

МЕТОДЫ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЛНОМЕРА МОРСКОЙ ПРИБРЕЖНОЙ СТАНЦИИ «БРИЗ-1»

П.В. Гайский

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: gaysky@inbox.ru

В статье предлагаются методы обработки результатов измерения поверхностного волнения. Приводятся примеры их испытаний и реализации в программном обеспечении морской прибрежной станции «Бриз-1» применительно к измерительным данным акустического волнометра для телеметрических измерений и в программе подготовки отчетности.

Введение. В составе погружного блока морской прибрежной станции (МПС) «Бриз-1» [1] присутствует модуль измерений поверхностного волнения [2]. Принцип его работы основан на определении расстояния до водной поверхности посредством посылки и приема отраженного акустического сигнала. Стандартная частота измерений составляет $f=5\text{ Гц}$. Первичный цифровой измерительный код временной задержки акустического сигнала составляет три байта.

Техническим заданием к МПС было предусмотрено определение параметров поверхностного волнения – высоты и периода волн в диапазоне от 1 до 100 секунд с разрешением в 1 секунду. Поскольку природное волнение имеет временную изменчивость и может содержать в себе несколько периодических составляющих (рисунок 1), то уточнение задачи для телеметрического режима измерений было сведено к обнаружению и вычислению экстремумов волновых составляющих в заданных отрезках временно-частотного диапазона.

Поставленная задача была решена с помощью программного обеспечения телеметрической и постобработки измерений МПС. Обобщенная блок-схема процедуры расчета приведена на рисунке 2. Для обнаружения всех волновых составляющих в исследуе-

мом процессе необходим расчет спектральной характеристики. Известно, что спектр имеет ограничения по шкале частот, связанный с частотно-временными рамками исходного ряда данных. Исходя из условий технического задания, необходима частота полученных измерений волнения не менее 2 Гц и длительность наблюдений не менее $T=200$ секунд, что аппаратно удовлетворяется и компьютерный расчет спектральной характеристики $N=1000$ значений ($5\text{ Гц} \cdot 200$) в режиме реального времени с периодичностью хотя бы один раз в минуту не представляет особых затруднений. Однако, гармоники полученного при этом спектра будут рассчитаны с неравномерной дискретностью, а именно для периодов: $T/2, T/3, \dots, 2/f=2*T/N$, что недостаточно в низкочастотной области и избыточно в высокочастотной. Поэтому, для того, чтобы получить дискретность по периоду в 1 секунду по всему заданному диапазону необходимо либо набирать и постоянно оценивать очень большой ряд “скользящих” во времени наблюдений колебаний волнения (около $10000\text{ сек} \cdot 5\text{ Гц} = 50000$ точек), либо для расчета каждой гармоники спектра хранить и использовать свой отдельный массив данных и вычислять значение только для конкретно заданной частоты. В первом случае обработка будет очень громоздкой и не отвечающей требованиям оперативного контроля. Для второго случая потребуется вычисление только по одной конкретной секундной гармонике в $N=1\text{ сек} \cdot 100\text{ сек} = 100$ спектрах, обрабатывая определенный по длине ряд наблюдений. Временной интервал периодичности проведения спектральных оценок (исходный массив) для расчета каждой секундной гармоники может быть выбран индивидуально, но должен отвечать требованиям общей синхронности отображения результатов. Очевидно, что этот интервал ограничен снизу и должен быть пропорционален соответствующему периоду гармоники без остатка. Если взять за основу цикличность вывода расчетных параметров волнения и длительность рядов измерений не менее 400 секунд, то можно предложить вычислительный метод согласно таблице 1. Накопление рядов указанной длительности и их обработка осуществляется в “скользящем” режиме. Таким образом достигается общая синхронность полученной спектральной характеристики и своевременная

выдача результата.

Теоретически минимально достаточным для вычислений может быть расчет крайней Т/2 гармоники. Тогда для нашего случая удовлетворителен был бы алгоритм:

гармоника периода волн 100 сек. – исходный массив длительностью 200 сек. (1000 измерений);

гармоника периода волн 99 сек. – исходный массив длительностью 198 сек. (990 измерений);

.....
гармоника периода волн 2 сек. – исходный массив длительностью 4 сек. (20 измерений);

гармоника периода волн 1 сек. – исходный массив длительностью 2 сек. (10 измерений).

Время обработки при использовании этого метода уменьшается в сотни раз и позволяет вычислять параметры поверхностного волнения программно на ПК среднего уровня в телеметрическом режиме измерений. Основным недостатком такого метода является ограниченность обрабатываемого мас-

сива (только его часть), используемого при расчете высокочастотных составляющих, тем более, если программно эта операция выполняется для всего диапазона спектра с заданной программистом или оператором длиннопериодной цикличностью в процессе наблюдений.

Возможен расчет спектра Фурье не для целочисленных значений частот, пропорциональных обрабатываемому ряду и максимальной частоте измерений, а дробных, соответствующих равномерному шагу по периоду в исследуемом диапазоне. Тогда гармоники полученного спектра будут распределены равномерно, а длина расчетного ряда для всех одинакова.

Поскольку природное волнение разнородно и непостоянно во времени, то для одного из тестирований предлагаемых алгоритмов был смоделирован сигнал, содержащий в себе три различные по параметрам гармоники с амплитудами 5, 5÷1 (затухающая) и 3 метра и с периодами 5, 20 и 37 секунд. Математически и программно он представлен формулой:

$$\text{Волнение (м)} = 2 * \left[5 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot i}{5 \cdot f}\right) + \frac{5}{1 + \sqrt{i/100000}} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot i}{20 \cdot f}\right) + 3 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot i}{35 \cdot f}\right) \right],$$

где i – порядковый номер измерения, осуществляемый с частотой $f = 5 \text{ Гц}$.

Графически в увеличенном масштабе изменчивость тестового сигнала представлена на рисунке 3. Результаты постобработки суточного моделирования представлены в виде изолиний высоты волнения (рисунок 4) и отдельных спектральных оценок на границах всего временного интервала: рисунок 5 – спектр Фурье по массиву из 3000 измерений (соответствует 10 минутному ряду наблюдений), рисунок 6 – для метода расчета отдельных гармоник по минимальным массивам, рисунок 7 – для метода расчета отдельных гармоник по массивам с минимальным ограничением в 2000 измерений (400 секунд) и рисунок 8 – спектр Фурье с использованием дробных расчетных частотных значений периодических составляющих (одинаковых в интервале временного диапазона).

Из полученных графиков видно, что предложенные методы для обработки сложного природного процесса имеют недостатки и погрешности. Наиболее достоверным, хотя и слабо информационным в низкочастотной области (для ограниченного по длительности ряда) остается стандартный метод расчета по Фурье. Если отойти от требований по дискретности спектра в 1 секунду в диапазоне периода свыше 30 секунд, то он наиболее точно отображает общую картину поверхностного ветрового волнения применительно к Черному морю. Уточнение же возможно, как указывалось выше, за счет увеличения времени наблюдений и усиления аппаратно-вычислительных ресурсов компьютерной техники. Удовлетворительным также является высокоскоростной метод расчета каждой гармоники по минимальным массивам, причем длину каждого из них для увели-

чения достоверности и в зависимости от быстродействия компьютера можно неог-

раничивать условием $T/2$, а выбирать $T/3$, $T/4, \dots T/n$.

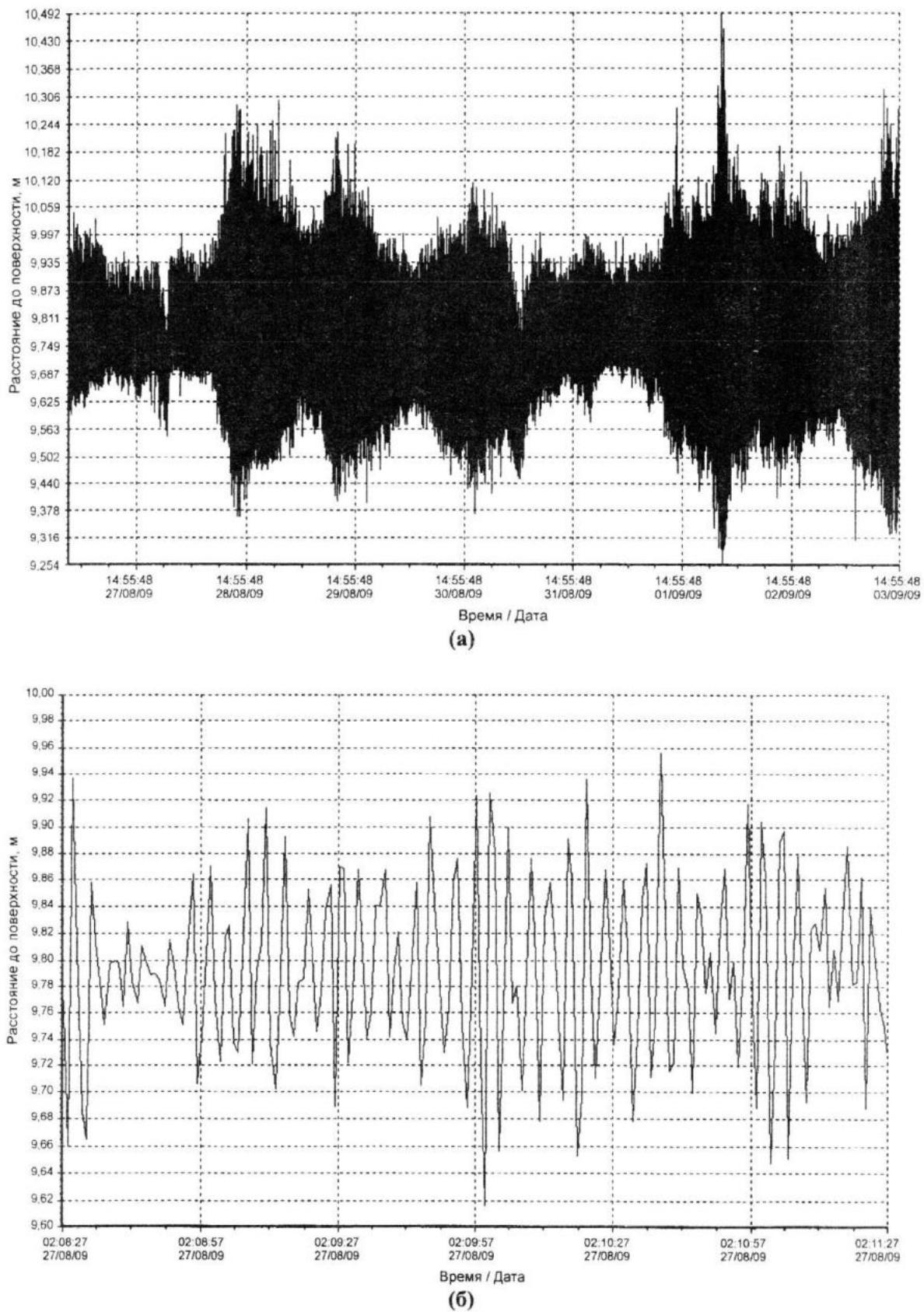


Рисунок 1 – Первичные результаты измерений акустическим волномером МПС: общий вид выборки 7 суток (а) и в масштабе 3 минут (б)

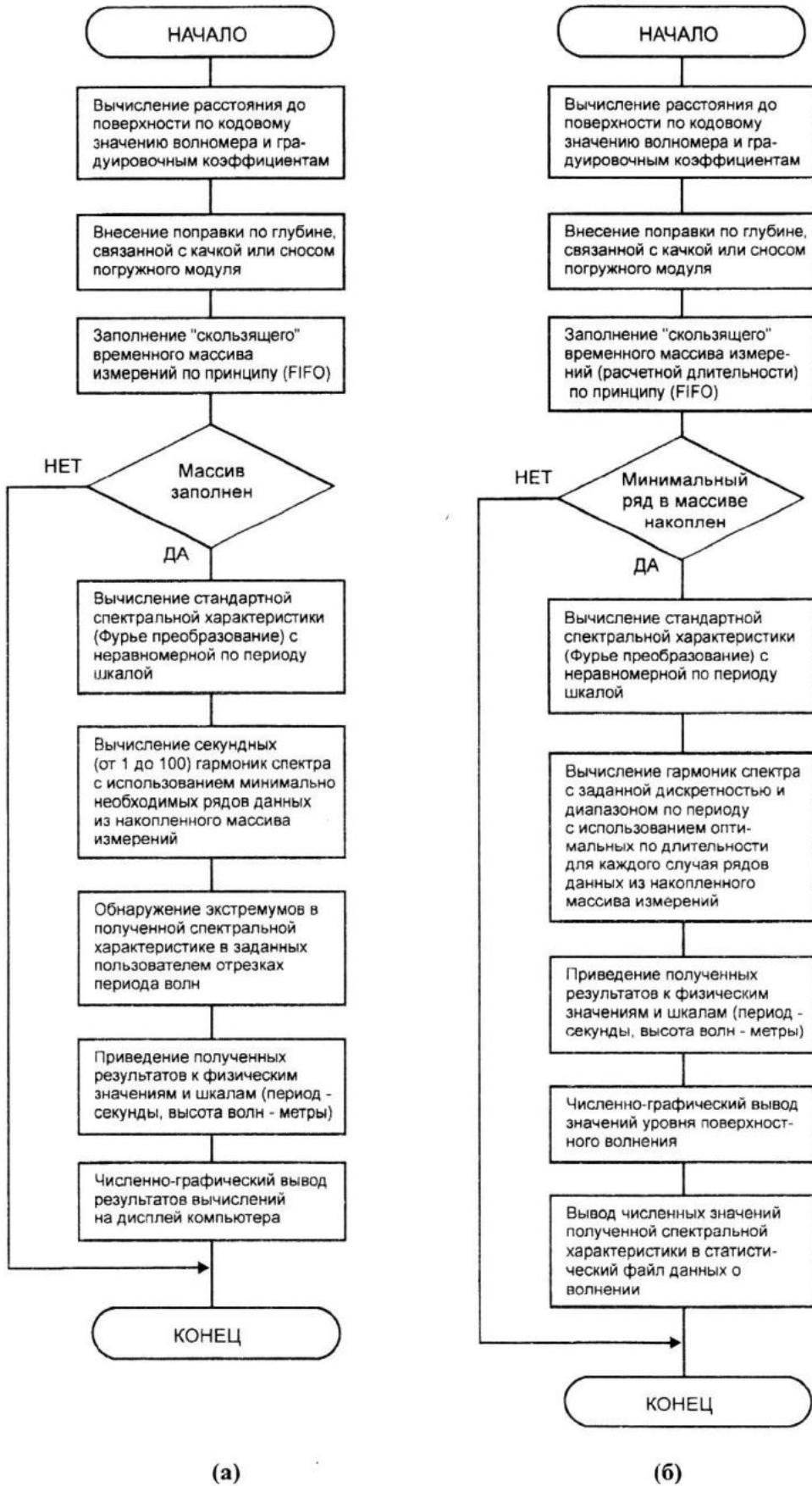


Рисунок 2 – Обобщенная блок-схема процедуры расчета параметров поверхностного волнения для телеметрического режима измерений (а) и для программы постобработки данных (б)

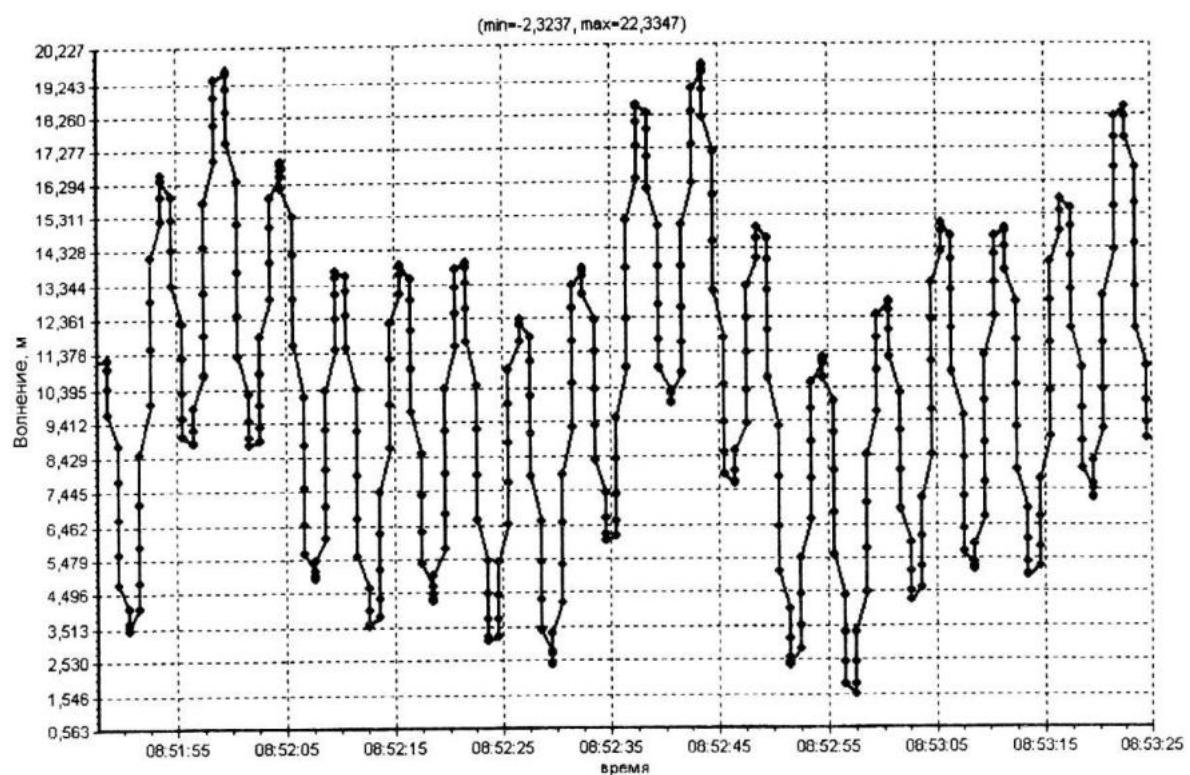


Рисунок 3 – Моделируемая изменчивость волнения (в увеличенном масштабе)

Таблица 1 – Пример подборки индивидуальных расчетных рядов для спектральных гармоник волнения с периодом от 1 до 100 секунд, разрешением 1 секунда и минимальным требованием на длину ряда 400 секунд

Период гармоники спектра волнения, сек.	Период наблюдений (T), сек. / Длина ряда (f=5 Гц)	Номер расчетной гармоники в спектре
100	400 / 2000	T/4
99	495 / 2475	T/5
98	490 / 2450	T/5
.....
80	400 / 2000	T/5
79	474 / 2370	T/6
.....
67	402 / 2010	T/6
66	462 / 2310	T/7
.....
58	406 / 2030	T/7
57	456 / 2280	T/8
.....
50	400 / 2000	T/8
49	441 / 2205	T/9
.....
45	405 / 2025	T/9
44	440 / 2200	T/10
.....
6	402 / 2010	T/67
5	400 / 2000	T/80
4	400 / 2000	T/100
3	402 / 2010	T/134
2	400 / 2000	T/200
1	400 / 2000	T/400

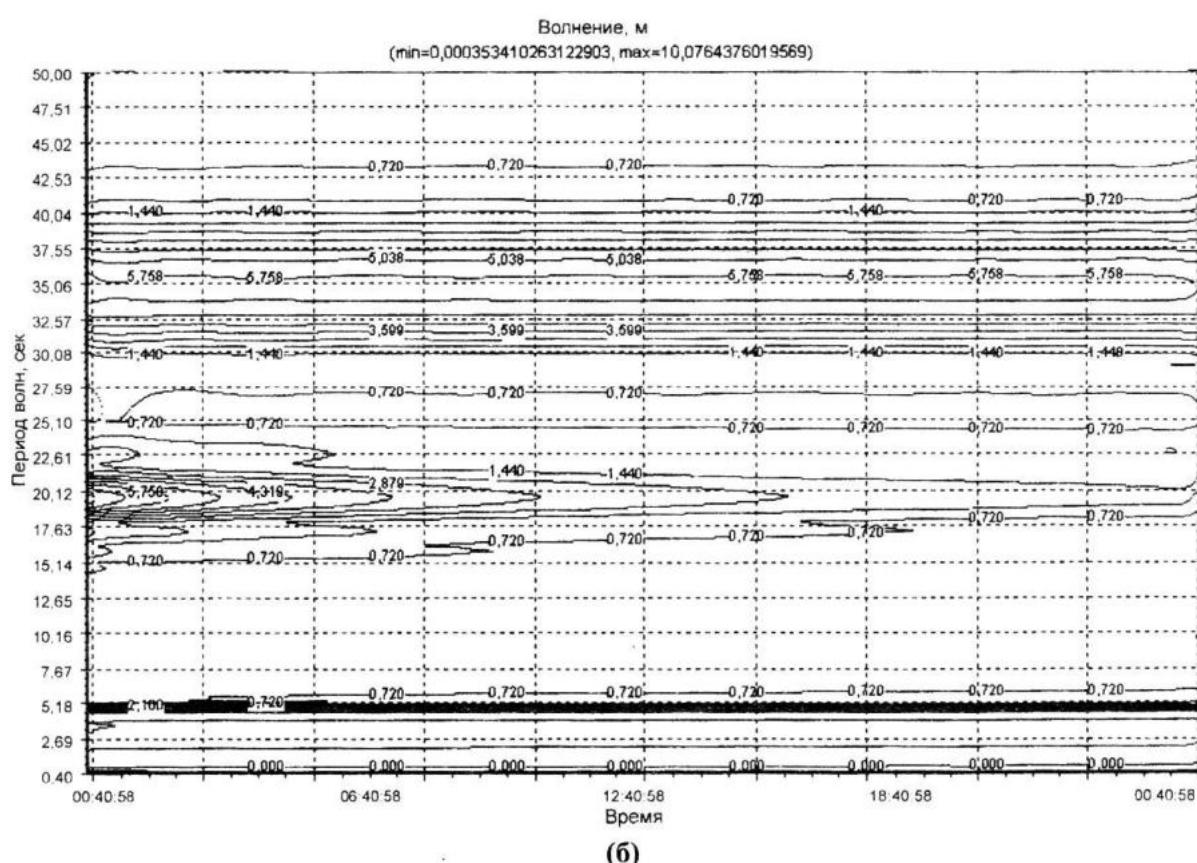
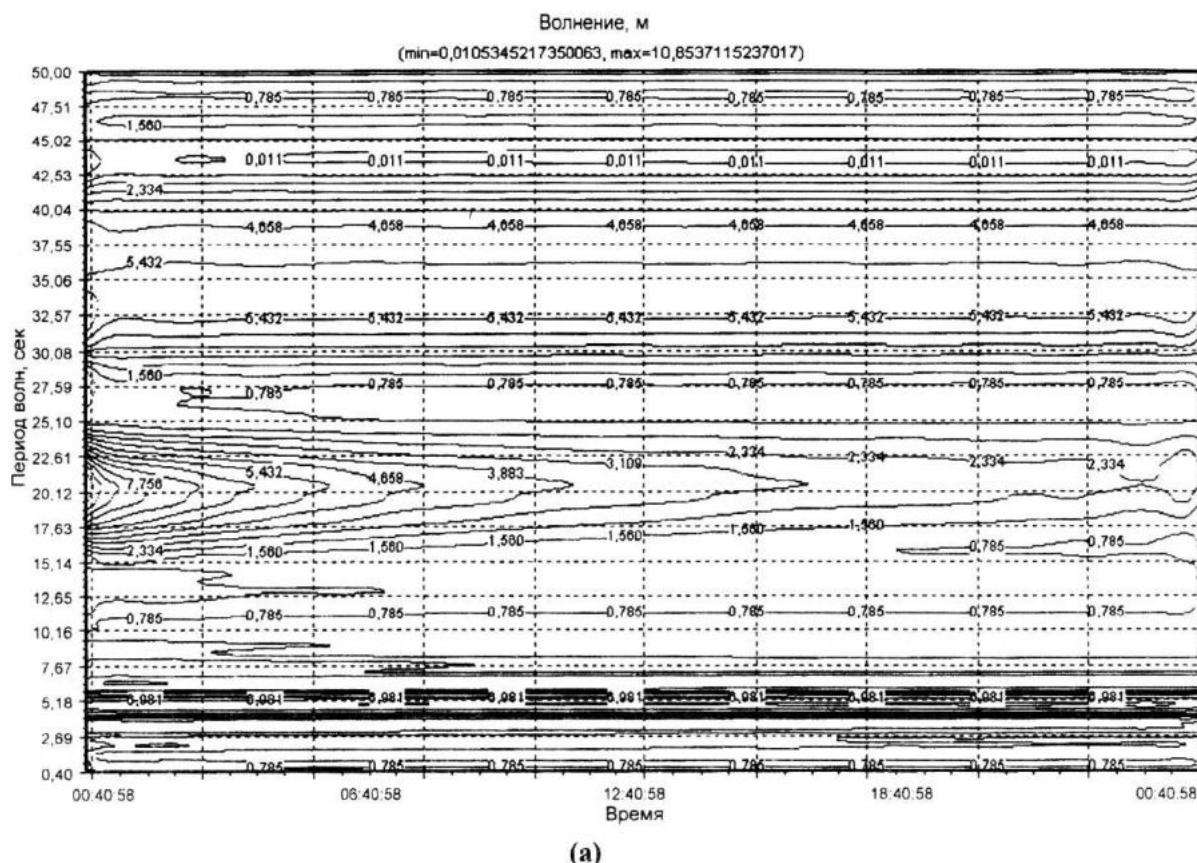
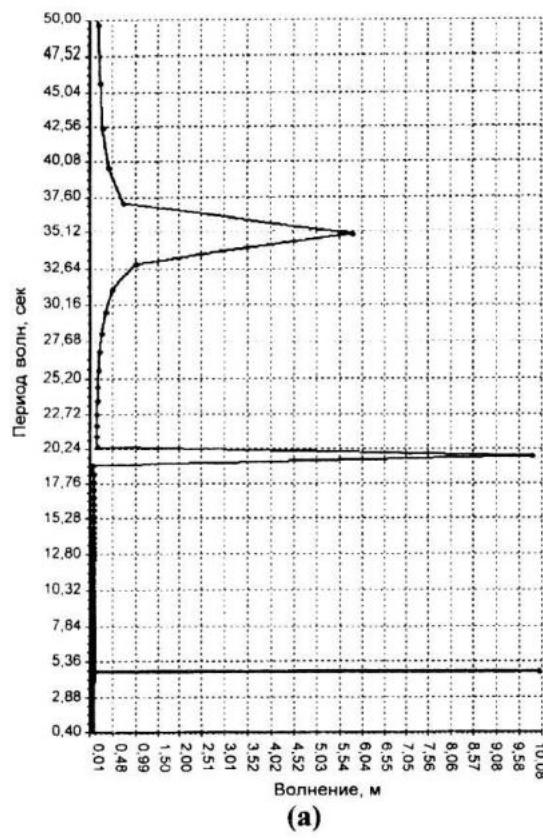
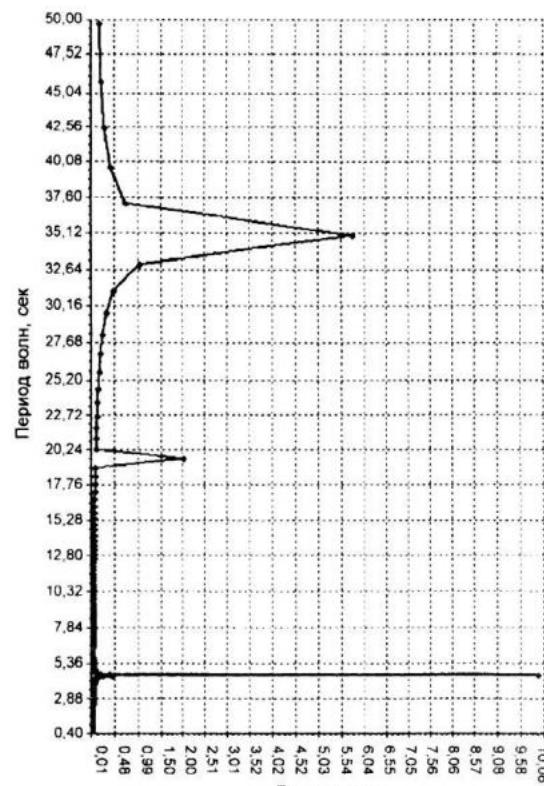


Рисунок 4 – Волнение по результаты постобработки суточного моделирования в виде изолиний: (а) – метод минимальных массивов, (б) – метод преобразования Фурье с использованием дробных расчетных частотных значений периодических составляющих

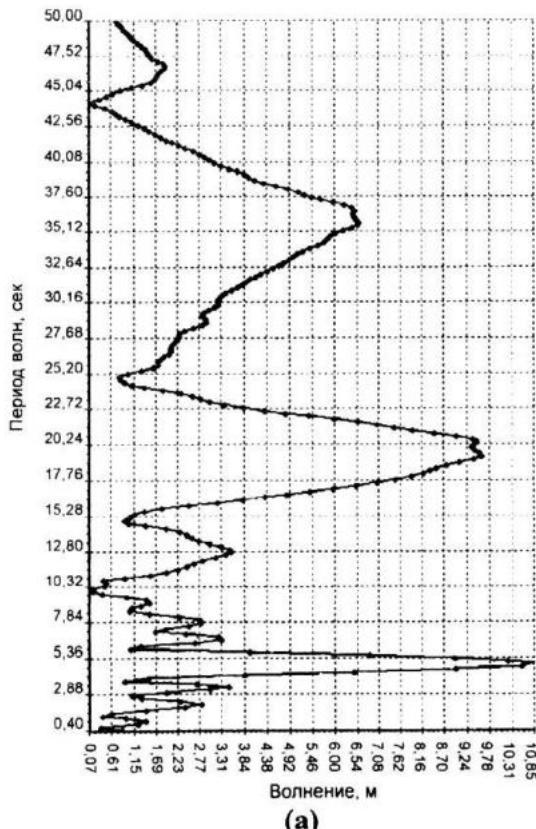


(а)

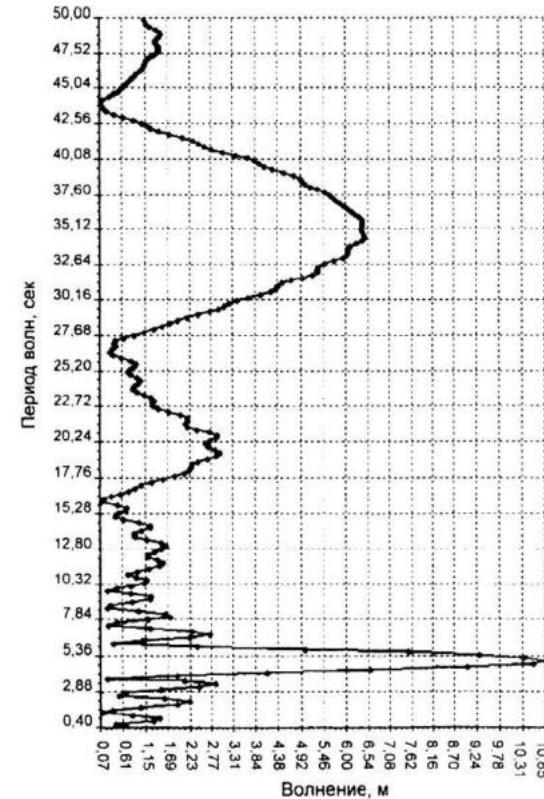


(б)

Рисунок 5 – Спектр Фурье волнения по результатам моделирования в начале (а)
и в конце (б) суточного диапазона

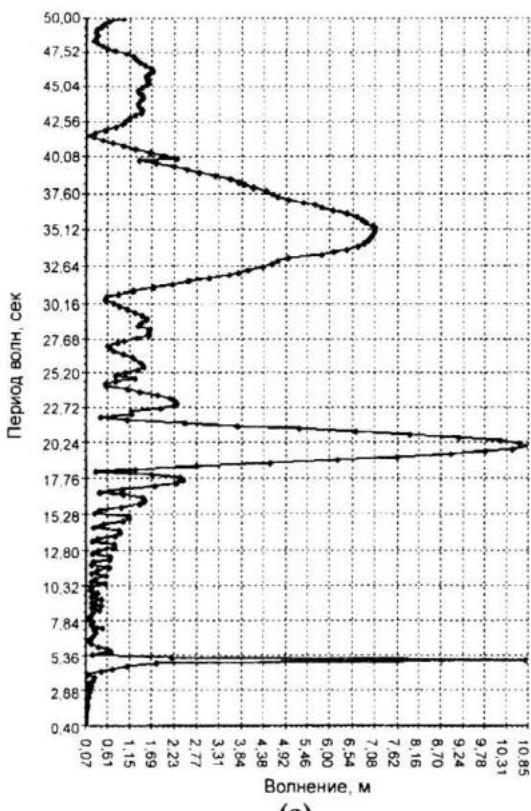


(а)



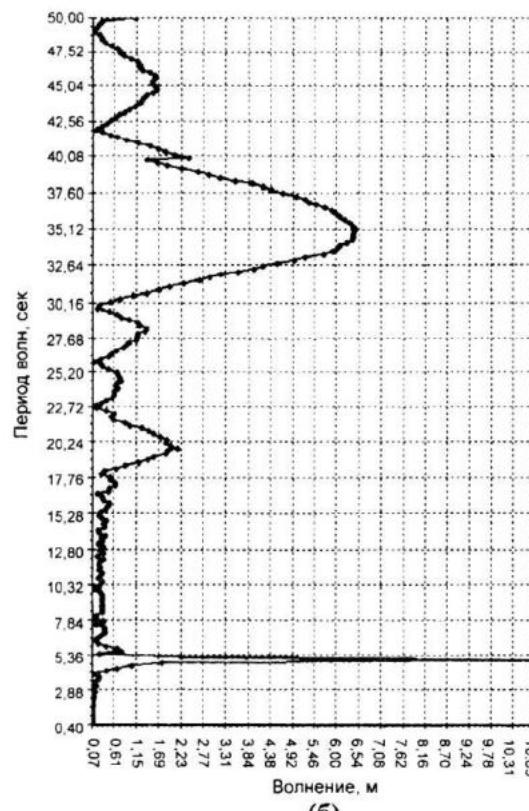
(б)

Рисунок 6 – Спектр волнения по результатам моделирования в начале (а) и в конце (б)
суточного диапазона с использованием метода расчета отдельных гармоник
по минимальным массивам

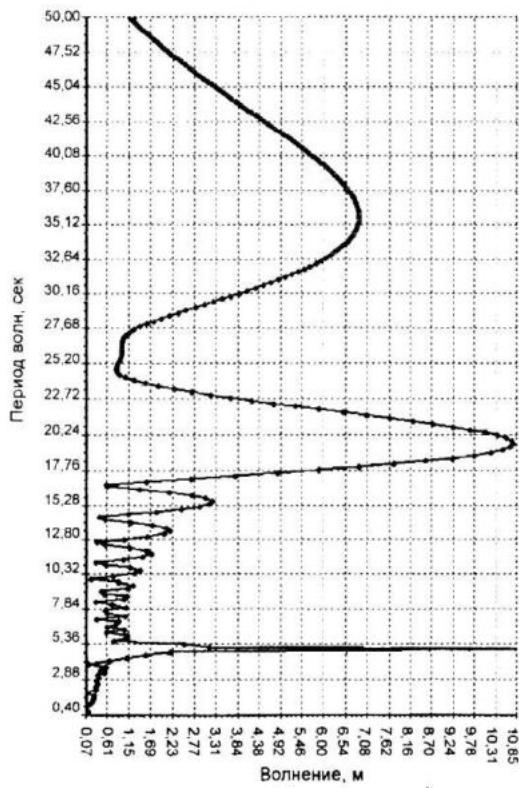


(а)

Рисунок 7 – Спектр волнения по результатам моделирования в начале (а) и конце (б)
суточного диапазона с использованием метода расчета отдельных гармоник
по массивам с минимальным ограничением в 2000 измерений (400 секунд)

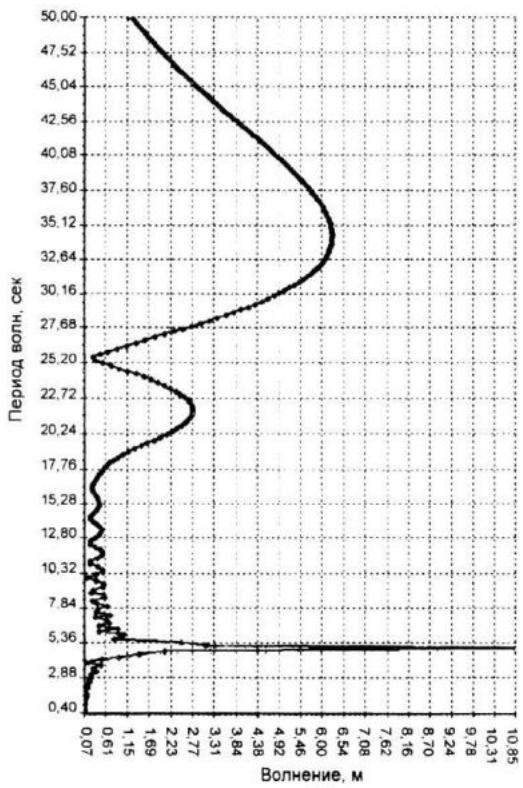


(б)



(а)

Рисунок 8 – Спектр Фурье с использованием дробных расчетных частотных значений периодических
составляющих (одинаковых в интервале временного диапазона) по результатам
моделирования в начале (а) и в конце (б) суточного диапазона



(б)

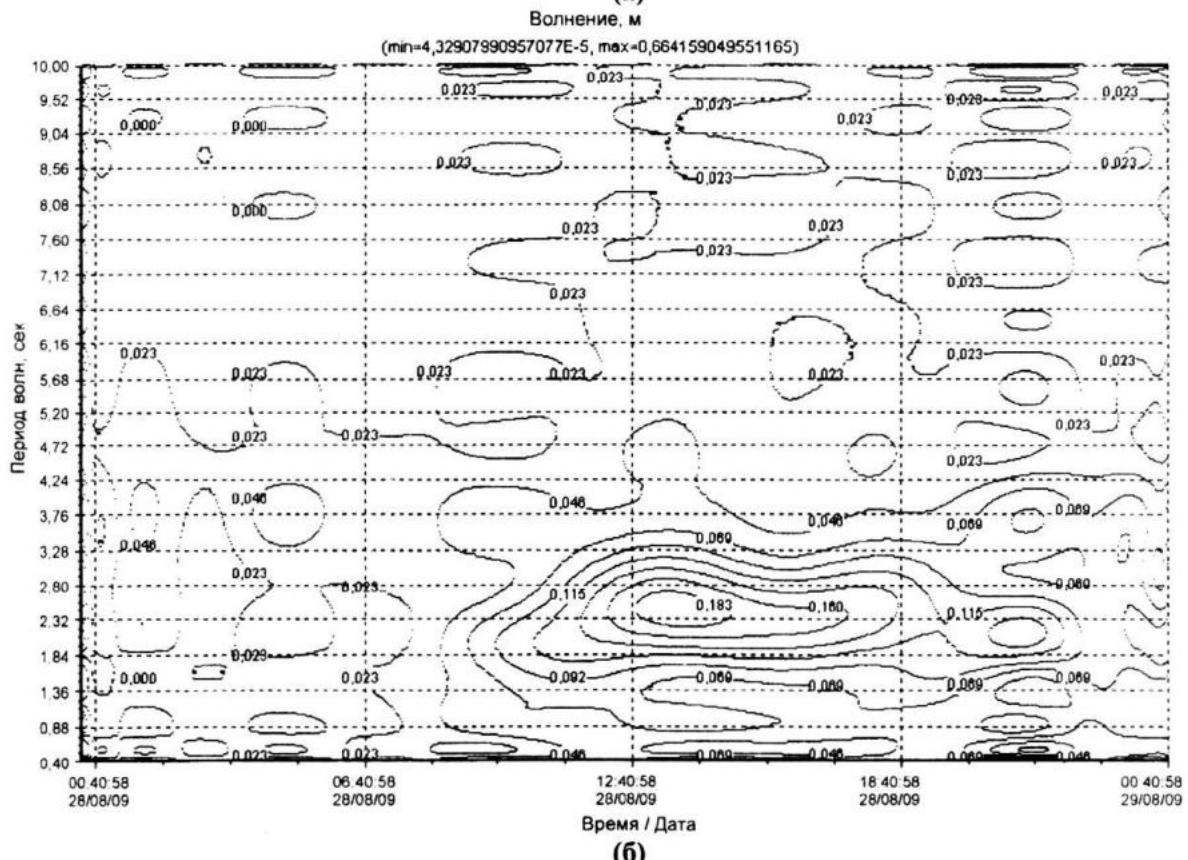
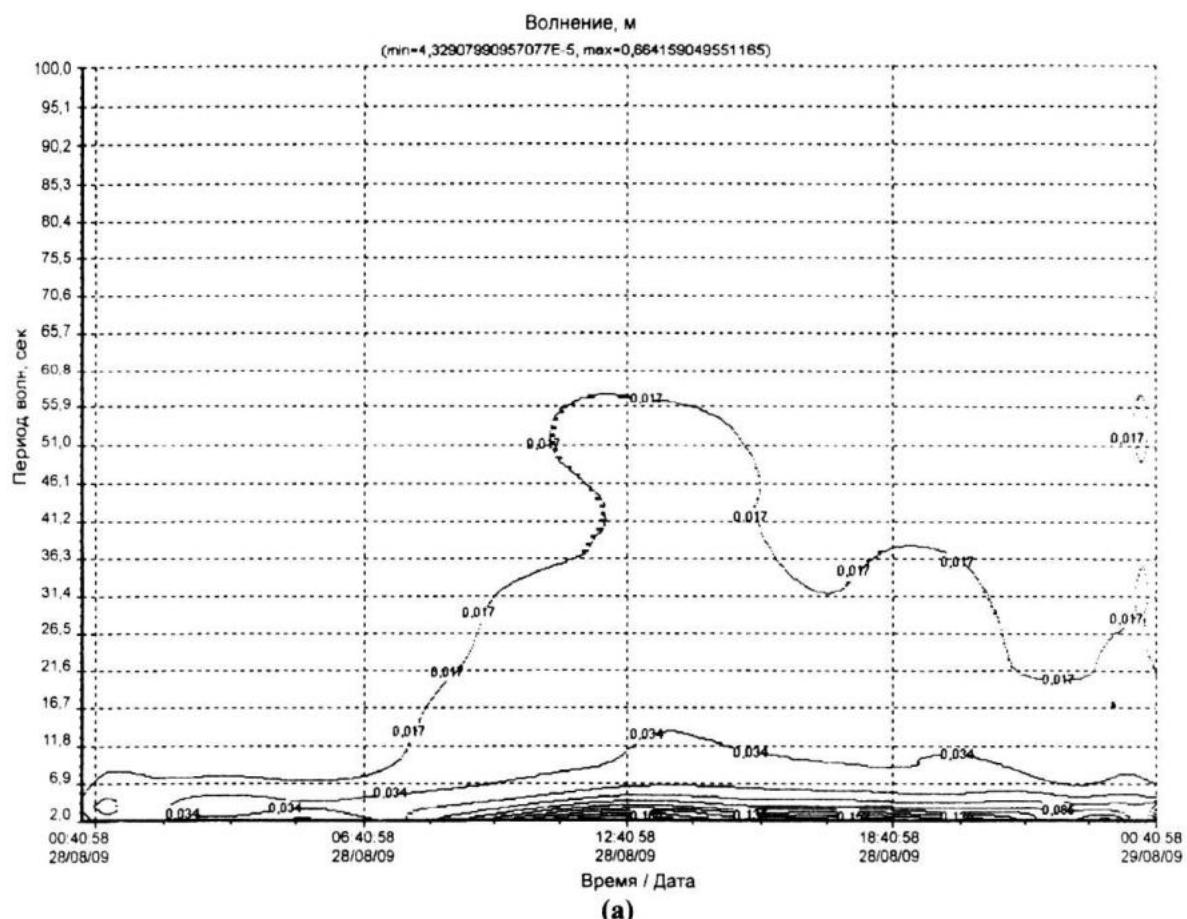


Рисунок 9 – Результаты постобработки параметров поверхностного волнения методом минимальных массивов за 1 сутки измерений в диапазоне периода волн от 1 до 100 секунд, представленные в изолиниях: (а) – в масштабе всего диапазона, (б) – в масштабе периода от 1 до 10 секунд

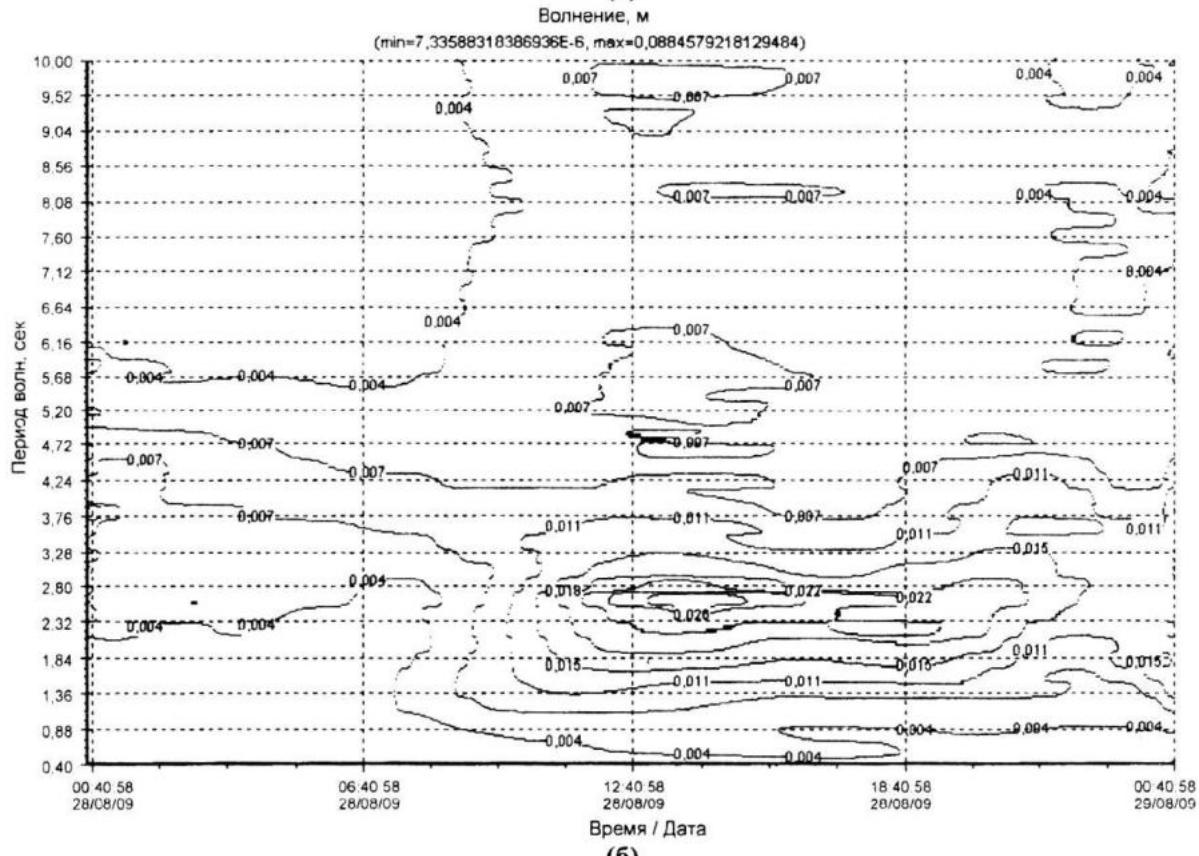
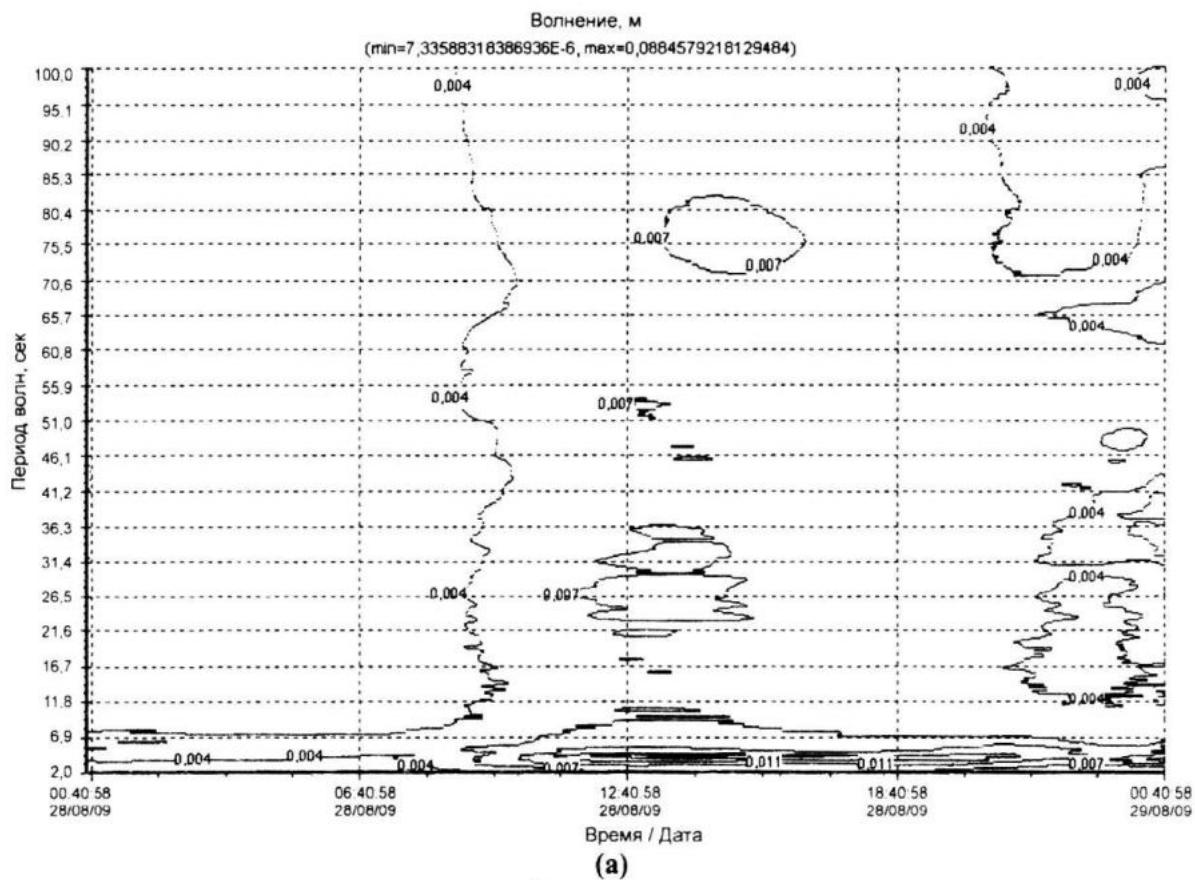


Рисунок 10 – Результаты постобработки параметров поверхностного волнения методом индивидуальных рядов за 1 сутки измерений в диапазоне периода волн от 1 до 100 секунд, представленные в изолиниях:
(а) – в масштабе всего диапазона, (б) – в масштабе периода от 1 до 10 секунд

По эффективности для работы с реальными измерительными данными можно выделить два метода. Метод минимальных массивов с заданной гармоникой расчета, позволяющий оперативно вычислять необходимые параметры и выявлять короткопериодные составляющие, и метод оптимальных массивов с заданной начальной гармоникой, который больше подходит для обнаружения длительных периодических процессов (длиннопериодных и продолжительно повторяющихся) в поверхностном волнении.

В программном обеспечении для телеметрических измерений МПС в режиме оперативного контроля параметров среды реализована вычислительная процедура на основе вычисления спектра волнения в заданном диапазоне и с заданным интервалом, использующая минимально необходимые ряды данных для одной и той же $T/4$ гармоники соответствующего периода волн от 1 до 100 секунд, а также расчет стандартной спектральной характеристики с неравномерным шагом по частоте (периоду). Максимальная длина обрабатываемого ряда соответствует 400 секундам (2000 измерений), минимальная – 4 секундам (20 измерений). Окончательно для оператора ПК осуществляется графический вывод спектральной характеристики с привязкой к реальным физическим параметрам и вывод численных значений обнаруженных экстремумов на указанных спектрально-волновых отрезках.

Программное обеспечение постобработки комплексных измерительных данных МПС позволяет использовать более точные и длительные процедуры расчета по всем предложенным здесь алгоритмам. При использовании метода индивидуальных рядов при расчете каждой гармонической составляющей автоматически для заданного опе-

ратором диапазона рассчитывается массив подобно представленному в таблице 1. В результате обработки кроме стандартных рядов первичных и вторичных параметров среды контролируемых МПС мы получаем трехмерный массив данных, содержащий в себе численные значения спектральных характеристик с привязкой к заданному временному интервалу расчета. Этот массив в дальнейшем может быть обработан любой графической программой построения изолиний, что, по мнению автора будет наиболее полно и наглядно отображать характер и свойства исследуемого процесса.

Заключение. Реализованные в программном обеспечении алгоритмы обработки и вывода параметров поверхностного волнения на основе измерительных данных акустического волномера МПС “Бриз-1” позволяют при наличии требуемых вычислительных ресурсов оперативно и достоверно получить пользователю требуемую информацию. В результате проведенных исследований предложены методы определения периодических составляющих (вычисление высоты и периода волн) в спектральной характеристике: метод минимальных массивов с заданной гармоникой расчета и метод оптимальных массивов с заданной начальной гармоникой.

Л и т е р а т у р а

1. Гайский В.А., Греков Н.А., Гайский П.В. и др. Морская прибрежная станция Бриз-1 // Системы контроля окружающей среды. Сб. научн. тр. НАН Украины, МГИ: – Севастополь, 2006. – С. 9–23.
2. Греков А.Н., Васильев Д.М., Котов М.Н. Акустический измеритель параметров волн // Системы контроля окружающей среды. Сб. научн. тр. НАН Украины, МГИ: – Севастополь, 2006. – С. 51–56.