ПОДСПУТНИКОВАЯ МАЛОГАБАРИТНАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДВУМЕРНОГО СПЕКТРА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН И ПОЛЯ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ

А.С. Миронов ¹, А.Н. Греков ^{2,3}, К.А. Кузьмин ²

¹ Российский государственный метеорологический университет,
РФ, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98
E-mail: alexey.s.mironov@gmail.com

² Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: oceanmhi@ya.ru

³ Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Измерение параметров верхнего слоя океана является одной из задач океанологии, от решения которой зависит прогресс целого ряда направлений исследования океана. Непрерывное увеличение объема данных дистанционного зондирования, рост сложности алгоритмов их обработки, совершенствование методов моделирования океана формируют новые требования к качеству и количеству экспериментальных измерений. В данной работе рассматривается малогабаритный дрейфтер, оборудованный необходимыми измерительными каналами и программным обеспечением, как элемент системы измерения пространственно-временных характеристик поверхностного слоя океана, а именно: вектора течения и углового спектра морского волнения. Приводится его структурная схема, общий вид, описание механической части, а также схема выполнения экспериментальных работ.

Ключевые слова: морское поверхностное волнение, пространственный спектр волн, измерение характеристик морской поверхности, натурные измерения в океане, дрейфтерные измерения, подспутниковые измерения, сетцентрические системы измерения

Поступила в редакцию: 06.09.2019. После доработки: 26.11.2019.

Введение. В настоящее время множество инструментов воздушного и космического базирования осуществляют систематическое дистанционное зондирование мирового океана в различных спектральных диапазонах, позволяя оценивать ключевые параметры верхнего морского слоя: вектор скорости течения, температуры воды, соленость, скорость приводного ветра, характеристики морского волнения. Современные модели морской поверхности поставляют данные реанализа и прогноза характеристик состояния океана с высоким временным и пространственным разрешением, постоянно улучшая качество моделирования физики процессов соответствующих геофизических полей. В свою очередь, дальнейшее развитие методов дистанционного зондирования и моделирования океана напрямую зависит от возможностей регуляр-

ной и всесторонней валидации и калибровки на основе данных, полученных в натуральных условиях. Как правило, различные параметры верхнего слоя океана взаимосвязаны и для решения большинства задач должны быть измерены одновременно. Растущая сложность методов дистанционного зондирования и моделирования океана обуславливает тенденцию к заметному усложнению проводимых измерений и накладывает дополнительные требования к качеству и объему необходимых экспериментальных данных.

Взаимодействие течений с поверхностными волнами и их влияние на пространственный спектр волн является актуальным объектом изучения в задачах фундаментальной океанографии, дистанционного зондирования морской поверхности и моделирования океана [1, 2].

Угловые спектры волн и скорость течения могут быть определены по микроволновым снимкам морской поверхности, например, на основе изображений серии спутников Sentinel-1 (радар с синтезированной апертурой) [3, 4]. При определенных условиях оптические наблюдения морской поверхности из космоса позволяют восстанавливать двумерные пространственные спектры волн, например, по данным со спутника Sentinel-2 [5, 6]. Новейшие спутниковые миссии CFOSAT (совместный проект французского и китайского космических агентств) [7] и SKIM (Европейское космическое агентство) [8] впервые позволяют осуществить постоянный мониторинг угловых спектров морского волнения в глобальном масштабе. Однако сложность проведения натурных измерений, ряд методологических ограничений (например, облака для оптических измерений, необходимость учета орбитальных движений волн и обрушений в радиолокационных данных), высокая стоимость специальных приборов, их установки и обслуживания приводят к тому, что в распоряжении научного сообщества находится крайне небольшая группировка измерителей вектора скорости поверхностного течения и спектральных характеристик поверхностного волнения. Часто такие измерения имеют ограниченные точность и спектральное разрешение. С другой стороны, соответствующие подспутниковые эксперименты зачастую требуют длительной подготовки и ограничены во времени и/или локации проведения, что препятствует формированию обширной базы совместных спутниковых и натурных измерений. Недостаток синхронных данных не позволяет осуществить необходимую всестороннюю валидацию и калибровку динамических моделей и данных дистанционного зондирования океана в различных метеорологических ситуациях, корректно оценить соответствующие передаточные функции. Эта проблема особенно актуальна для углового спектра волнения. Крайне небольшое количество измерений приводит к значительным сложностям, например,

при валидации модели Wave Watch 3 или данных со спутника CFOSAT, впервые предоставляющих спектр волнения как готовый спутниковый продукт. Как следствие, сильно ограничиваются точность и границы применимости расчетных и восстановленных геофизических полей.

Поэтому получение доступного и эффективного метода измерения динамических и кинематических характеристик верхнего морского слоя в натурных условиях является крайне актуальной задачей современной океанографии.

Описание измерительной системы.

Общая идея измерений. Одной из отличительных черт измерительной системы является синхронный сбор данных сразу несколькими измерителями. Для удобства изготовления, установки и эксплуатации каждый буй является свободно-дрейфующим, т.е. взаимное расстояние между датчиками может произвольно меняться в каждый конкретный момент времени. Такие измерения на нерегулярной пространственной сетке требуют существенной модификации существующих алгоритмов для оценки угловых спектров. Необходимая регуляризация данных может быть достигнута за счет использования метода ограниченной интерполяции.

Дополнительно качество восстанавливаемых спектров может быть улучшено за счет использования нейронных сетей, предварительно обученных на имеющихся экспериментальных данных. Исследования, проведенные с помощью компьютерного моделирования (обучающая выборка около 100 тыс. случайных пространственных спектров), показали положительные результаты и будут продолжены в рамках предлагаемого исследования.

Описание механической части дрейфтера (поплавков). Измерительный модуль – дрейфтер – выполнен в виде водонепроницаемого пластикового поплавка диаметром 10 см (рис. 1), содержащим внутри электронный и приемопередающий модули, элемент питания и балансирующий груз для придания устойчивости.

Рис. 1. Общий вид мини дрифтера
Fig. 1. General view of the mini drifter

Описание электронного устройства дрифтера. Электронная схема измерителя построена на базе энергоэффективного высокопроизводительного микроконтроллера (на основе серии микроконтроллеров Texas Instruments MSP430) и включает два высокочувствительных трехосевых МЭМС акселерометра, гироскоп и магнитометр, модуль глобального позиционирования GLONASS/GPS, несколько портов для подключения дополнительных измерительных каналов (например, для датчика температуры), модуль передачи информации, блок стабилизации питания и хранения/записи информации (карта памяти SD) (рис. 2). Данная конфигурация опробована на ранних прототипах измерителя и позволяет

закладывать широкую функциональность, сохраняя миниатюрные размеры и длительное время автономности прибора. Наличие аппаратного ускорителя со встроенным дискретным преобразованием Фурье в выбранном контроллере обеспечивает возможность предварительной обработки и сжатия измеренных данных непосредственно перед записью в память или передачей на принимающее устройство. Комбинация из двух трехосевых акселерометров, гироскопа и магнитометра, в отличие от традиционной схемы с одним акселерометром, а также применение метода оптимальной фильтрации Калмана позволяет уменьшить погрешности всей инерциальной системы [9].

Рис. 2. Структурная схема электронной части дрифтера
Fig. 2. Block diagram of the electronic part of the drifter

Мини-дрифтеры могут оснащаться двумя видами приемо-передающих модулей: ближнего действия на основе беспроводной сенсорной сети и глобального действия на основе спутникового транспондера. Каждый тип передачи данных имеет свои преимущества и недостатки, что обуславливает выбор того или иного варианта в зависимости от каждого конкретного сценария использования.

Связь между буями, дистанционное управление измерениями и сбор данных. Развертывание системы в морской среде является сложной задачей, и, среди многих проблем, связанных с реализацией, требует надежных и маломощных беспроводных линий связи между буями и базовыми станциями или шлюзами. Обычно в прибрежных регионах используются такие технологии, как WiFi или Zigbee [10], при условии, что точка доступа и узел находятся в прямой видимости. Когда узлы развертываются в удаленных морских районах, используются две широко распространенные технологии: система мобильной связи (GSM) и передача данных через спутниковую группировку, такую как Iridium [11].

Ряд научных работ посвящен проблеме передачи данных с измерительного узла с использованием упомянутых технологий. Например, [11] успешно продемонстрировали использование субгигагерцового трансивера для передачи данных измерений с буя, расположенного в 2,5 км от берега моря, с применением узкополосной модуляции. Boydston et al. [13] осуществляли передачу данных, используя Wi-Fi на расстояние приблизительно 300 м, в то время как Pozzebon et al. [14] продемонстрировали успешную связь в прибрежной зоне, объединяющую как ZigBee, так и GSM. Работа, представленная Trasviña-Moreno [15], показала успешную связь между измерительным узлом и беспилотным летательным аппаратом при помощи технологии LoRa.

Чтобы иметь возможность охватить различные сценарии развертывания

нашей системы, необходимо использовать соответствующие технологии. Например, ZigBee и WiFi являются адекватными технологиями при развертывании системы на расстоянии до нескольких сотен метров от побережья, что ограничивает их использование в отдаленных районах. Технология GSM может использоваться в отдаленных районах, до 35 км, при условии, что есть зона покрытия. Однако стоит обратить внимание на стоимость передачи данных, так как технология GSM использует лицензированные частоты. Кроме того, все три технологии предлагают скорости передачи данных, которые значительно выше, чем это требуется для разрабатываемой системы. Устройства, использующие эти технологии, крайне не энергоэффективны (из расчета на байт полезной нагрузки), поскольку требуют реализации сложных протоколов передачи. Наконец, системы со спутниковой передачей данных используются редко из-за высокой стоимости передачи данных, высоких энергозатрат на байт переданной информации и сложности реализации измерительного узла.

LoRa как одна из базовых технологий LPWAN имеет ряд преимуществ при развертывании над морской поверхностью. Прежде всего, она обеспечивает лучший динамический диапазон по сравнению со всеми тремя вышеперечисленными технологиями благодаря чувствительности приемника, которая достигает уровня -148 дБм [16]. Поскольку LoRa использует нелицензированные частоты, передача данных не требует финансовых затрат. Кроме того, низкая скорость передачи данных и небольшие накладные расходы протокола передачи на байт полезной нагрузки позволяют значительно сократить энергопотребление конечной системы, что увеличит время работы буев от батареи.

Есть несколько работ, посвященных передаче данных над морской поверхностью с использованием технологии LoRa.

Petajajarvi et al. [17] провели несколько экспериментов по различным сценариям применения технологии, в том числе над морской поверхностью. Lingling et al. [18] применили приемопередатчик LoRa в системе наблюдения за парусной лодкой. Результаты эксперимента показали, что максимальное расстояние передачи составляет 3467 м. А в работе [19] авторы показали, что возможна передача данных над морской поверхностью на расстояния до 28 км. Однако для этого необходимо использовать дорогостоящие антенны с высоким коэффициентом усиления, а также располагать их на некоторой высоте над морской поверхностью.

В результате анализа нами были предложены для передачи информации с буев по технологии LoRa модули серии E22 компании Chengdu Ebyte Electronic Technology Co., Ltd. Эта серия построена на базе новейшего поколения микросхем SX126x компании Semtech. По сравнению с предыдущим поколением, скорость передачи данных в этих микросхемах может достигать 62,5 кбит/с. Кроме того, значительно улучшена энергоэффективность микросхем. Так, в режиме

максимальной мощности передатчика (22 дБм) потребление тока составляет всего 118 мА, а в режиме приема микросхема потребляет всего 4,8 мА, что вдвое меньше, чем потребление микросхем предыдущего поколения (10 мА). Улучшенная энергоэффективность положительно сказывается на общем времени автономной работы системы.

Алгоритм восстановления углового спектра морских волн. Отличительной чертой разработанной измерительной системы является возможность измерения угловых спектров морского волнения. Математическая основа алгоритма оценки направленных спектров была предложена [20] и основана на анализе коэффициентов разложения Фурье различных компонентов измерений: проекций вектора ускорения, орбитальных скоростей или возвышений морской поверхности, измеренных волнографической решеткой. Спектр возвышений морской поверхности $S(\mathbf{k}, \omega)$ связан с кросс-спектром пары измерителей с номерами $\mathbf{m}$ и $\mathbf{n}$ как

$$\phi_{m,n}(\omega) = \int_{\mathbf{k}} H_m(\mathbf{k}, \omega) H_n^*(\mathbf{k}, \omega) \exp\{-i\mathbf{k}(x_n - x_m)\} S(\mathbf{k}, \omega) d\mathbf{k}, \quad (1)$$

где ω – круговая частота; $\mathbf{k}$ – волновой вектор, связанные через дисперсионное соотношение (линейная форма дисперсионного соотношения для глубокой воды $\omega^2 = gk$, где g ускорение свободного падения); $H(\mathbf{k}, \omega)$ – передаточная функция соответствующая каждому конкретному

типу измерителя; $\mathbf{x}_m$ и $\mathbf{x}_n$ – соответствующий направляющий вектор между измерителями $\mathbf{m}$ и $\mathbf{n}$. Применительно к измерениям, полученным при помощи буев, выражение (1) может быть представлено в виде функции спектральной частоты $f = \omega/2\pi$ и азимутального угла θ :

$$\phi_{m,n}(f) = \int_0^{2\pi} H_m(f, \theta) H_n^*(f, \theta) [\cos\{k(x_{mn} \cos \theta + y_{mn} \sin \theta)\} - \sin\{k(x_{mn} \cos \theta + y_{mn} \sin \theta)\}] F(f, \theta) d\theta,$$

где $x_{mn} = x_n - x_m$, $y_{mn} = y_n - y_m$ вертикальное и горизонтальное расстояния между измерителями $\mathbf{m}$ и $\mathbf{n}$, а $F(f, \theta)$ частотно-угловой спектр волнения ($F(f, \theta) = \frac{dk}{df} k S(\mathbf{k})$).

В результате, полный частотно-угловой спектр определяется через сумму всех кросс-спектров, измеренных пространственными элементами измерительной решетки.

$$F(f, \theta) = \alpha \sum_m \sum_n \phi_{mn}(f) \exp\{ik(x_n - x_m)\},$$

где α – константа пропорциональности, которая определяется из условия спектральной нормировки

$$\int_0^{2\pi} F(f, \theta) d\theta = F_{\text{omni}}(f).$$

Так как количество пространственных компонент, как правило, ограничено, существующие алгоритмы обработки данных в качестве интерполяционных подходов используют метод максимального правдоподобия [21, 22] или максимальной энтропии [23]. Подробный анализ методики и проверка эффективности различных конфигураций измерительных решеток была выполнена в работе [24]. В случае одиночного измерителя, например буй с широкой базой, для расчета углового спектра возможно использование компонент измеренного вектора линейного или углового ускорения [25], (современный пример реализации Directional Waverider MkIII (Datawell)). Помимо высокой стоимости таких приборов, наличие корпуса с большой инертной массой и недостаточная чувствительность бортовых акселерометров и гироскопов негативно сказываются на точности измерений: длинноволновая часть спектра (низкоамплитудная зыбь) не видна из-за недостаточной чувствительности сенсоров, коротковолновая часть восстанавливаемого спектра скрыта собственными колебаниями дрейфтера.

Важной особенностью предлагаемой системы является схема на основе свободно дрейфующих измерителей. Это означает, что в отличие от традиционных измерительных решеток с фиксированным шагом, расстояние между сенсорами непрерывно изменяется. В данном случае взаимное расположение буйев контролируется при помощи систем глобального позиционирования, а методы нахождения угловых спектров [21–23] расширены с использованием подхода ограниченной

интерполяции аналогично обработке, представленной в [26].

Схема выполнения экспериментальных работ при помощи системы.

Основной особенностью предложенной системы является наличие нескольких независимых приборов, обеспечивающих измерение пространственной компоненты волнового спектра. При выполнении экспериментальных работ схема постановки дрейфтеров должна максимально точно удовлетворять требованиям по взаимному расположению поплавков для обеспечения необходимого углового и спектрального разрешений спектра морского волнения. Как показано в [24], количество измерителей и образованный ими пространственный рисунок играют ключевую роль для получения качественных данных. Так, установлено, что наиболее оптимальной схемой расположения является фигура в виде равносidedного пятиугольника с дополнительным измерителем в центре (рис. 3). Такая форма измерительной решетки способна обеспечить угловое разрешение не меньше 15° . Взаимное расстояние между буйками определяет спектральное разрешение измеряемого спектра, которое равно половине длины волны между соседними измерителями в каждом направлении.

При установке измерительных буйев важно учитывать скорость и структуру течений морской поверхности. Для предлагаемой измерительной схемы со свободно-дрейфующими измерителями наличие сдвигов и неоднородностей течения являются основными факторами,

определяющими длительность измерений и качество полученных данных. Минимальное время измерений, в течение которого измерители должны находиться в относительной близости друг от друга, составляет около 20–30 мин в зависимости от максимальной длины измеряемых волн, определяемых по длине волны спектрального пика.

В зависимости от целей, места и продолжительности экспериментальных работ управление режимами работы приборов и загрузка измеренной информации может осуществляться непосредственно на месте проведения эксперимента или удаленно при помощи приемо-передающего устройства, установленного на берегу, дроне или специального управляющего буя с использованием радиоволнового или спутникового каналов связи.

Рис. 3. Схема выполнения экспериментальных работ. Несколько свободно дрейфующих дрейфтеров образуют измерительную сеть в необходимом районе. Управление и съем измеренных данных могут осуществляться с берега, дрона или дополнительного управляющего буя

Fig. 3. Scheme of experimental work. Several drifters form a measuring network in the required area. Control and acquisition of the measured data can be carried out from the shore, a drone or an additional control buoy

Заключение. На основе проведенного в работе анализа предложена измерительная система с синхронным сбором данных и передачей информации с малогабаритного дрейфтера по технологии LoRa.

Отличительной чертой разработанной измерительной системы является возможность измерения угловых спектров морского волнения.

Разработана электрическая схема, алгоритм работы, ПО и механические части

буя, а отдельные узлы прошли предварительные испытания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ardhuin F. et al. Small-scale open ocean currents have large effects on wind wave heights: small-scale currents and wave heights // J. Geophys. Res. C: Oceans. 2017. Vol. 122, № 6. P. 4500–4517.
2. Quilfen Y. et al. Storm waves focusing and steepening in the Agulhas current: Satellite observations and modeling //

Remote Sens. Environ. 2018. Vol. 216. P. 561–571.

3. Chapron B. Direct measurements of ocean surface velocity from space: Interpretation and validation // *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110, № C7. P. 76–92.

4. Chapron Bertrand, Harald Johnsen, René Garello. Wave and wind retrieval from SAR images of the ocean // In *Annales des telecommunications*, Springer-Verlag, 2001. Vol. 56, № 11-12. P. 682–699.

5. Kudryavtsev V. et al. Sun glitter imagery of ocean surface waves. Part 1: Directional spectrum retrieval and validation: Sun glitter imagery of surface waves // *J. Geophys. Res. C: Oceans*. 2017. Vol. 122, № 2. P. 1369–1383.

6. Kudryavtsev V. et al. Sun glitter imagery of surface waves. Part 2: Waves transformation on ocean currents: Sun glitter imagery of swell on currents // *J. Geophys. Res. C: Oceans*. 2017. Vol. 122, № 2. P. 1384–1399.

7. Hauser D. et al. CFOSAT: a new Chinese-French satellite for joint observations of ocean wind vector and directional spectra of ocean waves // *Remote Sensing of the Oceans and Inland Waters: Techniques, Applications, and Challenges*. 2016.

8. Ardhuin F., Aksenov Y., Benetazzo A. et al. Measuring currents, ice drift, and waves from space: the Sea surface Kinematics Multiscale monitoring (SKIM) concept // *Ocean Science*. 2018. Vol. 14 (3). P. 337–354.

9. Luo Z. et al. Design and analysis of a novel virtual gyroscope with multi-gyroscope and accelerometer array // *Review of Scientific Instruments*. 2016. № 8 (87). P. 085003.

10. Xu G., Weiming S., Xianbin W. Applications of wireless sensor networks in marine environment monitoring: A survey // *Sensors*. 2014. № 9. P. 16932–16954.

11. Iridium Maritime Solutions. Available online: <https://www.iridium.com/solutions/maritime/> (accessed on 20 September 2019).

12. Kazdaridis et al. On the development of energy-efficient communications for marine monitoring deployments // In *Proceedings of the 2017 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS)*, Nis, Serbia, 18–20 October 2017. P. 271–274.

13. Boydstun et al. Drifter sensor network for environmental monitoring // In *Proceedings of the 2015 12th Conference on Computer and Robot Vision*, Halifax, NS, Canada, 3–5 June 2015. P. 16–22.

14. Pozzebon A. et al. A wireless sensor network for the real-time remote measurement of aeolian sand transport on sandy beaches and dunes // *Sensors*. 2018. № 18. P. 820.

15. Trasviña-Moreno C. Unmanned aerial vehicle based wireless sensor network for marine-coastal environment monitoring // *Sensors*. 2017. № 17. P. 460.

16. Semtech. LoRa Modulation Basics. Available online: <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf> (accessed on 20 September 2019).

17. Petajajarvi J. On the coverage of lpwans: Range evaluation and channel attenuation model for lora technology // In *Proceedings of the 2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, Copenhagen, Denmark, 2–4 December 2015. P. 55–59.

18. Lingling et al. On the application of lora lpwan technology in sailing monitoring system // In *Proceedings of the 2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, Jackson, WY, USA, 21–24 February 2017. P. 77–80.

19. Jovalekic N. et al. Experimental Study of LoRa Transmission over Seawater // *Sensors*. 2018. № 18. P. 2853.

20. Longuet-Higgins M.S., Cartwright D.E. and Smith N.D. Observations of directional spectrum of sea waves using the mo-

tions of a floating body // Ocean wave spectra (New Jersey: Prentice-Hall). 1963. P. 111–136.

21. Baggeroer A. Confidence intervals for regression (MEM) spectral estimates. IEEE Transactions on Information Theory, 1976. Vol. 22 (5). P. 534–545.

22. Isobe M., Kondo K., Horikawa K. Extension of MLM for estimating directional wave spectrum // In Proc. Symp. on Description and modeling of directional seas. 1984, June. P. 1–15.

23. Lygre A., Krogstad H.E. Maximum entropy estimation of the directional distribution in ocean wave spectra // Journal of

Physical Oceanography. 1986. Vol. 16 (12). P. 2052–2060.

24. Young I.R. On the measurement of directional wave spectra // Applied Ocean Research. 1994. Vol. 16. № 5. P. 283–294.

25. Long R.B. The statistical evaluation of directional spectrum estimates derived from pitch/roll buoy data // Journal of Physical Oceanography. 1980. Vol. 10 (6). P. 944–952.

26. Mironov A.S., Yurovskaya M.V., Dulov V.A. Statistical characterization of short wind waves from stereo images of the sea surface // Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012. 117. C12.

COMPACT SYSTEM FOR SUB-SATELLITE MEASUREMENTS OF SURFACE WAVE DIRECTIONAL WAVE SPECTRUM AND SURFACE VELOCITY FIELDS

A.S. Mironov¹, A.N. Grekov^{2,3}, K.A. Kuzmin²

¹Russian State Hydrometeorological University,
RF, Saint Petersburg, Maloohtinskiy Pr., 98

²Institute of Natural and Technical Systems,
RF, Sevastopol, Lenin St., 28

³Sevastopol State University,
RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

Measurement of parameters of the upper layer of the ocean is one of the tasks of oceanology, with the progress of a number of areas of ocean research depending on its solution. A continuous increase in the volume of remote sensing data, an increase in the complexity of their processing algorithms, and improvement of ocean modeling methods form new requirements for the quality and quantity of experimental measurements. In this article, we consider a small-sized drifter equipped with the necessary measuring channels and software as an element of the system for measuring the spatio-temporal characteristics of the surface layer of the ocean, namely, the flow vector and the angular spectrum of sea waves. Its structural scheme, a general view, a description of the mechanical part, as well as a diagram of experimental work are presented.

Keywords: sea surface waves, spatial spectrum of waves, measurement of the characteristics of the sea surface, full-scale measurements in the ocean, drift measurements, sub-satellite measurements, network-centric measurement systems