

УДК 551.508

## СЕЗОННАЯ И ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТОЛЩИНЫ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ЛЕДНИКЕ ГАЛИНДЕЗ

Л.М. Белокриницкая<sup>1</sup>, к.ф.-мат.н., В.Ф. Грищенко<sup>2</sup>, к.географ.н.,  
В.Н.Ивченко<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., С.В.Клок<sup>2</sup>, Г.М.Крученицкий<sup>3</sup>, к.ф.-мат.н.

<sup>1</sup>Физический факультет КГУ, Киев, Украина *ivchenko\_v@univ.kiev.ua*;

<sup>2</sup>Украинский научно-исследовательский институт гидрометеорологических исследований, УкрНИГМИ, Киев, Украина;

<sup>3</sup>ЦАО Росгидромета, г. Долгопрудный, РФ, *oom@cao-rhms.ru*

Светлой памяти нашего погибшего товарища  
А.П. Манченко посвящается

**Анотація.** Проаналізовано періодичну та аперіодичну складові змінності товщини сніжного покриву (ТСП) на метеорологічній ділянці о. Галіндез (архіпелаг Аргентинські острови). Побудовано мультиплікативну модель часового ходу цієї товщини, визначено амплітуди та фази спектральних складових процесу, виявлено статистично значимий додатний тренд, який складає ~5% на рік. На основі побудованої моделі виконано оцінку характерного часу змінності ТСП та складено прогноз товщини сніжного покриву на найближчі два роки.

**Long-term and seasonal variability of snow blanket thickness at the Galindez glacier.**

L.M. Belokrinitskaya, V.F.

Grishchenko, V.N. Ivchenko, S.V. Klock, G.M. Kruchenitsky

**Resume.** Periodical and irregular components of variations in snow blanket thickness at the Galindez Island, the Argentine Isles archipelago, were statistically analyzed. Multiplicative model of temporal series of this thickness was created, amplitudes and phases of spectral components were determined, statistically significant positive trend was revealed, its value was 5 percents per year. An estimation of characteristic time for variations in snow blanket thickness was made upon this base and this thickness was forecasted for next two years.

**Сезонная и долговременная изменчивость толщины снежного покрова на леднике Галиндез.** Л.М. Белокриницкая, В.Ф. Грищенко, В.Н. Ивченко, С.В. Клок, Г.М. Крученицкий

**Аннотация.** Проанализированы периодическая и аперіодическая составляющие изменчивости толщины снежного покрова (ТСП) на метеорологической площадке о. Галиндез (архипелаг Аргентинские острова). Построена мультипликативная модель временного хода этой толщины, определены амплитуды и фазы спектральных составляющих процесса, выявлен статистически значимый положительный тренд, равный ~5% в год. На основе построенной модели выполнена оценка характерного времени изменчивости ТСП и составлен прогноз толщины снежного покрова на ближайшие два года.

### 1. Исходные данные и постановка задачи

С 1997 года на украинской антарктической станции «Академик Вернадский» организованы регулярные измерения толщины снежного покрова (ТСП) на метеорологической площадке и леднике Домашний о. Галиндез. Из рисунка 1, на котором визуализированы данные измерений за 1997–2005 г.г., видно, что временная изменчивость ТСП имеет достаточно сложный характер, включая в себя как сезонные, так и другие периодические изменения, а также аперіодическую составляющую, выражающуюся в положительном тренде (рис. 1 и 4 на цв. вклейке).

В настоящее время, когда широким фронтом ведутся работы по обнаружению и диагностике долговременных изменений в климатической системе Земли [1], представляется весьма актуальной задача детального изучения временной изменчивости такого важного параметра, как ТСП в южнополярном регионе, который с одной стороны активно участвует в формировании альбеда Земли, а с другой тесно связан с изменениями региональной температуры.

### 2. Построение регрессионной модели

Для изучения временной изменчивости ТСП были привлечены данные ежедневных измерений и предложена мультипликативная регрессионная модель вида:

$$T(t) = S(t)Q(t) + res(t) \quad (1)$$

где  $T(t)$  – данные измерений ТСП;  $Q(t)$  – сезонная изменчивость ТСП;  $S(t)$  – огибающая сезонной изменчивости, ответственная как за периодические изменения, не являющиеся гармониками годового хода, так и за аперіодические изменения (тренд);  $res(t)$  – остатки моделирования.

Сразу оговоримся, что разделение на периодическую и аперіодическую составляющие долговременной изменчивости является в высокой степени условным. Хотя в климатических и озоновых исследованиях последнего времени принято идентифицировать линейный тренд как результат антропогенной деятельности, на

самом деле нельзя а priori утверждать, что столкнувшись с таким трендом, мы не обнаружили результат медленного колебания, период которого гораздо больше полной временной протяженности исследуемого ряда.

Построение модели (1) осуществлялось следующим образом. Сезонный ход ТСП выделялся путём сохранения статистически значимых (по уровню 95%) гармоник годового хода в регрессионном разложении:

$$T(t) = \sum_k a_k \cos[k\Omega(t - \tau_k)] + Seazres(t) \quad (2)$$

где:  $\Omega = \frac{2\pi}{365.25}$  — угловая частота первой гармоники годового хода;  $a_k$  — амплитуды гармоник годового хода;  $\tau_k$  — фазы гармоник годового хода;  $Seazres(t)$  — остатки сезонной модели ТСП.

$$Q(t) = \sum_k a_k \cos[k\Omega(t - \tau_k)]$$

Характеристики модели сезонного хода ТСП изображены на рис. 2.

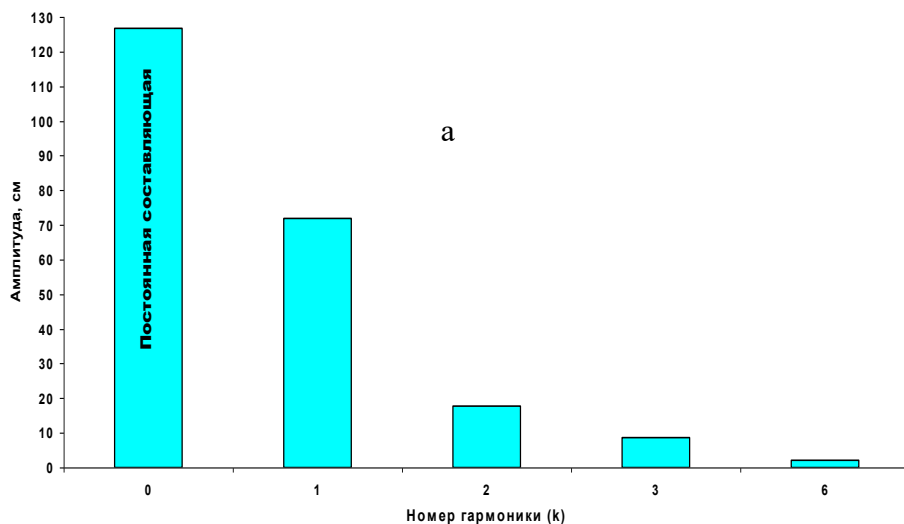
Огибающая сезонного хода строится путём определения статистически значимых (по уровню 95%) коэффициента регрессионного разложения:

$$\frac{T(t)}{Q(t)} = \sum_k b_k \cos[\omega_k(t - t_k)] + \lambda t + mres(t) \quad (3)$$

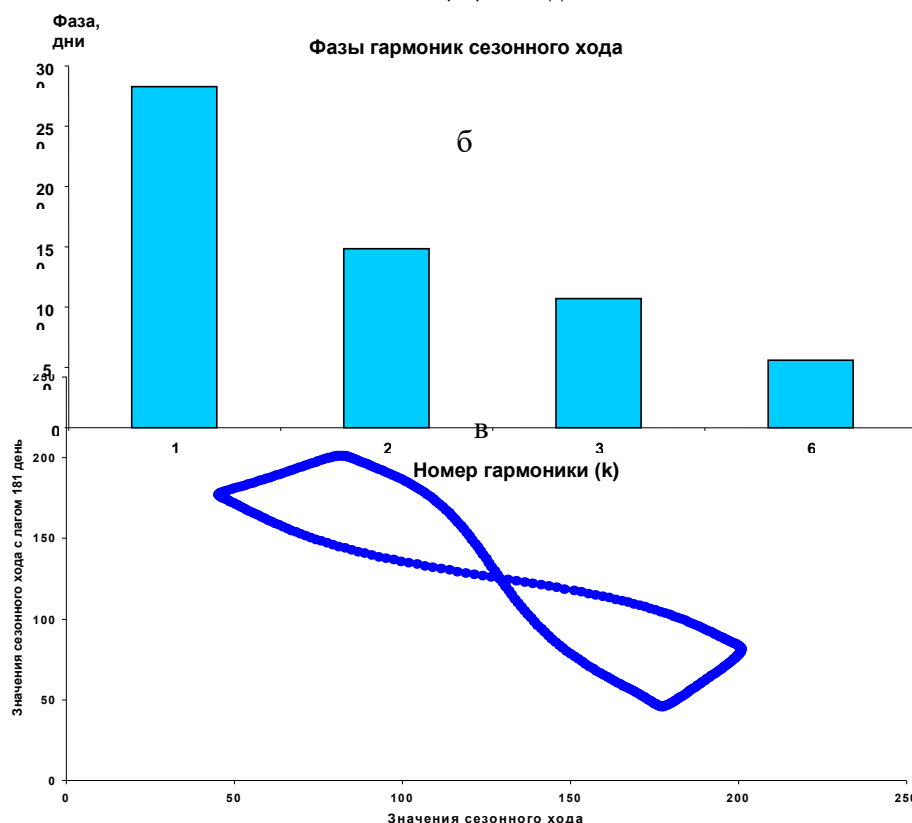
где:  $b_k$  — амплитуды спектральных составляющих процесса  $\frac{T(t)}{Q(t)}$ ;  $\omega_k$  — угловые частоты

спектральных составляющих процесса  $\frac{T(t)}{Q(t)}$ ;  $\tau_k$  — фазы спектральных составляющих процесса  $\frac{T(t)}{Q(t)}$ ;  $\lambda$  — линейный тренд;  $mres(t)$  — остатки моделирования огибающей сезонного хода.

Амплитуды гармоник сезонного хода



Фазы гармоник сезонного хода



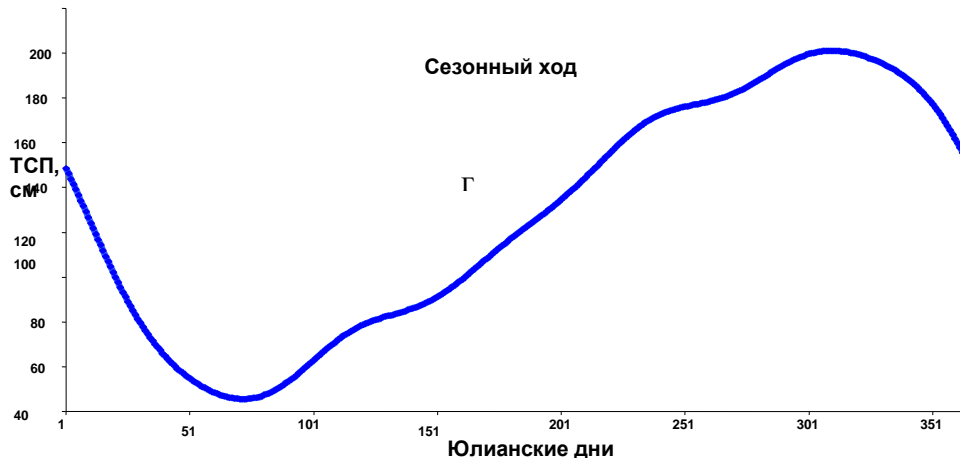


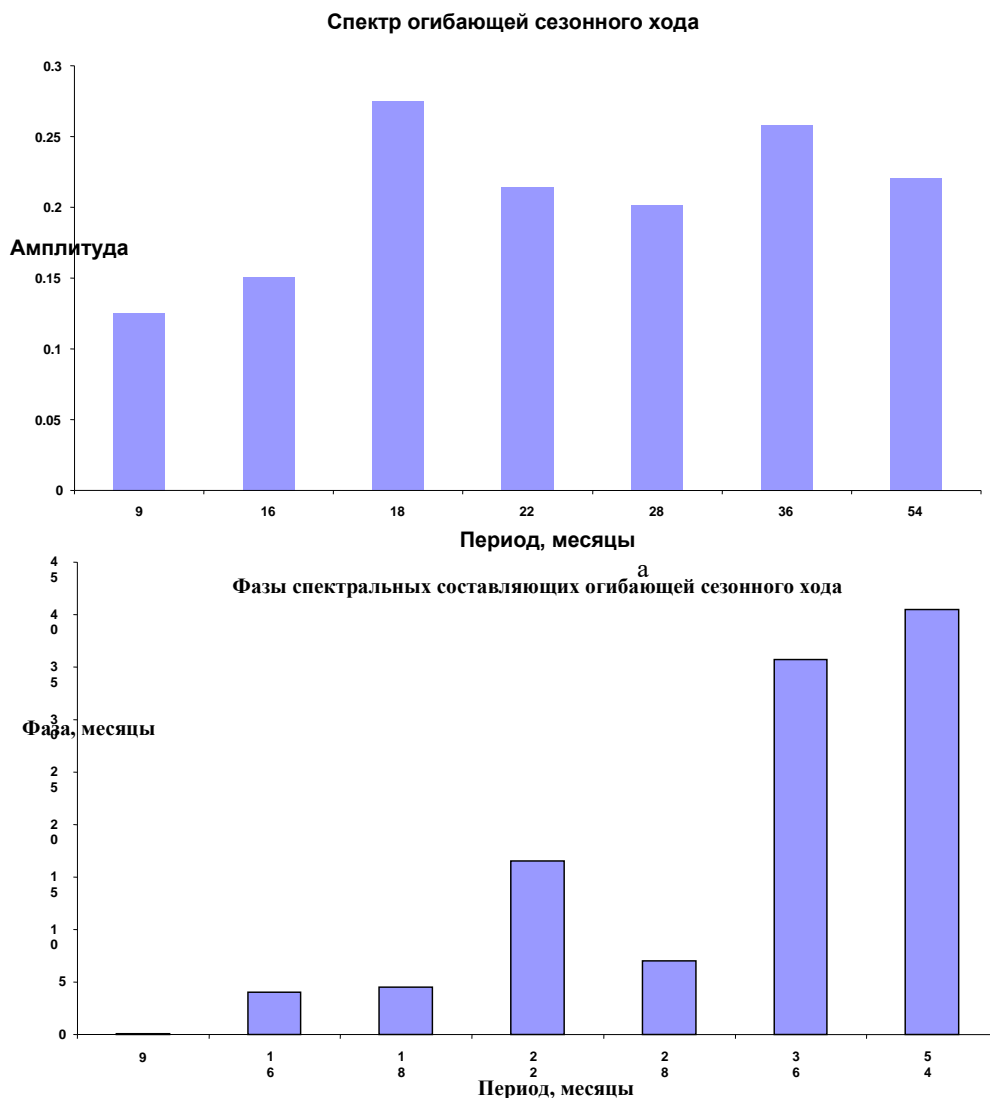
Рис. 2. Сезонный ход

ТСП (амплитуды гармоник – а, фазы гармоник – б, фазовый портрет – в, график – г).

Частоты  $\omega_k$  определялись по спектрограмме процесса  $\frac{T(t)}{Q(t)}$ , а остальные параметры вычислялись методом наименьших квадратов. Характеристики огибающей сезонного хода ТСП изображены на рис. 3.

$$S(t) = \sum_k b_k \cos[\omega_k(t - t_k)] + \lambda t$$

Величина постоянной составляющей  $b_0 = 0.76$ , а тренда  $\lambda = 5.3 \pm 0.7\%$  в год. Коэффициенты детерминации<sup>1</sup> ( $R^2$ ) моделирования представлены в таблице.



<sup>1</sup> Коэффициент детерминации модели показывает, какую часть изменчивости моделируемого процесса описывает модель. Он равен 100% для идеальной модели и нулю для бесполезной.

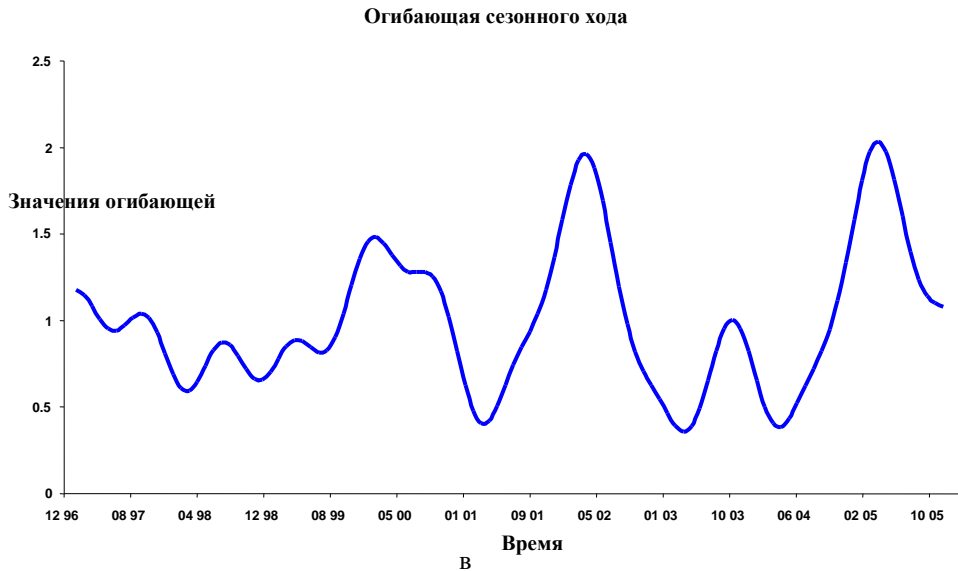


Рис. 3. Огибающая сезонного хода ТСП (а – амплитуды спектральных составляющих процесса, б – фазы спектральных составляющих процесса, в – график).

Таблица.

**Эффективность различных этапов моделирования**

Сезонный ход	Огибающая сезонного хода	Мультипликативная модель
67.8%	84.3%	88.5%

Сравнение модели с данными наблюдений и прогноз ТСП на 2006-2007 г.г. представлены на рис. 4.

Для оценки полноты использования экспериментальных данных при построении регрессионной модели был использован предложенный в [2] критерий – близость остатков мультипликативной модели  $res(t)$  к белому шуму. В качестве критериев близости к белому шуму использовались статистика Дарбина – Ватсона (для белого шума её значение равно 2) и коэффициент детерминации моделирования интегрированной периодограммы остатков линейной однородной функцией частоты. Как и следовало ожидать, сами остатки  $res(t)$  оказались весьма далеки от белого шума. Значение статистики Дарбина – Ватсона составило для них 0.69, а коэффициент детерминации моделирования интегрированной периодограммы линейной однородной функцией частоты – 45%. Это объясняется тем, что соседние отсчёты даже в помесечно осреднённом ряду остатков не являются независимыми, т.к. характерное время абляции и аккумуляции сравнимо по порядку величины с месяцем. Для исключения влияния инерционности названных процессов на оценку качества мультипликативной модели для помесечно осреднённых остатков  $res(t)$  была построена авторегрессионная модель вида:

$$rest(t) = \sum_{k=1}^m c_k res(t-k) + res_m(t) \quad (4)$$

для остатков которой  $res_m(t)$  значение статистики Дарбина – Ватсона составило для них 2.000, а коэффициент детерминации моделирования интегрированной периодограммы линейной однородной функцией частоты – 99.0%. Статистически значимыми (по уровню 95%) оказались только коэффициенты  $c_1=1.07$  и  $c_2=-0.54$ , что позволяет оценить характерное время инерционности процессов абляции и аккумуляции в два месяца.

### 3. Выводы

Присутствие в спектре огибающей сезонного хода ТСП на метеорологической площадке о. Галиндез колебаний с периодами, характерными для таких глобально значимых геофизических процессов, как квазидвухлетние колебания зональной компоненты экваториального ветра (28 месяцев), температура поверхности океана (54 месяца), Эль-Ниньо-Южное колебание (36 месяцев и 21 месяц) [3,4], свидетельствует о том, что этот параметр является эффективным индикатором глобальных климатических изменений и наблюдение за ним целесообразно продолжать на регулярной основе.

Построенная модель предсказывает стабилизацию ТСП в ближайшие два года ввиду противофазности низкочастотных колебаний в огибающей сезонного хода присутствующему в нём положительному тренду.

Высокая эффективность мультипликативной модели свидетельствует о том, что влияние перечисленных выше глобально значимых геофизических процессов на ТСП сводится к модуляции его сезонного хода.

Тот факт, что долговременное изменение ТСП сводится к её возрастанию в условиях роста индексов как глобальной, так и региональной температуры, свидетельствует о том, что через этот параметр может

реализовываться отрицательная обратная связь, стабилизирующая температуру за счёт обусловленного ростом ТСП увеличения альbedo южного полярного региона.

### **Литература**

**Third** Assessment Report – Climate Change 2001 (<http://www.ipcc.ch/>).

**Кадыгорова Т.В.**, Крученицкий Г.М.. Выделение трендов в парциальном давлении озона на различных высотах в атмосфере//Известия РАН, Физика Атмосферы и Океана, 1995, т. 31, № 1, стр. 62–68.

**Сидоренков Н.С.** Атмосферные процессы и вращение Земли. – СПб: Гидрометеоздат, 2002. – 200 с.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>