

УДК 551.510

## СОСТОЯНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ НИЖНЕЙ ТРОПОСФЕРЫ ЮЖНОЙ ПОЛЯРНОЙ ОБЛАСТИ В ПЕРИОД СОВРЕМЕННОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

**В.Ф. Мартазинова, Е.К. Иванова, В.Е. Тимофеев**

*Украинский научно-исследовательский гидрометеорологический институт,  
г. Киев, проспект Науки, 37, e-mail: nigmi2@yandex.ru*

**Реферат.** Атмосферная циркуляция в Южной полярной области (ЮПО) изучается посредством анализа средних полей давления за каждое десятилетие в течение периода 1961–2000 гг. и эталонных (наиболее вероятных) синоптических процессов зимнего и летнего сезонов 1991–2000 гг. Современное состояние циркуляции в Западном секторе ЮПО определяется преобладанием циклоничности, в особенности в море Беллинсгаузена. Преобладает западный и северо-западный перенос по отношению к Земле Грейама, с малой вероятностью адвекции холодного воздуха из континентальных районов Антарктиды, что объясняет причину значительного роста приземной температуры воздуха в районе Антарктического полуострова, а также на украинской станции Академик Вернадский. Полученные результаты позволяют оценить современное состояние и причины изменений климата (потепление) в исследуемом районе.

**Стан циркуляції низької тропосфери Південної полярної області в період сучасного потепління.**  
В.Ф. Мартазінова, Е.К. Иванова, В.Е. Тимофеев

**Реферат.** Атмосферна циркуляція в Південній полярній області (ППО) вивчається за допомогою середніх полів тиску для кожного десятиліття впродовж періоду 1961–2000 рр. і еталонних (найбільш імовірних) синоптичних процесів зимового та літнього сезонів 1991–2000 рр. Сучасний стан циркуляції атмосфери визначається посиленням циклонічності в Західному секторі ППО, особливо в морі Беллінсгаузена. Переважають західний і північно-західний переноси до Землі Грейама, із незначною ймовірністю адвекції холодного повітря з континентальних районів Антарктиди, що пояснює причину значного підвищення приземної температури повітря на станціях Антарктичного півострова, в тому числі на українській станції Академік Вернадський. Отримані результати дозволяють оцінити сучасний стан і причини змін клімату (потепління) в районі дослідження.

**The state of circulation of the lower troposphere in the Austral polar region in the period of recent warming,** by V.F. Martazinova, E.K. Ivanova, V.E. Tymofeyev

**Abstract.** Atmospheric circulation in Antarctic region is studied by means of mean sea level pressure fields for each decade during 1961–2000 as well as most probable synoptic processes for winter and summer seasons, 1991–2000. Present-day state of atmospheric circulation is represented by predominant cyclones especially at Bellingshausen Sea. Westerlies and north-westerlies towards Graham Land are prevailing, decreasing probability of cold air inflow from the Antarctic continent and explaining significant multi-years' near-surface air temperature growth in the region of the Antarctic Peninsula, including Ukrainian base of Academic Vernadsky. Results of our study let us to better understand present-day state and reasons of climate change (warming) in this region.

**Key words:** atmospheric circulation, most probable pressure field, etalon, similarity criteria, weather regime

### 1. Введение

Начало регулярных исследований атмосферной циркуляции в Южной полярной области (ЮПО) отсчитывается со времени Международного геофизического года (1957–

1959). [Атлас Антарктики, 1969]. С тех пор установлено, что основной чертой крупномасштабной циркуляции атмосферы ЮПО является западно-восточный перенос с сериями циклонов, что обуславливает меньшую интенсивность антициклонального блокирования [Астапенко, 1959, Воскресенский и др., 1980]. В районах взаимодействия воздушных потоков с береговыми или горными районами Антарктиды (в том числе на Антарктическом полуострове) формируются местные циркуляции [Тимофеев и др., 1996].

Особенности атмосферной циркуляции ЮПО традиционно исследуются в работах ААНИИ (С.-Петербург), в частности, выполнена типизация крупномасштабных процессов по традиционным методикам Г.Я. Вангенгейма с идентификацией позиций основных барических волн в ЮПО [Рыжаков, 1977], оценена энергетика синоптических вихрей [Лагун, 1990]. Результаты моделирования циркуляции ЮПО, с обоснованием методик долгосрочного прогнозирования, представлены в [Рабцевич, 1990, Ефимов, 1976]. Типизация синоптических процессов, выполненная в оперативном режиме на станции Вернадский, представлена в [Тумофеев, 2002]. Польскими коллегами [Кейна, 2002] представлена типизация синоптических процессов по данным о. Кинг-Джордж, однако их метод базировался на учете различного типа адвекции, при котором однородные синоптические процессы могли попасть в разные типы.

Новый этап исследований начался с появлением данных объективного анализа, что позволило изучить мезомасштабные процессы в районе Антарктического полуострова [Turner et al., 1994]; определенные успехи достигнуты в моделировании региональной атмосферной циркуляции [van Lipzig et al., 2004], много исследований в последнее время посвящено связи динамики климата отдельных регионов ЮПО и явления Эль-Ниньо-Южное Колебание [Trenberth, 1996, Turner, 2004].

Важные выводы были получены об изменениях климата ЮПО. Значительное возрастание температуры воздуха регистрировалось до конца XX столетия на станциях Антарктического полуострова, в том числе и ст. Вернадский [Говоруха и др., 2003, Turner et al., 2005]. При этом временные рамки регионального потепления соответствуют второму (современному) периоду глобального потепления в XX веке, охватившему внетропические и полярные широты обоих полушарий, в особенности Аляску, Северную и Центральную Сибирь, большую часть Европы [Hinzman, 2005, Алексеев, 2003, Кошельков, 1990, Будыко и др., 1999].

Учитывая незначительное число работ, посвященных роли циркуляционного фактора в изменении климата, задачей данной работы является исследовать междесятилетние изменения крупномасштабной атмосферной циркуляции в ЮПО, а также провести объективную классификацию синоптических процессов в районе Антарктического полуострова. Исследования проводятся в рамках проекта «Анализ преобразования крупномасштабных атмосферных процессов тропосферы Южного полушария в результате глобального потепления для разработки физико-статистических методов прогноза погоды на Антарктическом полуострове», зарегистрированном как проект Международного полярного года (2007–09), N 1151 (рук. д.ф.-м.н., проф. Мартазинова В.Ф.). Исходными данными послужил архив атмосферного давления реанализа ERA-40 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды, с регулярной широтно-долготной сеткой 2.5X2.5°.

## 2. Методика исследований

Все метеорологические поля в электронной версии архива представлены в виде вектора:

$$X_j = \{x_i\}_j = (x_1, x_2, \dots, x)_j, \quad i=1, 2, \dots, K, \quad j=1, 2, \dots, N \quad (1.1)$$

где  $x_i$  – значение метеорологической величины,  $K$  – количество узлов регулярной сетки,  $N$  – количество полей в архиве.

В целом архив метеорологических полей представлен в виде матрицы  $X$  с элементами  $x_{ij}$ , которые соответствуют значениям метеорологической величины в  $i$  узле регулярной географической сетки поля  $j$  электронного архива:

$$X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{i1} & \dots & x_{K-11} & x_{K1} \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{i2} & \dots & x_{K-12} & x_{K2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{1N} & x_{2N} & \dots & x_{iN} & \dots & x_{K-1N} & x_{KN} \end{pmatrix}, \quad (1.2)$$

где  $i = 1, \dots, K$ ,  $j = 1, \dots, N$ .

Для распознавания наиболее информативного синоптического процесса используются два критерия аналогичности, которые принадлежат к разным типам мер близости (отдаленности) метеорологических полей [Багров, 1983].

Критерий  $\rho$  позволяет оценить геометрическое сходство барических полей по знаку аномалии двух полей:

$$\rho = \frac{n_+ - n_-}{K}, \quad (1.3)$$

где  $K$  – общее количество узлов регулярной сетки,  $n_+$  – количество узлов, где знаки аномалий двух полей совпадают,  $n_-$  – количество узлов, где знаки аномалий полей противоположны. Значение критерия изменяются в пределах  $-1 \leq \rho \leq 1$ . Знак аномалии определялся отклонением давления в каждой точке от пространственного среднего значения поля.

В качестве второго критерия аналогичности использовался средний квадрат расстояния между двумя полями, который определяется по формуле:

$$\eta^2 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (x_{ij} - x_{il})^2, \quad (1.4)$$

где  $x_{ij}$  и  $x_{il}$  – значение барического поля в  $i$ -ом узле регулярной сетки двух полей  $j$ -го и  $l$ -го.

Критерии аналогичности  $\rho$  и  $\eta$  не связаны между собой и отвечают за разные физические характеристики поля, что и определило целесообразность их использования. Если в классе выявляется несколько информативных полей с одинаковой вероятностью, то они могут в данном классе создать подклассы.

Расчеты проводились поэтапно. На первом этапе в каждом месяце каждого года определяется наиболее вероятное (эталонное) барическое поле у поверхности земли. Для этого рассчитывается матрица  $\rho$  с элементами  $\rho_{ij}$ , которая характеризует степень подобия полей  $i$ ,  $j$ -го отдельного месяца:

$$\rho = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{12} & \dots & \rho_{1p} \\ \rho_{21} & 1 & \dots & \rho_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{p1} & \rho_{p2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

где  $p$  – количество дней в месяце,  $i = 1, 2, \dots, p$ ;  $j = 1, 2, \dots, p$ .

Матрица квадратная и симметричная относительно главной диагонали, члены которой равны 1 и указывают на подобие одного и того же поля, т.е.  $i=j$ . Члены первой

строки матрицы указывают на степень сходства первого поля данной выборки с остальными полями, члены второй строки – на сходство второго поля с остальными полями, и т.д. Аналогично строится аналогичная матрица с элементами  $\eta_{ij}$ , которая характеризует степень близости (отдаленности) барических полей в данной выборке. Синоптические ситуации являются аналогичными в данном классе, если  $\rho \geq 0.3$  и  $\eta \leq 1$ . К наиболее вероятному классу полей давления относится класс с наибольшим объемом выборки, в которой поля взаимосвязаны по  $\rho \geq 0.3$  и  $\eta \leq 1$  [Martazinova, 2005]. В каждом выделенном классе необходимо определить одно наиболее информативное метеорологическое поле, которое выбирается из условий

$$\theta_{\max} = \sum_i^p \rho_{ij} \text{ та } \vartheta_{\min} = \frac{1}{p} \sum_1^p \eta_{ij} \leq 1. \quad (1.6)$$

Таким образом, получаем наиболее информативное поле приземного давления для каждого выбранного месяца в течение периода 1991–2000 гг.

Из полученных барических полей отдельно для каждого месяца формируется вторичная выборка, которая состоит из наиболее информативных синоптических ситуаций в каждом году. На втором этапе расчетов для снова сформированной выборки повторяется процедура определения наиболее вероятного поля, т.е. строятся аналогичные описанным выше матрицы с элементами  $\rho_{ij}$  и  $\eta_{ij}$ . Как и в предыдущем случае, по указанным выше критериям определяется поле, которое характеризуется наибольшим сходством с остальными полями как первичной, так и вторичной выборки. Это поле, собственно, и есть наиболее вероятным и наиболее информативным полем синоптических процессов в данном месяце за исследуемый период, указывая на те метеорологические процессы, которые были характерны для периода исследования. Поэтапное проведение расчетов позволяет определить обеспеченность полей, которые принадлежат к разным классам, т.е. количество аналогичных ему барических полей из всего множества полей. Эталонные поля давления рассчитывались для каждого зимнего (июнь–август) и летнего (декабрь–февраль) месяца десятилетия 1991–2000 гг. в области между 50 и 75° ю.ш. и между 180° з.д. и 50° в.д. (рис. 1).

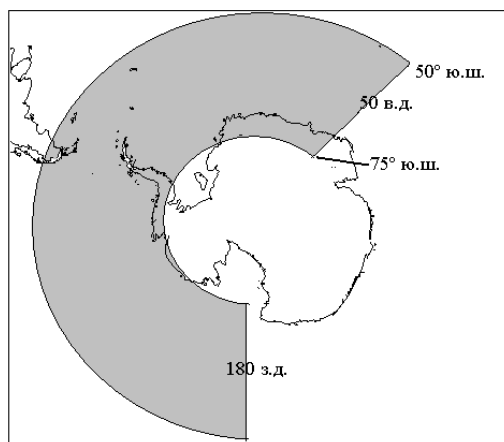


Рис. 1. Область расчета эталонных атмосферных процессов (выделена).

### 3. Результаты работы

Средние поля атмосферного давления были построены за каждое 10-летие для зимнего (июнь–август) и летнего (декабрь–февраль) сезонов внетропических широт Южного полушария, начиная с десятилетия 1961–1970 гг. Наиболее обширным является циклон в районе

моря Росса, который продвинул более всего к полюсу, а над восточным сектором ЮПО располагается ЦДА низкого давления в районе моря Содружества, около 100° в.д. (рис. 2).

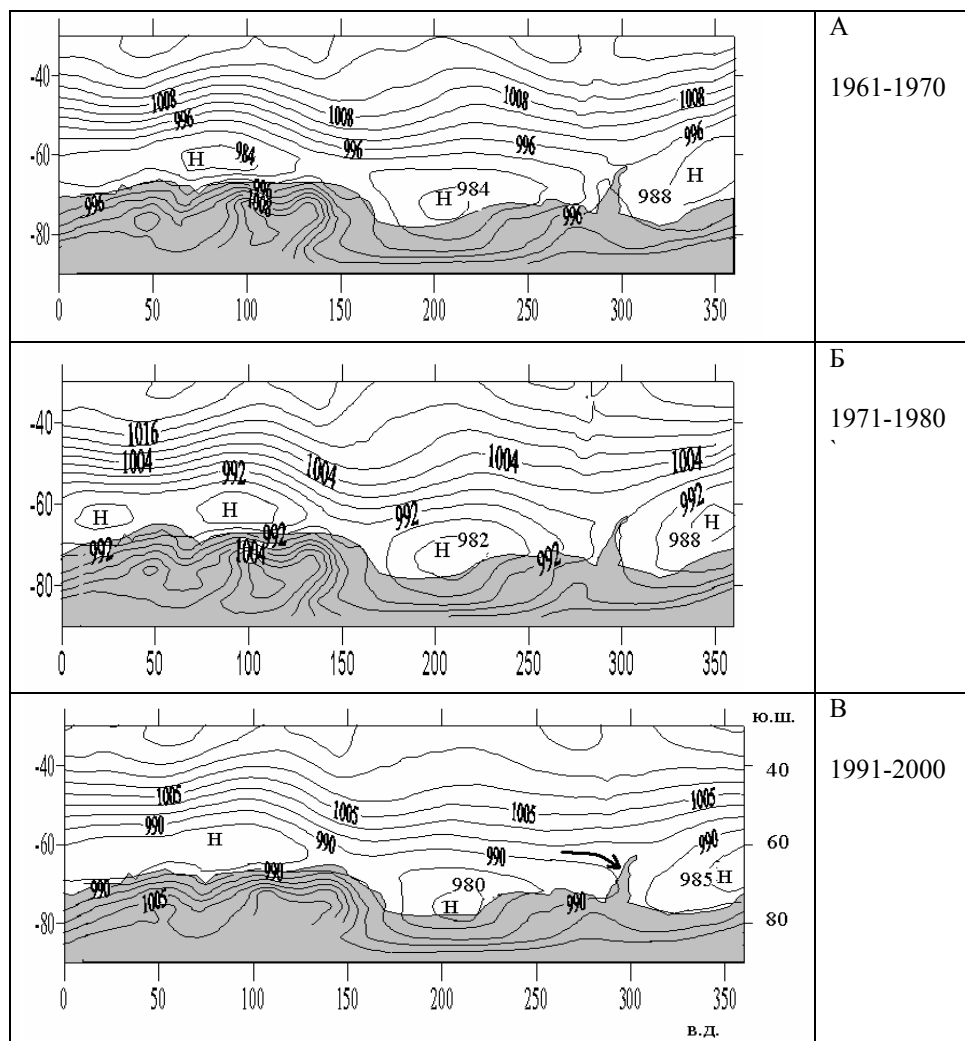


Рис. 2. Средние поля давления ЮПО по десятилетиям (июль): а – 1961–1970, б – 1971–1980, в – 1991–2000 гг.

Площадь циклонической циркуляции в Западном секторе ЮПО увеличивается к 1991–2000 гг. за счет распространения ложбины в море Беллингаузена, что сопровождается понижением давления в этой области. Другой ЦДА пониженного давления расположен над морем Уэдделла, а смена знака циркуляции происходит в районе Антарктического полуострова, с наличием барического гребня, или седловины (рис. 2). Наиболее выражен этот гребень в 1960-ые годы, в связи с усилением отрога континентального (антарктического) антициклона; в последующие десятилетия он оформлен слабее. Ослабление гребня сопровождается усилением зональности в данном регионе, что является циркуляционным механизмом, объясняющим процесс потепления на Земле Грейама. Кроме того, прослеживается некоторое смещение к востоку седловины в районе Антарктического полуострова от десятилетия к десятилетию.

Как следует из анализа рис. 3, эталонные поля месяцев зимнего сезона являются во многом аналогичными, с преобладающим циклогенезом в западном секторе ЮПО в целом и над морем Беллинсгаузена в частности, а также развитием гребня субтропического максимума, который простирается непосредственно к Антарктическому полуострову в июне, а в остальные месяцы он смещен в море Уэдделла. Данный гребень образует значительное меридиональное преобразование потоков, с квази-блокирующим эффектом в июне и августе, обуславливая усиление северных-северо-западных ветров к Земле Грейاما. Одновременно рассматриваемый гребень разделяет области климатических циклонов в море Беллинсгаузена и Уэдделла.

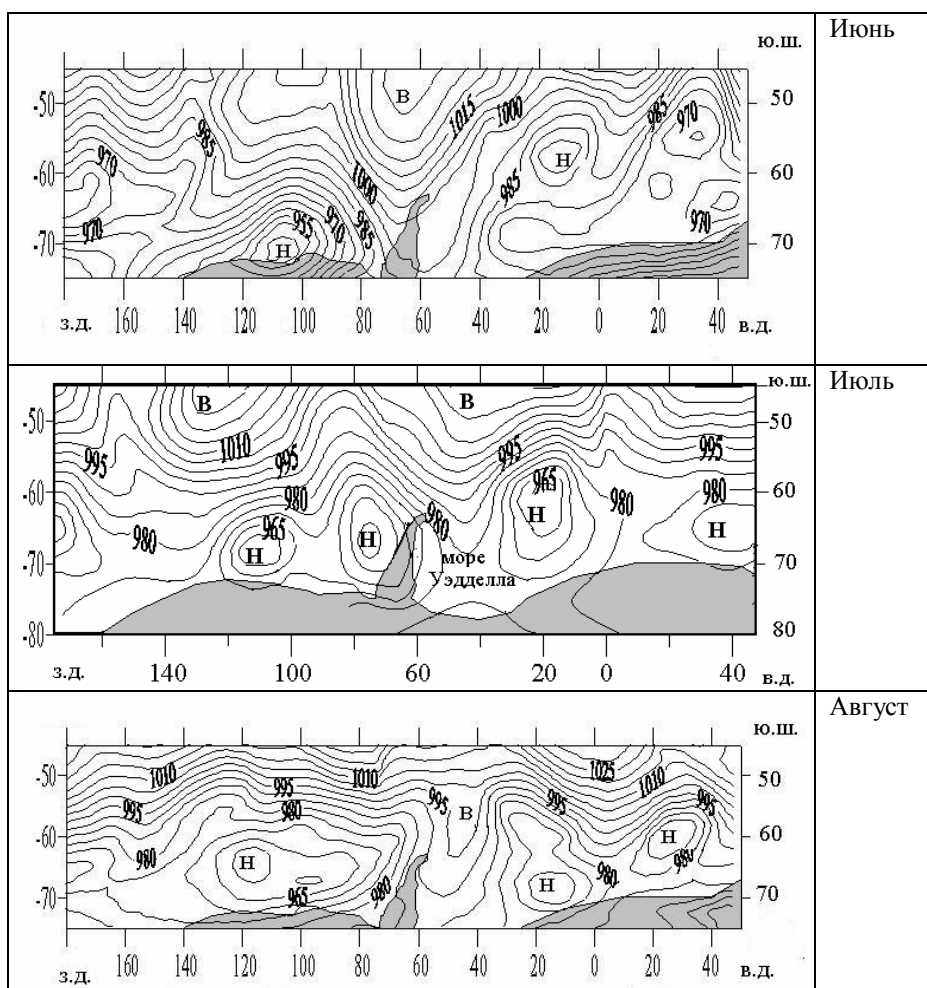


Рис. 3. Наиболее вероятные поля атмосферной циркуляции для июня–августа 1991–2000 гг.

В июле наиболее теплый и влажный воздух поступает в район станции Вернадский при реализации эталонного процесса с циклоном (или сериями циклонов) в море Беллинсгаузена. Температура воздуха зачастую поднимается до нуля и выше, сопровождаясь умеренными и сильными ветрами, метелями, выпадением снега и смешанных осадков. Данная синоптическая ситуация препятствует проникновению холодных антарктических масс, а похолодания, связанные с тыловыми вторжениями, носят непродолжительный характер.

Эталонный процесс характеризуется значительной устойчивостью – величина критерия  $\rho$  превышает 0,50 (коэффициент корреляции 0,80) в течение 2-3 дней после реализации эталонного процесса, и 0,30 на протяжении 7–10 дней. Дополнительно отметим, что эти поля давления также являются наиболее вероятными для ситуаций с сильным ветром на ст. Вернадский, а также значительной вероятностью формирования местных циркуляций при пересечении воздушных масс горной системы при ветрах северо-восточных румбов.

Обеспеченность эталонных процессов достаточно высока и составляет: в июне – 62%, июле – 67%, в августе – 73%, а для месяцев теплых зим аналогичность полей давления оказалась больше, чем для холодных. С другой стороны, в среднем величины критерия  $\rho$  для ЮПО оказались выше, чем для Европейского сектора, что свидетельствует о более устойчивой циркуляции в Южном полушарии.

Таким образом, климатический режим зим последнего десятилетия на Антарктическом полуострове преимущественно формировался за счет синоптических процессов, представленных на рис. 3. Эталонные процессы обусловили значительный рост температуры воздуха на Антарктическом полуострове в 1991–2000 гг., с превышением нормы на ст. Вернадский в отдельные зимние месяцы более чем на 4°C.

Климатический режим летнего сезона в последние десятилетия на Антарктическом полуострове преимущественно формировался за счет эталонных синоптических процессов, представленных на рис. 4. Наиболее вероятный синоптический процесс на протяжении летнего сезона представляет собой практически один и тот же синоптический процесс с циклоном в море Беллинсгаузена и мелкими волнами в зональном потоке на всей области исследования.

Обеспеченность этого процесса на протяжении лета очень высока: в декабре – 77%, в январе – 89%, в феврале – 94%. Столь высокая степень подобия полей свидетельствует о том, что атмосферная циркуляция в первом приближении может быть описана одним эталонным процессом. Именно такие эталонные поля давления создали режим погодных условий летом, который определялся преимущественно сглаженным температурным режимом несколько выше нормы, относительной влажностью воздуха более 80%, преобладающим северо-восточным ветром со скоростью 5 м/с. Существует вероятность штормовой погоды с сильным ветром и значительными осадками, однако она существенно ниже, чем в зимнем сезоне. Аналогично зимнему периоду, эталонный процесс характеризуется значительной устойчивостью (до 7–10 суток), а затем отмечается быстрое его преобразование в другой процесс.

## Выводы

Впервые современный характер атмосферной циркуляции в районе Антарктического полуострова показан при помощи эталонных синоптических процессов, которые определяют погодные условия на Земле Грейама в целом и в районе украинской станции Академик Вернадский в частности. Современное состояние циркуляции летом и зимой обуславливает преобладание западного и северо-западного переноса, со снижением вероятности адвекции холодного воздуха из континентальных районов Антарктиды.

Типичным (наиболее вероятным) является поле давления с преобладанием циклоничности в пределах области исследований, в особенности в море Беллинсгаузена. Такой синоптический процесс обеспечил на ст. Вернадский температурный режим выше нормы, в особенности в течение зимнего сезона в 1991–2000 гг., неустойчивый режим с усилениями скорости ветра до штормового и значительными осадками, и более устойчивый погодный режим – летом. Обеспеченность эталонных процессов достаточно высока, что дает основание использовать эталоны в целях совершенствования методов синоптического прогнозирования. Полученные результаты позволяют понять современное состояние и причины изменений климата (потепление) в районе украинской станции Академик Вернадский.

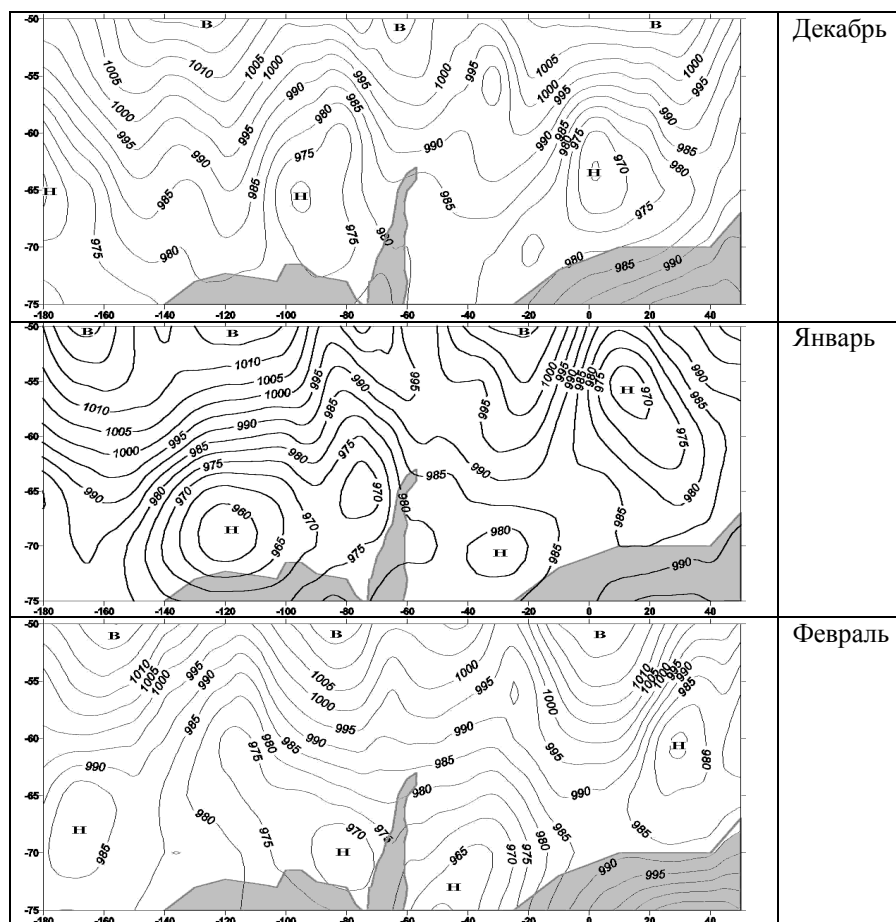


Рис. 4 Наиболее вероятное поле атмосферной циркуляции для летних месяцев 1991–2000 гг.

### Литература

- Алексеев Г.В. Исследования климата Арктики в XX столетии // С.-П. – Тр. ААНИИ. – 2003. – Т. 446. – С. 6–21.
- Астапенко П. Д. О циклонической деятельности в высоких широтах Южного полушария в зимнее время // Инф. бюл. САЭ. – 1959. – N 5. – С. 26–31.
- Атлас Антарктики, т. 2. Л., Гидрометеиздат. – 1969. – 600 с.
- Багров Н.А. Статистическая теория распознавания в метеорологии // Тр. ГМЦ СССР. – 1983. – Вып. 244. – С. 51–62.
- Будыко М.И., Ефимова Н.А., Строкина Л.А. Эмпирические оценки изменения климата к концу XX столетия // Метеорология и гидрология. – 1999. – №12. – С. 5–12.
- Воскресенский А.И., Чуканин К.И. Основные черты циркуляции атмосферы над Антарктидой // Исследования климата Антарктиды. – Л., Гидрометеиздат. – 1980. – С. 170–176.
- Говоруха Л.С., Тимофеев В.Е. Антарктический ледниковый щит – уникальный физико-географический и гидрометеорологический феномен планеты и его роль в глобальном массоэнергoбмене // Труды Юбил. Конфер. к 70-летию ОГМИ. – 2003. – Ч. 2. – С. 166–176.
- Ефимов В.А. Математическое моделирование долговременных нестационарных планетарных процессов в системе океан-атмосфера // Тр. ААНИИ. – 1976. – Т. 336. – 225 с.



- Кошельков Д.П.** Температурные тренды в Антарктике и смежных районах // Метеорология и гидрология. – 1990. – N 5. – С. 111–116.
- Лагун В.Е.** Диагностические исследования синоптической вихревой энергетики атмосферы. В кн.: Исследования вихревой динамики и энергетики атмосферы и проблема климата. Л., Гидрометеоиздат. – 1990. – С. 60–84.
- Рабцевич С.В.** Обеспеченность и эффективность метода долгосрочных метеорологических прогнозов на осень в Антарктике // Тр.ААНИИ. – 1990. – Вып. 422. – С. 107–120.
- Рыжаков Л.Ю.** О сезонных особенностях устойчивости и повторяемости форм циркуляции Южного полушария // Бюлл. САЭ. – 1977. – N 94. – С. 5–10.
- Тимофеев В.Е., Гордиенко С.И.** Местные циркуляции в районе украинской антарктической станции. // Киев, Бюлл. УАЦ. – 1996. – N 1. – С. 66–67.
- Hinzman, L., Bettez N., Bolton W.R et al.** Evidence and implications of recent climate change in Northern Alaska and other Arctic regions // Climatic Change. – 2005. – N 72. – P. 251–298.
- Kejna M.** Wether conditions at Arctowsky station, King George Island, South Shetland Islands, Antarctica in 1996. Polish Polar Research. – 1997. – N 20. – P. 203–220.
- van Lipzig N.P.M., King J.C., Lachlan-Cope T.A.** Precipitation, sublimation, and snow drift in the Antarctic Peninsula region from a regional atmospheric model // J. of Geoph. Res. – 2004. – Vol. 109. – D 24106–D24112.
- Martazinova V.F.** The classification of synoptic Patterns by Method of Analogs // J. Environ. Sci. Eng., 2005, 7. – 61–65.
- Thompson D.W.J., Solomon S.** Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change // Science. – 296. – 2002. – P. 895–899.
- Trenberth K.E., Hoar T.** The 1990–1995 El-Nino -Southern Oscillation events: Longest on Record // Geoph. Res. Letter. – 1996. – N 23. – P. 57–60.
- Turner J., Colwell S., Marshall G., Lachlan-Cope T., Carleton A., Jones P., Lagun V., Reid F., Iagovkina S.** Antarctic climate during the last 50 years. Int. J. Climatol. – 2005. – 25. – P. 279–294.
- Turner J.** The El-Nino and Antarctica // Int. J. of Climatol. – 2004. – V. 24. – P. 1–32.
- Turner J., Thomas J.P.** Summer-season mesoscale cyclones in the Bellinshgausen-Weddell Region of the Antarctic and Links with the synoptic-scale environment. Int. J. of Climatology. – 1994. – Vol. 14. – P. 871–894.
- Timofeyev V. E.** Synoptic circulation patterns of Antarctic Peninsula and adjacent South Ocean regions and connected phenomena // Problemy Klimatologii Polarnoi. – 2002. – N 10, p. 159–178.