

Периодическая и долговременная изменчивость термобарических параметров атмосферы в Антарктическом регионе

С.И. Клок¹, Г.М. Крученицкий^{2*}

¹Украинский научно-исследовательский гидрометеорологический институт
г. Киев, проспект Науки, 37

²Центральная аэрологическая обсерватория
141700, г. Долгопрудный Московской области, ул. Первомайская, 3

Поступила в редакцию 12.08.2008 г.

Проанализированы параметры суточной, сезонной и долговременной изменчивости полей температуры и давления в Антарктиде. Оценены вклады каждого из указанных видов изменчивости в полную изменчивость термобарических полей и пространственное распределение этих вкладов. Выполнено сравнение спектров сезонного хода давления и температуры. Описаны особенности пространственной локализации величины суточного хода изменчивости термобарических полей в регионе. Показано, что тренды температуры в регионе являются положительными, а давления — отрицательными, причем наиболее выражены эти тренды в Западной Антарктиде. Оценены параметры возможных долговременных колебаний температуры и давления в регионе.

Ключевые слова: Антарктида, термобарические поля, сезонная изменчивость, долгопериодные колебания, взаимодействие геосфер.

1. Постановка задачи

Пространственное распределение параметров изменчивости полей температуры и давления в Антарктическом регионе представляет значительный интерес как в силу физико-географических особенностей этого региона, так и ввиду его наименьшей подверженности влиянию антропогенных воздействий из-за значительной удаленности от главных центров хозяйственной деятельности человека. Регулярные наблюдения за температурой и давлением в регионе начаты сравнительно недавно (около 60 лет назад), и к настоящему времени появилась возможность, опираясь на минимальные (с точки зрения климатологии) по длительности ряды непрерывных наблюдений, определить основные характеристики суточной и сезонной изменчивости термобарических полей в Антарктиде, а также оценить характер и статистическую значимость долговременных изменений в этих полях.

2. Исходные данные

В качестве исходных данных для оценки параметров периодической и аperiodической изменчивости термобарических полей в регионе использовались помесячно осредненные данные измерений темпера-

туры и давления в стандартные сроки (0; 6; 12; 18 ч), а также помесячно осредненные данные среднесуточных значений температуры и давления. Эти данные получены на 42 станциях Антарктического региона [1]. Расположение этих станций, а также длительность и полнота рядов наблюдений на них проиллюстрированы рис. 1. (На карте отсутствует самая северная из станций Campbell (52° с.ш., 169° в.д.), отображение которой потребовало бы сильного уменьшения масштаба, затрудняющего восприятие относительного расположения станций в районе Антарктического полуострова и Шетландских островов).

Полнота рядов оценивалась по коэффициенту их заполнения, т.е. отношению числа отсчетов в ряду к его длительности в месяцах. Из рис. 1 видно, что данные о давлении непосредственно на станциях имеются только для 28 станций из 42. Правда, для 38 станций, т.е. всех, исключая «высокогорные», имеются данные о давлении, приведенном к уровню моря. Четыре «высокогорные» станции — это Восток (78,5° з.д., 106,9° в.д., 3490 м), South Pole (2835 м), Byrd (80° ю.ш., 120° з.д., 1515 м) и Asuka (71,5° з.д., 24,1° в.д., 931 м).

И наконец, отметим, что две станции в регионе имеют длину рядов, заметно превосходящую остальные длины. Это Grytviken (54,3° ю.ш., 36,5° з.д.) — температура с января 1905 г. (коэффициент заполнения 84%) и Orcadas (60,7° ю.ш., 44,7° з.д.) — температура (98%) и приведенное к уровню моря давление (95%) с апреля 1903 г.

* Сергей Иванович Клок (bel@ozsol.kiev.ua); Григорий Михайлович Крученицкий (oom@cao-rhms.ru).

3. Методы параметризации изменчивости термобарических полей

Для каждой из станций и каждого ряда (температура, давление и давление, приведенное к уровню моря), прежде всего строилась регрессионная модель сезонного хода среднемесячных значений:

$$V(t) = \sum_{k=0}^5 A_k \cos[k\omega(t - \Theta_k)] + R_{Seaz}(t), \quad (1)$$

где $V(t)$ – моделируемая величина; A_k – амплитуда k -й гармоники годового хода; $\omega = 2\pi/T$ – угловая частота 1-й гармоники годового хода; t – время в сут, исчисляемое с 1 января 1900 г.; Θ_k – фаза k -й гармоники годового хода; $R_{Seaz}(t)$ – остатки сезонного хода.

Число гармоник ограничено пятью в силу теоремы Котельникова [2], утверждающей, что двух отсчетов на период самой высокой частоты в спектре сигнала достаточно для его восстановления при бесконечном значении соотношения сигнал-шум. Так как неизбежные аппаратные погрешности делают значение этого соотношения конечным, то восстановление параметров 6-й гармоники в принципе невозможно. В модели (1) сохранялись только те гармоники, статистическая значимость которых составляла не менее 95%. Остатки модели (1) подвергались регрессионному тестированию на наличие линейных и квадратичных трендов:

$$R_{Seaz}(t) = kt + b + r(t), \quad (2a)$$

$$R_{Seaz}(t) = At^2 + Bt + C + r(t), \quad (26)$$

где k, b – параметры линейного тренда; A, B, C – параметры квадратичного тренда; $r(t)$ – остатки регрессионной модели.

Параметры тренда принимались отличными от нуля, если значения статистики Фишера [3] для регрессионной модели (2) обеспечивали ее статистическую значимость на уровне не менее 95%.

4. Результаты исследования периодической изменчивости

Успешность моделирования сезонной изменчивости с помощью регрессионной модели (1) иллюстрирует рис. 2, на котором визуализированы поля коэффициентов детерминации модели для температуры и давления. Напомним, что коэффициент детерминации (или эффективность) модели

$$R^2 = 1 - \sigma_{res}^2 / \sigma_m^2,$$

где σ_{res}^2 – дисперсия остатков моделирования; σ_m^2 – дисперсия моделируемого процесса.

Коэффициент детерминации (обычно выражаемый в процентах) показывает, какую часть изменчивости моделируемого процесса описывает модель.

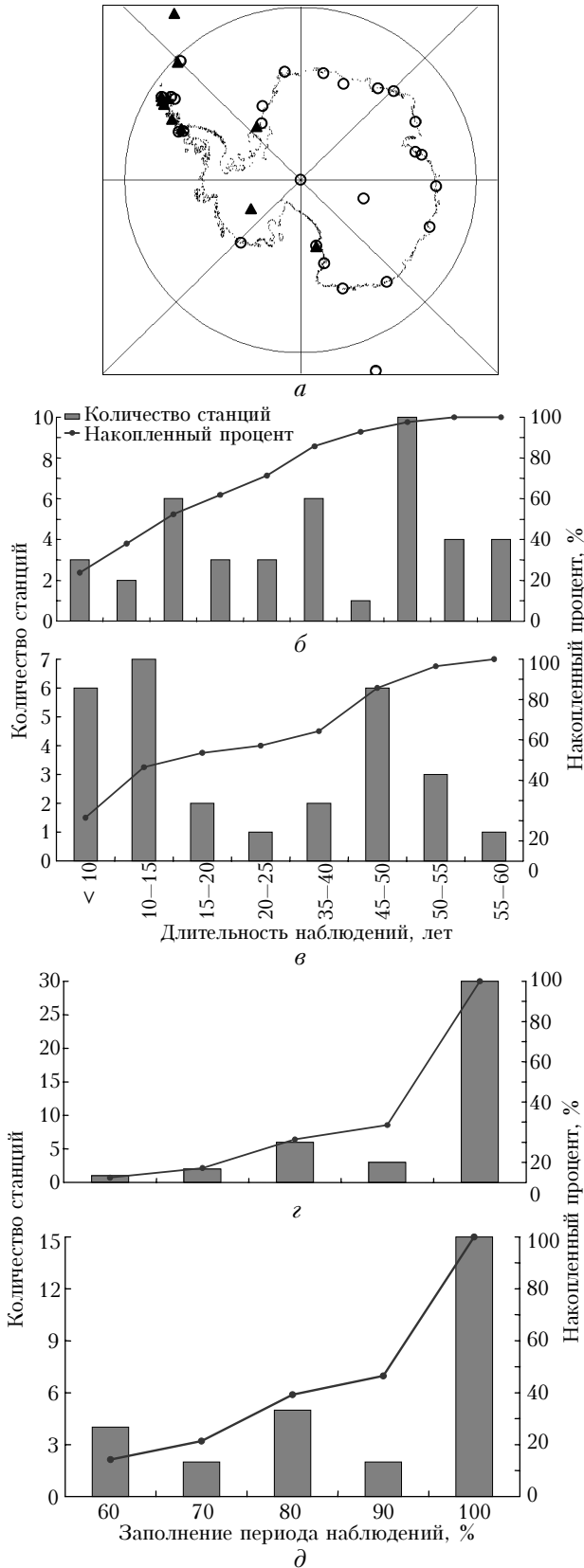
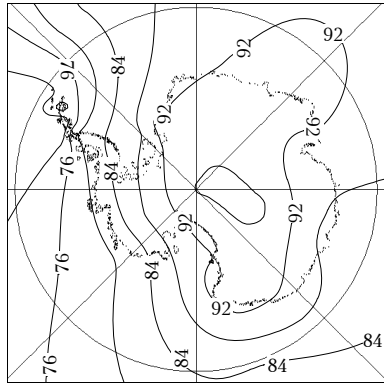
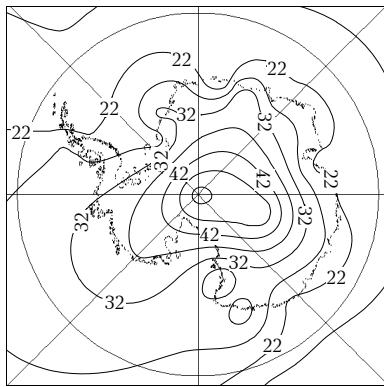


Рис. 1. Исходные данные: расположение станций наблюдения – а (треугольники – станции, где измеряется только температура, кружки – температура и давление); распределение рядов наблюдений по длине (б – температура, в – давление) и коэффициенту заполнения (з – температура, д – давление)



а



б

Рис. 2. Эффективность регрессионного моделирования сезонного хода температуры (а) и давления (б) в Антарктическом регионе, %

Из рис. 2 видно, что сезонная изменчивость температуры составляет существенно большую часть ее полной изменчивости, нежели сезонная изменчивость давления по отношению к его полной изменчивости.

На станции Rothera (67,5° ю.ш., 68,1° з.д.), в частности, сезонную изменчивость давления на статистически значимом уровне вообще не удалось выделить, несмотря на то что наблюдения ведутся с 2001 г. Отметим также, что давление отличается существенно более быстрой временной изменчивостью даже в регионально осредненных данных, о чем свидетельствует рис. 3.

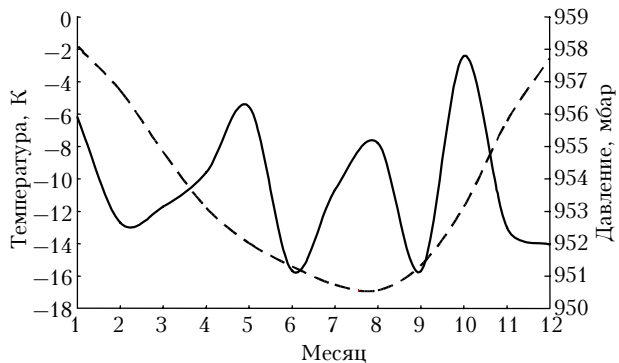
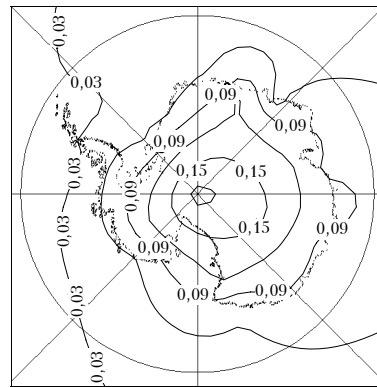


Рис. 3. Осредненный по региону сезонный ход температуры (штриховая) и давления (сплошная линия)

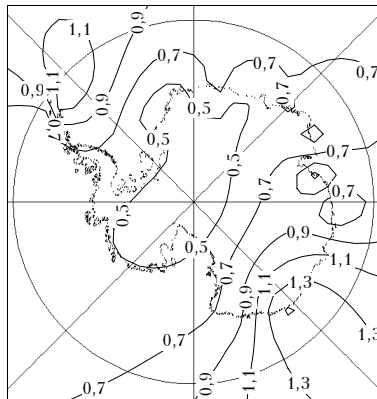
Для количественной оценки этого эффекта для всех станций региона был вычислен энергетический центр тяжести спектра сезонной изменчивости температуры и давления

$$f_c = \frac{\sum_{\text{significant}} kA_k^2}{\sum_{\text{significant}} A_k^2},$$

где суммирование происходит по всем статистически значимым гармоникам годового хода, а f_c выражается в обратных годах. Рис. 4 подтверждает, что сезонные изменения давления происходят существенно быстрее сезонных изменений температуры во всем Антарктическом регионе.



а



б

Рис. 4. Сдвиг (год⁻¹) в область высоких частот энергетического центра тяжести спектра сезонной изменчивости температуры, К (а) и давления, мбар (б) по отношению к первой гармонике годового хода

Для любого другого региона этот факт очевиден ввиду того, что сезонные температурные изменения гораздо более инерционны по своей природе, но в Антарктическом регионе, где почти полгода существует выраженный, устойчивый и малоподвижный циркумполярный вихрь, такая ситуация нетривиальна и нуждается в обосновании данными наблюдений. Это обоснование и иллюстрирует рис. 4. Интересно отметить, что близлежащие от Антарктиды континенты (Южная Америка и Австралия) увеличивают скорость сезонной изменчивости давления и уменьшают скорость сезонной изменчивости температуры.

Форма сезонного хода температуры на отдельных станциях практически совпадает с формой среднего

по региону, о чем свидетельствует близость к единице коэффициентов корреляции между этими функциями. Отличие состоит лишь в «размахе» сезонного хода. Принципиально иная ситуация имеет место для давления. Рис. 5 показывает, что в отличие от температуры формы кривых сезонной изменчивости весьма разнообразны и сильно подвержены влиянию прилегающих континентов, в особенности Южной Америки. Представление о сезонной изменчивости полей давления и температуры дает рис. 6.

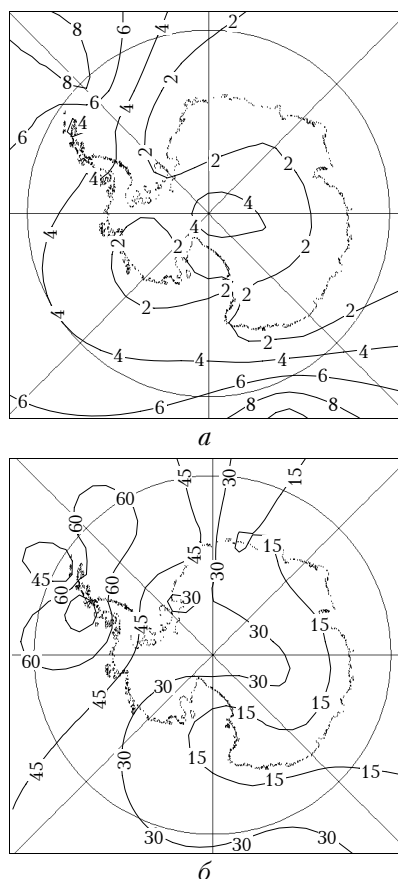


Рис. 5. Отличие от 100%-й корреляции сезонного хода температуры (а) и давления (б) с соответствующими средними по региону сезонными ходами

Весьма неожиданно выглядят поля среднеквадратических отклонений внутрисуточных значений давления и температуры (рис. 7).

При практически полном отсутствии внутрисуточных вариаций давления в Восточной Антарктиде эти вариации аномально высоки в западной части материка, причем практически одинаковы зимой (октябрь—март) и летом (апрель—сентябрь). Подчеркнем, что близки не только значения изоплант внутрисуточных вариаций давления, но и их форма. Эти обстоятельства дают основания предполагать, что аномально высокие внутрисуточные вариации давления в Западной Антарктиде, которая в отличие от восточной части континента (возраст ~3 млрд лет) представляет собой относительно молодое геологическое образование (возраст ~500 млн лет), обусловлены, по крайней мере частично, взаимодействием

геосфер. Это предположение косвенно подтверждается фактом выхода активно выделяющего газ и энергию рифтового разлома к антарктическому побережью между морями Беллинсгаузена и Росса [4].

Столь же необычно располагаются изопланты внутрисуточных вариаций температуры. Хотя эти вариации летом вдвое больше, чем зимой, формы изоплант весьма схожи и представляют собой в основном замкнутые кривые, группирующиеся вокруг действующего влк. Эребус (77° ю.ш., 167° в.д.). Это также указывает на возможность литосферной обусловленности наблюдаемых внутрисуточных вариаций температуры.

5. Результаты исследования долговременной изменчивости

Из 42 станций Антарктического региона, для которых имеются ряды среднемесячной температуры, статистически значимый на 95%-м уровне линейный тренд (2а) был обнаружен на 18, квадратичный (2б) — на 11, причем на шести станциях значимыми оказались оба тренда. При этом на всех шести станциях значимость квадратичного тренда оказалась выше. Для 28 станций, где имеются ряды среднемесячных значений давления, статистически значимый на 95%-м уровне линейный тренд (2а) был обнаружен на 10, квадратичный (2б) — на трех, причем на трех станциях значимыми оказались оба тренда. Все значения линейного тренда температуры оказались отрицательными, а давления — положительными, их географическое распределение иллюстрирует рис. 8.

Соотношение знаков трендов температуры и давления представляется естественным с точки зрения гидростатики. Географическая локализация трендов обоих параметров близка и привязана к Западной Антарктиде. Разумеется, естественным выглядит предположение, связывающее положительный тренд температуры в Антарктическом регионе с глобальным потеплением [5]. (Для полноты представления мнений приведем цитату из известного энциклопедического словаря «Википедия» (<http://ru.wikipedia.org>): «Несмотря на общемировое потепление, за последние 35 лет температура в Антарктиде существенно понизилась. Температура воздуха у поверхности снижается на 0,7 °С каждые десять лет. Общее снижение температуры в Антарктиде является загадкой для ученых, поскольку большинство сценариев климатических изменений предполагают, что полярные области планеты должны быстрее и интенсивнее подвергаться воздействию глобального потепления»). Оно отчасти подтверждается локализацией области наибольших трендов между обитаемыми территориями: Австралией и Южной Америкой.

В то же время имеются обстоятельства, которые указывают на возможность и других причин образования трендов. Кроме локализации области наибольших трендов в эндогенно активной Западной Антарктиде, это может быть различие знаков коэффициента A в модели (2б) на различных станциях

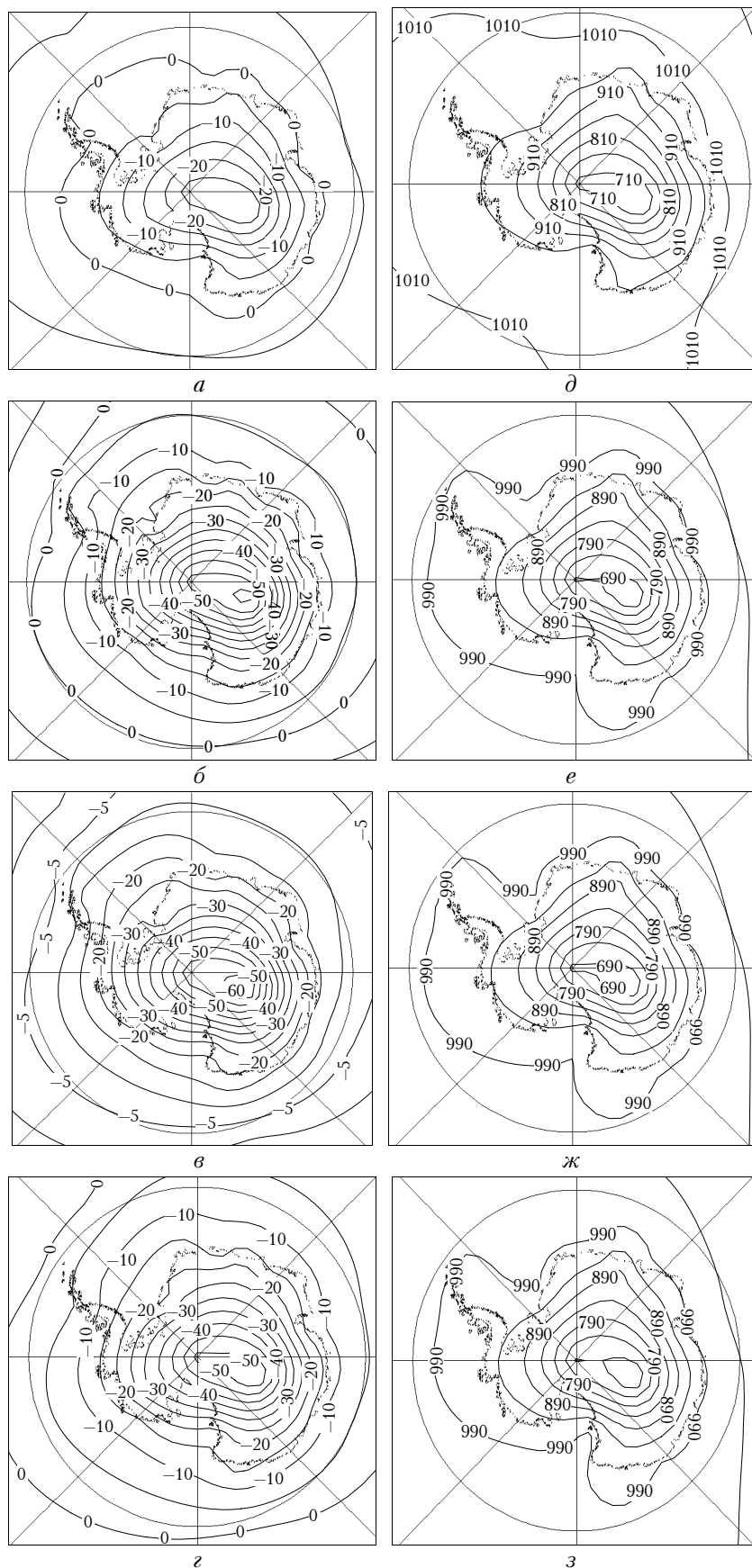


Рис. 6. Сезонные значения температуры и давления в Арктическом регионе: январь – *a* и *д* соответственно; апрель – *б* и *е*; июль – *в* и *ж*; октябрь – *г* и *з*

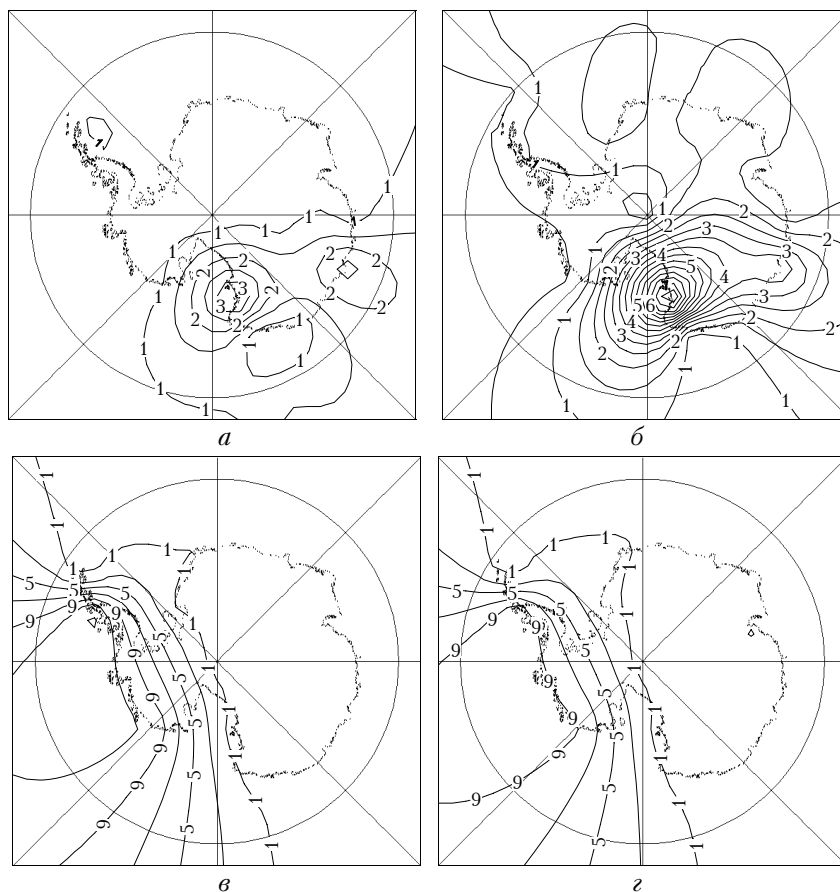


Рис. 7. СКО внутрисуточных вариаций температуры, К: зимой – а; летом – б и давления, мбар: зимой – в; летом – г

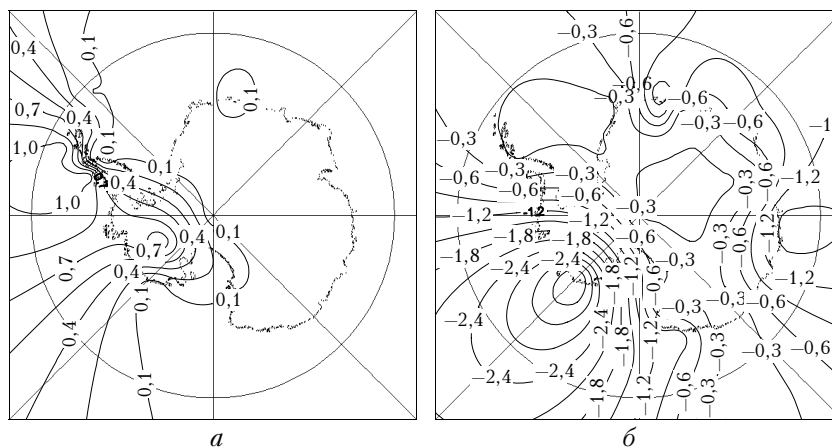


Рис. 8. Линейные тренды за 10 лет температуры, К (а) и давления, мбар (б) в Антарктическом регионе

как для температуры, так и для давления. Так как бессмысленно с физической точки зрения интерпретировать наличие значимого квадратичного тренда в том или ином параметре как свидетельство неограниченности его значений в прошлом и в будущем, такой тренд естественно интерпретировать как свидетельство колебательных изменений в эволюции данного параметра с периодом, превышающим полную временную протяженность ряда наблюдений.

Смена знаков при старшем члене квадратичного тренда на различных станциях говорит о том, что долговременные колебательные изменения на этих

станциях происходят не синфазно. Ясно, что если период наблюдения расположен вблизи нулей медленного колебания (медленным колебанием естественно считать колебание, период низшей гармоники которого заметно превосходит длительность периода наблюдений, или, по крайней мере, сравним с ним), то мы получим статистически значимый линейный тренд.

В случае близости периода наблюдения к экстремумам медленного колебания статистическую значимость приобретает квадратичный тренд со знаком при старшем члене, соответствующем типу экстремума (минимум – плюс, максимум – минус). И наконец,

значимость линейного тренда будет убывать тем в большей степени, чем симметричнее относительно экстремума медленного колебания расположен период наблюдений.

Исходя из этих соображений, следует признать, что приведенные выше сведения о трендах на различных станциях дают возможность предположить именно колебательный характер долговременных изменений давления и температуры в Антарктическом регионе. Косвенно предположение о колебательном характере долговременных изменений в полях температуры и давления подтверждает форма регионально осредненных рядов остатков сезонного хода этих параметров.

Чтобы оценить форму этих колебаний, для названных рядов были построены нелинейные регрессионные модели:

$$R_{Seaz}(t) = \sum_{k=0}^5 B_k \cos \left[k \frac{2\pi}{T_l} (t - \Psi_k) \right] + r(t), \quad (3)$$

где в качестве подбираемого (по критерию максимума коэффициента детерминации) параметра кроме амплитуд и фаз пяти гармоник (B_k, Ψ_k) использовался период основной из них — T_l . Этот период оказался равным 88 годам для температуры и 55 годам для давления (рис. 9). При этом значения коэффи-

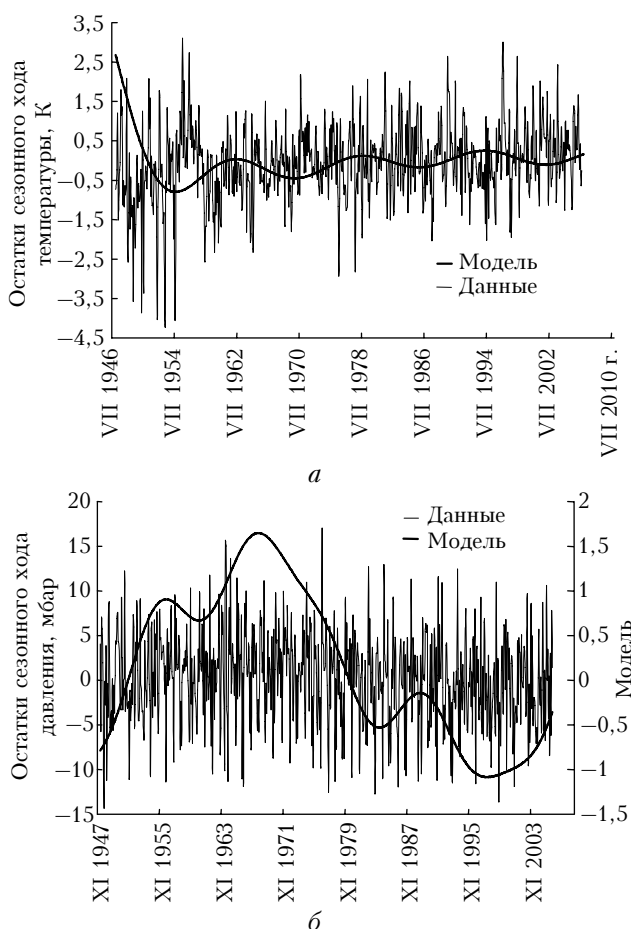


Рис. 9. Периодическая модель долговременной изменчивости температуры (а) и давления (б) в Антарктическом регионе

циента детерминации оказались примерно в 2 раза выше, чем для линейного тренда (2а): 8,5% для температуры и 2,7% для давления.

Относительно невысокие значения коэффициента детерминации объясняются отмеченной выше расфазировкой долговременных изменений на различных станциях и обусловленным этим обстоятельством высоким вкладом фазового шума в ряды регионально осредненных остатков сезонного хода.

В заключение отметим одно важное обстоятельство. Периодическая модель долговременной изменчивости температуры Антарктического региона указывает на наличие аномально высоких ее значений (до 5,6 К выше климатической нормы) в начале 40-х гг. XX в. и, естественно, предсказывает такие же значения на рубеже 20–30-х гг. XXI в. (рис. 10).

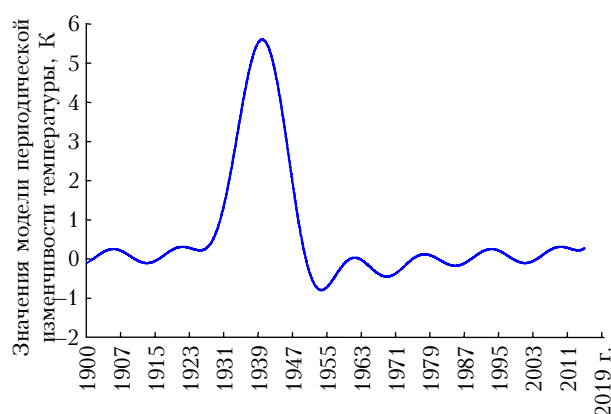


Рис. 10. Динамический диапазон периодической модели долговременной изменчивости температуры

Подтвердить прошлое мы можем (лишь отчасти и то по понятным причинам: сравнивать значения *региональной* модели с *локальными* отсчетами не вполне корректно, но выбирать, увы, не из чего) данными лишь двух станций, на которых, как отмечено выше, в это время велись наблюдения. Аномалия составила +5,5 К в феврале 1942 г. на ст. Grytviken (54,3° ю.ш., 36,5° з.д.) и 5 мес спустя на ст. Orcadas (60,7° ю.ш., 44,7° з.д.). Заметим также, что близкие по величине аномалии наблюдаются в настоящее время в Арктическом регионе, правда, несколько ближе к полюсу.

Заключение

1. Установлено, что в Антарктическом регионе сезонная изменчивость температуры составляет от 76 до 96% от ее полной изменчивости, а для давления — от 22 до 52%. Сезонные изменения давления происходят значительно быстрее, чем температуры, энергетический центр тяжести их спектра существенно смещен в область высоких частот по отношению к годовой гармонике (местами более чем вдвое), в то время как для температуры соответствующее смещение не превышает 18%.

Отмеченное обстоятельство приводит к тому, что формы кривых сезонного хода давления в различных частях Антарктического региона намного

разнообразнее, чем формы кривых сезонного хода температуры. При этом если географическое распределение сдвига энергетического центра тяжести спектра сезонной изменчивости температуры близко к зональному, то для давления область больших сдвигов явно смещена в направлении прилегающих континентов (Австралии и Южной Америки).

2. Установлено, что внутрисуточные вариации как давления, так и температуры в основном сосредоточены в Западной Антарктиде, причем если величина СКО давления практически не зависит от сезона, то для температуры она летом примерно вдвое больше, чем зимой.

3. Линейные тренды температуры (положительный) и давления (отрицательный) локализованы главным образом в Западной Антарктиде. В то же время имеющиеся данные наблюдений не противоречат предположению о колебательном характере долговремен-

ных изменений давления и температуры в Антарктическом регионе. При этом первая гармоника долговременных колебаний температуры может составлять ~ 88 лет и динамический диапазон колебания ~ 6 К, а для давления соответствующие показатели 55 лет и 3 мбар.

1. <http://cdiac.ornl.gov/epubs/ndp/ndp032/ndp032.html>
2. *Иванов М.Т., Сергиенко А.Б., Ушаков В.Н.* Теоретические основы радиотехники. М.: Высш. шк., 2002. 260 с.
3. *Худсон Д.* Статистика для физиков. М.: Мир, 1967. 242 с.
4. *Сорохтин О.А., Ушаков С.А.* Развитие Земли: Учебник / Под ред. акад. РАН В.А. Садовниченко. М.: Изд-во МГУ, 2002. 560 с.
5. *Third Assessment Report – Climate Change 2001* (<http://www.ipcc.ch/>).

S.I. Clok, G.M. Kruchenitskii. **Seasonal and long-term variability of temperature and pressure fields in Antarctic region.**

For the Antarctic region diurnal seasonal and long-term variability have been analyzed. The shapes of seasonal pressure variation curves for different parts of the Antarctic region are much more diverse than those of seasonal temperature variation curves. Therewith, while the geographical distribution of the shift of energy spectrum weight centrum for seasonal temperature variability is close to the zonal one, the area with the largest shifts for pressure is distinctly shifted towards the adjacent continents (Australia and South America). It is established that both pressure and temperature 24-hour variations basically center in Western Antarctica, and while standard deviation values for pressure SD are practically independent of the season, for temperature in summer they are twice higher than in winter. The linear trends of temperature (positive) and pressure (negative) are mainly localized in Western Antarctica.