

УДК 551.583

ЗМІНА ПРИЗЕМНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ У XX – XXI СТОРІЧЧЯХ В РАЙОНІ АНТАРКТИЧНОГО ПІВОСТРОВА ЗА ДАНИМИ КЛІМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

С. В. Краковська, Л. А. Писаренко

Український гідрометеорологічний інститут ДСНС та НАН України, просп. Науки, 37, м. Київ, 03028, svitlanakrakovska@gmail.com

Реферат. Стаття присвячена дослідженню динаміки зміни приземної температури повітря, як одного із основних показників кліматичних змін, за даними спостережень і моделей загальної циркуляції атмосфери та океану (МЗЦАО) у районі Антарктичного півострова, де ріст середньої річної температури є одним із найстрімкіших на планеті з другої половини XX ст. Для аналізу температурного режиму у XX ст. та побудови кліматичних проєкцій до кінця XXI ст. залучено дані 93 розрахунків 10 МЗЦАО, оскільки **метод** моделювання є єдиним засобом у прогнозуванні майбутніх кліматичних змін. Тому **метою** даної роботи стала перевірка кожної з 10 МЗЦАО у порівнянні з даними спостережень на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» (колишня Фарадей) за 1947–2016 рр., а також побудова та аналіз кліматичних проєкцій на майбутнє за сценаріями 4-ої та 5-ої доповідей Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (МГЕЗК). У **результаті** за даними обох останніх доповідей МГЕЗК наведено порівняльний аналіз SRES та RCP сценаріїв зміни приземної температури повітря глобально та в Антарктиці, який показав відсутність значних розходжень у відповідних сценаріях. Проведено верифікацію результатів розрахунків 10 МЗЦАО даними вимірів за 70-річний період інструментальних спостережень на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський», де лінійний тренд температури склав $0,51^{\circ}\text{C}/10$ років. Отримання близьких до реальних коефіцієнтів лінійних трендів та достатньо високих коефіцієнтів кореляції за даними рядів значень температури повітря на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» та в МЗЦАО у XX ст. підтвердило можливість використання глобальних моделей для отримання проєкцій температури повітря у майбутньому. **Висновок:** розраховані кліматичні проєкції на XXI ст. 10 МЗЦАО та їх ансамблів показали, що очікується продовження зростання температури за всіма сценаріями збільшення антропогенних викидів парникових газів. Найшвидше цей процес в районі Антарктичного півострова буде відбуватися за «песимістичним» сценарієм A2 із середнім трендом підвищення температури $0,29^{\circ}\text{C}/10$ років, за «збалансованим» сценарієм A1B отримано значення $0,26^{\circ}\text{C}/10$ років, а найповільніший ріст прогнозується за «оптимістичним» сценарієм B1 – $0,15^{\circ}\text{C}/10$ років.

Ключові слова: Антарктичний півострів, зміна клімату, температура повітря, кліматичні проєкції, модель загальної циркуляції атмосфери та океану

ИЗМЕНЕНИЯ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В XX-XXI ВЕКАХ В РАЙОНЕ АНТАРКТИЧЕСКОГО ПОЛУОСТРОВА ПО ДАННЫМ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

С. В. Краковская, Л. А. Писаренко

Украинский гидрометеорологический институт ГСЧС и НАН Украины, г. Киев, svitlanakrakovska@gmail.com

Реферат. Стаття посвящена исследованию динамики приземной температуры воздуха, как одного из основных показателей климатических изменений, по данным наблюдений и моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) в районе Антарктического полуострова, где рост приземной годовой температуры является одним из наиболее стремительных на планете начиная со второй половины XX века. Для анализа температурного режима в XX веке и построения климатических проєкций до конца XXI века взяты данные 93 расчетов по 10 МОЦАО, поскольку **метод** моделирования является единственным способом в прогнозировании будущих климатических изменений. Поэтому **целью** данной работы стала проверка каждой из 10 МОЦАО в сравнении с данными наблюдений на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» (бывшая Фарадей) за 1947–2016 гг., а также построение и анализ климатических проєкций будущего по сценариям 4-го и 5-го докладов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). В **результате** по данным двух последних докладов МГЭИК выполнен сравнительный анализ SRES и RCP сценариев изменения приземной температуры воздуха глобально и в Антарктике, который продемонстрировал отсутствие значительных расхождений в соответствующих сценариях. Проведена верификация результатов расчетов 10 МОЦАО по данными измерений за 70-летний период инструментальных наблюдений на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский», где линейный тренд температуры составил $0,51^{\circ}\text{C}/10$ лет. Полученные близкие к реальным коэффициенты линейного тренда и достаточно высокие коэффициенты корреляции между данными рядов значений температуры

воздуха на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» и в МОЦАО в ХХ ст. подтвердили возможность использования глобальных моделей для получения проекций температуры воздуха в будущем. **Выводы:** рассчитанные климатические проекции на ХХІ ст. 10 МОЦАО и их ансамблей показали, что ожидается продолжение повышения температуры по всем сценариям увеличения антропогенных выбросов парниковых газов. Быстрее всего в районе Антарктического полуострова этот процесс будет происходить в «пессимистическом» сценарии А2 со средним трендом повышения температуры 0,29°C/10 лет, для «сбалансированного» сценария А1В получено значение 0,26°C/10 лет, а самый медленный рост температуры прогнозируется в «оптимистическом» сценарии В1 – 0,15°C/10 лет.

Ключевые слова: Антарктический полуостров, изменения климата, температура воздуха, климатические проекции, модель общей циркуляции атмосферы и океана

CHANGES OF THE SURFACE AIR TEMPERATURE IN THE 20TH – 21ST CENTURIES IN THE ANTARCTIC PENINSULA REGION BASED ON CLIMATE MODELS' DATA

S.V. Krakovska, L.A. Pysarenko

Ukrainian Hydrometeorological Institute, State Emergency Service of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, sviplanakrakovska@gmail.com,

Abstract. This paper is dedicated to surface air temperature dynamics in the Antarctic region where the most rapid warming on the Earth was recorded during the second half of the 20th century. As air temperature is one of the main characteristics of climate system and climate model is the only tool to forecast future climate change, temperature data of Atmospheric-Ocean Global Circulation Models (AOGCMs) and measurements at the Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station (former British Faraday station) were used for this research. Therefore, the main **objectives** of the research were to verify of 10 AOGCMs and their ensemble in comparison with observational data in period 1947-2016 at the station; to extract and to analyze climate projections till the end of the 21st century for the Antarctic Peninsula region based on scenarios of the 4th (SRES) and 5th (RCP) Reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Overall 93 model runs of 10 AOGCMs were analyzed. Comparative analysis between SRES and RCP IPCC scenarios of air temperature change has been performed and demonstrated, as a **result**, an absence of strong contradiction between the respective scenarios in surface air temperature projections both on global scale and in the Antarctic region. The verification of 10 AOGCMs runs has been carried out with 70-year observational data from Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station where temperature has been increasing with rate of 0.51°C/10 years. Similar coefficients of linear trend and high correlation between measured air temperature at the station and in AOGCMs have confirmed that these climate models can be used for obtaining air temperature projections in the future. As a **conclusion**, analysis of climate projections for 21st century of 10 AOGCMs and their ensembles has demonstrated further temperature increase for all the above scenarios. The most rapid warming in the studied region has been expected for “pessimistic” A2 scenario with average temperature rise 0.29°C/10 years, “balanced” A1B scenario has projected 0.26°C/10 years and “optimistic” B1 – 0.15°C/10 years.

Key words: Antarctic Peninsula, climate change, air temperature, climate projections, atmosphere-ocean general circulation models.

1. Вступ

Сучасні дослідження кліматичних змін показали, що у другій половині ХХ століття найстрімкіше потепління було зафіксовано в полярних регіонах, зокрема й у районі Антарктичного півострова (Climate Change, 2013). Очевидно, що підвищення температури у високих широтах спричинює танення льодовиків, пакового льоду та зміни у криосфері в цілому, що в свою чергу впливає на інші складові кліматичної системи. Тому дослідження температурного режиму у полярних широтах та прогноз його можливих змін за різними сценаріями антропогенного впливу на кліматичну систему є важливою та актуальною задачею.

Незважаючи на те, що Антарктида все ще залишається найменш дослідженим континентом, в районі Антарктичного півострова метеорологічні спостереження почали проводитися з початку ХХ століття переважно на островах в Субантарктиці. Найдовший, з 1947 року, 70-річний безперервний ряд інструментальних вимірів метеоелементів має колишня британська станція Фарадей, а з 1996 року – Українська антарктична станція «Академік Вернадський». Спостереження ведуться не тільки за програмами Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО), але й інших наукових напрямків, які потребують даних про температуру повітря та морської води, атмосферний тиск, опади, вітер, сніговий покрив, актинометрію тощо. Аналіз особливостей просторового розподілу і часового ходу вимірних характеристик дозволив оцінити зміни клімату в регіоні (Turner et al., 2009; Bokhorst et al., 2011; Turner et al., 2013; Ding et al., 2013), їх вплив на екосистеми та біорізноманіття (Convey et al., 2005; Hogg et al., 2006; Convey et al., 2009; Parnikoza et al. 2009; Yudakova et al., 2016) та використати ці дані для верифікації кліматичних моделей (Van Lipzig et al., 2002; Weatherly, 2003; Bromwich et al., 2004; Van de Berg et al., 2005; Climate Change, 2007; Краковская, 1998; Краковська та ін., 2011; Climate Change, 2013).

Сучасні дослідження клімату довели доцільність використання моделювання, оскільки чисельна модель є єдиним інструментом, що дозволяє кількісно оцінити можливі майбутні кліматичні зміни, зокрема і в Антарктиці. Однак оцінка модельних значень кліматичних показників є складною у зв'язку з недостатньою густотою мережі пунктів спостережень на Антарктичному континенті та ґрунтується на чисельних методах інтерполяції та прогнозу (Climate Change, 2007). При порівнянні модельних значень з даними спостережень в окремих випадках виявляються значні відмінності та похибки, зокрема відхилення температури є зазвичай дещо вищими над океанами, ніж над континентами. У моделях рельєфу також наявні похибки, які вносять певні неточності. Щодо опадів, то їх модельні значення мають деяке розходження з даними реаналізу, особливо при проходженні циклонів та інтенсивній циклонічній діяльності. В результаті обмежень у представ-

ленні всіх фізичних процесів, неточності існують у моделях всіх просторово-часових масштабів (Covey et al., 2003; Weatherly, 2003; Bromwich et al., 2004; Van de Berg et al., 2005). Але все ж незважаючи на певні недоліки, моделі регіонального та глобального клімату є наразі єдиною можливістю спрогнозувати майбутні кліматичні зміни.

Порівнюючи результати за регіональними кліматичними моделями (РКМ) та моделями загальної циркуляції атмосфери та океану (МЗЦАО) було виявлено, що моделі меншого масштабу (РКМ) показали менші відхилення значень температури та опадів над Антарктидою у порівнянні з МЗЦАО. Збільшення роздільної здатності МЗЦАО покращує узгодження моделі з даними спостережень та дозволяє детальніше дослідити елементи кліматичної системи (Climate Change, 2007). РКМ та МЗЦАО успішно застосовувалися для отримання проєкцій зміни кліматичних показників в Україні до кінця XXI сторіччя (Краковська С. В. та ін., 2016). Тому розроблені методичні підходи доцільно використати й для району Антарктичного півострова, де розташована УАСАВ.

Ґрунтовний та повний аналіз зміни приземної температури повітря, морського льоду, опадів, стану льодовиків для Антарктиди було зроблено Міжурядовою групою експертів з питань зміни клімату (МГЕЗК), зокрема й за даними кліматичних моделей, який представлено в останніх доповідях (Climate Change, 2007; Climate Change, 2013). Відповідно до 4-ї доповіді Першої робочої групи МГЕЗК (Climate Change, 2007) за проєкціями кліматичних моделей середня приземна температура повітря найшвидше буде зростати у полярних широтах. Дані ВМО останніх років підтвердили цей прогноз, що також дозволяє використовувати ці моделі з достатнім рівнем довіри. До того ж, за останні роки вдалося значним чином покращити якість розрахунків температури повітря завдяки удосконаленням в моделюванні баричного поля над Антарктикою та, зокрема, завдяки покращенням параметризації хмар та радіаційних потоків (Climate Change, 2007; Climate Change, 2013).

Таким чином, **метою** даної роботи було оцінити можливість застосування МЗЦАО для досліджень змін температурного режиму та отримати і проаналізувати кліматичні проєкції за різними сценаріями до кінця XXI століття в районі Антарктичного півострова. **Об'єктом** даного дослідження була середня річна приземна температура повітря. **Предметом** були сучасні та прогнозовані зміни приземної температури повітря в районі Антарктичного півострова за сценаріями 4-ої та 5-ої доповідей МГЕЗК.

2. Вихідні матеріали

Антарктида є ще доволі мало вивченим материком, оскільки його відкрили лише у XIX столітті. Перша метеорологічна станція Оркадас була організована Шотландською національною антарктичною експедицією у 1903 році на острові Лорі (Південні Оркнейські острови). Проте у 1904 році уряд Великої Британії відмовився підтримувати цю ініціативу (експедицію), тому дану станцію передали Аргентині (History of Signy, British Antarctic Survey). Вона є найстарішою діючою станцією з найдовшим рядом спостережень більше 100 років (Turner, 2009; Legnani et al., 2006). У 40-х та 50-х роках XX століття науковці починають активно цікавитися Антарктикою та Субантарктикою і в цей період відкриваються дослідницькі станції, зокрема британські, протягом цих 20 років їх було близько 10, а за весь час – близько 20, деякі з них припинили існування. Станція Фарадей (наразі Українська антарктична станція «Академік Вернадський»), яка почала свою безперервну роботу з 1947 року, належала до числа перших британських станцій. Як відомо, вона була передана Україні у 1996 році в результаті підписання меморандуму. На сьогодні в регіоні Антарктики та Субантарктики діють понад 80 станцій різного призначення (Automatic weather stations-2017; Reader). Відповідно до бази Reader на 47 з них проводять спостереження та виміри метеоелементів та ще 37 – автономні автоматизовані станції.

Для оцінки зміни клімату та верифікації МЗЦАО у представленій роботі було використано дані про приземну середню річну температуру повітря, що вимірювалася на висоті 2 метри на УАСАВ у період з 1947 до 2016 р. (Reader).

2.1. Сценарії кліматичних змін в Антарктиці

Для оцінки майбутніх кліматичних змін у 4-й та 5-й доповідях МГЕЗК були використані декілька груп сценаріїв викидів парникових газів, які ґрунтуються на прогнозі різних соціо-економічних факторів і призводять до додаткового радіаційного (теплого) навантаження, яке залежить від просторово-часового розподілу концентрацій парникових газів.

У 4-й доповіді МГЕЗК (Climate Change, 2007) використано так звані сценарії SRES (Special Report on Emissions Scenarios, IPCC Special Report, 2000), які позначалися А1, А2, В1 та В2. За сценарієм А1, світ буде характеризуватися значним економічним розвитком та зростанням кількості населення до середини XXI ст. з подальшою стабілізацією. Сценарій А2 («песимістичний») передбачає повільні технологічні зміни у використанні джерел енергії та постійний ріст кількості населення. Сценарій В1 («оптимістичний») характеризується швидкими змінами в економіці, як А1, але з впровадженням ресурсозберігаючих технологій. Найпоширеніше використання мав різновид сценарію А1 – сценарій А1В («збалансований»), який передбачав рівновагу між використанням викопних та відновлюваних джерел енергії на протиположному сценарію з цього «сімейства» А1FI («fossil intensive»), який базувався на інтенсивному використанні тільки викопних видів палива. Сценарій В2 (розвиток економіки без технологічних змін) та А1FI майже не використовувалися, оскільки їх ймовірність найнижча. Також застосовувався й додатковий сценарій Constant composition commitment (3С), тобто стабілізація концентрації парникових газів і складу атмосфери через припинення зростання викидів з 2000 року, який можна розглядати як, по суті, «найкращий» сценарій, або втрачену можливість зниження «антропогенного тиску» на кліматичну систему.

У 5-й доповіді (Climate Change, 2013) для оцінки майбутніх змін клімату застосовувалися сценарії Representative Concentration Pathways RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5, які включають викиди еквіваленту CO₂, їх траєкторії та концентрації. Дані сценарії враховують додаткове антропогенне радіаційне (теплове) навантаження, яке полягає у різниці між потоками радіації, що надходять до земної поверхні та йдуть від неї. У назві кожного сценарію числом позначається величина дода-

ного радіаційного форсингу, наприклад для сценарію RCP2.6 вона буде в середньому по планеті $2,6 \text{ Вт/м}^2$, у RCP8.5 – $8,5 \text{ Вт/м}^2$.

На рис.1 наведено порівняння між сценаріями цих двох доповідей IPCC на прикладі часового ходу аномалій середніх річних глобальних приземних температур повітря. Сценарій RCP2.6 має найнижчі температури протягом XXI сторіччя, максимально наближений до сценарію 3С та його значення менші за «оптимістичний» B1, які представлено у 4-ій доповіді. Значення температури за RCP4.5 наближені до сценарію B1, за RCP6.0 – знаходяться між B1 та A1B. Сценарій RCP8.5 прогнозує найвищі значення та перевищує «песимістичний» сценарій A2 (рис.1).

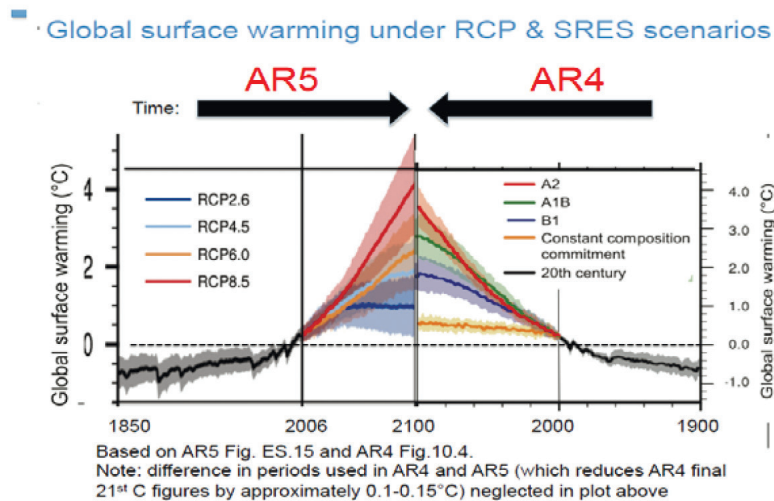


Рис.1. Порівняння сценаріїв 4-ої та 5-ої доповідей МГЕЗК за аномаліями глобальної приземної температури (Christensen, 2013).

Fig.1. A comparison between scenarios from the 4th and the 5th IPCC reports of global surface temperature anomaly (Christensen, 2013).

За даними 4 доповіді МГЕЗК (Climate Change, 2007) за кліматичними проєкціями до кінця XXI століття потепління над Антарктидою є помірним, проте значимим. Його розмах за всіма сценаріями з урахуванням довірчих інтервалів склав від $1,4$ до $5,0^\circ\text{C}$. Річні усереднені проєкції МЗЦАО показують відносно рівномірне потепління по всьому континенту, з найбільшим значенням за сценарієм A2 ($3,1^\circ\text{C}$), найменшим – за сценарієм B1 ($1,8^\circ\text{C}$), і за сценарієм A1B потепління оцінено у $2,6^\circ\text{C}$. Ці величини подібні до попередніх оцінок (Covey et al., 2003).

Згідно з 5 доповіддю МГЕЗК (Climate Change, 2013) останнім часом відбулися вдосконалення МЗЦАО, а саме: вдалося досягти кращої репрезентативності трендів приземної температури, покращено визначення впливу динамічних факторів (зміни в циркуляції), включені біогеохімічні цикли. Проте щодо температурного режиму Антарктики у даній доповіді більше уваги приділялося скоріше наслідкам підвищення температури, зокрема таненню льодовиків та підвищенню рівня моря і зростанню температури морської води та загальному стану криосфери, ніж детальному аналізу. Хоча у доповіді наведено хід приземної температури повітря для зимового та літнього сезонів над сушею та морською поверхнею за даними інструментальних спостережень з бази даних HadCRUT4 (HadCRUT4) в Антарктиді до 2010 року, а далі – за даними моделювання до 2100 року з використанням різних сценаріїв RCP (рис. 2).

За усередненими даними вимірів по всіх метеорологічних станціях Антарктики було виявлено, що у період з 1950 по 2008 рр. в регіоні відбулося потепління (Climate Change, 2013). Хоча по окремих пунктах, зокрема влітку та восени, відмічалось похолодання у дещо коротший період з 1960 по 1999 рр. Проте після того, як значення температури були скориговані за допомогою регресійного аналізу з урахуванням впливу Південного (Антарктичного) коливання, було виявлено потепління як за результатами вимірів, так і за модельними розрахунками, і воно спостерігалось на всіх антарктичних станціях у період з 1950 до 1999 рр. за виключенням Південного полюсу.

З рис.2 очевидно, що за даними моделей на кінець XXI сторіччя для двох сезонів зміни температури коливаються від $-0,1$ до $5,8^\circ\text{C}$ взимку та від $0,1^\circ\text{C}$ до $5,0^\circ\text{C}$ влітку з урахуванням 95% довірчого інтервалу. Однак, над акваторією Південного океану і ці зміни, і їх розмах за сценаріями є більшими взимку, ніж влітку, відповідно зимовий сезон в Антарктиді є найвразливішим до потепління на континенті. Це може бути пов'язано у першу чергу з відступом меж морського пакового льоду. Зауважимо, що в 4-й доповіді МГЕЗК (Climate Change, 2007) не була виявлена значна залежність від сезону у змінах середньої температури в Антарктиці за сценарієм A1B.

Як помітно з перших двох графіків (рис. 2) для літнього сезону, за сценарієм RCP8.5, який передбачає найвищі значення викидів парникових газів, ріст температури за усередненими значеннями моделей складе до 4°C до 2100 року над континентом. Для RCP6.0 та RCP4.5 ці зміни становлять до 2°C над тією ж поверхнею, для RCP2.6 ці зміни є найменшими – до 1°C до 2100 року. Над морською поверхнею для літнього сезону не спостерігається такий розкид модельних значень, як для континенту. Між сценаріями різниця набагато менша: найвищі значення росту температури для сценарію RCP8.5 становлять 2°C , для RCP2.6 – до $0,5^\circ\text{C}$.

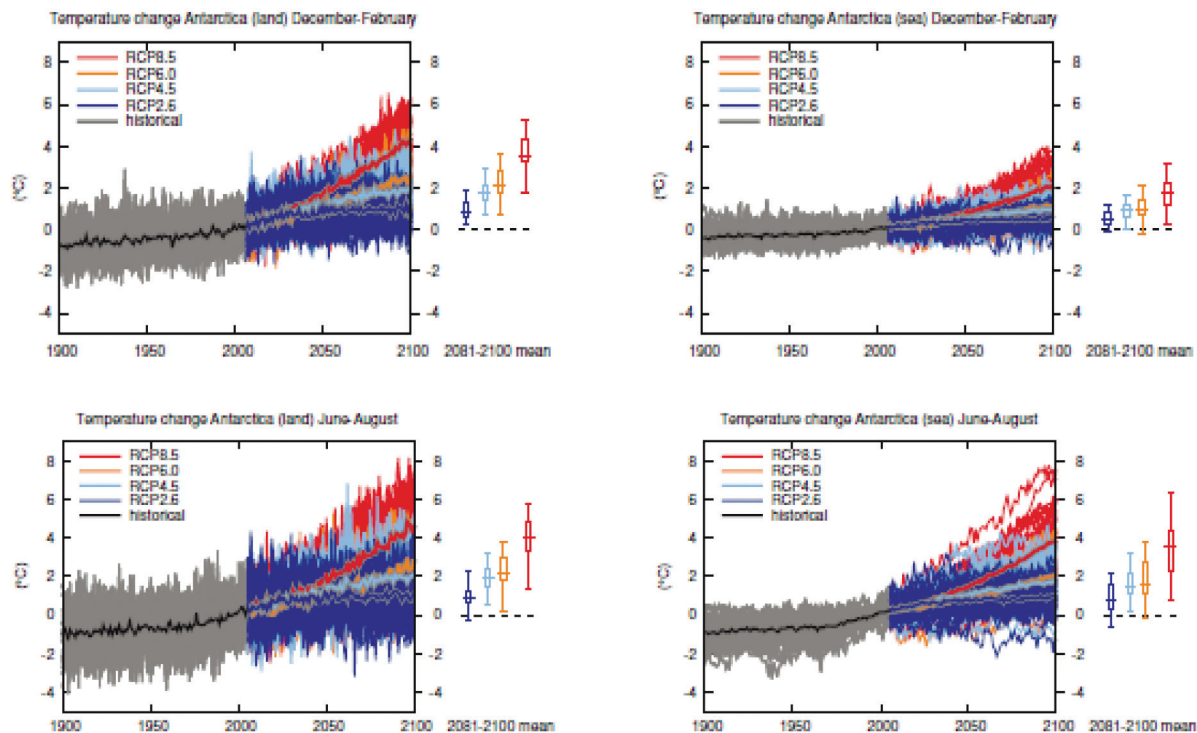


Рис. 2. Проекції температурних змін в Антарктиці до 2100 року по відношенню до 1950-2010 рр. для грудня – лютого (літо) та червня – серпня (зима) над континентом та акваторіями морів (Fig. A1.76, A1.77, Climate Change, 2013).

Fig.2. Projection of temperature changes in Antarctica up to 2100 in comparison with the period of 1950-2010 for December-February (summer) and June-August (winter) above land and sea surface.

Потепління прогнозується найбільшим взимку (червень-серпень) (два останні графіки, рис.2) у порівнянні з іншими сезонами як над континентом, так і над морською поверхнею. За сценарієм RCP8.5 підвищення температури буде сягати до 4,5°C над сушею та 4°C над морем, за RCP6.0 та RCP4.5 значення зміни майже однакові та становлять 2°C та 1,5°C над континентом та морською поверхнею відповідно, для RCP2.6 це 1°C для двох типів. З графіків можна помітити, що потепління майже однакові як для морської, так і для земної поверхонь у зимовий сезон до 2100 року.

Таким чином, порівнюючи результати моделювання приземної температури повітря за 4-тою (Climate Change, 2007) та 5-тою доповідями МГЕЗК (Climate Change, 2013) можна зробити висновок, що результати моделювання температури суттєво не відрізняються, оскільки згідно з рис.1 всім чотирьом сценаріям RCP можна знайти аналог серед чотирьох SRES сценаріїв. Також зауважимо, що у 4-ій доповіді МГЕЗК зазначалося, що для адекватного виявлення антропогенної складової потепління недостатнє покриття мережею пунктів спостережень в Антарктиці, тобто неможливо було підтвердити або спростувати антропогенний вплив на цьому континенті. В 5-ій доповіді за допомогою аналізу приземної температури та за даними моделей вдалося відокремити природний від антропогенного впливу і, таким чином, підтвердити цей факт на всіх континентах. Однак в 5-ій доповіді МГЕЗК (Climate Change, 2013) відзначається, що він дещо слабший в Антарктиці порівняно з іншими континентами.

2.2. Моделі та методи

У даному дослідженні кліматичні проекції температури на 2000–2100 рр. отримано з використанням тих самих 93 розрахунків за 10 глобальними моделями МЗЦАО проекту СМІР3 (Coupled Model Intercomparison Project phase 3), що були застосовані для отримання проекцій зміни клімату в Україні (Краковська та ін., 2011). Також було додано дані 8 розрахунків МЗЦАО на XX століття (сценарій 20с3m) та один розрахунок МЗЦАО 5-ESMAM5/MPI-OM (повна назва The Max-Planck-Institute Global Ocean/Sea-Ice Model 5) за сценарієм 3С. Характеристики цих МЗЦАО наведені у таблиці 1, зокрема очевидно, що моделі мають різну горизонтальну роздільну здатність (від 1,1° до 2,8°), кількість вертикальних рівнів (від 16 до 56) та вочевидь характеризуються різним ступенем складності параметризації фізичних процесів. Дані середньої річної температури отримано з електронного архіву з ресурсу (Model output described in the 2007 IPCC, Data Distribution Centre).

Розрахунок приземної температури повітря для району Української антарктичної станції «Академік Вернадський» проводився для кожної з 10 моделей методом усереднення значень по чотирьох найближчих вузлах сітки, між якими знаходиться станція. Якщо МЗЦАО мала більше одного розрахунку за будь-яким сценарієм (див. останній стовпчик у табл. 1), то спочатку знаходили усереднене значення для цього сценарію. В подальшому аналізувалися часові серії річних значень та п'ятирічних ковзних середніх для окремих МЗЦАО та ансамблю з усіх 10 моделей. Також для часових серій кожного з сценаріїв визначалися рівняння

регресії та будувалися лінійні тренди. За даними вимірів на станції «Академік Вернадський» визначалися похибки моделей як різниці значень середніх річних температур за період спостережень з 1947 до 2016 р.

Таблиця 1

Характеристики чисельних моделей проекту CMIP3

Table 1

Numerical models characteristics from CMIP3 project

Назва і рік версії моделі	Наукова установа -розробник, країна	Роздільна здатність, кількість вертикальних рівнів та верхня межа моделі	Кількість розрахунків сценаріїв 20с3m-3С-В1-А1В-А2
1. Bergen Climate Model (BCCR-BCM2.0, 2005)	Bjerknes Centre for Climate Research, Norway	T63 (1.9°x1.9°) L16, top = 25 hPa	1-0- 1-1-1
2. The Community Climate System Model (NCAR-CCSM3, 2005)	National Center for Atmospheric Research, USA	T85 (1.4°x1.4°) L26, top = 2.2 hPa	0-0- 9-7-4
3. The Third Generation Coupled Global Climate Model (CGCM3.1 (T47), 2005)	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	T47 (2.8°x2.8°) L31, top = 1 hPa	1-0- 5-5-5
4. The Third Generation Coupled Global Climate Model (CGCM3.1 (T63), 2005)	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	T63 (1.9°x1.9°) L31, top = 1 hPa	1-0- 1-1-0
5. ECMWF and Hamburg (ECHAM5 / MPI-OM, 2005)	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	T63 (1.9°x1.9°) L31, top = 10 hPa	2-1- 5-4-3
6. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Coupled Model (GFDL-CM2.1, 2005)	U.S. Department of Commerce, NOAA, GFDL, USA	2.0° x 2.5° L24, top = 3 hPa	0-0- 1-1-1
7. Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC 3.2 (hires), 2004)	Center for Climate System Research, National Institute for Environmental Studies, JAMSTEC, Japan	T106 (1.1°x1.1°) L56, top = 40 km	1-0- 1-1-0
8. Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC 3.2(medres), 2004)	JAMSTEC, Japan	T42 (2.8°x2.8°) L20, top = 30 km	0-0- 3-3-3
9. Meteorological Research Global Circulation Model (MRI-CGCM2.3.2, 2003)	Meteorological Research Institute, Japan	T42 (2.8°x2.8°) L30, top = 0.4 hPa	1-0- 5-5-5
10. Global Environment Model (UKMO-HadGEM1, 2004)	Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office, UK	(1.3°x1.9°) L38, top = 39.2 km	1-0- 1-1-1

3. Результати

Дослідження температурного режиму в районі станції «Академік Вернадський» включали аналіз часових серій значень температури повітря з МЗЦАО у два періоди: минулий з 1860 до 2000 р., де моделі розраховувалися з початковими та граничними умовами реаналізів, та у майбутній до 2100 р., де розрахунки проводилися за вище вказаними сценаріями SRES. Дані вимірів на станції «Академік Вернадський» за весь період інструментальних спостережень (1947 – 2016 рр.) використовувалися для порівняння.

На рис. 3 представлено часові ряди приземної температури та їх п'ятирічні ковзні середні для декількох МЗЦАО до 2000 р.: з 1860 р. для п'яти, а з 1900 р. – ще для двох моделей (для кращого сприйняття кожної моделі присвоєно порядковий номер у тексті відповідно до табл.1). Також на рис.3 наведено дані спостережень на УАСАВ, які вказують на підвищення приземної температури на 3,5°С за 70 років, тобто в середньому зі швидкістю 0,5°С за 10 років (див. рівняння на рис.3). Для моделі 5 (MPI-ECHAM5/OM, ансамбль 2) ряд продовжено до кінця XXI століття за сценарієм 3С з метою наочного представлення стабілізації значень приземної температури повітря за гіпотетичної умови припинення антропогенних викидів парникових газів після 2000 р.

Порівнюючи результати даних по станції та розрахунків змодельованої температури, тільки за моделлю 5 значення були дуже близькі до реальних з подібним трендом (0,44°С/10 років). Коефіцієнт кореляції між рядами п'ятирічних ковзних середніх склав $r=0,8$. Трохи гірший показник $r=0,6$ отримано за тією ж моделлю, але за ансамблем 4 (позначено 5.1 на рис.3), коли підвищення температури склало +0,38°С/10 років. Найнижчі абсолютні значення температури у порівнянні з даними інструментальних спостережень отримано за моделлю 4, але отриманий коефіцієнт кореляції часових рядів $r=0,6$ вказує на узгодженість ходу температури і тренд для даної моделі склав +0,26°С/10 років. Найнижчий коефіцієнт кореляції з реальними даними спосте-

режень $r=0,3$ та найменші значення росту температури ($0,06^{\circ}\text{C}/10$ років) продемонструвала модель 9. Для решти моделей коефіцієнти кореляції та тренду коливалися в межах від $r=0,4$ до $0,6$ та від $+0,08^{\circ}\text{C}$ до $+0,26^{\circ}\text{C}/10$ років.

Таким чином, порівняння результатів розрахунків кліматичних моделей з даними вимірів Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» показало, що всі МЗЦАО відобразили потепління в другій половині XX сторіччя, але більшість моделей мали на $1-4^{\circ}\text{C}$ нижчі абсолютні значення приземної температури у порівнянні з даними спостережень.

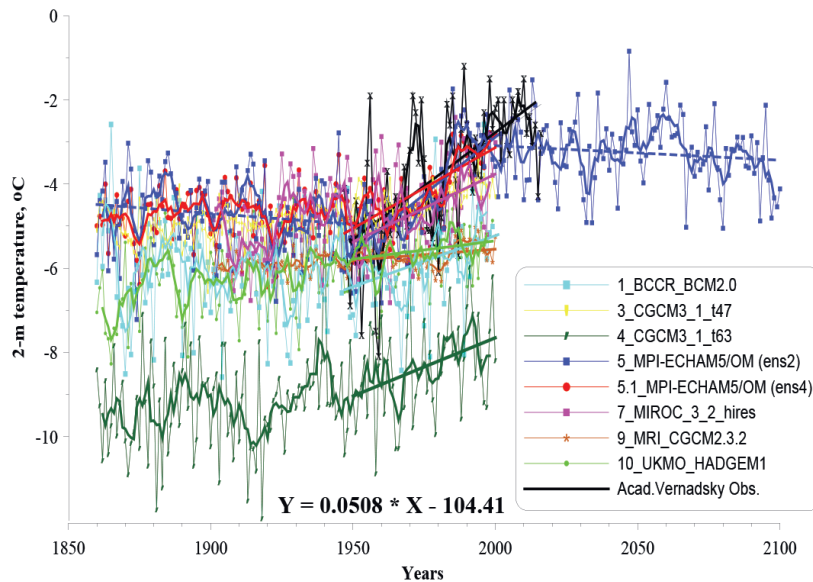


Рис. 3. Часові ряди приземної температури (2 м) за даними МЗЦАО CMIP3 (сценарії 20c3m до 2000 р. та 3C до 2100 р.) та УАСАВ за період 1947- 2016 рр. з рівнянням регресії.

Fig. 3. Time series of surface temperature (2m) from AOGCMs CMIP3 (20c3m scenarios till 2000 and 3C till 2100) and at Vernadsky station for period 1947-2016 with regression equation.

Для наочного зображення, наскільки модельні значення температури повітря відрізняються від вимірюваних, побудовано графік різниць (рис.4), які по суті є похибками МЗЦАО. Обрахунок полягав у знаходженні різниці між значенням температури, усередненої за п'ятирічними ковзними кожними з 10 моделей та даними на станції. Отримані результати показали, що похибка між змодельованими та виміряними даними має від'ємний коефіцієнт лінійного тренду ($-0,3^{\circ}\text{C}/10$ років), таким чином, різниця досягла $-1,5^{\circ}\text{C}$ на початок 2000-х років, тобто навіть ансамбль моделей не відобразив у повній мірі швидкість потепління в районі Антарктичного півострова.

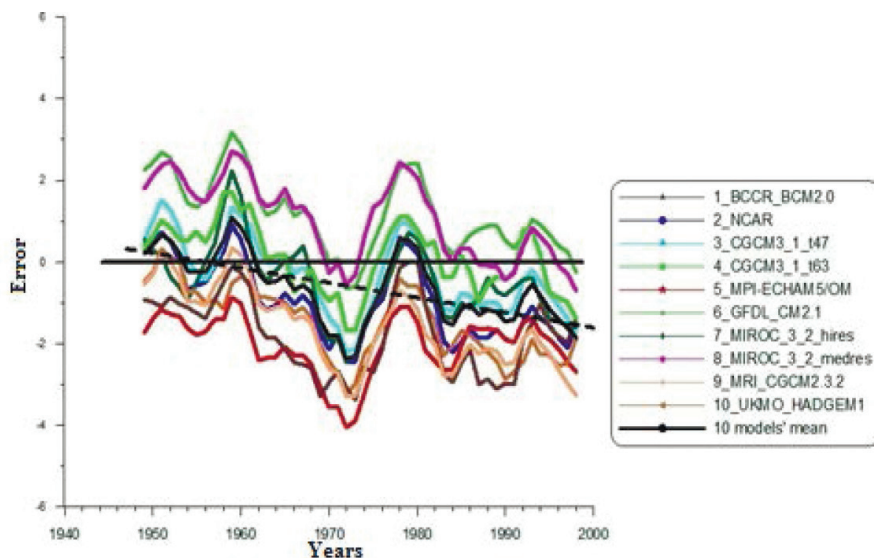


Рис. 4. Різниця між даними приземної температури за МЗЦАО та на станції «Академік Вернадський».

Fig. 4. Differences between year-mean model surface temperature data and observational data at Vernadsky station.

Для оцінки майбутніх змін приземної температури повітря у районі Антарктичного півострова проаналізовано значення коефіцієнтів лінійного тренду часових серій характеристики, отриманих за різними сценаріями, які наведено нижче у табл.2 та на рис. 5-7.

У табл.2 узагальнено виконані розрахунки, які охоплюють період з 2000 по 2100 рр. для трьох сценаріїв за моделями з порядковими номерами 1-10, назви яких зазначені у табл.1 та на рис. 3-7. Порівняння модельних значень проведено для кожного окремого сценарію та між сценаріями. Період дослідження поділено на 2 частини: 1-шу та 2-гу половину ХХІ сторіччя з відповідно періодами 2000-2049 та 2050-2100 рр. За даними ансамблю 10 МЗЦАО обчислені середнє квадратичне відхилення та довірчий інтервал (confidential interval CI у табл.2) із 95% забезпеченістю. Зауважимо, що для сценарію А2 дані деяких моделей були відсутні, тому в табл. 2 наявні пропуски.

Таблиця 2

Для сценаріїв В1, А1В та А2 значення коефіцієнтів лінійного тренду та середньої річної температури повітря у ХХІ ст. для 10 МЗЦАО та їх ансамблю (Mean) з довірчими інтервалами (CI)

Table 2

Linear trend coefficients and mean annual air temperature of AOGCMs for B1, A1B and A2 scenarios in the XXI century and their ensembles with confidence intervals (CI)

№ МЗЦАО	В1 сценарій			А1В сценарій			А2 сценарій		
	К-т тренду °C/10 р.	Темп 1-ша пол. ХХІ ст.	Темп 2-га пол. ХХІ ст.	К-т тренду °C/10 р.	Темп 1-ша пол. ХХІ ст.	Темп 2-га пол. ХХІ ст.	К-т тренду °C/10 р.	Темп 1-ша пол. ХХІ ст.	Темп 2-га пол. ХХІ ст.
1	0,25	-4,6	-3,1	0,34	-4,1	-2,4	0,34	-4,3	-2,4
2	0,08	-4,1	-3,8	0,14	-4,0	-3,2	0,23	-4,0	-2,8
3	0,20	-3,3	-2,2	0,26	-3,0	-1,7	0,37	-3,1	-1,2
4	0,20	-6,0	-5,0	0,30	-2,6	-0,9	-	-	-
5	0,15	-2,9	-2,1	0,31	-2,5	-1,0	0,33	-2,9	-1,1
6	0,06	-2,2	-1,9	0,11	-1,9	-1,4	0,23	-2,2	-1,2
7	0,26	-3,1	-1,7	0,35	-2,4	-0,6	-	-	-
8	0,11	-2,2	-1,7	0,24	-2,4	-1,1	0,23	-2,1	-1,0
9	0,09	-5,3	-4,8	0,17	-5,2	-4,3	0,18	-5,1	-4,3
10	0,06	-4,5	-3,9	0,34	-4,8	-3,2	0,36	-4,6	-2,7
Mean ± CI 95%	0,15	-3,8±0,8	-3,0±0,8	0,26	-3,3±0,7	-2,0±0,8	0,29	-3,6±0,7	-2,1±0,7

Для наочного зображення кліматичних проєкцій температури повітря у ХХІ сторіччі побудовано графіки за даними МЗЦАО та наведено їх усереднене значення (рис. 5-7). У розрахунках усіх трьох сценаріїв виявлено доволі великий міжмодельний розкид з визначеними межами довірчого інтервалу середнього у $\pm 0,7-0,8^{\circ}\text{C}$ (табл.2).

На рис. 5 зображено проєкції приземної середньої річної температури повітря за період 2000-2100 рр. за «оптимістичним» сценарієм В1, який передбачає проведення ефективної політики щодо зменшення використання викопного палива та перехід на відновлювані джерела енергії. Для даного сценарію за даними ансамблю 10 моделей середнє значення температури склало $-3,8^{\circ}\text{C}$ та $-3,0^{\circ}\text{C}$ для 1-шої та 2-гої половин ХХІ ст. відповідно, а коефіцієнт лінійного тренду $-0,15^{\circ}\text{C}/10$ років (табл.2). Найнижчі значення приземної температури повітря в обидві половини ХХІ ст. отримано за моделлю 4 ($-6,0^{\circ}\text{C}$ та $-5,0^{\circ}\text{C}$), найвищі – у моделі 8 ($-2,2^{\circ}\text{C}$ та $-1,7^{\circ}\text{C}$). Максимальний тренд зростання температури виявлено за моделлю 7, мінімальний – у моделях 6 і 10 ($0,26$ та $0,06^{\circ}\text{C}/10$ років відповідно).

За «збалансованим» сценарієм А1В, який передбачає використання як відновлюваних, так і викопних джерел енергії, відмічатиметься стрімкіший ріст приземної температури повітря (рис. 6). За усередненими значеннями 10 МЗЦАО приземна температура повітря в районі Антарктичного півострова складатиме $-3,3^{\circ}\text{C}$ та $-2,0^{\circ}\text{C}$ для 1-шої та 2-гої половини XXI ст. відповідно. Найнижчі значення температури отримано в моделі 9 протягом XXI ст. ($-5,2^{\circ}\text{C}$ та $-4,3^{\circ}\text{C}$), а найвищі – в моделі 6 в 1-шій половині ($-1,9^{\circ}\text{C}$) та в моделі 7 ($-0,6^{\circ}\text{C}$) у 2-гій половині XXI ст. (табл.2). Максимальний тренд складає $0,35^{\circ}\text{C}/10$ років за проєкцією моделі 7, тоді як мінімальне зростання температури прогнозується у моделі 6 ($0,11^{\circ}\text{C}/10$ років). Значення тренду ансамблевого середнього за 10 моделями складає $0,26^{\circ}\text{C}/10$ років (див. рівняння на рис. 6).

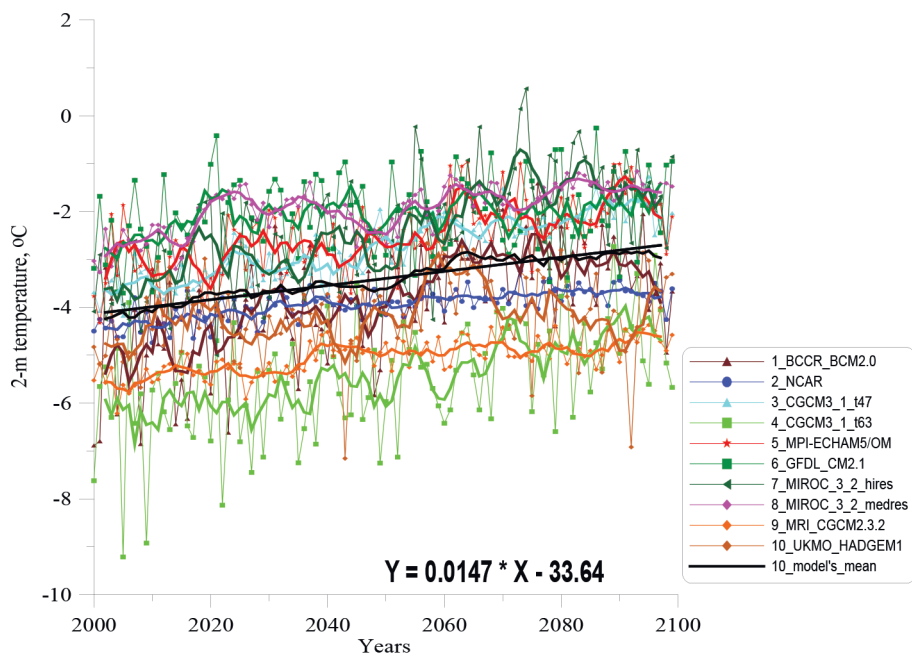


Рис.5. Проекції температури повітря за сценарієм B1 у районі станції «Академік Вернадський» до кінця XXI століття.

Fig. 5. The 21st century air temperature projection (scenario B1) for the Vernadsky station region.

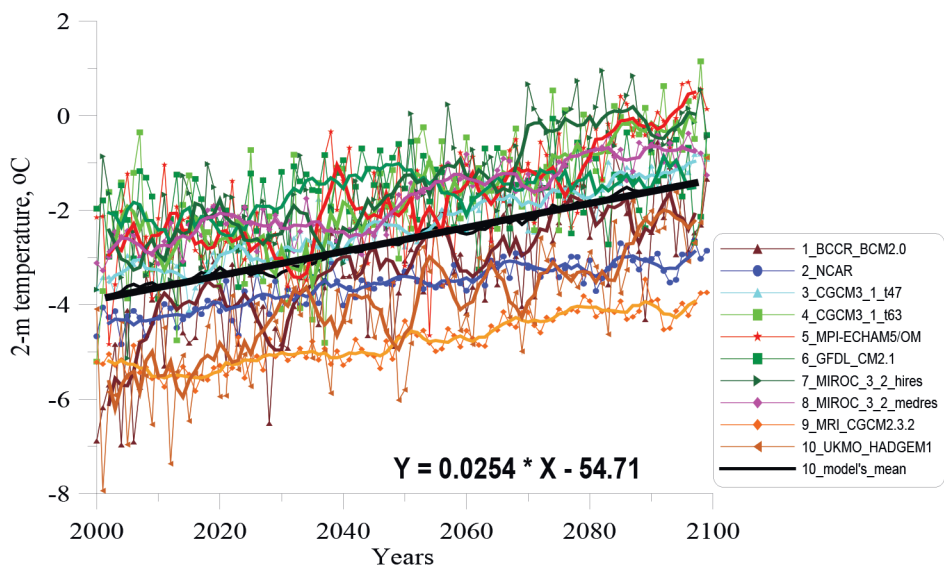


Рис. 6. Проекції температури повітря за сценарієм А1В у районі станції «Академік Вернадський» до кінця XXI століття.

Fig. 6. The 21st century air temperature projection (scenario A1B) for the Vernadsky station region.

Очікувано найвищі значення та швидкість росту приземної температури повітря в районі Антарктичного півострова прогнозується за сценарієм А2 (рис.7), оскільки він передбачає найвищі концентрації парникових газів через повільні технологічні зміни і вважається «песимістичним» у порівнянні з двома попередніми сценаріями. Слід відмітити, що розрахунки за сценарієм А2 проведено за даними 8 моделей (табл. 2). За їх усередненим значенням приземна температура повітря становитиме $-3,6^{\circ}\text{C}$ на кінець 1-шої половини XXI ст.

та $-2,1^{\circ}\text{C}$ на кінець сторіччя. Для обох періодів найнижчі значення температури повітря отримано за моделлю 9 ($-5,1^{\circ}\text{C}$ та $-4,3^{\circ}\text{C}$), а найвищі – в моделі 8 ($-2,1^{\circ}\text{C}$ та $-1,0^{\circ}\text{C}$). Максимальні тренди приземної температури повітря отримано в моделі 3 ($0,37^{\circ}\text{C}/10$ років), а мінімальні – в моделі 9 ($0,18^{\circ}\text{C}/10$ років), при цьому коефіцієнт лінійного тренду ансамблевого середнього значення 8 МЗЦАО склав $0,29^{\circ}\text{C}/10$ років.

Незважаючи на розбіжності між розрахунками, можна виділити деякі тенденції та спільні риси отриманих проєкцій моделей. По-перше, у всіх МЗЦАО збільшуються швидкості потепління (коефіцієнти лінійного тренду) із збільшенням кількості антропогенних викидів парникових газів як це передбачається згідно послідовності сценаріїв В1, А1В та А2. При цьому температури повітря у першу половину XXI ст. в сценаріях В1 та А2 ближчі один до одного, а до кінця XXI сторіччя сценарій В1 «відстає» та прогнозує набагато холодніший температурний режим за А1В та А2, значення в яких стають ближчими одне до одного у всіх МЗЦАО, за виключенням моделі 3 (табл. 2).

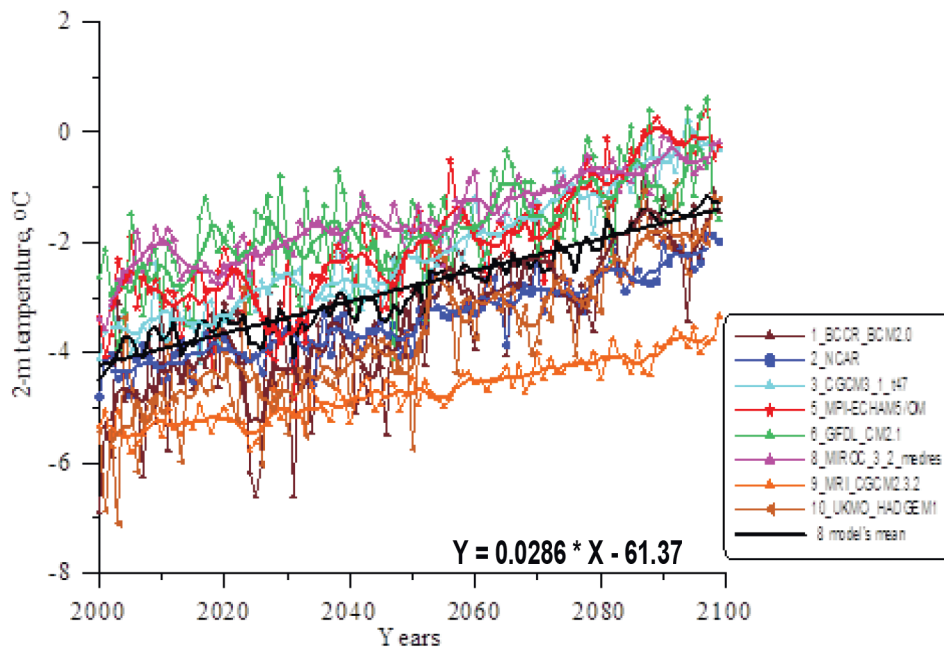


Рис. 7. Проєкції температури повітря за сценарієм А2 у районі УАСАВ до кінця XXI століття.

Fig. 7. The 21st century air temperature projection (scenario A2) for the Vernadsky station region.

4. Обговорення

Раніше в Україні та за її межами багаторазово та комплексно проводилися дослідження термічного режиму та методів прогнозування температури в районі Антарктичного півострова (Краковская, 1998; Krakovska et al. 2010; Turner et al., 2009, 2013; Мартазінова та ін., 2012, та ін.). Наприклад, у роботі Тимофеєва (2007, 2013) було проаналізовано процес потепління за даними інструментальних спостережень на УАСАВ та станціях прилеглих територій за різні періоди (у загальному з 1951 по 2012 рр.) і отримано показник лінійного тренду $0,53^{\circ}\text{C}$ за 10 років з найбільшим значенням тренду взимку ($+0,68^{\circ}\text{C}$) та найменшим влітку ($+0,12^{\circ}\text{C}$). В представленому дослідженні отримано аналогічне значення тренду у $0,51^{\circ}\text{C}$ за 10 років (рис.3) за даними вимірів на УАСАВ, але за дещо довший період з 1947 до 2016 р. Також наведено підтвердження про інтенсивніше потепління в Антарктиці взимку, ніж влітку з 5-ї доповіді Міжурядової групи експертів з питань змін клімату (МГЕЗК).

Зауважимо, що у виконаному дослідженні вперше було застосовано дані чисельних моделей для аналізу та прогнозу термічного режиму в районі Антарктичного півострова і отримано результати, які на нашу думку мають перспективу та повинні використовуватися із зазначеною метою. Так, верифікація глобальних моделей у порівнянні з реальними даними спостережень показала, що загалом МЗЦАО мали задовільну здатність у представленні сучасного потепління на Антарктичному півострові. Часовий хід середньої річної приземної температури повітря в моделі 5 (MPI_ECHAM5/OM, ансамбль 2) найкраще узгоджувався з даними спостережень і мав коефіцієнти кореляції $r=0,8$ за 1949-2014 рр. (п'ятирічні ковзні середні) та тренду $3,1^{\circ}\text{C}/70$ років, тоді як на УАСАВ він становив $3,5^{\circ}\text{C}$ за той же період. Найгірший результат з найменшим $r=0,3$ та трендом $0,3^{\circ}\text{C}/50$ років було отримано за моделлю 9 (MRI_CGCM2.3.2), прогноз якої до кінця XXI століття також давав найнижчі значення та темпи підвищення температури.

Разом з цим, потрібно зазначити, що всі МЗЦАО відобразили потепління в другій половині XX ст. і спрогнозували його продовження до кінця XXI ст., але більшість моделей мали на $1-4^{\circ}\text{C}$ нижчі абсолютні значення приземної температури у порівнянні з даними спостережень чи ансамблевим середнім. Така невідповідність може бути результатом того, що температуру отримано усередненням значень у чотирьох координатних вузлах навколо розташування УАСАВ. А чим гірша роздільна здатність моделі, тим більший простір покриває відповідна координатна комірка, яка з великою ймовірністю може бути зміщена у бік материка чи на південь, де вочевидь нижчі приземні температури. Отриману різницю температур у такому випадку можна

розглядати як систематичну похибку, яка досить легко коригується за наявності даних спостережень. В представленому, як і в попередніх дослідженнях авторів Краковська та ін. (2011; 2016), та багатьох інших, зокрема й IPCC (Climate Change, 2007; Climate Change, 2013), показано, що саме застосування усереднення за ансамблем компенсує такі невідповідності і систематичні похибки, що й довели представлені результати цієї роботи. Тому основними показниками придатності кліматичних моделей та їх ансамблів до прогнозування температури мають бути не абсолютні значення характеристики чи її похибки, а коефіцієнти кореляції чи значення лінійного тренду, отримані на рядах достатньої довжини у минулому.

Щодо прогнозу середньорічної температури повітря до кінця XXI сторіччя, то отримані у даному дослідженні проєкції можна порівняти з результатами Мартазінової та ін. (2012), де була за методом аналогу виявлена 30-річна періодичність характеристики та також спрогнозовано подальше зростання температури на станції «Академік Вернадський» й надалі до 2040 р. зі зменшенням її міжрічної мінливості. Потепління буде спостерігатися і за отриманими у статті проєкціями 10 МЗЦАО, але отримано проєкції за трьома кліматичними сценаріями і, вочевидь, можливості чисельних моделей у прогнозі набагато перевищують статистичні методи. Зокрема, проєкції отримано до кінця XXI сторіччя, можна отримати та проаналізувати, наприклад, зміни у міжрічній мінливості, отримати ще й сезонні та місячні проєкції і т.д., що може бути предметом для майбутніх досліджень.

5. Висновки

У представленому дослідженні за даними вимірів на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» за 70-річний період інструментальних спостережень з 1947 до 2016 р. отримано уточнене значення лінійного тренду у $0,51^{\circ}\text{C}$ за 10 років.

Проаналізовано температурний режим в Антарктиці за прогнозами з 4-ої та 5-ої доповідей МГЕЗК і підтверджено раніше виявлену тенденцію до більшого потепління взимку, ніж влітку в регіоні. Також доведено актуальність та можливість використання SRES-сценаріїв (Special Report on Emissions Scenarios) для детального аналізу майбутніх змін температурного режиму, оскільки порівняльний аналіз аномалій глобальної приземної середньої річної температури повітря між відповідними сценаріями 4-ої (B1, A1B та A2) та 5-ої доповідей МГЕЗК (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5) виявив лише незначні розходження близько $0,5^{\circ}\text{C}$ на кінець XXI ст.

Отримання близьких до реальних коефіцієнтів лінійних трендів та достатньо високих коефіцієнтів кореляції за даними рядів значень температури повітря на Українській Антарктичній станції «Академік Вернадський» та в МЗЦАО у XX сторіччі підтвердило можливість використання глобальних моделей для отримання проєкцій температури повітря у майбутньому. Водночас усереднена похибка всіх МЗЦАО як різниця між змодельованими значеннями температури та даними спостережень (1949-1998, усереднені ковзні) була негативною і досягла $-1,5^{\circ}\text{C}$ до кінця XX сторіччя. Це вказує на те, що більшість моделей не були в змозі відобразити в повному обсязі сучасне потепління в Антарктиці. Також в аналізі значень температури повітря за даними МЗЦАО було виявлено, що окремі моделі занижували абсолютні значення температури повітря до 4°C , що в даному дослідженні могло бути наслідком значних горизонтальних розмірів координатної сітки та застосованого методу усереднення значень МЗЦАО.

Розраховані кліматичні проєкції на XXI сторіччя 10 МЗЦАО та їх ансамблів показали, що очікується продовження зростання температури за всіма трьома сценаріями збільшення антропогенних викидів парникових газів. Найшвидше цей процес буде відбуватися за «песимістичним» сценарієм A2 із середнім трендом температури $0,29^{\circ}\text{C}/10$ років, а найповільніше – за «оптимістичним» B1 – $0,15^{\circ}\text{C}/10$ років.

6. Подяки

Автори висловлюють подяку Державній установі Національний антарктичний науковий центр МОН України за надані первинні дані та матеріали, отримані на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» під час Українських антарктичних експедицій.

7. Література

1. Краковская С.В. Метеорологические рекорды и анализ температурного режима станции Фарадей. *Академик Вернадский. Бюлл. УАЦ*. 1998. Вып.2.С.64-69.
2. Краковська С.В., Гнатюк Н.В., Шпиталь Т.М., Паламарчук Л.В. Проєкції змін приземної температури повітря за даними ансамблю регіональних кліматичних моделей у регіонах України в XXI столітті. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2016. Вип.268. С.33-44.
3. Краковська С.В., Паламарчук Л.В., Шедеменко І.П., Дюкель Г.О., Гнатюк Н.В. Моделі загальної циркуляції атмосфери та океанів у прогнозуванні змін регіонального клімату України в XXI ст. *Геофизический журнал*. 2011. №6. С. 68-81.
4. Мартазінова В.Ф., Клок С.В. Сучасний та майбутній стан середньорічної температури повітря північної частини Антарктичного півострова західного сектора Антарктиди. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2012. Вип.263. С.5-15.
5. Тимофеев В. Е. Динамика современного потепления в районе антарктического полуострова. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2007. Вип. 256. С.112-120.

6. Тимофеев В.Е. Многолетнее изменение температуры воздуха в районе Антарктического полуострова и его причины. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2013. Вип. 264. С.9-17.
7. Automatic weather stations-2017. *Space Science and Engineering Center, UW-Madison; Antarctic Meteorological Research Center and Automatic Weather Station program*. URL: <http://amrc.ssec.wisc.edu/aws/index.html>.
8. Bokhorst, S., Huiskes, A., Convey, P., Sinclair, B. J., Lebouvier, M., Van de Vijver, B., Wall, D. H. 2011. Microclimate impacts of passive warming methods in Antarctica: implications for climate change studies. *Polar Biology*, 34, 1421–1435. DOI: 10.1007/s00300-011-0997-y.
9. Bromwich, D. H., Fogt, R. L. 2004. Strong Trends in the Skill of the ERA-40 and NCEP–NCAR Reanalyses in the High and Midlatitudes of the Southern Hemisphere, 1958–2001. *Journal of Climate*, 17 (23), 4603–4619. DOI: 10.1175/3241.1.
10. Christensen, J. H. 2013. Regional climate science: Findings of IPCC AR5 WG1. *International Conference on Regional Climate – CORDEX 2013*. Brussels, 4-7 November, 2013. URL: http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/cordex2013_documents/ICRC2013_draft_agenda.pdf.
11. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. URL: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4_wg1_full_report.pdf
12. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC. URL: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf.
13. Convey, P., Bindschadler, R., Di Prisco, G., Fahrbach, E., Gutt, J., Hodgson, D.A. Mayewski, P.A., Summerhayes, C.P., Turner, J. and The Acece consortium. 2009. Review Antarctic climate change and the environment. *Antarctic Science*, 21(6), 541–563. DOI:10.1017/S0954102009990642.
14. Convey, P., Smith R. I. L. 2005. Responses of terrestrial Antarctic ecosystems to climate change. *Plant Ecology*. DOI: 10.1007/s11258-005-9022-2.
15. Coupled Model Intercomparison Project phase 3. URL: <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip3/>.
16. Covey, C., AchutaRao, K. M., Cubasch, U., Jones P., Lambert, S.J., Mann, M. E., Phillips, T. J., Taylor K. E. 2003. An overview of results from the Coupled Model Intercomparison Project. *Global and Climate change*, 37, 103–133. DOI:10.1016/S0921-8181(02)00193-5.
17. Ding, Q., Steig, E. J. 2013. Temperature Change on the Antarctic Peninsula Linked to the Tropical Pacific. *Journal of Climate*, 26, 7570-7585. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00729.1>.
18. HadCRUT4. *Met Office Hadley Centre observations datasets* /URL: <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut4/>.
19. History of Signy. *British Antarctic Survey*. URL: <https://www.bas.ac.uk/about/about-bas/our-history/british-research-stations-and-refuges/signy-h/>.
20. Hogg, I.D., Cary, S.C., Convey, P., Newsham, K. K., O'Donnell, A. G., Adams, B. J., Aislabie, J., Frati, F., Stevens, M. I., Wall, D. H. 2006. Biotic interactions in Antarctic terrestrial ecosystems: Are they a factor? *Soil Biology & Biochemistry*, 38, 3035–3040.
21. IPCC Special Report. 2000. Emissions Scenarios. Summary for Policymakers. URL: <https://ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>.
22. Krakovska, S.V., Djukel, G.A. The observed Antarctic Peninsula warming during the 20th century in the AOGCMs and the 21st century projections for the region. *International Polar Year Conference*. Oslo, 8-12 June, 2010. URL: https://www.researchgate.net/publication/306038235_The_observed_Antarctic_Peninsula_warming_during_the_20th_century_in_the_AOGCMs_and_the_21st_century_projections_for_the_region.
23. Legnani, W.E., Canziani, P. O., Barletta, Gil, J., Ibañez, F. 100 years of surface weather observations at Orcadas Antarctic Station: a look at variability and change in the Antarctic Peninsula. *8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*. Foz do Iguacu, 24-28 April, 2006. URL: https://www.researchgate.net/publication/258821220_100_YEARS_OF_SURFACE_WEATHER_OBSERVATIONS_AT_ORCADAS_ANTARCTIC_STATION_A_LOOK_AT_VARIABILITY_AND_CHANGE_IN_THE_ANTARCTIC_PENINSULA.
24. Model output described in the 2007 IPCC Fourth Assessment Report (SRES scenarios), multi-year means. *Data Distribution Centre*. URL: http://www.ipcc-data.org/sim/gcm_clim/SRES_AR4/index.html.
25. Parnikoza, I., Convey, P., Dykyy, I., Trokhymets, V., Milinevsky, G., Tyschenko, O., Inozemtseva, D., Kozeretyska, I. 2009. Current status of the Antarctic herb tundra formation in the Central Argentine Islands. *Global Change Biology*, 15, 1685–1693. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.01906.x.
26. Station Surface Data. *Reader Data set*. URL: <https://legacy.bas.ac.uk/met/READER/surface/stationpt.html>
27. Turner, J., Barrand, N. E., Bracegirdle, T. J., Convey, P., Hodgson, D. A., Jarvis, M., Jenkins, A., Marshall, G., Meredith, M. P., Roscoe, H., Shanklin J. 2013. Antarctic climate change and the environment: an update. *Cambridge University Press*, 1-23. DOI:10.1017/S0032247413000296.
28. Turner, J., Bindschadler, R., Convey, P., di Prisco, G., Fahrbach, E., Gutt, J., Hodgson, D., Mayewski, P., Summerhayes, C. 2009. *Antarctic Climate Change and the Environment*. Cambridge: Victoire Press.
29. Van de Berg, W.J., Van den Broeke, M.R., Reijmer, C.H., Van Meijgaard, E. 2005. Characteristics of the Antarctic surface mass balance, 1958–2002, using a regional atmospheric climate model. *Annals of Glaciology*, 41, 97-104. URL: http://www.staff.science.uu.nl/~broek112/home.php_files/Publications_MvdB/2005_VanDeBerg_AnnGlac.pdf.
30. Van Lipzig, N. P. M., Van Meijgaard, E., Oerlemans, J. 2002. The spatial and temporal variability of the surface mass balance in Antarctica: results from a regional atmospheric climate model. *International Journal of Climatology*, 22, 1197–1217. DOI: 10.1002/joc.798.
31. Weatherly, J. W. 2003. Sensitivity of Antarctic Precipitation to Sea Ice Concentrations in a General Circulation Model. *Journal of Climate*, 17, 3214-3223.
32. Yudakova, O. I., Tyrnov, V. S., Kunakh, V. A., Kozeretyskaya, I. A., Parnikoza, I. Yu. 2016. Adaptation of the Seed Reproduction System to Conditions of Maritime Antarctic in Deschampsia antarctica E. Desv. *Russian Journal of Developmental Biology*, 47(3), 138–146.

8. References

1. Krakovskaia S.V. 1998. Meteorologicheskie rekordy i analiz temperaturnogo rezhima stantsii Faradei-Akademik Vernadsky [Meteorological records and analysis of the temperature regime of the Faraday-Akademik Vernadsky station]. *Buletен Українського антарктичного тентру [Bulletin of the Ukrainian antarctic center]*, 2, 64-69.
2. Krakovska, S.V., Gnatiuk, N.V., Shpytal, T.M., Palamarchuk, L.V. 2016. Projections of surface air temperature changes based on data of regional climate models' ensemble in the regions of Ukraine in the 21st century. *Naukovi pratsi Ukrainського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*, 268, 33-44.
3. Krakovska, S.V., Palamarchuk, L.V., Shedemenko, I.P., Diukel, H.O., Gnatiuk, N.V. 2011. Proekcii zmin pryzemnoi temperatury povitria za danymy ansamblu regionalnykh klimatichnykh modelei u regionakh Ukrainy v XXI stolitti [Projections of surface air temperature changes based on data of regional climate models' ensemble in the regions of Ukraine in the 21st century]. *Naukovi pratsi Ukrainського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту [Scientific proceedings of the Ukrainian research hydrometeorological institute]*, 268, 33-44.
4. Martazinova, V.F., Klock., S.V. 2012. Suchasnyi ta maibutnii stan serednovichnoi temperatury povitria pivnichnoi chastyny Antarktychnogo pivostrova zahidnogo sektora Antarktydy [The current and future state of the mean annual temperature of the northern Antarctic Peninsula in West sector Antarctica]. *Naukovi pratsi Ukrainського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту [Scientific proceedings of the Ukrainian research hydrometeorological institute]*, 263, 5-15.
5. Tymofeyev, V.E. 2007. Dinamica sovremennoho potepleniia v raione Antarkticheskoho poluostrova [Dynamics of modern warming in the Antarctic Peninsula region]. *Naukovi pratsi Ukrainського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту [Scientific proceedings of the Ukrainian research hydrometeorological institute]*, 256, 112-120.
6. Tymofeyev, V.E. 2013. Mnogoletnee izmenenie temperatury vozdukha v raione Antarkticheskogo poluostrova I ego prichiny [Multi-years' changes in the air temperature at the Antarctic Peninsula and the possible reasons]. *Naukovi pratsi Ukrainського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту [Scientific proceedings of the Ukrainian research hydrometeorological institute]*, 264, 9-17.
7. Automatic weather stations-2017. *Space Science and Engineering Center, UW-Madison; Antarctic Meteorological Research Center and Automatic Weather Station program*. URL: <http://amrc.ssec.wisc.edu/aws/index.html>.
8. Bokhorst, S., Huiskes, A., Convey, P., Sinclair, B. J., Lebouvier, M., Van de Vijver, B., Wall, D. H. 2011. Microclimate impacts of passive warming methods in Antarctica: implications for climate change studies. *Polar Biology*, 34, 1421-1435. DOI: 10.1007/s00300-011-0997-y.
9. Bromwich, D. H., Fogt, R. L. 2004. Strong Trends in the Skill of the ERA-40 and NCEP-NCAR Reanalyses in the High and Midlatitudes of the Southern Hemisphere, 1958-2001. *Journal of Climate*, 17 (23), 4603-4619. DOI: 10.1175/3241.1.
10. Christensen, J. H. 2013. Regional climate science: Findings of IPCC AR5 WG1. *International Conference on Regional Climate – CORDEX 2013*. Brussels, 4-7 November, 2013. URL: http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/cordex2013_documents/ICRC2013_draft_agenda.pdf.
11. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. URL: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4_wg1_full_report.pdf
12. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC. URL: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf.
13. Convey, P., Bindschadler, R., Di Prisco, G., Fahrbach, E., Gutt, J., Hodgson, D.A., Mayewski, P.A., Summerhayes, C.P., Turner, G. and The Acce consortium. 2009. Review Antarctic climate change and the environment. *Antarctic Science*, 21(6), 541-563. DOI:10.1017/S0954102009990642.
14. Convey, P., Smith R. I. L. 2005. Responses of terrestrial Antarctic ecosystems to climate change. *Plant Ecology*. DOI:10.1007/s11258-005-9022-2.
15. Coupled Model Intercomparison Project phase 3. URL: <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip3/>.
16. Covey, C., AchutaRao, K. M., Cubasch, U., Jones P., Lambert, S.J., Mann, M. E., Phillips, T. J., Taylor K. E. 2003. An overview of results from the Coupled Model Intercomparison Project. *Global and Climate change*, 37, 103-133. DOI:10.1016/S0921-8181(02)00193-5.
17. Ding, Q., Steig, E. J. 2013. Temperature Change on the Antarctic Peninsula Linked to the Tropical Pacific. *Journal of Climate*, 26, 7570-7585. URL: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00729.1>.
18. HadCRUT4. *Met Office Hadley Centre observations datasets*. URL: <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut4>.
19. History of Signy. *British Antarctic Survey*. URL: <https://www.bas.ac.uk/about/about-bas/our-history/british-research-stations-and-refuges/signy-h>.
20. Hogg, I.D., Cary, S.C., Convey, P., Newsham, K. K., O'Donnell, A. G., Adams, B. J., Aislabie, J., Frati, F., Stevens, M. I., Wall, D. H. 2006. Biotic interactions in Antarctic terrestrial ecosystems: Are they a factor? *Soil Biology & Biochemistry*, 38, 3035-3040.
21. IPCC Special Report. 2000. Emissions Scenarios. Summary for Policymakers. URL: <https://ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>.
22. Krakovska, S.V., Djukel, G.A. The observed Antarctic Peninsula warming during the 20th century in the AOGCMs and the 21st century projections for the region. *International Polar Year Conference*. Oslo, 8-12 June, 2010. URL: https://www.researchgate.net/publication/306038235_The_observed_Antarctic_Peninsula_warming_during_the_20th_century_in_the_AOGCMs_and_the_21st_century_projections_for_the_region.
23. Legnani, W.E., Canziani, P. O., Barletta, Gil, J., Ibañez, F. 100 years of surface weather observations at Orcadas Antarctic Station: a look at variability and change in the Antarctic Peninsula. *8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*. Foz do Iguacu, 24-28 April, 2006. URL: https://www.researchgate.net/publication/258821220_100_YEARS_OF_SURFACE_WEATHER_OBSERVATIONS_AT_ORCADAS_ANTARCTIC_STATION_A_LOOK_AT_VARIABILITY_AND_CHANGE_IN_THE_ANTARCTIC_PENINSULA.

24. Model output described in the 2007 IPCC Fourth Assessment Report (SRES scenarios), multi-year means. *Data Distribution Centre*. URL: http://www.ipcc-data.org/sim/gcm_clim/SRES_AR4/index.html.
25. Parnikoza, I., Convey, P., Dykyy, I., Trokhymets, V., Milinevsky, G., Tyschenko, O., Inozemtseva, D., Kozeretka, I. 2009. Current status of the Antarctic herb tundra formation in the Central Argentine Islands. *Global Change Biology*, 15, 1685–1693. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.01906.x.
26. Station Surface Data. *Reader Data set*. URL: <https://legacy.bas.ac.uk/met/READER/surface/stationpt.html>
27. Turner, J., Barrand, N. E., Bracegirdle, T. J., Convey, P., Hodgson, D. A., Jarvis, M., Jenkins, A., Marshall, G., Meredith, M. P., Roscoe, H., Shanklin J. 2013. Antarctic climate change and the environment: an update. *Cambridge University Press*, 1-23. DOI:10.1017/S0032247413000296.
28. Turner, J., Bindshadler, R. Convey, P., di Prisco, G., Fahrbach, E., Gutt, J., Hodgson, D., Mayewski, P., Summerhayes, C. 2009. *Antarctic Climate Change and the Environment*. Cambridge: Victoire Press.
29. Van de Berg, W.J., Van den Broeke, M.R., Reijmer, C.H., Van Meijgaard, E. 2005. Characteristics of the Antarctic surface mass balance, 1958–2002, using a regional atmospheric climate model. *Annals of Glaciology*, 41, 97-104. URL: http://www.staff.science.uu.nl/~broek112/home.php_files/Publications_MvdB/2005_VanDeBerg_AnnGlac.pdf.
30. Van Lipzig, N. P. M., Van Meijgaard, E., Oerlemans, J. 2002. The spatial and temporal variability of the surface mass balance in Antarctica: results from a regional atmospheric climate model. *International Journal of Climatology*, 22, 1197–1217. DOI: 10.1002/joc.798.
31. Weatherly, J. W. 2003. Sensitivity of Antarctic Precipitation to Sea Ice Concentrations in a General Circulation Model. *Journal of Climate*, 17, 3214-3223.
32. Yudakova, O. I., Tyrnov, V. S., Kunakh, V. A., Kozeretkaya, I. A., Parnikoza, I. Yu. 2016. Adaptation of the Seed Reproduction System to Conditions of Maritime Antarctic in *Deschampsia antarctica* E. Desv. *Russian Journal of Developmental Biology*, 47(3), 138–146.