

# К ВОПРОСУ О ПРОГНОЗЕ АНОМАЛЬНЫХ ВЫСОТ ВОЛН В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ НА СРЕДНИЕ СРОКИ

*З.К. Абузяров*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации  
abusiar@mecom.ru*

## Введение

Необходимость в прогнозах высоты волн с заблаговременностью более 5 суток возникла прежде всего из требований практики. Высота волн является одним из важнейших параметров динамики волнового процесса. При этом большое значение придается аномально высоким волнам. Их размеры, достигающие 8 м и более, придают проблеме среднесрочного прогноза волнения особую актуальность. Вероятность появления в Северной Атлантике волн таких размеров достаточно велика, особенно в зимнее время. Они существенно увеличивают риск для судов и морских гидротехнических сооружений. Поэтому надежный прогноз волнения позволяет существенно повысить безопасность и производительность работ за счет выбора наиболее удобного времени и места проведения транспортных и других морских операций.

Особенно актуальной является проблема заблаговременности прогноза штормового волнения. Чем с большей заблаговременностью оно будет предсказано, тем больше будет возможностей для уменьшения ущерба от его воздействия. Заблаговременность подобных прогнозов зависит, в частности, от особенностей гидрометеорологического режима конкретных районов Северной Атлантики. К таким особенностям относятся:

- устойчивость в течение некоторого времени знака и величины аномалий атмосферных процессов, обуславливающих шторма;
- инерционность волновых процессов;
- образование к некоторому моменту времени аномалий гидрометеорологических факторов, определяющих на длительный срок особенности развития волновых условий (например сроки начала шторма, его длительность и интенсивность).

Этими особенностями определяются начальные или исходные условия, после которых появляется более или менее выраженная специфичность дальнейших изменений волнового процесса.

Несмотря на то, что прогнозы волнения, основанные на использовании современных спектральных моделей волнения [1, 7, 9], в последние годы достигли достаточно высокого

уровня оправдываемости, их заблаговременность (несколько суток) далеко не удовлетворяет постоянно растущим запросам практики. Часто для планирования и проведения морских операций необходимы прогнозы волнения с заблаговременностью от 10 суток до месяца. В настоящее время практически отсутствуют методы и рекомендации, позволяющие прогнозировать высоты волн с такой заблаговременностью.

В последнее время в ФГБУ «Гидрометцентр России» предпринимаются попытки прогноза опасных высот волн исходя из синоптической интерпретации предшествующих атмосферных процессов над Северной Атлантикой [3–6]. Поскольку изменения ветра и давления при смене синоптических процессов начинаются прежде всего в средней тропосфере, а затем уже распространяются в приземный слой, то изменения характеристик и структуры циркуляции на высотах опережают изменения приземного барического поля, обуславливающие интенсивность штормового волнения. Время опережения определяет заблаговременность прогноза. Эта концепция была положена в основу прогноза положения штормовых зон волнения и их характеристик (продолжительность шторма, максимальная высота волны в шторме и др.). Успешность такого прогноза в значительной степени зависит от знаний и опыта прогнозиста. Попытки объективного способа оценки возможности возникновения опасного волнения в конкретных синоптических ситуациях и его прогноза статистическими методами предпринимались и ранее [8].

Основная трудность прогнозирования аномально высоких волн (АВВ) заключается в сложных связях процессов волнообразования с изменением факторов, их обуславливающих (ветер, барические поля, вертикальные движения воздуха и т.д.), которые необходимо учитывать при составлении прогноза. Прежде всего, следует учитывать большую изменчивость высот волн и параметров ветра, что при отсутствии достаточной информации об их пространственно-временном распределении создает дополнительные трудности. Следует также учитывать многообразие форм волнения (чисто ветровое волнение, штормовая зыбь, мертвая зыбь, смешанное волнение). Возникшая система штормового волнения может длительное время существовать и после того, как исчезнут факторы, ее вызвавшие. Известно, например, что крупная зыбь, образованная ранее действовавшим штормом, может распространяться на весьма большие расстояния (до 4000 км) без значительной потери энергии.

Другая трудность прогноза АВВ на большие сроки состоит в том, что составлять его приходится до наступления исходных условий, определяющих продолжительность и интенсивность штормов. Такая ситуация ограничивает использование численных гидродинамических методов прогноза волн и заставляет искать другие подходы. В этих условиях одним из наиболее эффективных методов прогнозирования является вероятностно-

статистический подход, позволяющий в некоторой степени обойти указанные трудности. Статистические методы прогноза дают возможность оценить динамику развития процесса по результатам наблюдений в прошлом, используя при этом знание вероятностных характеристик этого процесса. Они позволяют получить наиболее вероятные сценарии развития случайного процесса.

Появившиеся за последние годы новые знания об изменчивости высоты волн синоптического масштаба и факторах, ее определяющих, а также накопленные данные наблюдений за волнением с помощью стационарных автоматизированных буев, дают возможность полнее обосновать возможность прогноза высоты волн с достаточно большой заблаговременностью.

Все методы количественного статистического прогнозирования условно можно разделить на два типа. Методы первого типа (часто называемые методами моделирования процессов) включают в себя определение значимых факторов и функциональной зависимости отклика этих факторов с применением множественного регрессионного анализа. Методы второго типа предусматривают определение прогностического значения переменной исключительно на основе прошлых и текущих значений этой же переменной.

Среди методов второй группы наиболее широко используется модель авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС) и адаптивные модели, в частности модель экспоненциального сглаживания (ЭС). Эти модели достаточно просты в употреблении и охватывают широкий класс как стационарных, так и нестационарных процессов. Их принципиальное отличие от других прогностических моделей состоит в том, что они, отражая текущие свойства временного ряда, способны непрерывно учитывать динамику стохастических процессов, обуславливаемую изменяющимися во времени условиями. Именно по этой причине эти методы находят широкое применение в различных сферах человеческой деятельности. В настоящей статье предпринята попытка применить эти модели к прогнозированию временного ряда высот волн на акватории Северной Атлантики.

### **Использованные материалы и метод исследования**

Модель АРПСС и модель экспоненциального сглаживания были исследованы на примере одного достаточно продолжительного временного ряда высот волн, сформированного по данным измерений буя 62095 в северо-восточной части Северной Атлантики в холодный период 2009–2010 гг. (октябрь–март). Общая длина ряда включала 182 среднесуточных значения высот волн. Из них 150 значений отводилось для построения модели, а остальные – для проверки прогноза. Исследование временных рядов и

прогнозирование высот волн осуществлялось с помощью универсальной интегрированной системы STATISTICA, предназначенной для комплексного статистического анализа и обработки данных в среде Windows [1].

Исследуемый временной ряд представляет совокупность значений высот волн в равноудаленные (с интервалом 6 ч) последовательные моменты времени. Каждая индивидуальная высота волны в ряду формируется под воздействием большого числа факторов, которые условно можно подразделить на три группы: факторы, формирующие тенденцию ряда (тренд); факторы, формирующие циклические колебания ряда и факторы и формирующие случайную составляющую ряда (белый шум). При различных сочетаниях этих факторов зависимость индивидуальных высот волн от времени может принимать различные формы. Очевидно, что эти факторы, взятые в отдельности, могут оказывать разнонаправленное влияние на высоту волн. Однако в совокупности они формируют возрастающую или убывающую тенденцию ряда. При разработке метода прогноза АВВ со среднесрочной заблаговременностью исследователи довольно часто используют такую физическую закономерность, как преемственность гидрометеорологических процессов, заключающуюся в установлении связей АВВ с предшествующими атмосферными процессами.

### Прогноз временного ряда методом АРСС

Порядок прогнозирования временных рядов в системе STATISTICA методом АРСС сводится к следующему:

- преобразование исходного временного ряда к стационарному виду;
- построение модели, подходящей для описания временного ряда;
- оценивание неизвестных параметров модели;
- оценка степени адекватности модели данным;
- составление прогноза и оценка его оправдываемости.

Формула, описывающая процесс генерации временного ряда  $\{X_t\}$ , имеет вид

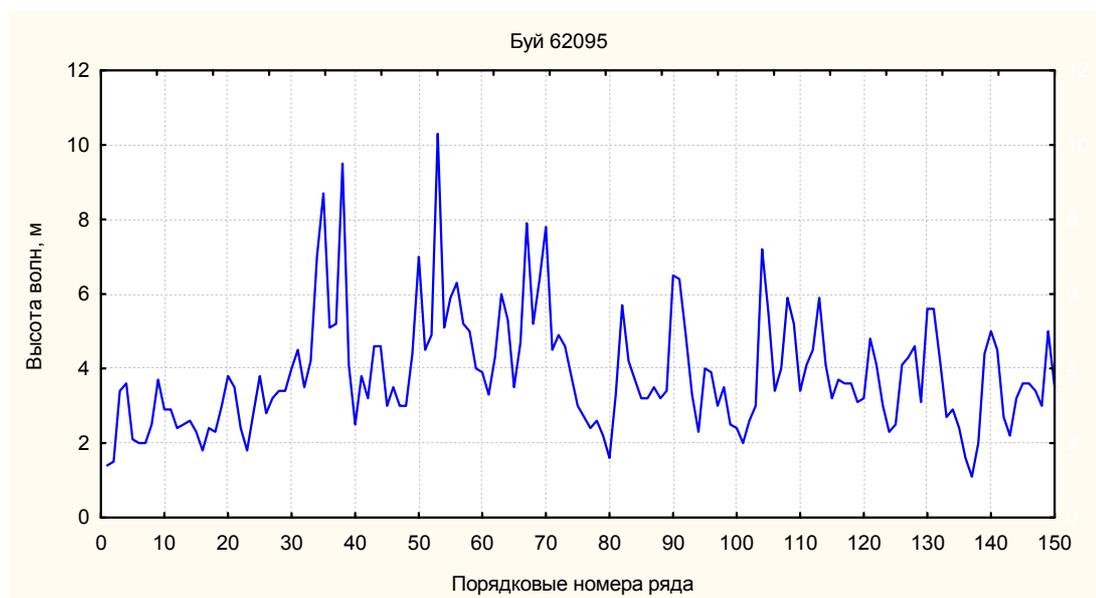
$$X_t = c + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^p \alpha_i X_{t-i} + \sum_{i=1}^q \beta_i \varepsilon_{t-i}, \quad (1)$$

где  $c$  – константа;  $\{\varepsilon_t\}$  – белый шум, т.е. последовательность независимых и одинаково распределенных случайных величин с нулевым средним; а  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  – авторегрессионные коэффициенты и коэффициенты скользящего среднего соответственно.

Для идентификации модели АРПСС по временному ряду необходимо определить, сколько и какие параметры должны использоваться в модели. Всего в модели АРПСС участвуют три типа несезонных и сезонных параметров:  $d$ ,  $d_s$  – порядки разности,  $p$ ,  $P_s$  – порядки авторегрессии,  $q$ ,  $Q_s$  – порядки скользящего среднего. После определения этих параметров вычисляются и сами коэффициенты модели. Для определения порядка модели были исследованы автокорреляционная функция и частная автокорреляционная функция. Для определения коэффициентов применялся метод максимального правдоподобия.

Адекватность модели данным оценивалась по разностям (остаткам) между фактическими и предвычисленными (модельными) значениями высот волн, а также по гистограмме, которая позволяет увидеть, насколько их распределение согласуется с нормальным. После выполнения всех этих этапов осуществляется непосредственно прогноз временного ряда.

Анализ с помощью АРПСС требует предварительной работы по идентификации модели. Было выполнено много экспериментов, чтобы найти удовлетворительную модель, адекватно описывающую исходный временной ряд, график которого показан на рис. 1.

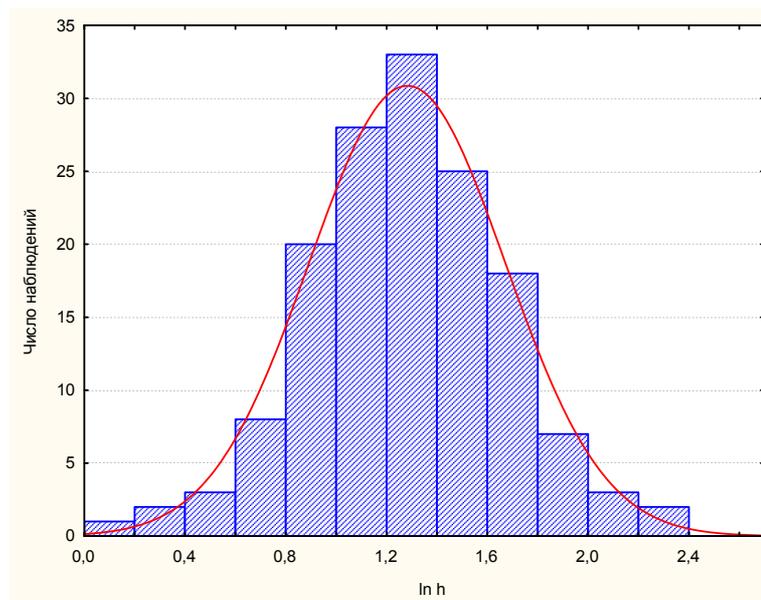


**Рис. 1. График временного хода высоты волн в октябре–феврале 2009–2010 гг. в районе буя 62095.**

На графике присутствуют резко выраженные пики (выбросы) со значительными амплитудами колебаний высоты волн, обусловленные прохождением штормов. Кроме того, в ряде имеется слабо выраженный нелинейный тренд, связанный с сезонностью хода высоты волны – некоторое повышение средней высоты волны в начале периода (октябрь–ноябрь), а

затем ее понижение в конце периода (март). Чтобы исключить или, по крайней мере, существенно уменьшить нелинейность, исходный ряд приводился в соответствие с моделью стационарного случайного процесса с тем, чтобы применить к нему аппарат линейной математической статистики.

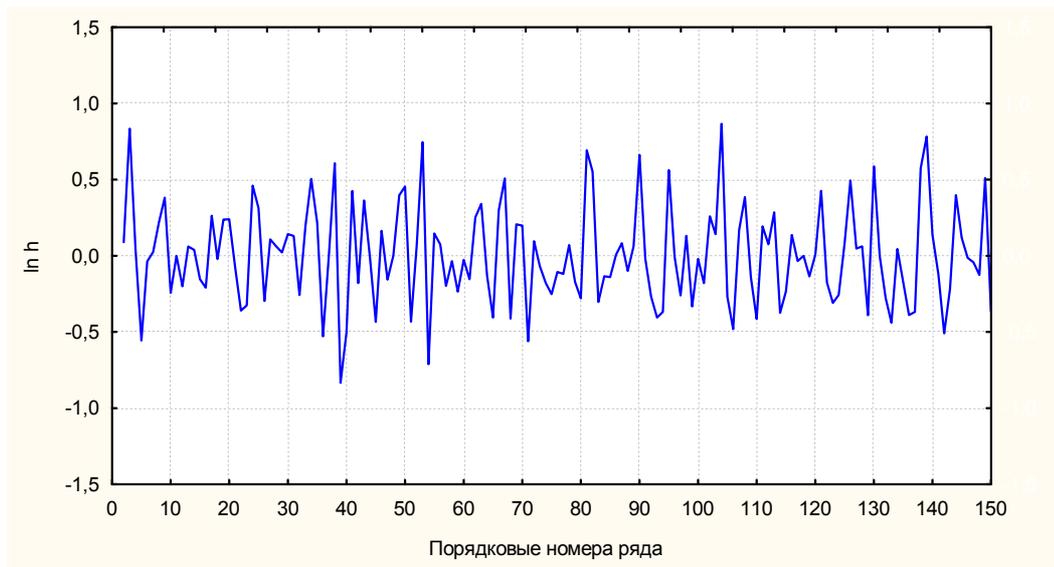
Для этого было выполнено несколько преобразований. Прежде всего, ряд был преобразован в ряд натуральных логарифмов высот волн. Эта процедура заметно приблизила ряд к стационарному виду, что хорошо подтверждает гистограмма, показанная на рис. 2.



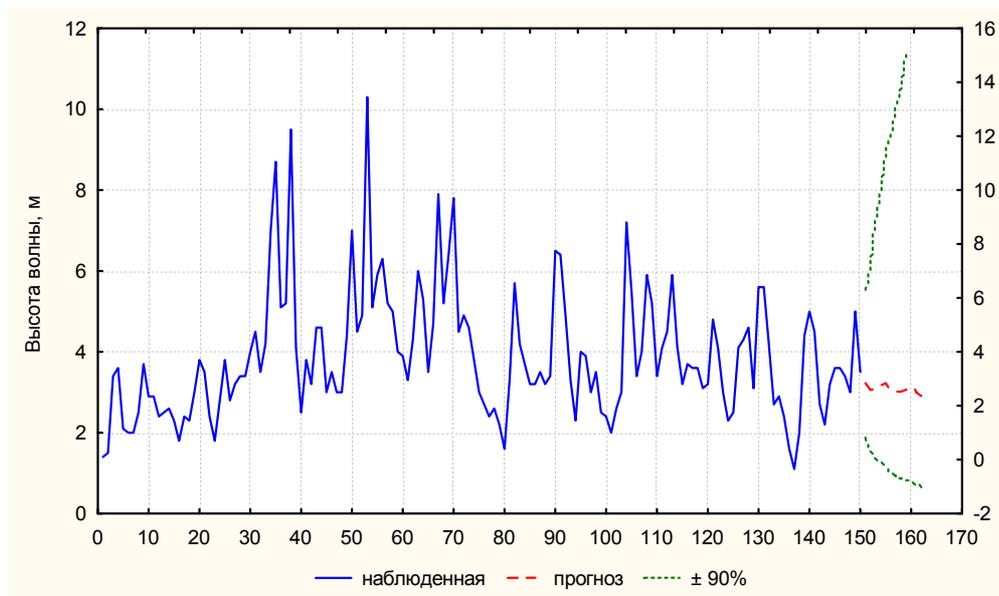
**Рис. 2. Эмпирическое распределение натурального логарифма высоты волн с наложенной кривой нормального распределения.**

На гистограмме эмпирическое ступенчатое распределение высот волн хорошо аппроксимируется теоретической кривой нормального распределения. Для того чтобы исключить тренд, были вычислены первые разности ряда: из текущего значения ряда вычиталось предыдущее (со скользящим сдвигом 1). Полученный результат представлялся в качестве нового ряда. Затем было сделано преобразование на исключение сезонной составляющей. На рис. 3 показан график хода высот волн после всех преобразований: логарифмирования, исключения тренда и сезонности. Вдоль оси  $x$  отложены номера суток начиная с 1.10.2009 г. по 28.02.2010 год. Из рисунка видно, что после всех преобразований ряд стал очень близок к стационарному.

На рис. 4 представлены результаты прогноза, полученные после применения метода АРПСС. Вдоль оси  $x$  отложены номера суток начиная с 1.10.2009 года.



**Рис. 3. График хода среднесуточных значений высоты волн после преобразований: логарифмирования, исключения тренда и сезонности.**



**Рис. 4. График временного хода высоты волн и прогноз на 10 суток с 90 % интервалом доверительности по методу АРПСС.**

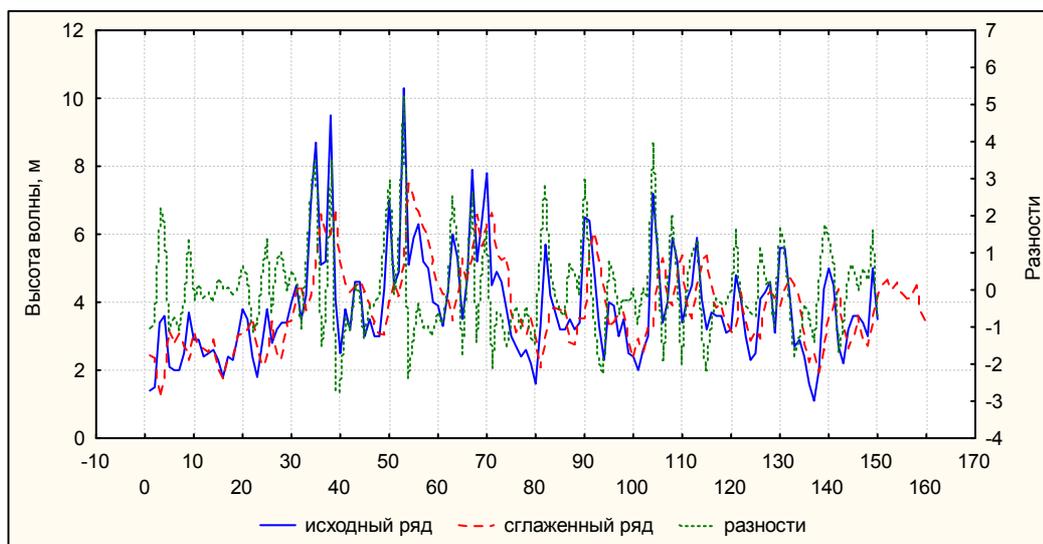
### **Прогноз временного ряда методом экспоненциального сглаживания**

Суть метода экспоненциального сглаживания состоит в том, что исходный ряд  $X(t)$  сглаживается с помощью взвешенной скользящей средней, веса которой подчиняются экспоненциальному закону, причем чем дальше от момента прогноза отстоит точка ряда, тем меньшее участие принимает она в формировании прогностического значения. Метод позволяет сгладить исходный временной ряд, выделить из него шум и спрогнозировать

будущие значения. Тренд и сезонность учитываются автоматически при построении модели. В общем виде экспоненциальная скользящая средняя  $S_t$  временного ряда определяется по рекуррентной формуле

$$S_t = \alpha x_{t-1} + (1 - \alpha)S_{t-1}, \quad (2)$$

где  $S_t$  – значение средней в момент  $t$ ;  $S_{t-1}$  – в момент  $t-1$ ;  $\alpha$  – параметр сглаживания. Результат сглаживания зависит от параметра  $\alpha$ , который изменяется в пределах от 0 до 1. Если  $\alpha = 1$ , то предыдущие наблюдения полностью игнорируются. Если  $\alpha = 0$ , то игнорируются текущие наблюдения. Точной формулы для определения  $\alpha$  не существует. Поэтому внутри этого интервала показатель  $\alpha$  выбирался методом подбора, который заключался в том, что модель оценивалась по нескольким значениям  $\alpha$ , затем выбиралось то значение  $\alpha$ , которое дает наилучшие результаты. Наиболее сглаженный ряд (с наименьшей дисперсией) получается при значениях  $\alpha = 0,1$ , а с наибольшей изменчивостью – при  $\alpha = 0,9$  (почти повторяет значения исходного ряда). На рис. 5 представлен результат прогноза временного хода высоты волны на 10 шагов (суток), выполненный методом экспоненциального сглаживания.



**Рис. 5. Результат прогноза высоты волн на срок 10 суток, построенный методом экспоненциального сглаживания.**

В таблице приведены результаты прогноза, полученные по модели АРПСС и модели экспоненциального сглаживания (ЭС).

Как видно из таблицы, метод АРПСС дает более точные результаты, чем метод экспоненциального сглаживания. Недостатком метода экспоненциального сглаживания является то, что отсутствует точный способ выбора оптимальной величины параметра

сглаживания, а также то, что в нем не строятся доверительные интервалы и, следовательно, невозможно рассчитать риск при использовании прогноза.

Таблица

**Сравнение результатов прогноза высоты волн по двум моделям**

Шаг	$h_{набл}$	АРПСС			ЭС		
		$h_{прогн}$	$\Delta$	%	$h_{прогн}$	$\Delta$	%
1	5,0	2,7	2,3	46	4,5	0,5	11
2	3,5	3,0	0,5	14	4,0	-0,5	14
3	2,3	3,3	-1,0	43	3,8	-2,0	87
4	2,1	3,3	-1,2	57	4,	-2,4	95
5	2,3	3,5	-1,2	52	3,6	-1,9	83
6	2,3	3,5	-1,2	52	3,8	-1,8	78
7	2,6	2,2	0,4	15	3,5	-1,5	58
8	2,0	3,0	-1,0	50	3,4	-1,4	70
9	2,8	3,5	-1,7	61	3,4	-1,6	89
10	3,1	4,1	-1,0	32	3,5	-0,2	6
Сред.	2,7	3,2	-0,5	42	3,8	1,3	59

### Выводы

1. Выполнены прогнозы на 10 суток высоты волн с использованием статистических методов авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего и экспоненциального сглаживания. Лучшие результаты получены для АРПСС. Средняя ошибка прогноза высоты волн по методу АРПСС составила  $-0,5$  м, а по методу ЭС  $-1,3$  м.

2. При прогнозировании необходимо исходить из того, что временной ряд высот волн может содержать тренд, сезонную, циклическую и случайную составляющие.

3. Настоящее исследование носит предварительный, поисковый характер. Для детального анализа временных рядов высот волн и выяснения возможности их прогнозирования с достаточно большой заблаговременностью необходимо оценить применимость других статистических методов.

### Список использованных источников

1. *Абузяров З.К.* Морское волнение и его прогнозирование. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 166 с.
2. *Боровиков В.П., Боровиков И.П.* STATISTICA. Статистический анализ и обработка данных в среде Windows. – М.: Филинь, 1997. – 608 с.
3. *Лукин А.А.* Опасное ветровое волнение в Северной Атлантике зимой 2008-2009 гг. // Труды Гидрометцентра России. – 2009. – Вып. 343. – С. 23–28.

4. Лукин А.А., Нестеров Е.С. Траектории циклонов и опасное ветровое волнение в Северной Атлантике // Труды ГОИН. – 2011. – Вып. 213. – С. 224–233.

5. Лукин А.А., Нестеров Е.С. Опасное ветровое волнение в Северной Атлантике при различных режимах атмосферной циркуляции // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 12. – С. 36–44.

6. Лукин, А.А. Циркуляция в средней тропосфере и прогноз опасного ветрового волнения в Северной Атлантике // Труды Гидрометцентра России. – 2012. – Вып. 347. – С. 169–180.

7. Матушевский, Г.В. Современные модели расчета ветрового волнения // Метеорология и гидрология. – 1995. – № 4. – С. 51–56.

8. Непон К.И. Прогноз особо опасного волнения в Охотском море // Труды Гидрометцентра СССР. – 1980. – Вып. 221. – С. 101–104.

9. Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях / под ред. Е.С.Нестерова. – М., Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2013. – 295 с.

*Поступила в редакцию 20.09.2013 г.*

