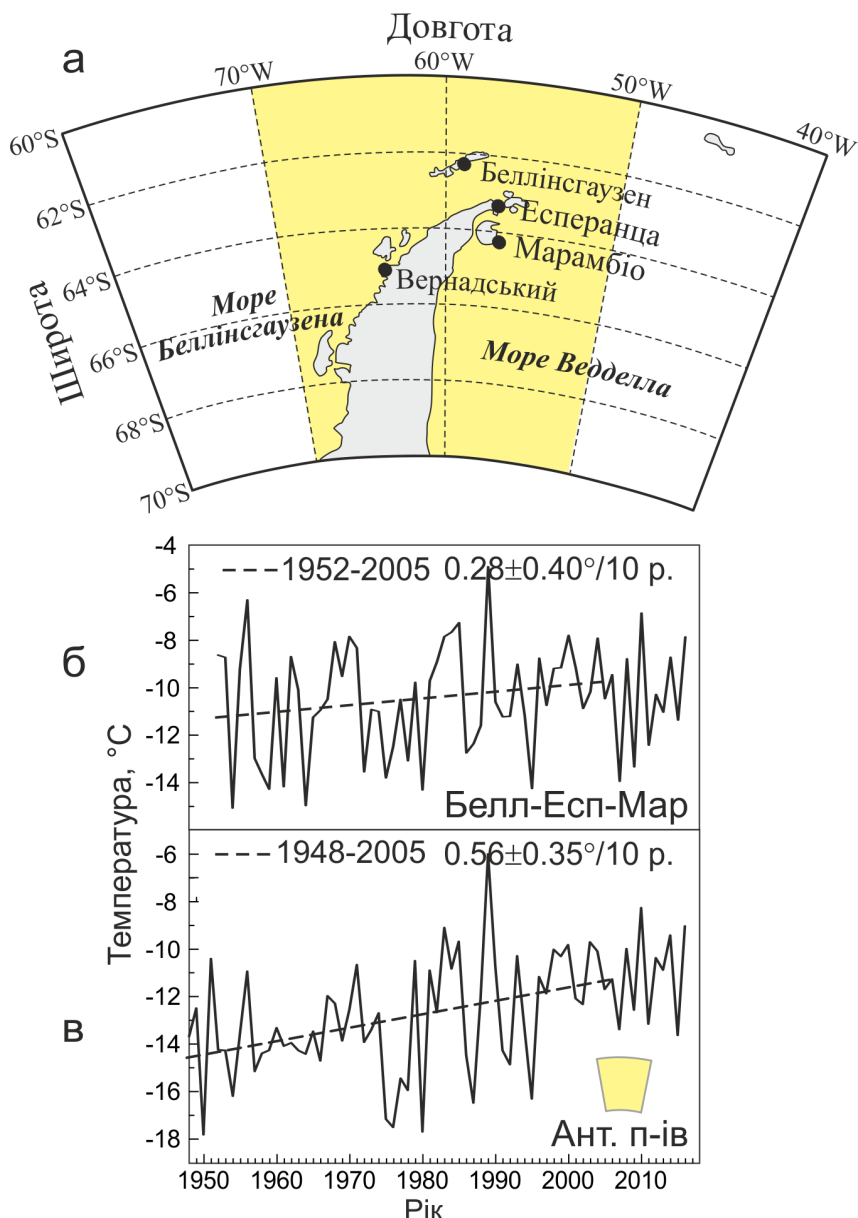
## Дані та методика аналізу

Використано дані вимірювань температури повітря на станціях Антарктичного півострова Фарадей/Вернадський, Беллінсгаузен, Есперанца та Марамбіо, які забезпечує проєкт READER (REference Antarctic Data for Environmental Research — стандартизовані антарктичні дані для досліджень навколишнього середовища) Наукового комітету з антарктичних досліджень SCAR (The Scientific Committee on Antarctic Research) [19]. Дані розміщені на вебсторінці Британської антарктичної служби <https://legacy.bas.ac.uk/met/READER/data.html>. Чотири вибрані станції (рис. 3 а) характеризуються найбільшою амплітудою 16-річного періоду коливань зимової температури [7]. Дані для першої станції показані на рис. 2, а усереднені для решти трьох — на рис. 3 б.

Для ототожнення міжрегіональних впливів і зв'язків температурні часові ряди зіставлялися з атмосферними параметрами південної півкулі з використанням даних реаналізу NCEP/NCAR (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>) та із застосуванням лінійної кореляції. Пошук періодичності у варіаціях метеоданих здійснювався із застосуванням спектрального аналізу.

За даними реаналізу для району Антарктичного півострова сформовано часовий ряд поверхневих температур ТАП, усереднених за зимові місяці червень–серпень у сегменті 50–70°W, 60–70°S (жовтий сегмент на рис. 3 а). Цей ряд значень ТАП охоплює період 1948–2016 рр. загальною тривалістю 69 років, він показаний на рис. 3 в. Для кореляційних співвідношень з часового ряду ТАП вилучався лінійний або поліноміальний тренд (в залежності від переважаючої лінійної або нелінійної тенденції у змінах середньомісячної температури) і одержаний ряд температурних аномалій, усереднених за червень–серпень, використовувався як індекс ТАП міжрічної змінності зимової температури в районі Антарктичного півострова. Криві на рис. 3 б та 3 в ілюструють міжрічні варіації та довготривалі зміни зимової температури. Можна відзначити висхідний тренд до початку 2000-х (статистично незначущий для трьох вибраних станцій, рис. 3 б) та припинення потепління або деяке похолодання у 2000-і–2010-і. Ці тенденції узгоджуються з даними для станції Фарадей/Вернадський (див. рис. 2) та з останніми опублікованими даними для Антарктичного півострова, згаданими у Вступі.

Темпи зимового потепління до 2005 р. в межах півострова знижуються, якщо рухатися на північ: 1.1°C/10 р. на станції Фарадей/Вернадський (див. рис. 2) та 0.28°C/10 р. для трьох станцій, розташованих північніше (рис. 3 б). Для виділеного сегменту навколо Антарктичного півострова (рис. 3 а) дані реаналізу показують тренд 0.56°C/10 р. (див. рис. 3 в). Проте щорічні



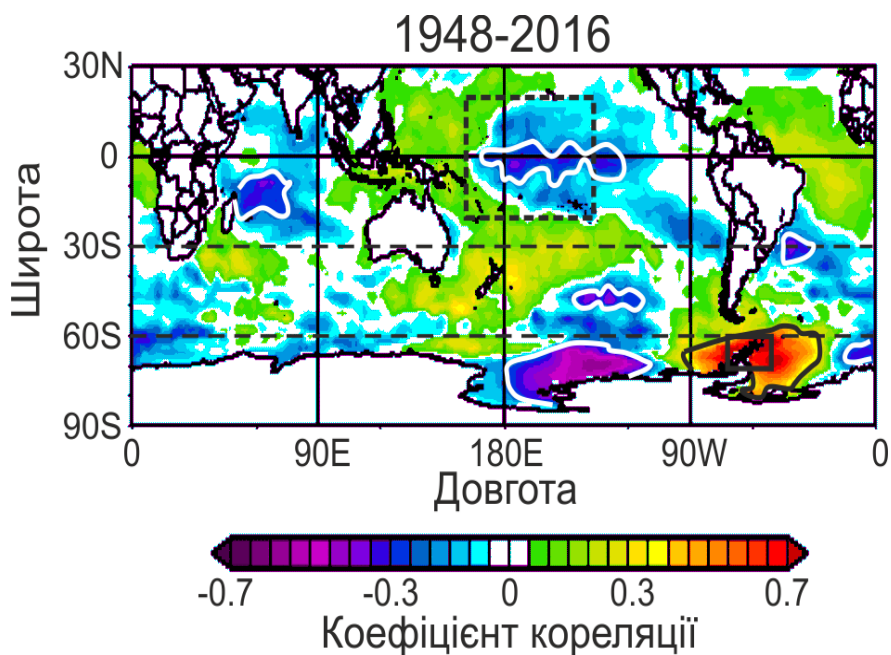
**Рис. 3.** а — станції Антарктичного півострова, вибрані для аналізу змін зимових температур (червень–серпень); б — варіації температури за усередненням для станцій Беллінсгаузен, Есперанца та Марамбіо; в — усереднена поверхнева температура ТАП для регіону Антарктичного півострова (дані NCEP–NCAR), позначеного жовтим сегментом на (а). На (б, в) пунктирними лініями нанесено температурні тренди, обчислені до 2005 р. і вказані над кожною кривою

зміни температури відбуваються досить узгоджено. Коефіцієнт кореляції індексу ТАП з рядом вимірювань на станції Фарадей/Вернадський  $r = 0.77$ , а з рядом для трьох станцій  $r = 0.70$ . Це свідчить про дію спільних факторів міжрічної змінності зимових температур у досліджуваному регіоні, і нижче наводяться оцінки внеску тропічних чинників у цю змінність

#### Зміни температурних тенденцій за кореляційними співвідношеннями

На рис. 4 показано географічний розподіл коефіцієнта кореляції між індексом ТАП та температурою поверхні океану у південній півкулі та тропіках для 1948–2016 рр. Зображення побудоване з викорис-

танням можливостей реаналізу для опрацювання даних, зокрема, для візуалізації кореляційних співвідношень (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/>). Для цього файл середньомісячних значень індексу ТАП було завантажено на ftp-сервер реаналізу (<ftp.cdc.noaa.gov>). З рис. 4 видно регіони, між якими існує тісний кореляційний зв'язок. У високих широтах виділяється диполь з додатною аномалією в розподілі кореляції в районі Антарктичного півострова й моря Ведделла та від'ємною аномалією в районі моря Амундсена (рис. 4, чорний та білий контури в субантарктичній зоні). Ця стаціонарна структура відома як Антарктичний диполь [22]. Відомо також, що температура в атлантичному секторі дипольної структури варіює у протифазі з



**Рис. 4.** Географічний розподіл коефіцієнта кореляції між індексом поверхневої температури повітря ТАП в районі Антарктичного півострова (суцільний квадрат) та температурою поверхні океану в південній півкулі та тропіках. Пунктирним прямокутником показано тропічну область Тихого океану, усереднену температуру якої за червень–серпень проіндексовано часовим рядом ТПО. Контурами виділено ділянки, де коефіцієнт кореляції досягає статистичної значущості з довірчою ймовірністю 95% ( $r = 0.24$ )

температурою в тропічній частині Тихого океану [22], що видно і з рис. 4.

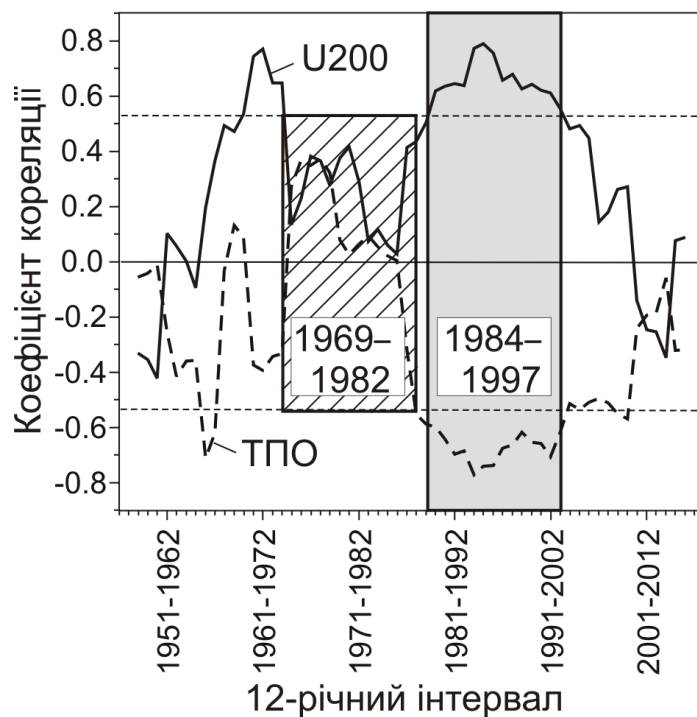
Для вказаної тривалості корельованих рядів статистично значущим з довірчою ймовірністю 95% є значення коефіцієнта кореляції  $r = 0.24$ . Згідно з кольоровою шкалою на рис. 4, статистично значущими є ділянки жовтого та червоного кольорів для додатної кореляції та темно-синього й фіолетового для від’ємної кореляції. Отже, результат рис. 4 свідчить, що між районами Антарктичного півострова, моря Амундсена та тропічного Тихого океану існує значущий кореляційний зв’язок, досить сильний між елементами Антарктичного диполя ( $r = \pm 0.6$ ) та слабший з тропіками ( $r = 0.3-0.4$ ). Оскільки дані рис. 4 характеризують середню картину міжрегіональних зв’язків за майже 70-річний період, доцільно визначити, які зміни у зв’язках відбувалися за цей час. На таку можливість вказують відзначені у вступному розділі довготривалі кліматичні зміни в окремих регіонах.

Останнім часом увага дослідників спрямована на визначення внеску тропічних температурних аномалій у зміни клімату в районі Антарктичного півострова. У цій роботі розглядається часовий ряд середніх для зимового сезону температур поверхні океану ТПО, сформований для ділянки, обмеженої пунктирним прямокутником на рис. 4 (20°N–20°S, 160–220°E). Це центральна тропічна ділянка Тихого океану (ЦТО), яка за довготним положенням близька до загальноприйнятого регіону Нін’яо 4 (160–210°E, 5°N–5°S; див., наприклад, <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/>) та охоплює вчетверо більший широтний інтервал. Зв’язок

ЦТО з Антарктикою був продемонстрований у роботі [18].

Тропічні теплові аномалії та пов’язані з ними зміни конвективної активності є джерелом планетарних хвиль, які викликають глобальні та регіональні відгуки в атмосферній циркуляції та кліматі. Вище відзначалося, що тропічна зона Тихого океану впливає на антарктичний регіон через меридіональний ланцюг хвиль ТПАМ [8, 16]. В останні десятиліття помітно зросла роль області ЦТО у впливах на клімат Антарктики [9, 14, 18]. Інтенсивність та структуру планетарних хвиль описують в рамках взаємодії “хвиля–зональний потік” [11]. Тому для оцінки варіацій зональної циркуляції, пов’язаних з розвитком хвильових процесів, нами введено індекс змінності зонального вітру на рівні тиску 200 гПа (U200) для тих же географічних меж ЦТО. Рівні тиску 300–200 гПа (9–12 км) відповідають висотному положенню осі субтропічного зонального потоку, який слугує хвилеводом для планетарних хвиль, генерованих тропічною конвекцією [11, 20]. Тому цей інтервал висот (верхня тропосфера, тропопауза та нижня стратосфера у позатропічних широтах) зазвичай використовується для опису хвильових явищ, викликаних аномальною тропічною конвекцією. Отже, індекс U200 може бути використаний для пошуку можливого тропічного сигналу в районі Антарктичного півострова.

На рис. 5 наведено криві для ковзної кореляції між індексом поверхневої температури повітря ТАП в районі Антарктичного півострова та індексами ТПО та U200 для тропіків. Ковзна кореляція обчислена з вікном 12 років, і довірна ймовірність на рівні 95%



**Рис. 5.** Ковзна кореляція з вікном 12 років між індексом температури ТАП для району Антарктичного півострова та індексами для тропічної області (пунктирний прямокутник на рис. 4) — ТРО (поверхнева температура океану, пунктирна крива) та U200 (зональний вітер на рівні тиску 200 гПа, суцільна крива). Горизонтальні пунктирні лінії показують 95%-й довірчий інтервал ( $r = \pm 0.53$ ). Сірим та заштрихованим прямокутниками позначені інтервали статистично значущої та незначущої кореляції, відповідно, а їх часові межі вказані на середину відповідних 12-річних вікон

для такої довжини часового ряду виконується при значеннях коефіцієнта кореляції  $r = \pm 0.53$  (пунктирні горизонтальні лінії на рис. 5).

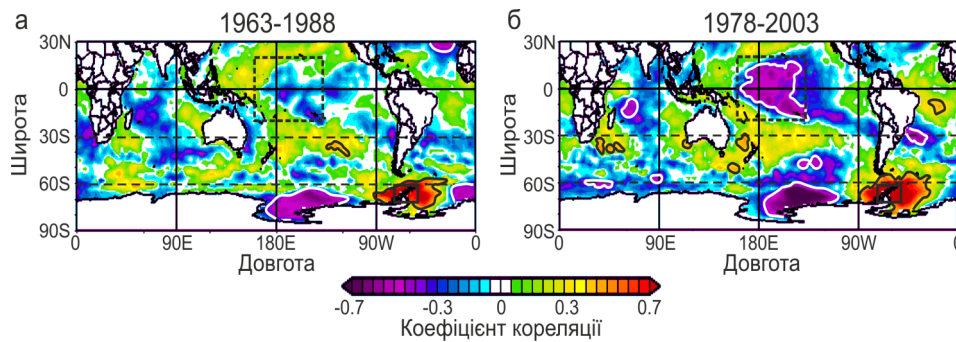
Видно, що статистично значущий зв'язок між тропіками та Антарктичним півостровом існував тривалий період між 12-річними вікнами 1978–1989 рр. та 1992–2003 рр., центрованими на 1984 р. та 1997 р., відповідно (виділено сірим прямокутником на рис. 5). Загальна тривалість сильного кореляційного зв'язку на рівні  $r \approx \pm 0.7$  становить близько чверті століття (1978–2003 рр.). Є також порівняно короткочасні значущі піки кореляції у 1950-і–1960-і роки. Втім, до початку систематичних супутникових вимірювань (з кінця 1970-х років) дані реаналізу ґрунтуються на обмеженій мережі метеостанцій і “досупутникові” результати видаються менш надійними.

На рис. 6 показані зміни активності ділянки ЦТО по відношенню до температури в районі Антарктичного півострова за розподілом кореляції поля температури на поверхні океану з індексом ТАП. Порівнюються часові проміжки 1963–1988 рр. (рис. 6 а) та 1978–2003 рр. (рис. 6 б), в межах яких спостерігалася низька та висока кореляція на рис. 5 (заштрихований та сірий прямокутники, відповідно, з часовими межами, вказаними на середину відповідних 12-річних вікон). Ділянка ЦТО слабо корелює з індексом ТАП у першому випадку та демонструє значну від'ємну кореляцію до  $r = -0.6$  у другому випадку (пунктирні прямокутники на рис. 6а та 6б, відповідно). Цей результат узгоджується з відзначеною вище ан-

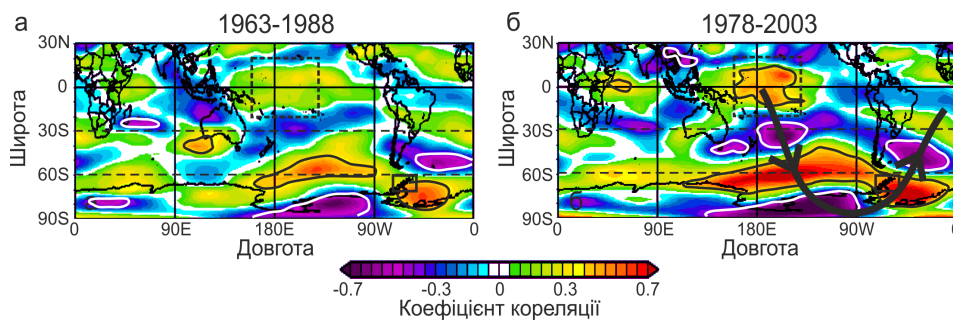
तिकореляцією температури в атлантичному субантарктичному регіоні з температурою тропічної частини Тихого океану [22]. Проте отримані нами співвідношення (рис. 5 та рис. 6) визначають часові межі інтенсивної взаємодії між віддаленими регіонами та вказують локалізацію тропічного джерела великомасштабних збурень.

Для візуалізації шляху поширення хвильового збурення від тропічного джерела в бік Антарктики використовуємо розподіл кореляції індексу ТАП із зональним вітром на рівні тиску 200 гПа (U200). На цьому рівні, як відзначено вище, чітко простежуються хвильові структури в атмосфері при взаємодії “хвиля–зональний потік”. Вплив ділянки ЦТО на Антарктичний півострів, як видно з рис. 7, здійснюється за посередництва меридіональної хвильової структури ТПМ. Помітною є різниця між 1963–1988 рр. (рис. 7 а) та 1978–2003 рр. (рис. 7 б) в інтенсивності ТПМ, відповідно до ходу ковзної кореляції (рис. 5) та активності тропічного джерела (рис. 6 а та 6 б).

Для першого часового проміжку характерною є відсутність статистично значущої кореляції у тропіках, а в районі Антарктичного півострова кореляція досягає 95%-ї значущості лише на східному узбережжі з боку моря Ведделла (рис. 7 а, чорний контур в правому нижньому куті зображення). У другому часовому проміжку спостерігається висока кореляція (від  $r \approx \pm 0.5$  до  $r \approx \pm 0.7$ ) уздовж всієї хвильової структури (показано стрілкою на рис. 7 б), включно з тропічною ділянкою ЦТО (пунктирний прямокутник) та Антар-



**Рис. 6.** Розподіл кореляції між індексом ТАП та температурою поверхні океану в періоди низької (а) та високої (б) ковзної кореляції, виділені прямокутниками на рис. 5. Контурами виділено 95%-й рівень статистичної значущості ( $r = 0.39$ )



**Рис. 7.** Розподіл кореляції між індексом ТАП та зональним вітром на рівні тиску 200 гПа в періоди низької (а) та високої (б) ковзної кореляції, виділені прямокутниками на рис. 5

ктичним півостровом (суцільний прямокутник). Схожа структура ТПАМ існує в кореляціях із зональним вітром по всій вертикальній протяжності тропосфери (не показано).

Таким чином, коливання температури на півострові в значній мірі залежать від західного вітру і знак кореляції вказує, що підвищення температури тут відбувається при посиленні вітру, тобто завдяки надходженню тепліших повітряних мас з океану. У свою чергу, посилення вітру модулюється генерованим у тропіках в ділянці ЦТО меридіональним ланцюгом хвиль ТПАМ та змінами його амплітуди.

### Періодичність у змінах клімату на півострові

У вступі відзначено, що існують як глобальні довготривалі (нерегулярні) зміни клімату, так і регіональні–квазіперіодичні (викликані явищами Ель Ніньйо, 2–8 років [6, 20]) та періодичні (16 років [7]). В роботі [7] було показано, що 16-річний період у коливаннях температури на Антарктичному півострові мав найбільшу амплітуду в 1970-і та 1980-і роки. На рис. 8 (вгорі) показано спектральні особливості варіацій зимової температури на станції Есперанца (див. рис. 3) за даними метеорологічних вимірювань у 1952–2016 рр.: Фур'є-спектр часового ряду (рис. 8 а) та відхилення температури 16-річної гармоніки, обчислене із застосуванням ковзного косинусоїдального вікна (рис. 8 б).

Для виділення заданої гармоніки в часовому ряді

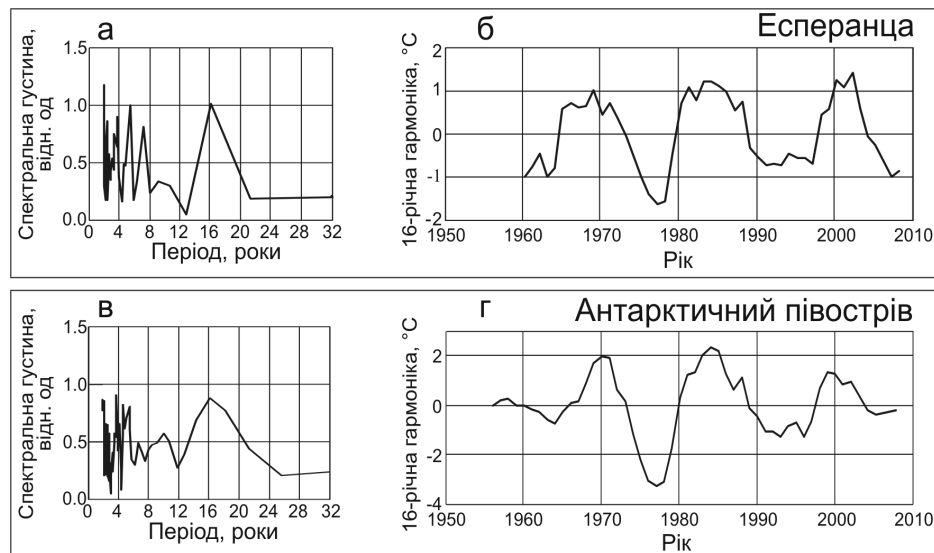
використано ковзне 16-річне вікно-косинусоїда, для якого обчислюється усереднене за період значення температури:

$$D_i = \sum_{p=0}^{T-1} \frac{2 \cdot C_{i+p}}{T} \cos\left(2\pi \frac{p-T/2}{T}\right)$$

де  $C_i$  — послідовні значення температури в інтервалі  $i = 0 \div N-1$ , де  $N$  — кількість значень у ряду даних,  $T$  — період (тут 16 років),  $p$  — номер значення у межах вікна (від 0 до 15). Косинусоїда зміщена на півперіода, щоб середина вікна припадала на позитивний максимум. Значення  $D_i$  приписується середині вікна, тому перше значення 16-річної гармоніки, наприклад, для станції Есперанца з початком ряду в 1952 р. припадає на 1960 р. (рис. 8 б).

Фур'є-спектр та 16-річна гармоніка коливань зимової температури на Антарктичному півострові (у сегменті, виділеному жовтим кольором на рис. 3) показані на рис. 8 в та 8 г, відповідно. У цьому випадку дані реаналізу NCEP–NCAR охоплюють період 1948–2016 рр. (рис. 8 в), а ковзна 16-річна гармоніка — 1956–2008 рр. (рис. 8 г).

Фур'є-спектри демонструють, що в обох випадках існують короткі періоди 2–8 років та ізольований 16-річний період (рис. 8 а та 8 в). Обидва ряди даних вмщують 3 повних періоди 16-річних коливань з найбільшою амплітудою в 1970-і–1980-і роки (рис. 8 б та 8 г). Короткі періоди відповідають періодичності явищ Ель Ніньйо і, отже, характери-



**Рис. 8.** Фур'є-спектр коливань температури (а, в) та відхилення температури, обчислене для 16-річної гармоніки із застосуванням ковзного косинусоїдального вікна (б, г) на станції Есперанца за даними вимірювань у 1952–2016 рр. (вгорі) та на Антарктичному півострові за даними реаналізу за 1948–2016 рр. (внизу)

зують тропічні впливи, а 16-річний період, ймовірно, має локальне походження і потребує подальшого аналізу його джерел. Як у тропіках, так і в прилеглих до Антарктичного півострова областях 16-річних коливань у поверхневих характеристиках атмосфери (температурі, зональному та меридіональному вітрі) не виявлено. Можливо, ці коливання пов'язані з циркуляцією у приповерхневому шарі океану, якій необхідно присвятити окреме дослідження.

З результатів рис. 8 зрозуміло, що 16-річна періодичність відповідальна за помітне зниження температури на півострові у другій половині 1970-х років та після 2000-го року (див. рис. 2 та рис. 3 б і 3 в, див. також рис. 1, справа). Амплітуда 16-річної гармоніки для регіону в цілому знижується (рис. 8 г), але для станції Есперанца виглядає стійкою (рис. 8 б). Хід обох кривих дозволяє припустити, що близько 2020 р. можливий черговий максимум температури, принаймні на станціях північної частини регіону. Метеоспостереження найближчих років покажуть, наскільки справдиться це припущення.

## Висновки

Розглянуто зміни зимової температури в регіоні Антарктичного півострова та наведено оцінки зв'язків міжрічних варіацій температури з тропічними аномаліями в температурі. Показано шлях розповсюдження тропічних збурень зональної циркуляції над Тихим океаном у позатропічні широти південної півкулі та продемонстровано структуру меридіонального ланцюга стаціонарних планетарних хвиль. Виявлено довготривалі зміни у стійкості хвильового ланцюга

та, відповідно, в інтенсивності тропічного впливу на клімат Антарктичного півострова. Період найбільш відчутних тропічних ефектів припадає на 1980-і–1990-і роки, і в цей час спостерігалися найбільш швидкі темпи зимового потепління на станції Фарадей/Вернадський ( $1.9 \pm 1.1^\circ\text{C}/10 \text{ р.}$ ).

Одна із складових довготривалих змін зимової температури на півострові — 16-річна періодичність з амплітудою близько  $1^\circ\text{C}$ . Результати цієї та інших робіт свідчать, що у 2000-і–2010-і роки відбувається припинення потепління на півострові, що може бути частково спричинено настанням чергового мінімуму 16-річної осциляції.

## Література

1. Гончарова Л. Д. Клімат і загальна циркуляція атмосфери / Л. Д. Гончарова, Е. М. Серга, Є. П. Школьнік. — Київ: КНТ, 2005. — 251 с. — ISBN 966-373-032-3.
2. Кравченко В. О. Періодичні зміни швидкості зимового потепління в районі Антарктичного півострова / В. О. Кравченко, О. М. Євтушевський, Г. П. Міліневський // Наук. праці УкрНДГМІ. — 2010. — Вип. 259. — С. 132–144.
3. Мартазінова В. Ф. Сучасний та майбутній стан середньорічної температури повітря північної частини Антарктичного півострова західного сектора Антарктиди / В. Ф. Мартазінова, С. В. Клок // Наук. праці УкрНДГМІ. — 2012. — Вип. 263. — С. 5–16.
4. Тимофеев В. Е. Динаміка сучасного потепління в районі Антарктичного півострова / В. Е. Тимофеев // Наук. праці УкрНДГМІ. — 2007. — Вип. 256. — С. 112–120.
5. Absence of 21st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability / J. Turner, H. Lu, I. White [et al.] // Nature. — 2016. — Vol. 535. — P. 411–415.



6. Antarctic climate change during the last 50 years / J. Turner, S. R. Colwell, G. J. Marshall [et al.] // *Int. J. Climatol.* — 2005. — Vol. 25. — P. 279–294.
7. Decadal variability of winter temperatures in the Antarctic Peninsula region / V. O. Kravchenko, O. M. Evtushevsky, A. V. Grytsai, G. P. Milinevsky // *Antarctic Science.* — 2011. — Vol. 23. — P. 614–622.
8. Ding Q. Temperature change on the Antarctic Peninsula linked to the tropical Pacific / Q. Ding, E. J. Steig // *J. Climate.* — 2013. — Vol. 26. — P. 7570–7585.
9. El Nino Modoki and its possible teleconnection / K. Ashok, S.K. Behera, S.A. Rao [et al.] // *J. Geophys. Res.* — 2007. — Vol. 112. — C. 11007, doi:10.1029/2006JC003798.
10. Global surface temperature change / J. Hansen, R. Ruedy, M. Sato, K. Lo // *Rev. Geophys.* — 2010. — Vol. 48. — RG4004, doi:10.1029/2010RG000345.
11. Hoskins B. J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing / B. J. Hoskins, D. J. Karoly // *J. Atmos. Sci.* — 1981. — Vol. 38. — P. 1179–1196.
12. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula / D. G. Vaughan, G. J. Marshall, W. M. Connolley [et al.] // *Climatic Change.* — 2003. — Vol. 60. — P. 243–274.
13. Recent regional climate cooling on the Antarctic Peninsula and associated impacts on the cryosphere / M. Oliva [et al.] // *Sci. Total Environ.* — 2017. — Vol. 580. — P. 210–223.
14. Response of the Antarctic stratosphere to two types of El Nino events / M. M. Hurwitz, P. A. Newman, L. D. Oman, A. M. Molod // *J. Atmos. Sci.* — 2011. — Vol. 68. — P. 812–822.
15. Roscoe H. K. Low potential for stratospheric dynamical change to be implicated in the large winter warming in the central Antarctic Peninsula / H. K. Roscoe, G. J. Marshall, J. C. King // *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* — 2006. — Vol. 132. — P. 803–820.
16. Schneider D. P. An assessment and interpretation of the observed warming of West Antarctica in the austral spring / D. P. Schneider, C. Deser, Y. Okumura // *Climate Dyn.* — 2012. — Vol. 38. — P. 323–347.
17. Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change / D. W. Thompson [et al.] // *Nature Geoscience.* — 2011. — Vol. 4. — P. 741–749.
18. Teleconnection between the central tropical Pacific and the Antarctic stratosphere: spatial patterns and time lags / O. M. Evtushevsky, V. O. Kravchenko, L. L. Hood, G. P. Milinevsky // *Climate Dyn.* — 2015. — Vol. 44. — P. 1841–1855.
19. The SCAR READER Project: Toward a high-quality database of mean Antarctic meteorological observations / J. Turner, S. R. Colwell, G. J. Marshall [et al.] // *J. Climate.* — 2004. — Vol. 17. — № 14. — P. 2890–2898.
20. Turner J. The El Nino - Southern Oscillation and Antarctica / J. Turner // *Int. J. Climatol.* — 2004. — Vol. 24. — P. 1–31.
21. Wei M. A quantitative definition of global warming hiatus and 50-year prediction of global-mean surface temperature / M. Wei, F. Qiao, J. Den // *J. Atmos. Sci.* — 2015. — Vol. 72. — P. 3281–3289.
22. Yuan X. The Antarctic Dipole and its predictability / X. Yuan, D. G. Martinson // *Geophys. Res. Lett.* — 2001. — Vol. 28. — No. 18. — P. 3609–3612.

#### ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕНДЕНЦИЙ В РАЙОНЕ АНТАРКТИЧЕСКОГО ПОЛУОСТРОВА

В. О. Кравченко, А. М. Евтушевский

Оценки связей зимней температуры в районе Антарктического полуострова с тропическими температурными аномалиями свидетельствуют о долговременных изменениях в интенсивности тропических влияний. Эти изменения связаны с устойчивостью меридиональной цепочки стационарных планетарных волн, вдоль которой распространяются тропические возмущения в секторе Тихого океана, воздействуя на климат Антарктического полуострова. Период наиболее ощутимых тропических эффектов приходится на 1980-е–1990-е годы, и в это время наблюдались наиболее быстрые темпы зимнего потепления на станции Фарадей/Вернадский. Одна из составляющих изменений зимней температуры на полуострове — 16-летняя периодичность с амплитудой около 1°C — также дает вклад в региональные изменения климата.

**Ключевые слова:** Антарктический полуостров, зимняя температура, тропические температурные аномалии, Тихий океан, изменения климата

#### CHANGES IN CLIMATIC TENDENCIES IN THE ANTARCTIC PENINSULA REGION

V. O. Kravchenko, O. M. Evtushevsky

Estimations of couplings of winter temperature in the Antarctic Peninsula region with tropical temperature anomalies indicate long-term changes in the intensity of tropical influences. These changes are associated with the stability of the meridional wavetrain of stationary planetary waves, along which tropical disturbances in the Pacific Ocean sector propagate, affecting the climate of the Antarctic Peninsula. The period of the most significant tropical effects is the 1980s and the 1990s, and, at that time, the most rapid winter warming at Faraday/Vernadsky station was observed. One of the components of the winter temperature change on the peninsula is a 16-year periodicity with amplitude of about 1°C that also contributes to regional climate change.

**Key words:** Antarctic Peninsula, winter temperature, tropical temperature anomalies, Pacific ocean, climate change