ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ СТАЦИОНАРНОГО ПОДВОДНОГО ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОДВОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ И МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ

**В.К. Фищенко, П.С. Зимин,
А.В. Голик, А.А. Гончарова**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И.Ильичева ДВО РАН¹

Системы стационарного подводного видеонаблюдения, разработанные в ТОИ ДВО РАН, помимо решения задач наблюдения за состоянием морской биоты прибрежных акваторий залива Петра Великого (Японское море) могут применяться для оценивания характеристик морского волнения и подводных течений. Эти характеристики важны как в контексте сопровождения наблюдений за жизнедеятельностью морских организмов информацией о гидрологических условиях их существования, так и сами по себе – как важные параметры состояния природной среды. В статье рассмотрены несколько методик измерения сигналов вариаций подводных течений и оценивания на их основе частотных свойств поверхностного волнения. Основная идея состоит в отслеживании на основе анализа видео горизонтальных движений легких маркеров под воздействием на них течений. В первой части работы приведены примеры использования искусственных маркеров двух видов – закрепленных на тонкой нити теннисных шариков с небольшой положительной либо отрицательной плавучестью и установленных на дне вертушек. Показано, что при небольших глубинах установки камер частотные свойства сигналов горизонтальных движений маркеров хорошо воспроизводятся в сигналах поверхностного волнения в диапазонах ветровых волн, корабельных волн, волнения зыби, сейшевых колебаний уровня моря с периодами от десятков секунд до десятков минут. Во второй части работы рассмотрены технологии измерений, основанные на использовании естественных маркеров – полей органических и неорганических взвесей, перемещаемых водными потоками перед камерой, либо растительности, изменяющей свой наклон под действием течений. Они могут применяться при отсутствии либо выходе из строя искусственных маркеров.

ВВЕДЕНИЕ

Системы стационарного подводного видеонаблюдения находят широкое применение в мире для долговременного наблюдения за состоянием прибрежных акваторий [1]. С 2012 г. по настоящее время три таких системы были установлены и испытаны специалистами ТОИ ДВО РАН в бухте Алексева (о-в Попова, Амурский залив) и в бухте Витязь (залив Посьета) [2]. Подводные камеры обеспечивают возможность просмотра подводных видеосцен в сети Интернет, а также по заданному временному расписанию пересылают моментальные снимки и короткие видео в базы данных системы научного мониторинга залива Петра Великого во Владивостоке [3]. В рабо-

тах [4, 5] представлены примеры использования развернутых комплексов для наблюдения и анализа состояния прибрежного подводного биоразнообразия.

Помимо выполнения биологических задач системы стационарного видеонаблюдения могут использоваться для решения многих других задач, в частности для оценивания параметров подводных течений и морского волнения. Знание об этих процессах важно как в контексте сопровождения биологических наблюдений данными об условиях существования морских гидробионтов, так и для многих других приложений, например, для контроля гидрологических условий в местах строительства и эксплуатации подводных со-

¹ 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.: +7 (423) 231-21-31, Факс: +7 (423) 231-25-73. E-mail: fischenko@poi.dvo.ru

оружий, в местах проведения гидроакустических экспериментов и т.д. В связи с этим часто рядом с системами видеонаблюдения отдельно устанавливают приборы, измеряющие различные характеристики морской среды. Иногда средства видеонаблюдения комплексированы с гидрологическими приборами в т.н. подводные обсерватории. Размещение дополнительного измерительного оборудования усложняет схему наблюдений и увеличивает ее стоимость. Поэтому актуальна разработка методов для оценивания параметров подводных течений и поверхностного волнения, основанных только на основе анализа подводного видео. В настоящей работе рассматриваются несколько таких методик, разработанных и апробированных ТОИ ДВО РАН в бухтах Алексеева и Витязь.

Сделаем предварительно небольшое замечание об особенностях оценивания параметров поверхностного волнения подводными камерами. Будем расширительно трактовать волнение как процесс изменения высоты $h(t)$ уровня водной поверхности в заданной пространственной точке (x, y) . Такая трактовка в общем случае включает колебания с периодами 1–20 с, состоящие из различных видов классического морского волнения – зыби, ветровых волн, корабельных волн, ряби, а также колебания с периодами от десятков секунд до 12 и 24 ч (сейши и приливы), которые в отечественной литературе обычно называют колебаниями уровня моря. Очевидно, что измерить с приемлемой точностью сам сигнал волнения $h(t)$ на поверхности моря по данным подводного видео практически невозможно. Однако вполне возможно ответить на следующие вопросы:

- какие типы поверхностного волнения из вышеперечисленных в данный момент присутствуют на акватории,
- каковы их основные периоды,
- какова временная динамика частотного состава волнения.

Для ответа на эти вопросы необходимо оценить сигнал изменения скорости движения потоков воды $u(t)$ перед камерой. Известно, что волнение и течения взаимосвязаны, повышение уровня воды в некоторой точке моря с неизбежностью должно вызывать перетекание водных масс в места, где уровень воды меньше. И, наоборот, подводные течения могут переносить дополнительные объемы воды в некоторое место моря, где неизбежно должен приподняться уровень водной поверхности. По крайней мере, эти рассуждения справедливы для мелководных зон (с глубиной до 20–50 м), где чаще всего располагаются системы стационарного подводного видеона-

блюдения. На малых глубинах (до 5–10 м) основным источником подводных движений водных масс будут поверхностные волны, поскольку, как известно, они вовлекают в эллиптические движения частицы жидкости вплоть до глубины, равной половине длины волны. Таким образом, измеряя с помощью камер вариации подводных течений $u(t)$, можно в значительной мере полученные результаты отнести к классическому волнению и колебаниям уровня моря, по крайней мере, на уровне оценок частотного состава волнения. Для оценки сигнала вариаций подводных течений могут применяться методики, основанные на слежении по видео за движениями искусственных либо естественных маркеров, перемещаемых потоками воды. Для практического подтверждения возможности «волновой» интерпретации данных по течениям в бухте Алексеева были выполнены многосуточные синхронные наблюдения последних совместно с прямыми наблюдениями сигнала волнения $h(t)$ с помощью стационарного «видеоволномера» [6]. Сигналы оказались в значительной мере коррелированными практически для всех типов волнения. Этот эксперимент обсуждается ниже в статье.

Особенностью применяемых программных методик анализа подводного видео является то, что они работают не с ранее записанными видеофайлами, а с графической памятью компьютера. Это обеспечивает возможность проведения долговременных непрерывных измерений сигнала вариаций подводных течений при частоте дискретизации от 2 до 30 Гц на основе анализа интернет-трансляций с подводных камер. Измерения проводятся с помощью нескольких инструментов программы QAVIS [7], анализ полученных временных сигналов – программой OceanSP [8]. Отчасти условием соблюдения режима реального времени обусловлено то, что было решено ограничиться измерениями проекций подводных течений $u_x(t)$, $u_y(t)$ на плоскость, ортогональную оптической оси камеры. Вопросы реконструкции трехмерных течений по данным видеонаблюдений в бухтах Алексеева и Витязь обсуждаются в работе [9].

■ Прямой метод оценивания параметров волнения подводными камерами

Как было отмечено во введении, для оценивания частотных свойств поверхностного волнения используются сигналы вариаций подводных течений, рассчитываемые на основе видеослежения за подводными маркерами. Однако в некоторых случаях возможно прямое оценивание подводными камера-

Рис. 1. Синхронная регистрация оценок сигналов поверхностного волнения в бухте Алексеева надводной и подводной камерами

ми волновых процессов на поверхности моря. Идея этой методики подсказана ранее апробированной нами методикой регистрации оценки сигнала волнения надводной камерой как сигнала изменения во времени яркости указанной исследователем локальной области моря [10]. При прохождении волн через эту область периодически изменяется наклон водной поверхности, что вызывает синхронную с волновым процессом модуляцию интенсивности светового потока, отраженного в сторону камеры. Можно предположить, что и под водой происходит подобная модуляция наклонами поверхностных волн светового потока, но не отраженного, а проходящего в водную среду перед камерой через поверхность раздела двух сред. На рис. 1 демонстрируется процесс синхронной регистрации программой QAVIS оценок поверхностного волнения в бухте Алексеева с использованием надводной и подводной камер.

Пользователь загрузил на экран компьютера видеотрансляцию с надводной камеры AXIS-233d (слева) и подводной камеры Dealextreme IP-531MW (справа). Затем загрузил программу QAVIS и установил инструмент «Развертка», измеряющий яркость видео в областях круглой формы, на обеих трансляциях примерно в одном и том же месте. Во вспомога-

тельных окнах синхронно отображаются осциллограммы регистрируемых сигналов и их вейвлетограммы Морле. В обоих сигналах очевидно присутствие некоторой преобладающей квазигармонической компоненты. Это подтверждается на вейвлетограммах, где компонента проявляется в виде горизонтальных полос чередующихся максимумов и минимумов. В обоих случаях положение этой полосы соответствует периодичности 2,2 с, которая могла бы быть обусловлена ветровым волнением в месте наблюдения. Отметим, что волновая структура с чередующимися темными и светлыми полосами на изображении поверхности моря зрительно почти не выражена. Однако тот факт, что волновой процесс одной частоты одновременно проявился в сигналах яркости с надводной и подводной камер, свидетельствует в пользу предположения, что обе методики работоспособны и они объективно зафиксировали присутствие в бухте ветрового волнения с периодом 2,2 с. Эта очень простая методика оценивания частотных свойств поверхностного волнения подводными камерами много раз применялась нами при проведении исследований в бухте Алексева. Так, в работе [2] описан небольшой эксперимент, связанный с одновременной регистрацией параметров жизнедеятельности морских

организмов и волновых процессов. Волнение оценивалось вышеописанной методикой и методикой на основе регистрации движений естественных маркеров под воздействием подводных течений. Обе методики подтвердили факт прохождения в бухте волны с периодом 8,5 с. Зыбь с таким же периодом в это же время проявилась в данных сейсмической станции MSH, расположенной в 65 км от о-ва Попова на мысе Шульца (залив Посьета).

К сожалению, существенным недостатком описанной методики измерений является то, что благоприятные для нее условия освещенности выполняются очень редко, на регистрируемый сигнал могут оказать влияние облачность, рябь на морской поверхности и т.д. Это не дает возможности проведения долговременных непрерывных наблюдений поверхностного волнения.

■ Оценивание параметров подводных течений и волнения с использованием искусственных маркеров

Как отмечалось выше, наиболее стабильными являются методики оценивания, основанные на измерении и анализе сигнала движений искусственных маркеров, устанавливаемых в поле зрения подводной камеры. Маркер «Шарик» (рис. 2, а) представляет собой теннисный шарик, прикрепленный тонкой нитью снизу к тяжелому предмету на морском дне либо сверху к элементам конструкции подводного комплекса. Подводные движения жидкости смеща-

ют положение шарика в поле видеокадра, при этом горизонтальная компонента этого смещения пропорциональна проекции горизонтальной компоненты скорости подводного течения на плоскость наблюдения, ортогональную главной оптической оси объектива камеры $u_x(t)$. Маркер «Вертушка» (рис. 2, б) представляет собой обычную подводную вертушку со свободно вращающимися лопастями, жестко устанавливаемую на дне в поле зрения камеры. Подводные течения при прохождении через вертушку приводят во вращение ее лопасти. При этом угловая скорость вращения пропорциональна проекции скорости течения на ось, ортогональную плоскости вращения. Методики измерений на видео смещений маркерного шарика и скорости вращения вертушки поясним ниже на практических примерах.

■ Регистрация подводных течений в бухте Алексева с помощью маркера «Шарик»

На рис. 3 демонстрируется пример регистрации вариаций подводных течений с использованием маркера «Шарик». Наблюдения выполнялись 27 марта 2013 года в бухте Алексева. Как видно на панорамном снимке с надводной IP-камеры AXIS-233d (рис. 3, а), в бухте еще стоял лед, его кромка находилась примерно в 700 м от берега Морской экспериментальной станции ТОИ ДВО РАН, в 600 м от подводной камеры. На рис. 3, б демонстрируется процесс регистрации движений шарика с помощью инструмента «Корреляция» программы QAVIS. Поль-

Рис. 2. Искусственные маркеры: а – «Шарик»; б – «Вертушка»

Рис. 3. Регистрация подводных течений в б. Алексева, 27-03-2013: ледовая обстановка в бухте (а), процесс измерения движений маркерного шарика (б), спектральная плотность мощности (в), осциллограмма сигнала горизонтальных движений маркера (г)

зователь установил прямоугольный селектор в зону колебаний шарика, зафиксировал начальный кадр и запустил работу коррелятора. С заданной частотой (в данном случае 5 Гц) программа рассчитывает взаимную корреляционную функцию текущего кадра под селектором с начальным кадром, записывая измеренные в пикселах видеокадра координаты максимума корреляции (X,Y) в выходной файл. Координата X отслеживает горизонтальные движения шарика под действием подводных течений, она пропорциональна проекции скорости течения на плоскость наблюдения камеры в точке установки маркера.

На рис. 3, г приведена осциллограмма горизонтальной компоненты движений маркера, в ней визуально хорошо заметна квазипериодическая компонента с периодом примерно 10 мин. Спектральная плотность мощности этого сигнала (рис. 3, в) подтверждает наличие компоненты с периодом 10 мин 10 с, она самая мощная. Кроме того в спектре очевидны пики еще нескольких компонент вариаций подводных течений. Отметим, что периодичности 10 м 10 с и 4 мин 40 с неоднократно упоминались разными исследователями, наблюдавшими колебания уровня моря в бухте Алексева, в частности, в работе [11]. Это сейшевые колебания уровня моря в Амурском заливе и в самой бухте Алексева. Периодичности 1 мин 30 с и 35 с – короткопериодные сейши, обусловленные, по-видимому, особенностями морфологии дна бухты около места установки подводной камеры. Периодичность 7,8 с характерна для волнения зыби, регулярно регистрируемого в бухте в летние месяцы, несколько удивительно, что зыбь проявилась под до-

вольно большим ледовым полем. Отметим еще раз, что регистрировались подводные течения, при этом в них проявились практически все особенности, присущие колебаниям уровня и поверхностного волнения.

■ Совместная регистрация в бухте Алексева сигналов подводных течений с помощью маркера «Вертушка» и поверхностного волнения с помощью оптического волномера

Приведем результаты методически важного эксперимента, проведенного в октябре 2014 г. в бухте Алексева (рис. 4). Практически в одной и той же точке бухты проводится синхронная регистрация сигнала волнения (рис. 4, а) с помощью конструкции видеоволномера [21] и сигнала подводных течений (рис. 4, б) с помощью подводной камеры и маркера «Вертушка». Волномер с использованием инструмента «Корреляция» программы QAVIS отслеживает на видеотрансляции с надводной IP-камеры вертикальные движения под действием волнения легкой маркерной конструкции, размещенной в море рядом с подводной камерой. Фактически это и есть сигнал волнения $h(t)$, причем измеренный с достаточно высокой точностью, определяемой линейным размером одного пиксела в плоскости наблюдения маркера – 0,45 см.

На видеотрансляции с подводной камеры регистрируется линейная скорость вращения лопастей вертушки $v(t)$ под действием течений. Для этого используется установленный в верхней половине вер-

тушки инструмент «Корреляция» программы QAVIS, работающий в отличие от ранее рассмотренных двух случаев не в режиме фиксированного первого кадра, а в режиме фиксированной временной задержки Δt между парами видеокадров. Программа на каждом такте рассчитывает корреляционную функцию между текущим и задержанным кадром, затем находит положение ее максимума (X,Y). Отношение $X / \Delta t$ определяет измеренную в пикс/с линейную скорость вращения лопастей вертушки $v(t)$ на некотором удалении d от ее центра. В текущей версии QAVIS именно сигнал вариаций линейной скорости сохраняется в файл выходных данных. Линейная скорость пропорциональна угловой скорости ω : $v = \omega d$, следовательно, и скорости протекающего через вертушку водного потока $u(t)$. Отметим, что знание сигнала вариаций скорости подводных течений $u(t)$ лишь с точностью до неизвестного линейного коэффициента не позволяет получать точные энергетические характеристики составляющих его частотных компонент. Но сам вид частотного спектра, наличие либо отсутствие в нем каких-либо важных компонент, соотношение их мощностей, временная динамика спектра вполне могут быть оценены по данным описанной методики измерений.

На рис. 4, в представлены осциллограммы 28-часовых фрагментов сигнала волнения и оценки

сигнала скорости подводных течений. На рис. 4, з показаны спектры сигналов, в которых синхронно проявляются отклики характерных для бухты Алексева сейшей с периодом 10 мин и волнения зыби с периодом около 9 с. Справа от спектров показаны взаимные корреляционные функции выделенных методами частотной фильтрации компонент сейшей (рис. 4, д) и зыби (рис. 4, е). В обоих случаях значимость корреляционных максимумов очевидна, что доказывает взаимозависимость волнения и подводных течений, регистрируемых обоими методами. На рис. 4, ж приведены спектрограммы сигналов. Очевидно, что обе методики хорошо воспроизводят временную динамику компонент зыби, проявляющихся в виде горизонтальных полос внизу спектрограмм. Характерные отклики более высокочастотных корабельных волн от проходящих в бухте и рядом с ней судов (линейные чуть наклоненные треки) хорошо заметны в спектрограмме сигнала с волномера и несколько хуже заметны в спектрограмме сигнала с вертушки. В целом можно заключить, что методика на базе маркера «Вертушка» оказалась вполне работоспособной для оценивания частотных свойств сигнала вариаций подводных течений. Второй важный вывод состоит в том, что оцениваемые под водой частотные особенности сигнала течений вполне могут быть отнесены и к сигналам поверхностного волнения.

Рис. 4. Регистрация и анализ сигналов волнения и вариаций подводных течений, бухта Алексева, 19–20 октября 2014 г.

■ Синхронная регистрация в бухте Витязь оценок сигналов подводных течений с помощью искусственных маркеров «Шарик» и «Вертушка»

На рис. 5 демонстрируется пример синхронной регистрации вариаций подводных течений в бухте Витязь на основе отслеживания движения маркеров «Шарик» и «Вертушка».

В верхней половине рисунка показаны: процесс регистрации движений маркеров, осциллограммы и спектрограммы 11-суточных записей сигналов. Спектрограммы в целом похожи. При этом они хорошо отражают очень сложную нестационарную динамику подводных течений в диапазоне частот 0,05–0,5 Гц, генерируемых в толще воды около дна ветровыми волнами и волнением зыби на поверхности моря. В нижней части слева показаны спектры Фурье сигналов «Шарик» и «Вертушка», рассчитанные по относительно стационарному 19-часовым фрагмен-

там (с 15 ч 18 ноября по 12 ч 19 ноября). В обоих спектрах хорошо видны две компоненты зыби с периодами 7 с и 6,2 с. Компонента ветрового волнения с основным периодом 3,5 с хорошо видна в сигнале «Шарик» и почти не видна в сигнале «Вертушка», т.е. второй маркер более «низкочастотный», ветровое волнение с периодом 3,5 с на глубине 5 м еще вызывает движения водных масс, но очень слабое. Оно может немного сместить легкий теннисный шарик, но уже не может заставить вращаться лопасти вертушки. Справа от спектров показаны корреляционные функции между этими компонентами, зарегистрированными шариком и вертушкой. Корреляции обеих компонент зыби очевидны и достаточно высоки – около 0,8. Корреляция между компонентами ветрового волнения также очевидна, однако не так велика, около 0,4. Основой вывод – оба маркера могут применяться на глубине 5 м для регистрации движений жидкости, вызываемых волнами зыби.

Рис. 5. Синхронная регистрация вариаций подводных течений с помощью маркеров «Шарик» и «Вертушка». Бухта Витязь, 16-27 ноября 2016 г., маркеры расположены на глубине 5 м

■ Оценивание параметров подводных течений и волнения с использованием и естественных маркеров

Как было показано выше, искусственные маркеры «Шарик» и «Вертушка» могут эффективно применяться в составе комплексов подводного видеонаблюдения для оценивания частотных свойств подводных течений и морского волнения. Однако не всегда есть возможность установить перед камерой маркерные объекты. Со временем маркер «Шарик» обрастает биологическим налетом и становится малоконтрастным. Маркер «Вертушка» имеет существенный недостаток – довольно часто взвеси, поднимающиеся со дна, например остатки морской травы, «прилипают» к вертушке и препятствуют вращению лопастей. В связи с этим актуальна задача исследования возможности использования не искусственных, а естественных маркеров. Такими, например, могут быть поля зоопланктона, движущиеся под действием течений в поле зрения камеры. Не всегда, но иногда, особенно ночью, эти поля становятся столь заметными и контрастными, что становится возможным отследить их движение обычными корреляционными методами. Еще один претендент на роль естественных маркеров – морская трава, которая изменяет свой наклон под действием течений. Ниже представлены результаты исследований, связанных с оценкой эффективности

применения двух видов естественных маркеров, условно названных «Планктон» и «Трава», для регистрации подводных течений.

■ Исследование эффективности естественных маркеров типа «Планктон»

На рис. 6 демонстрируется процесс одновременной регистрации подводных течений с использованием искусственных и естественных маркеров. Бухта Витязь, 3 ноября 2016 г., 22 ч 35 мин, ведется трансляция в сеть ДВО РАН видео с подводной камеры, установленной на глубине 5 м. В поле зрения камеры хорошо виден искусственный маркер «Шарик». Также хорошо видно подсвеченное фонарями поле зоопланктона, которое можно попробовать использовать в качестве естественного маркера типа «Планктон». Пользователь установил инструмент «Корреляция» программы QAVIS на теннисный шарик, зафиксировал начальный кадр и запустил регистрацию движений шарика на основе отслеживания максимума корреляции текущих кадров с начальным. Затем установил второй инструмент «Корреляция» на поле с подсвеченным зоопланктоном, переключил его в режим корреляции между парами кадров с фиксированным временным сдвигом, установил величину сдвига – 0,2 с и запустил процесс регистрации. На каждом шаге программа рассчитывает корреляцию между текущим кадром и отстающим на 0,2 с.

Рис. 6. Синхронная регистрация вариаций подводных течений с помощью искусственного (шарик) и естественного (поле планктона) маркеров. Бухта Витязь, 3 ноября 2016 г

Координаты максимума корреляции при этом фиксируют оценку направления и скорости преимущественного перемещения поля планктона.

На рис. 7 приведены результаты анализа полученных с помощью маркеров «Шарик» и «Планктон» 9-часовых записей оценок сигналов подводных течений.

Слева приведены Фурье-спектры сигналов в диапазоне периодичностей от 2 мин до 0,5 с, они в целом похожи. На них отмечены пики, соответствующие ветровому волнению (периоды 2–4 с), зыби (8 с), короткопериодным сейшам (85 с). Компонента ветровых волн в спектре сигнала «Планктон» почти не видна, очевидно, соответствующая методика регистрации течений более «низкочастотная» по сравнению с методикой на базе маркерного шарика. В середине показаны взаимные корреляционные функции вышеупомянутых частотных компонент сигналов, оцененных маркерами «Шарик» и «Планктон». Максимумы корреляции очевидны и значительны (около 0,7 с), что доказывает возможность оценивания вариаций подводных течений с использованием естественных маркеров типа полей планктона, перемещаемых при движении жидкости. Наконец, справа показаны корреляции частотных компонент с периодами 18 мин, 32 мин и 1 ч 20 мин. Это периодичности, соответствующие известным по многим источникам

сейшевым колебаниям залива Посьет. Для получения строго обоснованных статистически выводов по ним длительность записей 9 ч недостаточно велика. Тем не менее, приведенные оценки корреляционных функций с визуально заметными максимумами вблизи начала координат, по крайней мере, не противоречат предположению, что обе обсуждаемые методики, использующие как искусственные, так и естественные маркеры, способны объективно регистрировать эти важные для теории и приложений колебательные процессы в прибрежных бухтах и заливах.

■ Исследование эффективности естественных маркеров типа «Трава»

Исследование было выполнено в бухте Алексева 17 октября 2019 г. На рис. 8 демонстрируется процесс синхронной регистрации сигнала волнения волномером (большой прямоугольный селектор инструмента «Корреляция» сверху) и сигнала движений морской травы на искусственном рифе (небольшой прямоугольный селектор инструмента «Корреляция» внизу). Также с помощью инструмента «Яркость» программы QAVIS фиксируются еще два сигнала, но они не имеют отношения к рассматриваемой задаче. Расстояние между точками наблюдения 110 м.

Рис. 7. Анализ 9-часовых записей оценок сигналов вариаций подводных течений, полученных с использованием маркеров «Шарик» и «Планктон»

Рис. 8. Синхронная регистрация сигнала волнения и сигнала подводных течений, бухта Алексеева, 17 октября 2019 г

На рис. 9 представлены результаты анализа сигналов «Волномер» (измеренные в пикселах колебания уровня морской воды в точке установки конструкции волномера) и «Трава» (измеренные в пикселах смещения куста травяной растительности под действием подводных движений воды).

На рис. 9, а показаны осциллограммы сигналов длительностью около полутора часов. Ниже (рис. 9, б) приведены частотно-временные спектрограммы, которые очень похожи. В них наиболее заметны линейные частотные треки корабельных волн, идущих из открытой части Амурского залива в бухту Алексеева. Длительность треков очень велика, около 1 ч, это означает, что источник корабельных волн находился на значительном, до нескольких километров, расстоянии от бухты. На рис. 9, в приведены Фурье-спектры волнения и течений, рассчитанные по получасовым фрагментам сигналов, ближе к их окончанию, где сигналы более стационарны. В спектрах синхронно присутствуют пики, соответствующие волнению зыби с периодом 9,5 с. Эти компоненты были выделены методом частотной фильтрации (их спектры

показаны синими графиками). На рис. 9, г представлена взаимная корреляционная функция между компонентами зыби, зарегистрированными волномером, и подводной камерой. В ней заметен пик $K = 0,33$ при временном сдвиге $-26,8$ с. Это означает, что зыбь движется со скоростью $v = 110 \text{ м} / 26,8 \text{ с} = 4,1 \text{ м/с}$. Сначала она проходит волномер, через $26,8$ с подходит к камере, где возбуждает подводные движения, все еще когерентные с волновыми движениями на поверхности моря, регистрируемыми в 110 м от камеры. На рис. 9, д–е приведены результаты такого же исследования применительно к корабельным волнам. Исследуются 5-минутные фрагменты сигналов, на которых мощность корабельных волн максимальна. Их периоды в это же время примерно равны $3,6$ с. В спектрах сигналов компоненты корабельных волн явно доминируют над всеми остальными. Корреляционная функция между корабельными волнами, регистрируемыми в точках расположения волномера и камеры, имеет значительный пик $K = 0,77$ при сдвиге 51 с. Скорость движения волн $v = 110 \text{ м} / 51 \text{ с} = 2,15 \text{ м/с}$. Рассмотренные выше примеры показывают, что ис-

Рис. 9. Анализ сигналов «Волномер» и «Трава»

пользование подводных систем видеонаблюдения в сочетании с естественными маркерами типа «Трава» достаточно перспективно для применения в комплексных исследования волновых процессов в прибрежных зонах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в статье результаты демонстрируют высокую эффективность разработанных технологий измерения характеристик подводных течений и морского волнения в прибрежных зонах. Прямая методика регистрации волновых процессов на основе отслеживания подводной камерой модуляции поверхностными волнами интенсивности проходящего в воду светового потока очень проста и достаточно эффективна. Ее применение ограничивает то, что необходимые условия солнечного освещения морской акватории выполняются достаточно редко. Наиболее стабильны методики, основанные на отслеживании движений специально устанавливаемых под водой маркеров. В исследовании, выполненном в 2013 г. в бухте Алексева, показано, что в подводных течениях под ледовой поверхностью проявляются практически все известные по литературным источникам периодичности, присущие колебаниям уровня моря в этой бухте. Выполненные летом 2014 г. в бухте Алексева синхронные независимые наблюдения волнения и подводных течений практически показа-

ли, что при небольших глубинах эти процессы существенно коррелированы, и поэтому оцениваемые камерами характеристики подводных течений могут быть отнесены и к волнению. Проведенные в 2016 г. в бухте Витязь синхронные наблюдения течений с помощью маркеров «Шарик» и «Вертушка» показали, что на глубинах порядка 5 м оба маркера хорошо регистрируют колебания, присущие волнению зыби, отклики более высокочастотных ветровых волны лучше регистрирует «Шарик». Проведенные там же чуть позже сравнительные синхронные наблюдения волнения с использованием искусственного маркера «Шарик» и естественного маркера «Планктон» подтвердили эффективность применения естественных маркеров. Результаты наблюдений оказались коррелированными не только в диапазоне ветровых волн и зыби, но и в диапазоне сейшевых колебаний. Исследования, выполненные осенью 2019 г. в бухте Алексева, показали перспективность методик оценивания частотных свойств подводных течений на основе слежения за наклонами подводной растительности. При сравнении подводных данных с данными от стоящего на расстоянии 110 м волномера была доказана их коррелированность в диапазоне волн зыби и корабельных волн. Способность уверенно регистрировать отклики корабельных волн под водой потенциально может быть использована для создания скрытной системы отслеживания движений морских судов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mallet, D., Pelletier, D., 2014. Underwater video techniques for observing coastal marine biodiversity: A review of sixty years of publications (1952-2012) // Fisheries Res. 2012. Vol. 154. P. 44–62.
2. Фищенко В.К., Зимин П.С., Зацерковный А.В., Суботэ А.Е., Голик А.В., Гончарова А.А. Системы стационарного подводного видеонаблюдения прибрежных акваторий // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 1 (31). С. 60–71.
3. Антушев С.Г., Голик А.В., Суботэ А.Е., Олейников И.С., Фищенко В.К. О развертывании системы оперативного мониторинга природных процессов на побережье и акваториях залива Петра Великого // Материалы конф. «Современные информационные технологии для научных исследований». Магадан, 2008. С. 146–148.
4. Маркевич А.И., Суботэ А.Е., Зимин П.С., Фищенко В.К. Первый опыт использования системы долговременного подводного видеонаблюдения для биологического мониторинга в заливе Петра Великого (Японское море) // Вестн. ДВО РАН. 2015. № 1. С. 86–91.
5. Фищенко В.К., Зимин П.С., Зацерковный А.В., Гончарова А.А., Суботэ А.Е., Голик А.В. Стационарные системы подводного видеонаблюдения: возможности применения для мониторинга биоты прибрежных акваторий залива Петра Великого (Японское море) // Вестн. ДВО РАН. 2018. № 1. С. 149–160.
6. Зимин П.С., Фищенко В.К., Суботэ А.Е., Зацерковный А.В., Голик А.В. Разработка и апробация в бухте Алексева (о. Попова) технологий регистрации волнения и колебаний уровня моря с использованием видеоволномеров // Физика геосфер. Вып. 1. Владивосток: ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 2019. С. 53–64.
7. Св-во о рег. № 2017611593, Российская Федерация. Программа для ЭВМ «Программа экспресс-анализа изображений и видео (QAVIS)» / В.К. Фищенко, А.А. Гончарова. – № 2016663409, заявл. 08.12.2016, зарег. 06.02.2017, Бюл. № 2.
8. Св-во о рег. № 2018611821. Российская Федерация. Программа для ЭВМ «Программа анализа океанологических сигналов (OceanSP)» / В.К. Фищенко, А.А. Гончарова. – № 2017660892, заявл. 26.10.2017, зарег. 07.02.2018, Бюл. № 2.
9. Зацерковный А.В. Автоматическая оценка течения в морской воде по видеопроекции, полученной с подводной камеры // Материалы 8-й науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана». Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2019. С. 275–278.
10. Гончарова А.А., Суботэ А.Е., Фищенко В.К. Программный комплекс для исследования волновых процессов и течений по данным видеосъемки акваторий // Материалы докл. 8-й Всерос. симп. «Физика геосфер». Владивосток. 2013. С. 50–54.
11. Шевченко Г.В., Чернов А.Г., Ковалев П.Д., Горин И.И. Резонансные колебания в заливах и бухтах: натурные эксперименты и численное моделирование // Тр. Нижегород. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. Н. Новгород, 2010. № 1 (80). С. 52–62.