

# Вероятностный анализ климатического сезонного хода поля давления в Российской зоне Арктики

Тучкова Н.П.<sup>1</sup>, Беляев К.П.<sup>1,2</sup>, Михайлов Г.М.<sup>1</sup>, Сальников А.Н.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

<sup>3</sup>ФОУ ВПО "Московский государственный университет имени  
М.В.Ломоносова", факультет ВМК

**Аннотация.** В работе проведен анализ климатического сезонного хода поля атмосферного давления в Арктическом регионе России. В качестве основного метода исследования использовался вероятностный и статистический анализ временных рядов поля давления длиной в 60 лет с 1948 по 2008 год в фиксированных точках области Арктической зоны России. На основе этих данных строился климатический сезонный ход как осреднение значений данного временного ряда в каждой точке пространства на каждое фиксированное число. Изучались характеристики такого сезонного хода, его амплитуда и фаза. Эти характеристики анализировались, и проводилась их геофизическая интерпретация. В частности, определялись минимальное и максимальное значения ряда по всей области и строились временные ряды этих характеристик. Численные расчеты выполнялись на суперкомпьютере Ломоносов-2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

**Ключевые слова:** анализ временных рядов, климатический сезонный ход, максимальные и минимальные значения давления внутри климатического года

## Probabilistic analysis of the climatic seasonal cycle of atmospheric pressure fields in the Arctic region of Russia

N.P. Tuchkova<sup>1\*\*</sup>[0000-0001-6518-5817], K.P. Belyaev<sup>1,2\*</sup>[0000-0003-2111-2709],  
G.M. Mikhaylov<sup>1\*\*\*</sup>[0000-0002-4535-7180], A.N. Salmikov<sup>1,3\*\*\*\*</sup>[0000-0001-8669-6605]

<sup>1</sup> *Dorodnicyn Computing Center FRC CSC of RAS*

<sup>2</sup> *Shirshov Institute of Oceanology of RAS*

<sup>3</sup> *Lomonosov Moscow State University*

**Abstract.** The paper analyzes the climatic seasonal variability of the atmospheric pressure field in the Arctic region of Russia. The main research method is the probabilistic and statistical analysis of the time series of the pressure field recorded at fixed points for 60 years long from 1948 to 2008 in the Arctic zone of Russia. Based on these data, the climatic seasonal variability was constructed as an averaging of the values of a given time series at each point in space for each fixed day. The characteristics of such a seasonal cycle, its amplitude and phase are studied. Analyzes of those characteristics has been performed and their geophysical interpretation is carried out. In particular, the minimum and maximum values of the series were determined over the entire region and the time series of these characteristics were constructed. Numerical calculations realized on the Lomonosov-2 supercomputer of the Lomonosov Moscow State University

**Keywords:** time series analysis, climatic seasonal cycle, maximum and minimum pressure values within a climatic year

## 1. Введение

В настоящей работе продолжают исследования, опубликованные ранее в работах [1-2]. Так же, как и в этих работах, здесь использовалось поле атмосферного давления в области, ограниченной координатами  $62^{\circ}\text{с.ш.}-80^{\circ}\text{с.ш.}$  и  $15^{\circ}\text{в.д.}-60^{\circ}\text{в.д.}$  С одной стороны, это область достаточно широка, чтобы пренебречь локальными особенностями атмосферных процессов, с другой - достаточно однородна, так как размеры крупных атмосферных образований сопоставимы с размерами всей области. По времени данные по давлению записаны с 1 января 1948 г. по 31 декабря 2008 г. ежедневно в одноградусной сетке. Данные получены в Гидрометцентре России<sup>1</sup> и использовались ранее в некоторых работах, например, в [3].

В работе использованы методы анализа временных рядов, в частности разбиение временного ряда на периодическую и непериодическую составляющие. Такие методы успешно используются при анализе финансового рынка [4], при анализе многолетней изменчивости геофизических характеристик, таких как температура воздуха или воды [5], в более сложных моделях и схемах [6]. В геофизических схемах часто используется понятие климатического сезонного хода, когда строятся средние значения всего временного ряда на каждую дату года и в каждой фиксированной точке пространства. Например, все значения на 1 января в конкретной точке пространства за весь период наблюдений усредняются, и в результате строится среднее

---

<sup>1</sup> <http://meteoinfo.ru>

значение ряда на 1 января, которое считается климатическим значением. Эту процедуру осуществляют на каждое число внутри года, таким образом строится климатический сезонный ход конкретной физической характеристики. Подробно этот метод описан, например, в работе [7]. Далее в исследованиях, можно более подробно проанализировать полученный ряд наблюдений, например, выделить максимальные и (или) минимальные значения этой физической характеристики по заданной области и изучить изменчивость только этого максимума или минимума. Заметим важность этих характеристик, поскольку, например, в поле атмосферного давления эти экстремумы связаны с такими физическими процессами, как циклоны и антициклоны, их локализацией и изменчивостью.

В данной работе проводится вероятностный анализ поля атмосферного давления на основе разбиения всего ряда на периодическую и непериодическую составляющие. Отдельно такой анализ осуществляется для максимальных и минимальных значений поля давления по области и их изменчивости внутри климатического года. Показано, что такие процессы хорошо описываются в виде суммы, где одно слагаемое представляет собой регулярный периодический сигнал, а другое - независимый от первого случайный процесс, характеристики которого можно определить из полученной выборки. При этом и периодический сигнал, и характеристики случайного процесса для максимума и минимума давления различны, имеют свои принципиальные особенности и требуют дополнительного изучения.

Для поля атмосферного давления в регионе, который мы рассматриваем, максимальные и минимальные значения заметно отличаются. Если минимумы по пространству меняются от 980 гПа до 995 гПа, то максимумы меняются от 1010 гПа до 1025 гПа, и эти значения в течение года «мигрируют» внутри области. Это связано с поведением и изменением циклонов и антициклонов, их передвижением, углублением и перестройкой. В Арктической области России циклонов в течение климатического года наблюдается заметно больше, чем антициклонов, поэтому распределения их характеристик различны. При этом размер циклонического атмосферного образования, которое в основном и формирует поле давления, сопоставим с размерами всей рассматриваемой области, другими словами мы имеем дело с одним, максимум двумя циклонами и антициклонами одновременно.

В работе сделано следующее:

- построен климатический сезонный процесс для поля атмосферного давления в районе Арктической области России, описаны его особенности для максимальных и минимальных значений по области;
- построены временные графики этих характеристик, проведен их анализ;

- проведено разбиение этих процессов на периодические и аperiodические составляющие, оценены амплитуды и фазы периодических составляющих;

- для аperiodических составляющих подобраны оптимальные в смысле минимума дисперсии аппроксимации наблюдаемых величин, показано их согласие с аппроксимирующими распределениями.

## 2. Данные наблюдений и результаты расчетов

В работе рассматривается поле атмосферного давления в области, ограниченной координатами  $62^{\circ}\text{с.ш.}-80^{\circ}\text{с.ш.}$  и  $15^{\circ}\text{в.д.}-60^{\circ}\text{в.д.}$ , то есть, Европейская часть Арктической зоны России, включая побережье Балтики, акваторию Белого, Баренцева морей до Карского моря и полуострова Ямал. Это достаточно широкая область для того, чтобы пренебречь локальными особенностями атмосферных процессов, а также достаточно однородная, поскольку размеры крупных атмосферных образований сопоставимы с размерами этой области. Данные наблюдений за давлением записаны в период с 01.01.1948 по 31.12.2008 гг. ежедневно с интервалом в 6 часов в одноградусной сетке.

Для наглядности представим сами поля давления за различные годы этого региона. На рис. 1 показано среднее за 60 лет поле давления, а на рис. 2(а-г) представлены поля давления в ограниченной области на 1 января с интервалом 20 лет (от 1948 до 2007 гг.).

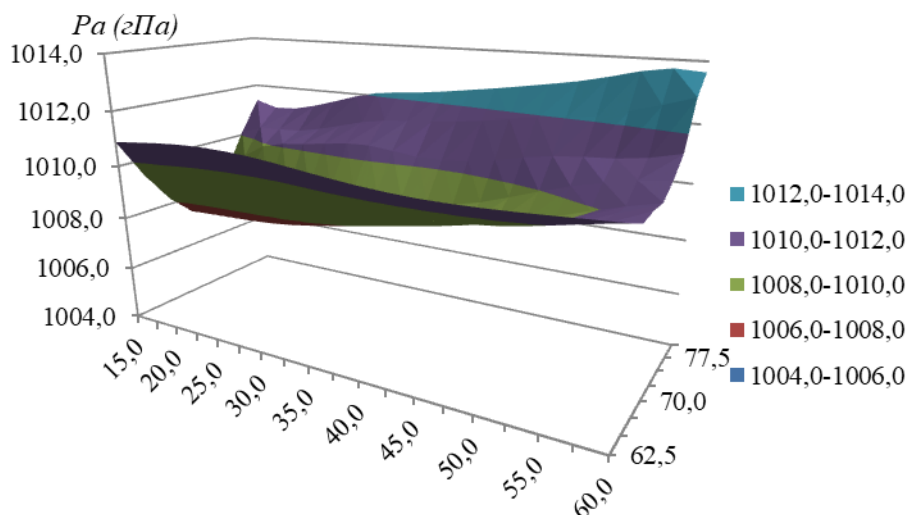


Рис. 2. Поле средних значений давления за 60 лет (01.01.1948 – 31.12.2007) в Арктической зоне РФ

В рассматриваемых полях выделялись области минимального и максимального давления за каждые сутки и строились графики их поведения для средних за климатический год значений.

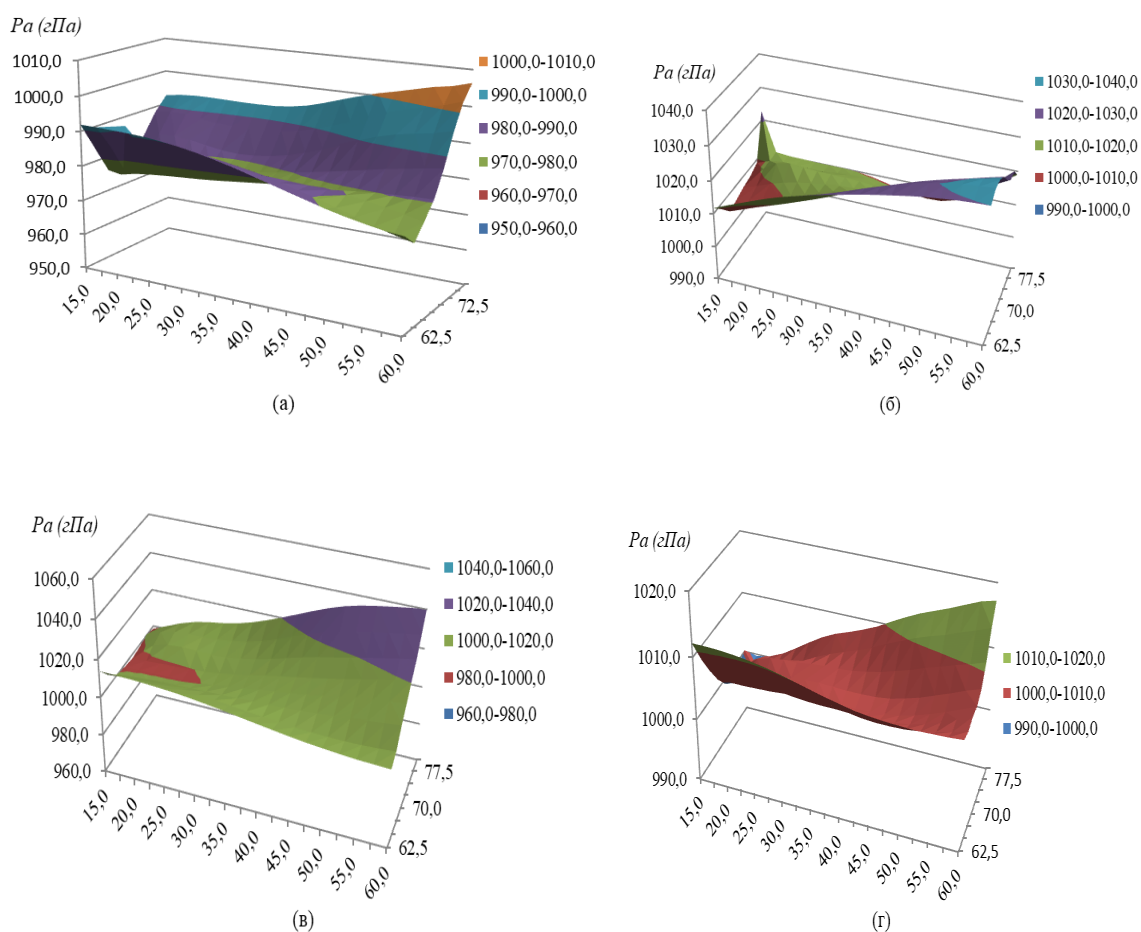


Рис. 2. Поля давления (наблюдения) в Арктической зоне РФ на 1 января:  
 а) 1948 год; б) 1967 год; в) 1987 год; г) 2007 год

На рис. 3 приведены графики среднего максимума климатического годового хода за рассматриваемый период и аппроксимирующей функции. Показано поведение среднегодового максимума давления  $Pa$  ( $y_i$ ) по всей области и за весь период с 1968 по 2008 годы и на всем пространстве  $62,5^{\circ}$ с.ш.- $80^{\circ}$ с.ш. и  $15^{\circ}$ в.д.- $60^{\circ}$ в.д. в сравнении с тригонометрической функцией  $f_i = 6\sin(0,01y_i) + 1016,5$  (год – усредненный по массиву данных наблюдений год).

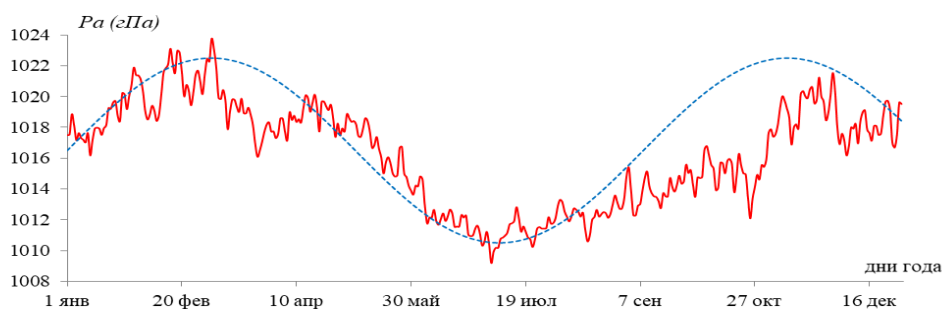


Рис. 3. Поведение среднегодового максимума давления - красная линия;  
 аппроксимация - синий пунктир

На рис. 3 очень хорошо видно, что поведение максимума можно представить в виде суммы тригонометрической функции и случайного остатка. Методом наименьших квадратов можно найти параметры этой тригонометрической функции, которая оказывается равной  $f_i = A + B \sin \omega y_i$ , где  $A=1016,5$  (гПа),  $B=6$  (гПа),  $\omega=0,01$  (год<sup>-1</sup>). После вычитания из «красной линии» ее аппроксимации получается кривая ( $\Delta Pa$ ), показанная на рис. 4 (начало координат перенесено для лучшей презентации).

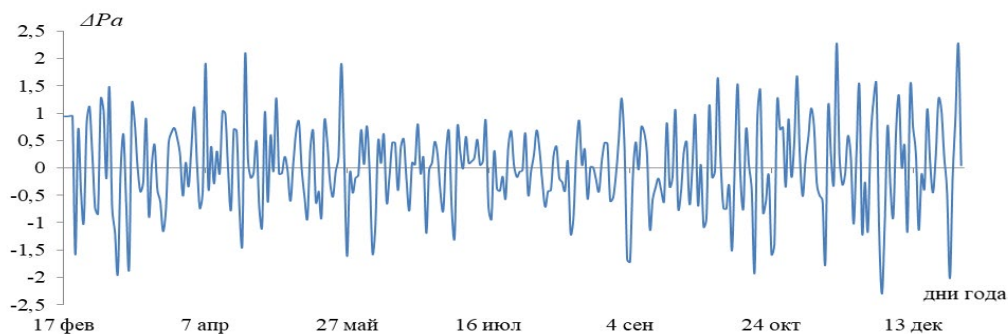


Рис. 4. Разность между наблюдаемой и аппроксимирующей кривой для среднегодового максимума давления

Из рис. 4 видно, что величина разности  $\Delta Pa$  не имеет заметной регулярной изменчивости и может рассматриваться как случайная величина, независимая от аппроксимирующей функции (см. рис. 3). Имеет смысл известными статистическими методами, в частности методом наибольшего правдоподобия, подобрать вероятностное распределение этой величины. Соответствующая аппроксимации гистограмма частот показана на рис. 5. Предварительно была проведена центровка остатка поля давления относительно величины  $A=1016,5$  (гПа).

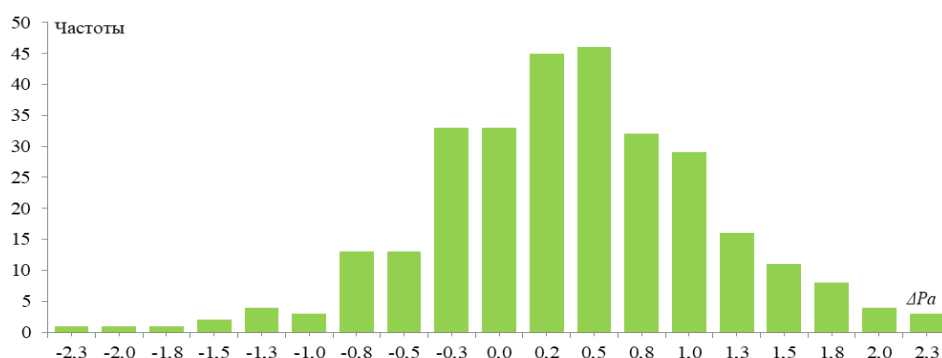


Рис. 5. Гистограмма максимумов для  $\Delta Pa$  среднегодового климатического хода

Эта гистограмма достаточно хорошо, с нужной степенью вероятности относительно критерия  $\chi^2$  согласуется с двумя

распределениями: Гаусса ( $Pd_1$ ) и Максвелла ( $Pd_2$ ), что показано на рис. 6 (а,б).

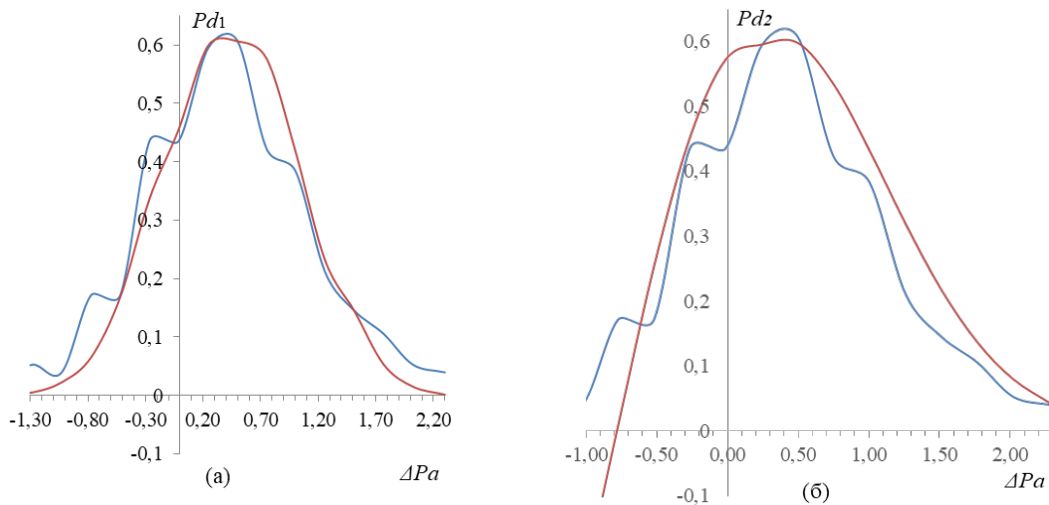


Рис. 6. Аппроксимация случайного остатка максимумов (синяя кривая): распределением: а) Гаусса (красная кривая); б) Максвелла (красная кривая)

Для распределения Гаусса  $F_1(x) = \beta \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\alpha)^2}{2\sigma^2}}$  оптимальными параметрами будут  $\alpha=0,277$ ,  $\sigma=0,5$ ,  $\beta=0,78$ . При этом аппроксимация происходит равномерно по всей области, но не очень хорошо в области малых вероятностей («хвостов» распределения). Распределение Максвелла  $F_2(x) = \frac{(x-\alpha)}{\sigma^2} e^{-\frac{(x-\alpha)^2}{2\sigma^2}}$  при параметрах  $\alpha=1$ ,  $\sigma=0,8$ , гораздо лучше аппроксимирует «хвосты», но плохо аппроксимирует область малых отрицательных значений давления.

Аналогичное исследование было выполнено и для минимумов давления. Поведение климатических сезонных минимумов показано на рис. 7 (год - усредненный по массиву данных наблюдений год).

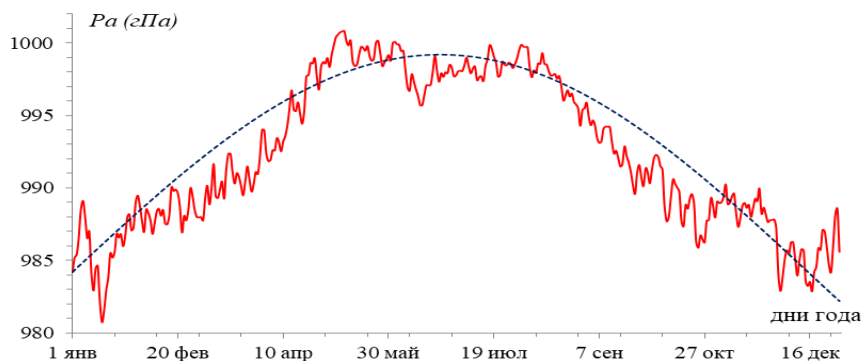


Рис. 7. Кривая средних ежедневных минимумов (красная линия) и аппроксимирующая кривая (синий пунктир)

Кривая средних ежедневных минимумов (1948-2008 гг., во всем регионе) и аппроксимирующая кривая  $f_i = A + B \sin \omega x_i$ , где  $A=984,2$ ,  $B=15$ ,  $\omega=0,01$ , ( $x_i=0,9*k$ ,  $k=0,1,\dots,368$ ) (рис. 7), а гистограмма представлена на рис. 8.

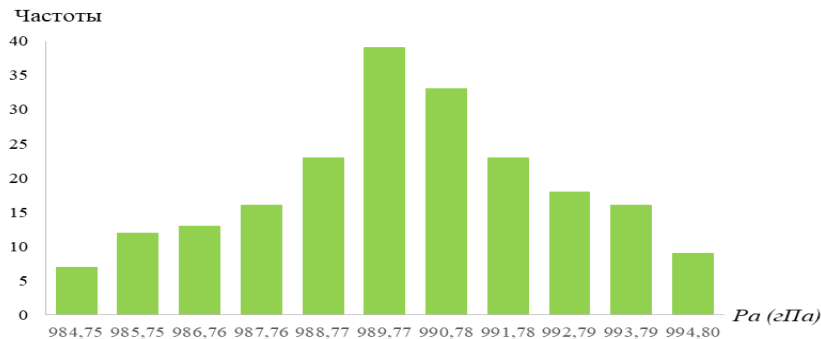


Рис. 8. Гистограмма минимумов среднегодового климатического хода

По принятому методу соответствующая функция плотности вероятности ( $Pd$ ) аппроксимирована распределением Максвелла

$$F_2(x) = \frac{(x-\alpha)}{\sigma^2} e^{-\frac{(x-\alpha)^2}{2\sigma^2}}, \text{ где } \alpha=0, \sigma=1, \text{ (рис. 9).}$$

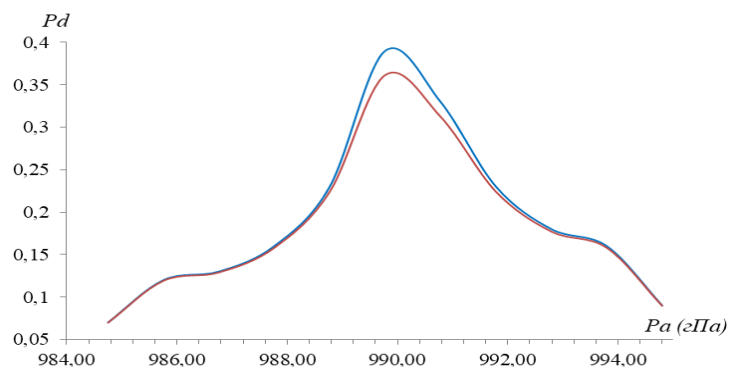


Рис. 9. Аппроксимация случайного остатка минимумов (синяя линия) распределением Максвелла (красная линия)

На рис. 9 видно, что распределение Максвелла с приведенными выше параметрами, построенными по методу наибольшего правдоподобия и протестированными по критерию  $\chi^2$  с 12 степенями свободы, (разбиение интервала давления на 14 подынтервалов и 2 параметра оценивалось по выборке) очень хорошо согласуется с наблюдениями (с доверительным уровнем 95%). Можно отметить, что для минимумов модель суммы фиксированных тригонометрических функций плюс случайный остаток лучше согласуется с наблюдениями, чем для максимумов. Это можно объяснить тем фактом, что для полярной зоны России циклоны, их



физические особенности более характерны, чем антициклоны и их изменчивость.

### **Заключение и выводы**

В работе предложены и реализованы методы вероятностного анализа временного ряда атмосферного давления за 60 лет. Показано, что построенный по такому ряду климатический сезонный ход и построенные по этому сезонному ходу максимальные и минимальные значения хорошо аппроксимируются суммой регулярного и стохастического слагаемых. При этом дана количественная оценка отклонения реального давления от сезонного хода в виде распределения плотности вероятности.

Показано, что отклонение носит несимметричный характер, что составляет неочевидный результат исследований. Для максимума и минимума построены наилучшие аппроксимации, и эти аппроксимации протестированы известными методами статистического анализа, включая метод максимального правдоподобия, метод наименьших квадратов и методы (критерии) согласия, в частности  $\chi^2$  критерий.

Такое исследование имеет приложение как чисто физическое, то есть позволяет объяснить природу, генезис и распространение крупномасштабных атмосферных образований в климатическом году, так и прогностическое, то есть позволяет понять и отследить тенденции в климате, а также количественно оценить масштабы и изменчивость крупномасштабных атмосферных процессов.

Работа представлена в рамках выполнения темы госзадания «Математические методы анализа данных и прогнозирования» ФИЦ ИУ РАН, темы госзадания 0128-2021-0002 ИО РАН и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №18-29-10085мк).

### **Литература**

1. Belyaev K., Mikhaylov G., Salnikov A., Tuchkova N. Seasonal and Decadal Variability of Atmosphere Pressure in Arctic, its Statistical and Temporal Analysis // *CEUR Workshop Proceedings, M. Jeusfeld c/o Redaktion Sun SITE, Informatik V, RWTH Aachen (Aachen, Germany)*, 2020. V. 2784. — P. 51-61. — <http://ceur-ws.org/Vol-2784/rpaper05.pdf>
2. Беляев К. П., Михайлов, Г. М., Сальников А. Н., Тучкова, Н. П. Сезонная и многолетняя изменчивость атмосферного давления в Арктике, статистический и временной анализ // *Электронные библиотеки*, 2021. Т. 24. № 1 — С. 57-73. — <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2021-24-1-57-73>.
3. Попов С.К. Влияние морского льда на приливные колебания уровня моря и скорости течений в Баренцевом и Белом морях // *Труды*

- Гидрометцентра РФ, Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 4 (370). — С. 137-155.
4. Kendall M., Stuart A., Ord J.K. The Advanced Theory of Statistics. Volume 3: Design and Analysis, and Time-Series. Fourth edition Hardcover – March 13, 1983.
  5. Murphy J. Technical analysis of the futures markets. A Comprehensive Guide to Trading Methods and Applications. New York Institute of Finance, 1986. 556 p.
  6. Привальский В.Е. Статистическая предсказуемость средней годовой температуры воздуха северного полушария // Докл. АН СССР. 1981. Т. 257. № 6. — С. 1342–1345.
  7. Зверьяев И.И., Яшайев И.М. Сезонная изменчивость полей давления, температуры воды и воздуха в Северной Атлантике по данным COADS // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1996. № 2. — С. 222-239.

## References

1. Belyaev K., Mikhaylov G., Salnikov A., Tuchkova N. Seasonal and Decadal Variability of Atmosphere Pressure in Arctic, its Statistical and Temporal Analysis // *CEUR Workshop Proceedings, M. Jeusfeld c/o Redaktion Sun SITE, Informatik V, RWTH Aachen (Aachen, Germany)*, 2020, V. 2784. — P. 51-61. — <http://ceur-ws.org/Vol-2784/rpaper05.pdf>
2. Belyaev K., Mikhaylov G., Salnikov A., Tuchkova N. Sezonnaya i mnogoletnyaya izmenchivost' atmosfernogo davleniya v Arktike, statisticheskij i vremennoj analiz // *Russian Digital Libraries Journal*, 2021/ V. 24 №1, P. — 57-73. — <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2021-24-1-57-73>.
3. Popov S.K. Influence of sea ice on the harmonic tidal oscillations of sea level and currents in the Barents and White seas // *Trudy Hidrometcentra RF, Hidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*. 2018. N 4 (370). — P. 137-155.
4. Kendall M., Stuart A., Ord J.K. The Advanced Theory of Statistics. Volume 3: Design and Analysis, and Time-Series. Fourth edition Hardcover – March 13, 1983.
5. Murphy J. Technical analysis of the futures markets. A Comprehensive Guide to Trading Methods and Applications. New York Institute of Finance, 1986: 556 p.
6. Prival'skij V.E. Statisticheskaya predskazuemost' srednej godovoj temperatury vozduha severnogo polushariya // *Dokl. AN SSSR*. 1981. V. 257. N 6. — P. 1342–1345.
7. Zveryaev I.I., Yashayaev I.M. Sezonnaya izmenchivost' polej davleniya, temperatury vody i vozduha v Severnoj Atlantike po dannym COADS // *Izvestiya AN SSSR. FAO*. 1996. № 2. — P. 222-239.