

## ПРОГНОЗ ДОЛГОПЕРИОДНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ ПРИПОЛЯРНЫХ ГОРОДОВ РФ

Д.Б. Рождественский, В.И. Рождественская, В.А. Телегин, В.М. Михайлов

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук им. Н.В. Пушкова, Москва, Троицк*

**Аннотация.** Долгопериодные составляющие приземной температуры или низкочастотная составляющая температуры отображает многолетние или климатические изменения, а также определяют холодную или теплую зиму, или лето, ледниковый период или глобального потепления. Вариации низкочастотной составляющей могут служить индикатором наступления аномальных значений температуры. Амплитуда низкочастотной составляющей значительно меньше амплитуды суточного и годового ходов, она составляет примерно, один градус. Однако, для долгосрочного прогноза это значимая величина, которая в настоящее время характеризует потепление климата и аномально теплую зиму 2024-2025 г., а также коррелирует с максимумом солнечной активности в 25 цикле. Так для Мурманска амплитуда долгосрочного прогноза колеблется около нуля градусов, но преобладают положительные температуры. В Верхоянске и Магадане эти температуры сугубо отрицательные, однако, везде наблюдается рост температур в 2025 году с дальнейшим понижением к началу 2026 года. Это обстоятельство подтверждается аномально теплой зимой в 2025 году.

### Введение

Многолетние измерения приземной температуры представляют собой бесценный материал для долгосрочного прогнозирования составляющих с периодом более одного года. Методические основы долгосрочного прогнозирования были заложены еще в 1975 году. Развитие этих работ в дальнейшем позволило разработать алгоритмы долгосрочного прогнозирования длинных рядов [1-3], основываясь исключительно на измеренных температурных данных, полученных за период от 10 до 100 лет.

В настоящей работе представлены результаты долгосрочного прогнозирования приземной температуры для четырех городов, расположенных в приполярных областях Российской Федерации: Мурманск, Апатиты, Верхоянск и Магадан. Прогноз получен на основе температурных данных, полученных на метеостанциях указанных городов за период 2013-2022 гг., включительно.

Приземная температура относится к наиболее значимым параметрам Земли, в которых отражаются вариации климата. Поэтому регулярные многолетние измерения температуры необходимы для формирования наших знаний о состоянии земной поверхности сегодня и завтра. В настоящее время достоверный температурный прогноз ограничивается двумя, тремя сутками. Для получения долгосрочного прогноза необходимо исследовать долгопериодные составляющие, которые можно получить путем низкочастотной фильтрации. Методика использования спектрального анализа и цифровой фильтрации для анализа и прогноза экспериментальных данных, предложенная авторами, описана в работах [4,5]. Применение спектрального анализа для таких сложных систем как формирование приземной температуры, состоящих из совокупности физических, химических процессов, существенно облегчает эту задачу, так как позволяет представить совокупность этих процессов в виде суммы отдельных составляющих колебательных процессов с различными периодами. Известны суточные, сезонные, годовые и многолетние составляющие приземной температуры. Последняя низкочастотная составляющая, ответственна за климатические и долгопериодные вариации. Как показал предварительный анализ, амплитуда низкочастотной составляющей значительно меньше суточного и годового ходов. Поэтому при проведении спектрального анализа низкочастотной составляющей, целесообразно из наблюдаемого процесса убрать высокочастотные составляющие. Такую операцию можно получить с помощью цифровой фильтрации.

### Методика проведения спектрального анализа

Основу модуля цифровой фильтрации составляют цифровые чебышевские фильтры, выбранные благодаря высокому качеству их частотных характеристик [5]. Частотная характеристика чебышевского фильтра близка к характеристике последовательного применения непрерывного скользящего осреднения и идеального фильтра нижних частот. Разработанная рекуррентная схема расчета коэффициентов чебышевского фильтра позволяет достигать степени подавления в полосе среза до 400 дБ.

Программный модуль системы обработки и анализа состоит из блока цифровых фильтров и блока расчета спектров. С помощью блока цифровых фильтров формируются ряды с различным спектральным составом. Фурье анализ долгопериодных составляющих, позволяет получить более точный спектральный состав.

На основе спектрального анализа данных, которые могут быть представлены в виде временной последовательности суммы гармонических составляющих ряда Фурье, построен комплекс программ для выявления характеристик солнечно-земных связей [5]. Методика проведения спектрального анализа включает несколько этапов: 1. Ввод длинного ряда данных; 2. Фильтрация данных; 3. Сортировка результатов фильтрации для проведения оптимального спектрального анализа; 4. Сохранение результата фильтрации после сортировки; 5. Проведение спектрального анализа, исходя из представления вклада отдельного отсчета в спектр процесса; 6. Построение системы дешифровки и идентификации спектра. Проведение многокаскадной фильтрации длинных рядов экспериментальных данных с последующим разложением сложного сигнала на отдельные составляющие с целью выделения отдельных составляющих сложного процесса, осуществлялось по схеме, представленной на рис.1.



**Рисунок 1.** Схема многокаскадной фильтрации для обработки наблюдаемых данных для последующей экстраполяции.

На рис.1 используются обозначения: ФНЧ-1, ФНЧ-2 – блоки спаренных цифровых фильтров F1, F2, F3, F4. Дискретные ряды  $ad[i]$  – числа Вольфа,  $c[i]$ ,  $cb[i]$ ,  $cx[i]$ ,  $cb2[i]$  – результаты фильтрации. Из этих рядов формируются ряды разностей, являющиеся узкополосными сигналами, которые более эффективны с точки зрения операции прогнозирования:  $adc[i] = ad[i] - c[i]$ ;  $cad[i] = c[i] - cb[i]$ ;  $sab[i] = cb[i] - cx[i]$ ;  $sac[i] = cx[i] - cb2[i]$ . В блок схему рис.1 может быть добавлен модуль расчета коэффициента корреляции. Цифровая фильтрация в области времени основана на операции свертки двух цифровых последовательностей. Потеря во времени у таких фильтров равна половине числа коэффициентов взвешивания. Поэтому синтез цифровых фильтров с частотной характеристикой близкой к идеальной обходится значительными задержками во времени.

### Алгоритмы прогнозирования приземной температуры

В результате наблюдений регистрируют конечное число отсчетов, которые представимы в виде:

$$y(t_n) = v(t_n) \cdot \sum_i c_i \cos(\omega_i t_n + \varphi_i), n = 1, 2, 3, \dots, N; \quad (1)$$

$v(t)$  - прямоугольная выделяющая функция, определяемая границами наблюдений,  $t$  - время дискретных отсчетов,  $N$  – конечное число отсчетов. Проведя упорядочивание спектра финитного сигнала (1), получаем алгоритм интерполяции дискретного процесса с интервалом дискретизации  $\Delta t$  (2) и для узловых точек  $d$ , лежащих в области экстраполяции (3):

$$\tilde{y}(d) = \frac{\sum_{n=-N}^N y(n) b_n \frac{\sin \pi(d-n)}{d-n}}{\sum_{n=-N}^N b_n \frac{\sin \pi(d-n)}{d-n}}, \quad (2)$$

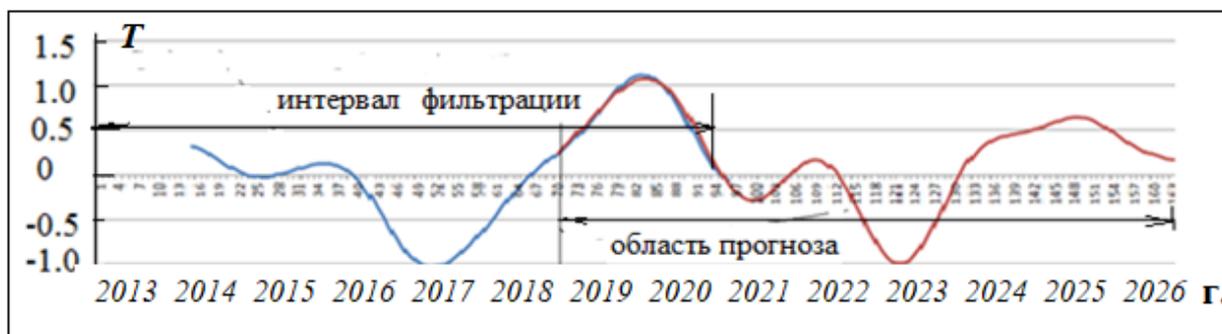
$$\tilde{y}(d) = \frac{\sum_{n=-N}^N y(n) \frac{b_n (-1)^{d-n}}{d-n}}{\sum_{n=-N}^N \frac{b_n (-1)^{d-n}}{d-n}}. \quad (3)$$

В качестве алгоритма прогнозирования, наряду с выражением (3), используется ряд Тейлора, производные которого также рассчитываются по формуле:

$$y'(m) = [y(n) - y(m)] \frac{b_n}{b_m(m-n)} (-1)^{(n-m)}. \quad (4)$$

### Прогнозирование долгопериодной составляющей приземной температуры

Прогнозирование низкочастотной или медленноменяющейся составляющей приземной температуры, т.е. долгосрочный прогноз, представляет наиболее сложную проблему в решении задачи прогноза. На составляющие суточного и годового ходов оказывает влияние низкочастотная составляющая температуры, которая отображает многолетние или климатические изменения, а также определяют холодную или теплую зиму, или лето, ледниковый период или глобальное потепление. Амплитуда низкочастотной составляющей значительно меньше суточного и годового ходов. При проведении спектрального анализа низкочастотной составляющей, целесообразно из наблюдаемого процесса убрать высокочастотные составляющие. Такую операцию проводят с помощью цифровой фильтрации. В результате операции фильтрации теряются примерно от 15 до 18 месяцев. Исходной информацией для прогноза служили наблюдения температуры 2013-2022 гг. Кроме того, из-за ограничений величины степени подавления цифрового фильтра, невозможно полное подавление колебаний Гиббса, что приводит к необходимости переноса начала прогнозирования на июль 2018 года. Долгосрочное прогнозирование осуществляется непосредственно экстраполяцией низкочастотной и годовой составляющих на интервале 2018-2025 годов.



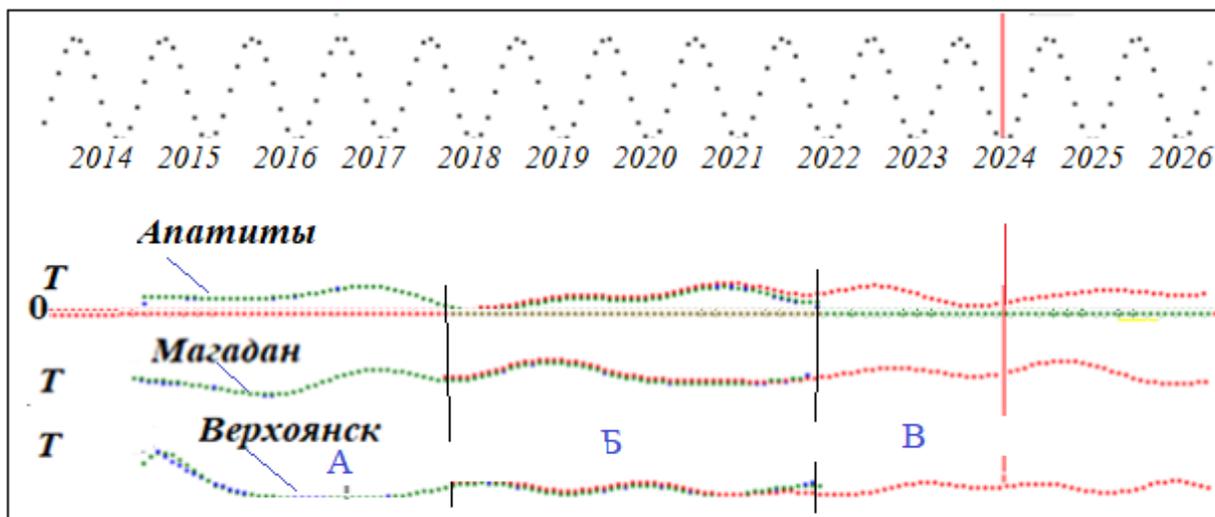
**Рисунок 2.** Долгосрочный прогноз низкочастотной составляющей температуры по результатам наблюдения в г. Внуково Московской области.

На интервале перекрытия областей фильтрации и прогнозирования отмечается удовлетворительное совпадение кривых. Амплитуда низкочастотной составляющей температуры равна, примерно, одному градусу. Однако, для долгосрочного прогноза это значимая величина, которая в настоящее время характеризует потепление климата и аномально теплую зиму 2024-2025 гг., а также коррелирует с максимумом солнечной активности в 25 цикле. При получении прогноза использовалось восемь членов ряда Тейлора, что соответствует применению производных до восьмого порядка. Из рис.2 следует, что на долгопериодной составляющей наблюдается небольшой максимум в 2025 году, что подтверждается теплой зимой в Московском регионе и соответствует максимуму 25 цикла солнечной активности [5].

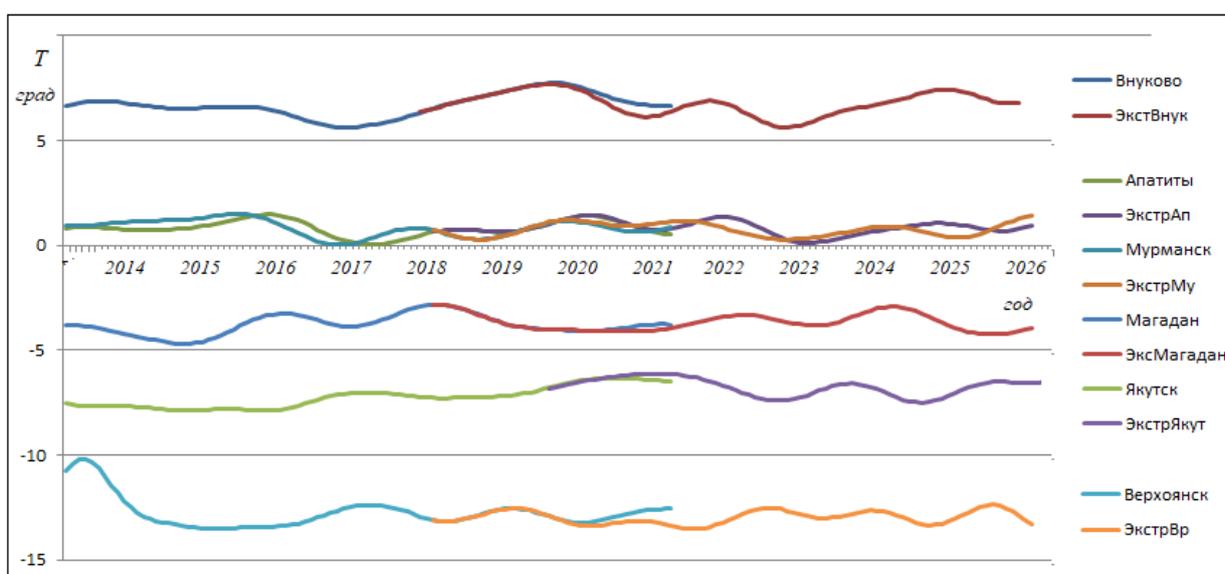
### Прогнозирование температуры для приполярных городов

На основе изложенной выше методики проведено прогнозирование долгопериодной или климатической составляющей приземной температуры для городов России, расположенных в приполярной области: Апатиты, Магадан, Верхоянск. Результаты прогнозирования представлены на рис.3.

Ось времени на интервале с 1 февраля 2013 г. по 31 марта 2026 г., изображена синусоидальной кривой, горизонтальная прямая – это нулевой уровень температуры, вертикальная красная прямая – отметка 1 января 2024 г. Область А (синяя или зеленая кривая) – область формирования составляющей более одного года, область Б (красная кривая) - область прогнозирования составляющей более одного года, область В (красная кривая) – одна из областей возрастания температуры. Часть кривой низкочастотной составляющей температуры с периодом более одного года, лежащая справа от вертикальной прямой, представляет прогноз долгопериодной составляющей приземной температуры с периодом более одного года, которую можно считать климатической нормой данной территории. Ее прогноз более правильно считать нормой на текущий период. На рис.4 приведены результаты для других приполярных городов.



**Рисунок 3.** Прогноз долгопериодной составляющей приземной температуры городов Апатиты, Магадан, Верхоянск.



**Рисунок 4.** Прогноз долгопериодной составляющей приземной температуры для городов Мурманска, Апатит, Магадана, Якутска, Верхоянска. Для сравнения приведены результаты для Внуково.

Долгопериодная составляющая приземной температуры в разных географических районах может лежать как в областях положительных (Апатиты) так отрицательных значений температуры (Верхоянск, Магадан, Якутск), а также пересекать нулевую линию температуры (Мурманск). Временные вариации долгопериодной составляющей для городов: Апатиты, Мурманск и Магадан на 2025 год повторяют долгопериодную составляющую солнечной активности, а для Верхоянска подобная вариация температуры менее выражена. Вероятно, на эту территорию большее влияние оказывает близость холодного океана, чем солнечная активность.

Количественная оценка погрешности прогнозирования долгопериодных составляющих дискретного процесса представлена в работе [2], где показано, что потенциальная погрешность прогнозирования зависит от параметров фильтрации и числа отсчетов на период искомой гармоники процесса.

## **Заключение**

На основе спектрального анализа предложен способ упорядочивания спектральных характеристик прогнозируемого процесса, позволивший значительно подавить колебания Гиббса, и тем самым преодолеть проблему аппроксимации разрывных функций, а также предложить механизм передачи информации в область будущего с помощью колебаний Гиббса. Разработана технология прогнозирования приземной температуры методом экстраполяции и представлена ее реализация для различных приполярных городов РФ.

Исходными данными для прогнозирования являются исключительно температурные данные, наблюдаемые в точке, для которой определяется прогноз. Температурные данные брались из сайта «архив погоды». Следует отметить, что данные содержат большое количество пропусков.

Амплитуда составляющей долгосрочного прогнозирования изменяется в пределах двух градусов. Возрастание температуры наблюдалось во всех пунктах с июня 2023г. по июль 2024 г., а понижение долгопериодной составляющей началось с марта 2025г. Предложенный метод обработки и анализа исходных данных является эффективным дополнением к практике долгосрочного прогнозирования в рамках многокомпонентной геоинформационной системы.

## **Список литературы**

1. *Рождественский Б.Г., Рождественский Д.Б., Рождественский Ю.Б.* Методические основы анализа и обработки дискретных наблюдений // Труды ГОИН. Вып. 130. М.: 1975. 107 с.
2. *Рождественский Д.Б.* Количественная оценка погрешностей и неопределённости восстановления и прогнозирования взвешенного ряда Котельникова // Гелиогеофизические исследования. Выпуск 26. 2020. С. 8–18.
3. *Рождественский Д.Б.* Методические основы цифрового управления // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. 2011. №7. С. 9–16.
4. *Рождественский Д.Б.* Цифровая фильтрация в задачах восстановления непрерывного процесса по дискретным отсчетам // Информационно-измерительные и управляющие системы. №3, Т.8. 2010. С. 51–61.
5. *Рождественский Д.Б., Рождественская В.И., Телегин В.А.* Анализ солнечно-земных связей // Тезисы доклада на Симпозиуме «Физические основы прогнозирования гелиогеофизических процессов и событий «ПРОГНОЗ-2024», посвященный 300-летию Российской академии наук, 85-летию ИЗМИРАН, и 60-летию Калининградского отделения ИЗМИРАН, 27-31 мая 2024 г., г. Москва, г. Троицк. С 126.