

СИСТЕМЫ СТАЦИОНАРНОГО ПОДВОДНОГО ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ

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

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

В Тихоокеанском океанологическом институте (ТОИ) ДВО РАН с 2012 г. ведутся разработки и исследования возможностей технологий стационарного подводного видеонаблюдения. Развернуты три подводных комплекса: два в бухте Алексеева (о-в Попова) и один в бухте Витязь (зал. Посыета). К настоящему времени накоплены значительные объемы информации в виде моментальных снимков и видеозаписей подводных сцен. Разработаны интерфейсы для предоставления этой информации пользователям по каналам сети Интернет. Разработаны технологии поддержки работы территориально разнесенных экспертов, составляющих биологические описания видеоматериалов, подобных тем, которые разрабатываются в ведущих зарубежных организациях по морской биологии. Разработаны и апробированы методики оценивания по видеoinформации параметров жизнедеятельности некоторых видов морских гидробионтов. Благодаря непрерывности наблюдения зафиксировано несколько редких случаев, представляющих интерес для морских биологов. Разработаны и апробированы методики оценивания гидрологических характеристик среды на основе анализа видеотрансляций с подводных камер. Эти результаты представляются важными в контексте сопровождения наблюдений за жизнедеятельностью морской биоты данными о внешних условиях, в которых она происходит. Продемонстрирована возможность использования звукового канала камер для регистрации и анализа акустических шумов от морских судов. Продемонстрирована возможность применения подводных видеоккомплексов для организации экспериментов по изучению реакции морских гидробионтов на воздействие целенаправленных физических сигналов.

ВВЕДЕНИЕ

История разработки и применения в научных и прикладных целях технологий подводной фото-видео съемки насчитывает более 170 лет. Первые подводные снимки были сделаны английским исследователем Вильямом Томсоном в заливе Уэймут на южном побережье Англии в 1856 году. В 1886 году российский филолог и специалист по технической фотографии Вячеслав Измайлович Срезневский впервые создал и испытал водонепроницаемую фотокамеру для морских съёмок. В 1893 г. французский биолог и фотограф Луи Бутан сделал подводные фотографии в процессе погружения в стандартном водолазном скафандре с жёстким шлемом. В 1914 г. англичанин Джон Эрнест Уильямсон снял первый подводный кинофильм с помощью оригинальной конструкции – фотосферы, опускаемой в воду с борта судна. В 1933

году кинооператор Мосфильма Федор Александрович Леонтович впервые в СССР создал кинокамеру для подводной съёмки. Изобретение французским океанологом Жаком-Ивом Кусто в 1943 г. акваланга способствовало дальнейшему развитию технологий подводной съёмки. Однако настоящий прорыв в практике использовании техник подводной фото-видео съемки для научных и прикладных целей произошел уже после окончания Второй мировой войны, в начале 1950-х годов. Такие системы подводного видеонаблюдения стали активно разрабатываться и испытываться по всему миру.

Среди задач, решаемых с их помощью, одной из наиболее важных является задача наблюдения и изучения морского биоразнообразия, включающего

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

растительные и животные виды морских гидробионтов. В работе [1] французскими исследовательницами Дельфин Малле и Доминик Пельтье представлен подробный обзор технологий подводного видеонаблюдения морской биоты, разработанных в мире в период с 1952 по 2012 г. Их условно можно разделить на мобильные и стационарные. К первым относят фото-видеосъемку, проводимую дайверами, съемку морского дна с помощью буксируемых надводными судами видеосистем, видеонаблюдение с помощью камер, установленных на автономных и управляемых подводных аппаратах. Ко вторым относят технологии наблюдения с помощью систем, устанавливаемых на дне и обзорающих длительное время, до нескольких лет, некоторую подводную сцену. Как правило, такие системы подключаются к сети Интернет, они способны оперативно передавать в береговые хранилища моментальные снимки, короткие видеозаписи, а также вести непрерывную видеотрансляцию подводных сцен. Обе технологии исследований дополняют друг друга. Если условно положить, что биоразнообразие есть некоторая функция пространственных и временной координат $B(x, y, z, t)$, то мобильные технологии видеонаблюдения ценны тем, что позволяют исследовать пространственную динамику биоразнообразия $B(x, y, z, t)$ при $t = const$ в моменты проведения наблюдений, а стационарные – тем, что позволяют исследовать его временную динамику в точках наблюдения $B(t)$ при $(x, y, z) = const$. Чтобы исследовать зависимость биоразнообразия от времени, иногда наблюдения с помощью мобильных систем повторяются на выделенных пространственных полигонах с некоторой периодичностью – 1 сутки, неделя, месяц, сезон. Это трудоемко и финансово затратно, к тому же интервал между измерениями даже в одни сутки для многих задач слишком велик. Стационарные системы, будучи непрерывными и долговременными, позволяют зафиксировать весь спектр временных закономерностей в развитии различных видов гидробионтов – от внутрисуточных до межгодовых циклов, а также долговременные, вплоть до климатических изменений и их тенденций. Таким путем можно оперативно отследить реакцию морской биоты на аномальные природные и антропогенные процессы: штормы, тайфуны, апвеллинги, разливы нефтепродуктов, внезапные вторжения на акваторию опасных биологических видов и т.д. Аспект пространственной динамики биоразнообразия отчасти учитывается путем установки не одной, а нескольких систем стационарного видеонаблюдения в разных точках исследуемой акватории.

Стационарные системы особенно активно стали применяться с середины 2000-х годов. К числу наиболее известных международных проектов относится Fish4Knowledge, в рамках которого в период с 2010 по 2013 г. проводились непрерывные видеонаблюдения за сообществами коралловых рыбок вблизи Тайваня [2]. В проекте использовались 10 стационарных подводных камер. На основе полученных видеоматериалов разрабатывались методики автоматизации процессов распознавания и количественного описания коралловых рыбок, а также исследовались их поведенческие особенности. Десятки стационарных подводных видеосистем размещены на побережье Австралии, исследования интенсифицировались в последние годы в связи с проблемой деградации Большого Барьерного Рифа, играющего важную роль в поддержании стабильности прибрежных экосистем. Французские исследователи активно используют стационарные видеосистемы для наблюдения биоразнообразия на побережье Новой Каледонии, бывшей колонии Франции. Системами стационарного видеонаблюдения оснащаются два известных проекта оперативного наблюдения океана – OOI (Ocean Observatories Initiative, США) и ONC (Ocean Networks Canada, Канада).

В ДВО РАН технологии мобильного фото- и видеонаблюдения морского биоразнообразия разрабатываются и применяются с 1990-х годов, прежде всего в Институте биологии моря (в настоящее время Национальный научный центр морской биологии) и Институте проблем морских технологий. Важным дополнительным стимулом к этим работам стала Целевая комплексная программа ДВО РАН «Биологическая безопасность дальневосточных морей Российской Федерации», инициированная в 2007 г. При ее выполнении на акваториях Дальневосточного государственного морского заповедника было проведено несколько циклов видеонаблюдений морского дна с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов ИПМТ ДВО РАН [3].

Технологии стационарного подводного видеонаблюдения прибрежного биоразнообразия разрабатываются и тестируются на акваториях залива Петра Великого специалистами Тихоокеанского океанологического института начиная с 2012 года. Далее опишем разработанные в институте системы подводного видеонаблюдения, особенности их эксплуатации в морской среде, возможности применения при решении биологических, океанологических и других задач.

■ Системы стационарного подводного видеонаблюдения ТОИ ДВО РАН: технологии изготовления, установки и эксплуатации

Всего начиная с 2012 г. было изготовлено и устанавливалось в море три системы стационарного подводного видеонаблюдения (ССПВ): две в бухте Алексева (о-в Попова) и одна в бухте Витязь (зал. Посьета). На рис. 1, а показана принципиальная схема развертывания каждой системы. Камера, расположенная внутри герметичного металлического кожуха, закрепленного на жесткой опоре в море, непрерывно наблюдает некоторую морскую сцену и пересылает видеоинформацию по Интернет-каналам в базы данных, расположенные в здании ТОИ ДВО РАН, предоставляет ее ученым ДВО РАН и обычным пользователям Интернета. На рис. 1, б показан первый комплекс подводного видеонаблюдения в бухте Алексева, наблюдаемый вторым, рядом расположенным комплексом.

Каждый комплекс состоит из подводного модуля с навесным оборудованием, кабельной линии электропитания и связи, берегового щита обеспечения. Подводный модуль (рис. 2) состоит из кожуха (вверху) и размещаемой в нем полезной нагрузки (внизу). Состав последней подробно описан в подписи к рисунку. Для видеонаблюдения в кожухи устанавливались IP-камеры нескольких модификаций с разрешениями кадра HD (1280 × 720 пикселей), FullHD (1920 × 1080 пикселей), 4K (3840 × 2160 пикселей). Навесное оборудование, крепящееся к кожуху, обычно состоит из фонарей подсветки наблюдаемой сцены, «омывателя» смотрового стекла, электрического «отпугивателя» животных на стекле, заслоняющих наблюдаемую сцену. Для подачи к подводному модулю электропитания и связи под водой

организуется кабельная трасса с подводными разъёмами. Береговой щит обеспечивает ее присоединение к береговым сетям электропитания и связи.

Комплекс может устанавливаться в море на расстоянии до 400 м от берега. Глубина постановки до 60-80 м, это проверялось путем опускания тестового макета кожуха с судна в наиболее глубоких точках залива Петра Великого. Практические постановки двух комплексов проводились в бухте Алексева на удалении 100 м от берега при глубине около 4 м. В бухте Витязь были три постановки, в одной из них комплекс был размещен в 210 м от берега на глубине 15 м. Дальность наблюдения гидробионтов зависит от прозрачности воды, в местах установки камер она варьировалась от 1 до 10 м.

Устройство управления «KernelChip Jerome» позволяет дистанционно с помощью web-интерфейса включать и отключать дополнительное оборудование. Фонари подсветки, включенные в темное время суток, привлекают рыб и зоопланктон с окружающих комплексов акваторий. Это хорошо с точки зрения максимального охвата наблюдением видового многообразия бухт. Но, с другой стороны, это нарушает естественное поведение исследуемых гидробионтов. Поэтому возможность управления включением/отключением фонарей актуальна при смещении акцентов проводимых биологических исследований. Один из трех комплексов был оснащен системой из двух лазерных указок, лучи которых параллельны и отстоят на расстоянии 2 см. Система дистанционно включалась при необходимости оценки реальных размеров объектов, например рыб, попадавших в поле зрения камеры. На рис. 1, б на теле наваги можно заметить два красных пятна – следы от лучей лазерных указок. Определив расстояние между ними в пикселях кадра, можно рассчитать масштабный коэффициент и затем оценить длину рыбы – 13 см.

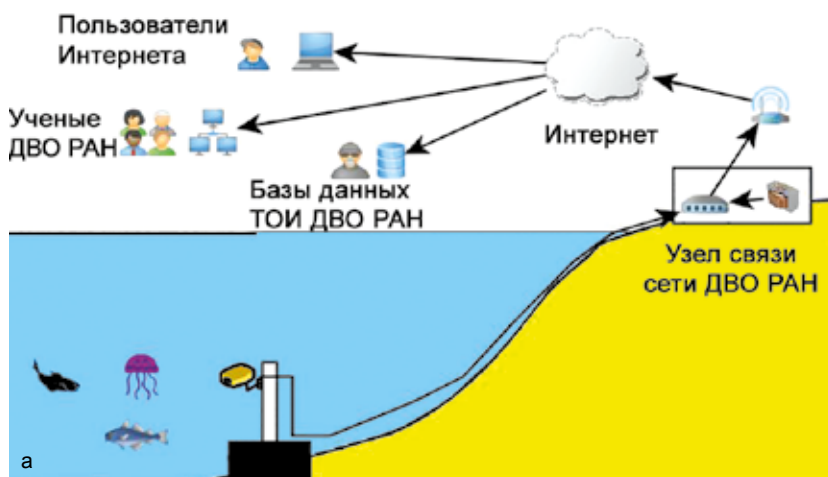
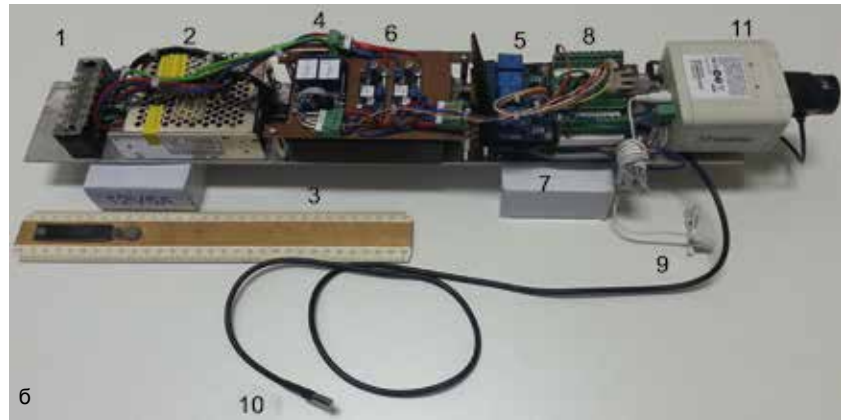


Рис. 1. Общая схема развертывания систем стационарного подводного видеонаблюдения (а) и система, установленная в бухте Алексева (б)



а

Рис. 2. Подводный модуль: металлический кожух (а) и размещаемая в нем полезная нагрузка (б): 1 – клеммы входных и выходных линий (вход ~220 В, управляемый выход ~220 В, 8 свободных клемм); 2 – блок питания ~220 В → +12 В; 3 – блок связи Powerline WD Lwswire; 4 – блок реле (2 шт.); 5 – блок реле (4 шт.); 6 – преобразователи напряжения DC-DC 12 В → 5 В и 12 В → 3,3 В (пределы регулировки выходного напряжения 1,5..30 В, макс. выходной ток 2 А); 7 – устройство мониторинга Nag ERD-3.2; 8 – устройство управления KernelChip Jerome на макетной плате с дополнительными клеммами; 9 – микрофон; 10 – датчик температуры Dallas DS18B20; 11 – камера



Еще одно потенциально возможное применение указок – оценка плотности полей зоопланктона в воде. При пересечении частицами планктона лазерного луча на последнем происходят кратковременные визуально заметные вспышки, которые могут быть программно идентифицированы и подсчитаны.

Как показал опыт эксплуатации комплексов, существенной проблемой для них является биологическое обрастание иллюминаторов подводных модулей, ухудшающее качество регистрируемого видео. В летние месяцы, особенно в августе, значительное обрастание происходит за 2–3 недели, поэтому приходится часто привлекать водолазов для механической очистки иллюминаторов. Еще одна схожая проблема – звезды и морские ежи, периодически забирающиеся на кожух и заслоняющие надолго иллюминатор. Предполагалось, что для их решения будут полезны упоминавшиеся выше «омыватель» и «отпугиватель». Первое устройство с помощью небольшого водяного насоса создает интенсивный поток воды в направлении иллюминатора. Второе создает разность потенциалов на двух выведенных за плоскость иллюминатора электродах, которая вызывает в воде небольшой электрический ток, создающий дискомфорт для животных. Как показала апробация, оба устройства, будучи включенными, помогают сгонять животных, заслоняющих иллюминатор, но малоэффективны для борьбы с обрастанием.

Отметим в заключение, что описанные системы стационарного подводного видеонаблюдения являются составной частью более общей системы комплексного оперативного наблюдения залива Петра Великого, разворачиваемой ТОИ ДВО РАН с 2008 года [4]. Это существенно увеличивает их эффективность за

счет возможности привлечения к анализу и интерпретации подводных сцен синхронных данных других мониторинговых экспериментов, а также за счет использования созданных для общей системы быстродействующих каналов связи, больших хранилищ данных, эффективных программ обработки и анализа данных, удобных пользовательских интерфейсов.

■ Применение разработанных систем стационарного подводного видеонаблюдения к задаче мониторинга состояния прибрежного биоразнообразия залива Петра Великого

Задачи контроля состояния морского биоразнообразия относятся к числу основных задач систем подводного видеонаблюдения. В настоящее время наиболее важным результатом является то, что создана обширная база видеоданных, на которых объективно зафиксировано биоразнообразие бухт Алексеева и Витязь в местах установки камер за период наблюдений с 2013 по 2019 годы. С каждой камеры в базу данных во Владивостоке пересылался один моментальный снимок в минуту и одноминутная видеозапись каждые 30 минут. Общий объем базы около 6 терабайт. Фактически на каждом снимке или видео зафиксировано в графической форме «мгновенное» состояние биоразнообразия – объекты живой и неживой природы различных биологических видов, которые могут распознать опытные биологи. Для доступа специалистов к этой информации помимо стандартных интерфейсов общей системы научного мониторинга залива Петра Великого ведется разработка и тестирование специализированной информационной системы «Подводное видео ТОИ ДВО РАН». В ней предусмотрено два вида пользователей – обычные пользователи и эксперты. Первые могут запрашивать видеoinформацию с камер, устанавливая различные критерии отбора. Вторые поми-

мо этого могут комментировать видео, создавать из них коллекции и т.д. Так, сотрудником Дальневосточного государственного морского заповедника А.И. Маркевичем с помощью этой системы был выполнен анализ видового состава рыб бухты Алексева и особенностей его временной динамики в разные сезоны 2013 г. [5].

Аналогичные и более значительные объемы графической информации со стационарных и мобильных систем подводного видеонаблюдения накапливаются по всему миру в научных организациях, занимающихся проблемами контроля и сохранения природного биоразнообразия прибрежных акваторий. Работать с ними не очень удобно. Поэтому все понимают, что следующим шагом должен стать перевод графической информации в текстовую форму, где для каждого изображения или видео будет составлено его биологическое описание. В нем должны быть перечислены все находящиеся на обозреваемой камерой сцене биологические объекты с указанием их видовой принадлежности и ряда важных характеристик, которые можно оценить по изображению, например длины, ширины и площади. Это послужит основой для последующего детального анализа временной динамики в развитии биоразнообразия наблюдаемых акваторий, для сравнения биоразнообразия на разных акваториях, для установления корреляций биоразнообразия с другими природными показателями и т.д.

Попытки разработать алгоритмы, которые бы надежно решали задачу автоматического составления таких биоописаний при всех возможных условиях видеонаблюдения морских гидробионтов пока не закончились успехом. Потому биоописания, которые в зарубежной литературе называют биологическими аннотациями изображений, проводят эксперты на основе внимательного визуального просмотра и с применением средств автоматизации, облегчающих эту работу. При этом, учитывая важность задачи аннотирования, рекомендуется, чтобы каждое изображение описывали несколько экспертов, крайние оценки исключались, а по остальным проводилось усреднение [6]. Для организации коллективной работы территориально разнесенных экспертов с едиными массивами видеоданных разрабатываются специализированные информационно-аналитические системы, функционирующие в сети Интернет. Примером подобной системы является разработка MBARI - Института морских исследований при Океанариуме залива Монтерей [7].

В 2010–2012 годах авторами была разработана подобная система автоматизации процесса составле-

ния экспертами биоописаний морских сцен в связи с необходимостью анализа данных мобильных подводных видеонаблюдений, проводившихся с помощью подводных аппаратов ИПМТ ДВО РАН и Института биологии моря в рамках Целевой комплексной программы «Биологическая безопасность Дальневосточных морей России» [8]. Как и зарубежные аналоги, система обеспечивает распределенную работу нескольких экспертов в сети Интернет. Технология составления биоописания следующая. Эксперт выбирает из общей базы видеоданных нужное изображение, далее оконтуривает эллипсом каждый биологический объект и указывает его биологический вид из предварительно подготовленного списка видов. Параметрами эллипса служат координаты его центра, длина, ширина, вытянутость, ориентация, площадь приписываются объекту. Это достаточно важные количественные характеристики, по ним можно судить о возрасте объекта (молодой или взрослый), примерно оценивать общий объем биомассы на обозреваемом участке акватории и т.д. Отметим, что в [6] тоже рекомендуется при составлении аннотаций использовать эти геометрические параметры объектов. По окончании описания всех объектов итоговое биоописание изображения сохраняется в общей базе данных с указанием его составителя. На рис. 3 демонстрируется процесс описания подводной сцены. Экспертом оконтурены эллипсами и внесены в базу данных сведения об объектах трех биологических видов: морских звезд, морских ежей, асцидий. Данная система может быть легко адаптирована к задачам анализа данных комплексов стационарного видеонаблюдения.

Помимо задачи составления биоописаний, наиболее общей и сложной в проблематике подводного видеонаблюдения морской биоты, могут возникать частные задачи, имеющие научное и практическое значение. В работе [9] нами были представлены три примера, демонстрирующие возможность применения развернутых в заливе Петра Великого комплексов для решения подобных задач. Программа «FishCounter» позволяет обнаруживать и подсчитывать на подводной сцене движущихся рыб, что может быть полезно, например, для организаций, занимающихся разведением рыбы. Методика регистрации и анализа дыхательных ритмов рыб на основе слежения за движением жаберных крышек, возможно, может иметь значение для научных приложений. Хотя случай уникальный, сложно воспроизводимый – наблюдаемый бычок керчак в течении нескольких часов находился перед камерой почти в неподвижном положении, выжидая добычу. Более перспективной для

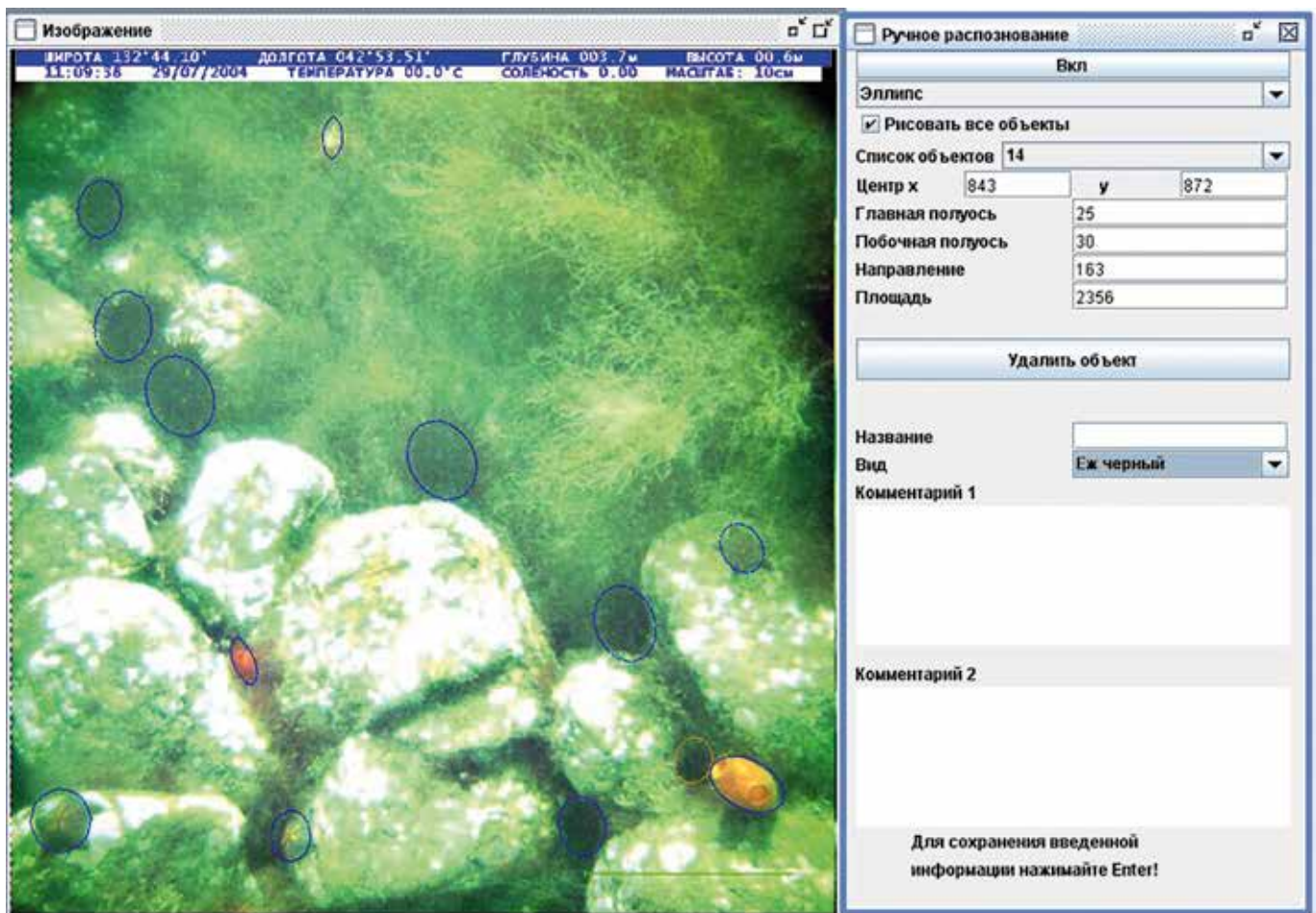


Рис. 3. Составление биоописания подводной сцены экспертом: описаны 4 морских звезды, 7 морских ежей, 2 асцидии

приложений представляется методика регистрации показателей жизнедеятельности баянусов – «усоногих» рачков, живущих в раковинах и загоняющих в нее воду с кислородом и питательными веществами взмахами своих ножек-усиков [10]. Особый интерес морских биологов к баянусам обусловлен тем, что они, с одной стороны, являются основным источником приводящим, к большому экономическому ущербу – биологическому обрастанию днищ морских судов и технических сооружений, а с другой – участвуют в процессах самоочищения моря, фильтруя воду, проходящую через их раковины. Суть методики состоит в регистрации и последующем анализе периодических сигналов движения ножек баянуса, обеспечивающих приток кислорода и питательных веществ. В результате оцениваются основная частота (ритм) периодических движений, стабильность этой частоты во времени, длительность циклов непрерывной работы баянуса по прокачиванию воды через свою раковину. Анализ данных наблюдений в 2016–2018 гг. показал, что описанные характеристики жизненно важных физиологических ритмов баянусов разли-

чаются, и эти отличия подобны, например, отличиям в ритмах дыхания либо сокращения сердечной мышцы здоровых людей и людей с патологиями. Пример, поясняющий программную реализацию методики, будет рассмотрен в следующем разделе.

Как оказалась, эта методика может применяться не только к взрослым особям гидробионтов, но и к их микроскопическим личинкам. Во время наблюдений с помощью камер TANTOS, снабженных варифокальными объективами, обнаружился эффект их самопроизвольной автофокусировки на плоскость смотровых стекол комплексов. При этом возникает очень четкая картинка процессов биологического обрастания – постепенного осаждения на стекло неорганических пылинок и микроорганизмов различных биологических видов. Если микроорганизмы осуществляют какие-либо визуально заметные жизненно необходимые периодические движения частями своего тела, то эти движения могут быть зафиксированы и изучены. В работе [9] приведены примеры регистрации очень быстрых сокращений главной мышцы личинок баянусов, приводящей в движение

их микроскопические ножки-усики. Полагаем также, что режим фокусировки стационарных подводных камер на смотровое стекло может быть полезен для специалистов, занимающихся подводными исследованиями и сталкивающимися с проблемами биологического обрастания.

В заключение к разделу отметим еще один аспект биологических видеонаблюдений с помощью стационарных подводных камер. В отличие от мобильных систем они ведут наблюдение долгое время и практически непрерывно. Поэтому время от времени фиксируются очень редкие события в жизни сообществ морских гидробионтов, представляющие особый интерес для морских биологов. Два таких видеосюжета – «Нерест мидий» и «Поединок японской мохоголовой собачки с актинией», зафиксированные осенью 2019 г., размещены на официальном канале ТОИ ДВО РАН в web-сервисе «Youtube» [11, 12].

■ Применение систем стационарного подводного видеонаблюдения для гидрологических и других задач

Гидрологические задачи также относятся к числу важных задач, решаемых с помощью систем подводного видеонаблюдения. Камеры могут применяться для оценивания цвета, мутности воды, вариаций подводных течений, а также во многом обуславливающих эти течения волновых процессов на поверхности моря. Знание этих характеристик важно как в контексте сопровождения видеоинформации о состоянии морского биоразнообразия, сведениями об условиях его существования, так и само по себе. Были разработаны и апробированы несколько методик оценивания параметров течений и волнения, основанные на отслеживании движений в поле зрения камеры искусственных и естественных маркеров.

В первом случае чаще других в качестве маркера использовался теннисный шарик с небольшой положительной либо отрицательной плавучестью, прикрепляемый тонкой нитью снизу ко дну либо сверху к элементам конструкции видеоконструкта. Движения шарика в водной среде отслеживалось с помощью инструмента «Корреляция» программы экспресс-анализа изображений и видео «QAVIS» [13], работавшего в режиме фиксированного первого кадра. Также в качестве искусственных маркеров использовались устанавливаемые на дне моря вертушки. Программа «QAVIS» с помощью инструмента «Корреляция», работающего в режиме фиксированной временной задержки между парами кадров, отслеживала направление и скорость вращения лопастей вертушки,

вызываемого проходящими через нее водными потоками. В некоторых случаях маркеры обоих типов устанавливались рядом для сравнительного анализа их эффективности. Результаты наблюдений подтвердили, что оба маркера дают схожую информацию о свойствах регистрируемых волновых процессов. При этом шарик является более высокочастотным сенсором. При одинаковой глубине установки маркеров в бухтах они оба хорошо чувствуют медленные движения жидкости, вызываемые длинными волнами зыби. Но малые быстрые движения воды, вызываемые короткопериодными ветровыми волнами, часто еще могут вызвать смещения шарика, но уже не могут заставить вращаться лопасти вертушки. Кроме этого было проведено много синхронных наблюдений вариаций течений с помощью подводных камер и волнения с помощью надводных камер, отслеживающих вертикальные движения легких контрастных маркеров на поверхности моря. При не очень глубокой установке подводных камер и маркеров (не более 5 м) практически всегда отклики ветровых, корабельных волн и зыби в сигналах течений под водой и волнения на поверхности были значительно коррелированы между собой при фазовом сдвиге примерно 90 градусов. Этот факт доказывает, что на таких глубинах результаты подводных измерения вариаций подводных течений можно применять для описания частотных свойств поверхностного волнения.

Также было проведено несколько исследований возможности использования для оценки вариаций подводных течений естественных маркеров – полей взвесей, перемещаемых перед камерой потоками воды, морской травы, изменяющей свой наклон под действием течений. В некоторых случаях полученные оценки удалось соотнести с данными, полученными другими средствами измерений, и подтвердить их значительную коррелированность между собой. Проблему, однако, составляет то, что подходящие естественные маркеры не всегда находятся в поле зрения подводных камер либо условия видимости неблагоприятны для качественного отслеживания их движений.

Ниже в порядке демонстрации возможностей разработанных методов рассмотрим случай одновременной регистрации с помощью подводной системы биологических и гидрологических характеристик. На рис. 4 показан процесс анализа одноминутной видеозаписи подводной сцены в бухте Алексева (2019 г., 11 ноября, 13:55), загруженной из базы видеоданных. В поле зрения камеры находится установленный в 2016 г. искусственный риф, который обжили гидробионты различных биологических видов.

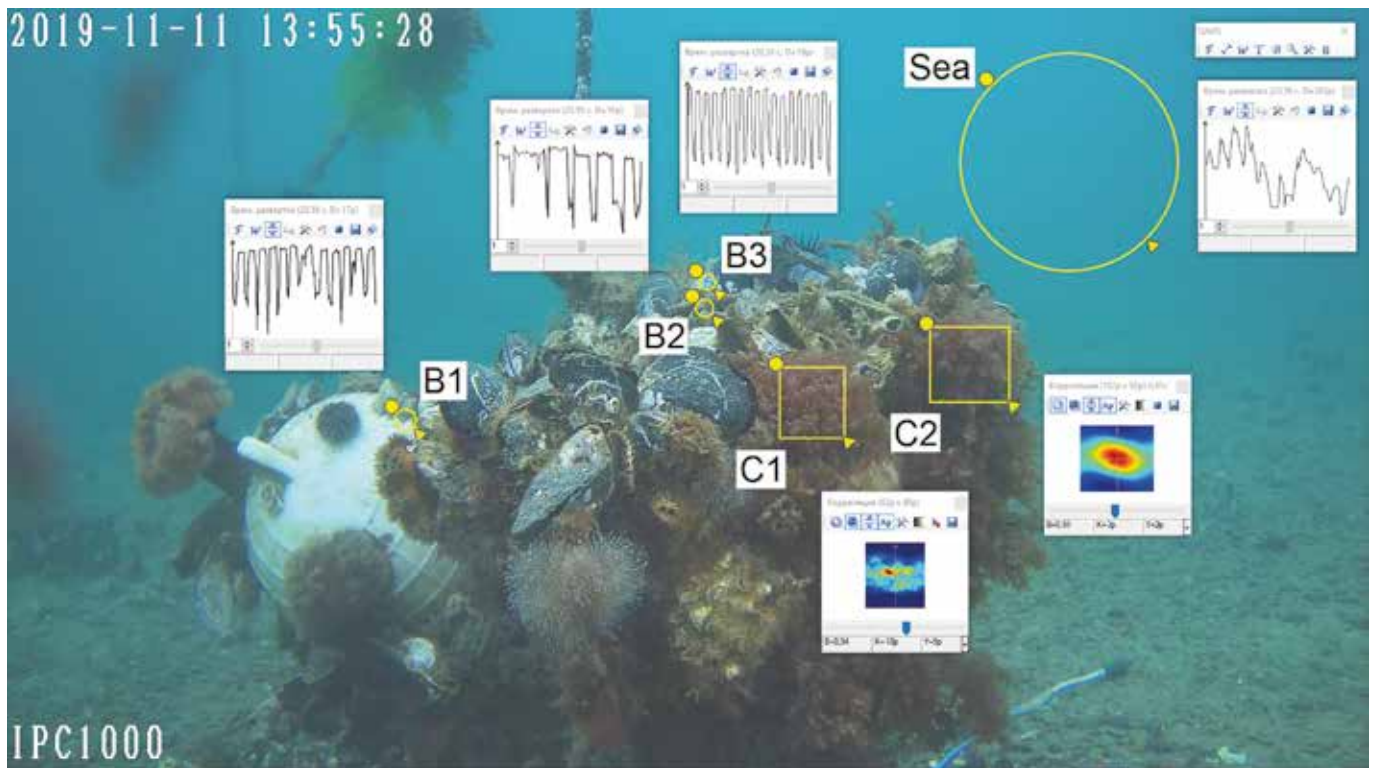


Рис. 4. Одновременная регистрация биологических и гидрологических сигналов

Для регистрации биологических и гидрологических сигналов используются шесть измерительных инструментов программы QAVIS, выставленных оператором в окне проигрывателя видеозаписи (отображаются желтым цветом). Имена инструментов указаны на рисунке рядом с ними в белых прямоугольных вставках. Инструменты B1, B2, B3 измеряют сигналы изменения средней яркости видео в небольших круглых областях рядом с тремя особями баянусов. Каждый такт закачивания воды с питательными веществами в раковину баянуса производит гребком своих ножек, которые для этого выходят из раковины в открытую водную среду. При попадании более темных, чем фон, ножек в расчетные круглые области там регистрируется минимум сигнала средней яркости. Когда ножки скрываются в раковине, регистрируется максимум, а в целом сигнал изменения яркости имеет периодический характер. В информационных окнах рядом с каждым инструментом отображается текущая осциллограмма регистрируемого сигнала на коротком временном интервале, она предназначена для настройки и визуального контроля правильности работы измерительного инструмента. По завершении работы инструментов все зарегистрированные сигналы сохраняются в файлах для последующего анализа. Формат хранения данных в файлах очень простой, поэтому для их анализа могут

использоваться любые математические пакеты. Мы используем собственную программу обработки многоканальных океанологических сигналов OceanSp [14], все примеры обработки данных в статье получены с ее помощью. На рис. 5, а три верхних осциллограммы соответствуют одноминутным сигналам движений ножек баянусов B1, B2 и B3. Визуально заметно, что ритмы движений у разных баянусов значительно отличаются. Это подтверждает спектральный анализ (рис. 5, б), наиболее мощные пики соответствуют периодичностям основного ритма движений 1,7 с, 3,1 с и 1,2 с. Отметим, что наиболее стабильны «биоритмы» третьего баянуса, их спектральный пик самый узкий.

Следующие три инструмента (Sea, C1, C2) выставлены для оценивания гидрологических характеристик. Инструмент Sea измеряет среднюю яркость видео в большой круглой области, установленной ближе к поверхности моря. Интенсивность света, проходящего в толщу водной среды, зависит он наклонов волн на поверхности. Это дает основания надеяться, что зарегистрированный в толще воды яркостный сигнал будет отслеживать свойства поверхностного морского волнения. Корреляционные инструменты C1 и C2 измеряют сигналы горизонтальных смещений морской травы на рифе под действием подводных движений водных масс. Фактически тра-

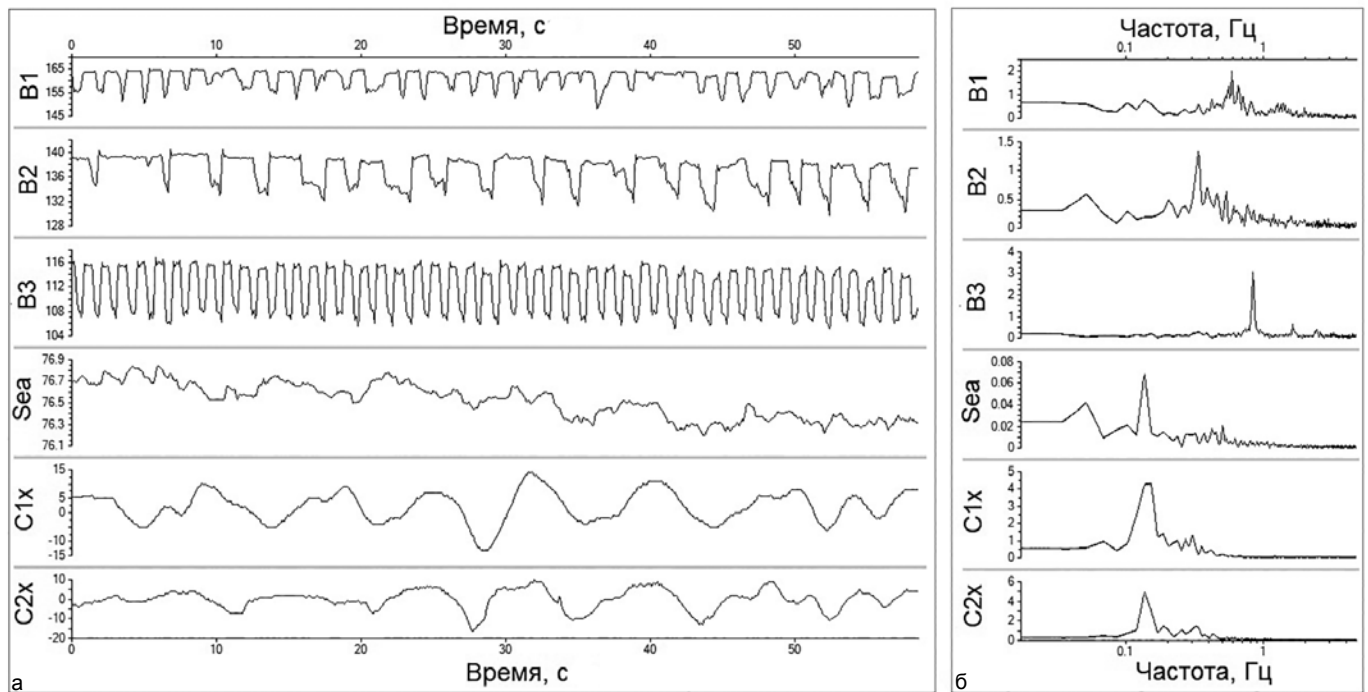


Рис. 5. Осциллограммы (а) и спектры (б) биологических и гидрологических сигналов

ва в данном случае выступает в роли естественного маркера для регистрации вариаций подводных течений. Первый корреляционный инструмент работает в режиме фиксированного первого кадра, второй – в режиме фиксированной временной задержки. В приведенных на рис. 5, б спектрах всех трех сигналов основной пик соответствует периоду 8,5 с, характерному для волнения зыби. Длинные волны зыби вполне могли вызвать и модуляцию светового потока, и горизонтальные смещения травы в местах установки прямоугольных корреляционных измерителей. Для окончательной проверки этого предположения были привлечены данные широкополосной сейсмической станции MSH Камчатского филиала Геофизической службы РАН, установленной на Морской экспериментальной станции ТОИ ДВО РАН «Мыс Шульца». Эта станция в своем горизонтальном канале ВНН, ориентированном в сторону Японского моря, хорошо регистрирует т.н. первичные микросейсмы, возбуждаемые волнами зыби при их выходе на берег мыса Шульца [15]. Как правило, зыбь вызывается сильными штормами в Японском море. Это масштабный процесс – если волны зыби подошла к мысу Шульца, то с большой вероятностью спустя какое-то время зыбь будет зарегистрирована во всех бухтах залива Петра Великого. На рис. 6, а показана спектрограмма суточной записи сейсмического сигнала ВНН от 11 ноября 2019 г. Начало записи соответствует 10:00 по владивостокскому времени (0 часов по всемирно-

му времени UTC). На спектрограмме около частоты 0,1 Гц хорошо видна характерная для первичных микросейсмов зыби полоса, интенсивность которой постепенно спадает к концу суток. На рис. 6, б приведен спектр Фурье одночасового фрагмента сейсмического сигнала (12:00–13:00 владивостокского времени), полученного примерно за 1 ч до момента регистрации выше обсужденной подводной видеозаписи в бухте Алексеева. В спектре хорошо виден характерный для первичных микросейсмов пик, соответствующий периодичности волн зыби 8,5 с. Этот результат окончательно доказывает, что в бухте Алексеева с помощью подводной камеры и трех измерительных методик был объективно зафиксирован факт прихода волн зыби с периодом около 8,5 с.

Помимо биологических и гидрологических приложений системы стационарного подводного видеонаблюдения могут быть использованы при решении многих других задач, начиная с тривиальных задач наблюдения за местами подводной постановки дорогостоящего научного оборудования и контроля загрязнений морского дна. Идеи некоторых приложений не закладывались при разработке систем, но возникали по ходу их эксплуатации. Рассмотрим ниже два примера, имеющих отношение к задачам гидроакустики.

Две подводные камеры в бухте Алексеева помимо видео неплохо регистрировали звуки, распространяющиеся в водной среде. Возникла идея

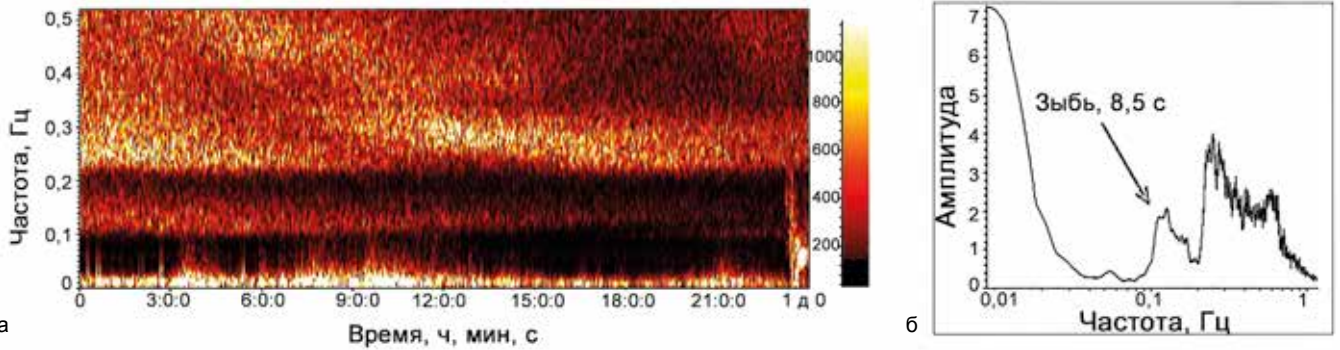


Рис. 6. Анализ данных сейсмической станции MSH: а – спектрограмма суточной записи от 11 ноября 2019 г.; б – спектр Фурье часового фрагмента (с 12:00 до 13:00 по владивостокскому времени)



проверить возможность их использования для регистрации и анализа гидроакустических шумов от проходящих по акватории судов. На рис. 7, а показан моментальный снимок акватории бухты, сделанный 29 августа 2014 г. в 14:25:28 установленной на горе Попова камерой AXIS 233D из системы научного мониторинга зал. Петра Великого. На нем зафиксирован аквабайк, проходящий на высокой скорости мимо огороженного буйками места установки подводной камеры. Качество снимка невелико, поскольку расстояние от камеры до аквабайка более 1,2 км и при этом последний быстро движется. На рис. 7, б показан скриншот окна анализа програм-

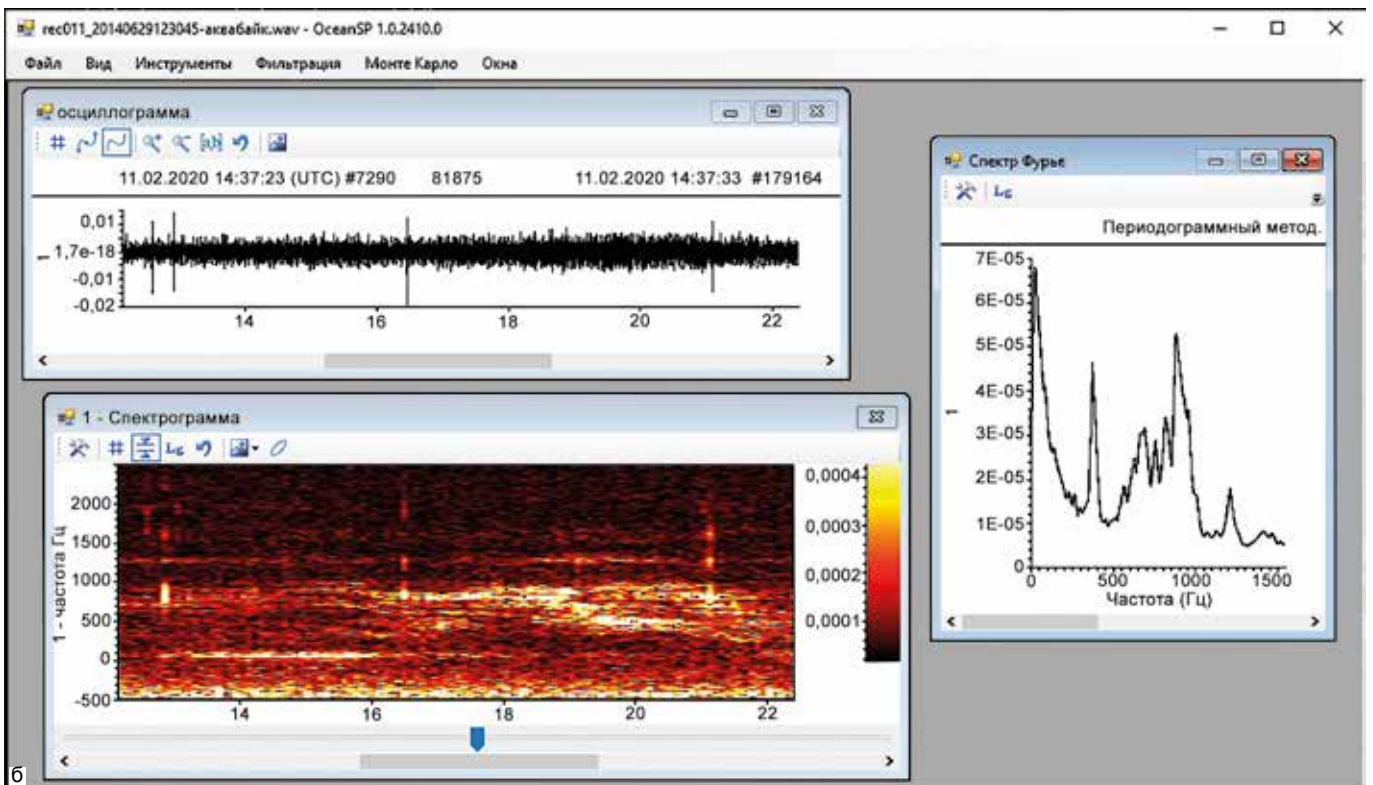


Рис. 7. Исследование возможности использования звукового канала подводных камер для регистрации акустических шумов плавательных средств (пояснения в тексте)

мой «OceanSP» 10-секундного фрагмента акустического канала видеозаписи, произведенной подводной камерой в тот же момент времени. Спектр и спектрограмма сигнала имеют характерные особенности, часто регистрируемые в исследованиях гидроакустических шумов от плавательных средств. Этот пример демонстрирует потенциальную возможность использовать подводные камеры, развернутые в целях мониторинга состояния морской биоты, для обнаружения и, возможно, распознавания проходящих неподалеку морских судов. Это может быть актуально, например, для организации круглосуточной охраны мест выращивания морепродуктов от вторжений браконьерских судов.

Второй пример связан с возможностью применения стационарных подводных камер для исследования поведения морской биоты в естественной среде обитания при целенаправленном воздействии на

нее различными физическими сигналами. На рис. 8 иллюстрируется пример исследования реакции рыб на акустические сигналы. Его проводили в феврале 2013 г. сотрудники лаборатории океанотехники ТОИ ДВО РАН.

Со льда бухты Алексеева перед местом установки подводной камеры опускался пневматический гидроакустический излучатель. Оператор, находившийся во Владивостоке, смотрел в реальном времени трансляцию с камеры и информировал оператора на льду о ситуациях, когда вблизи излучателя оказывались косяки рыб. Тот инициировал излучение акустических импульсов, а камера фиксировала реакцию на них рыб. На рис. 8, а показан моментальный снимок спустя 1 с после очередного импульса: стайка особей наваги резко бросилась в сторону от излучателя. В звуковом канале видео одновременно фиксировался гидроакустический сигнал, который также привлекался к последующему анализу. На рис. 8, б показан скриншот программы «OceanSP» во время анализа 0,25-секундного фрагмента акустического сигнала. Совместно с осциллограммой, на которой хорошо видны момент начала и структура акустического импульса, показаны его спектр Фурье и вейвлетограмма Морле. В спектре видны пики трех наиболее мощных компонент с частотами 64, 118 и 330 Гц. Эти же компоненты хорошо просматриваются на вейвлетограмме Морле в виде трех горизонтальных полос чередующихся экстремумов.

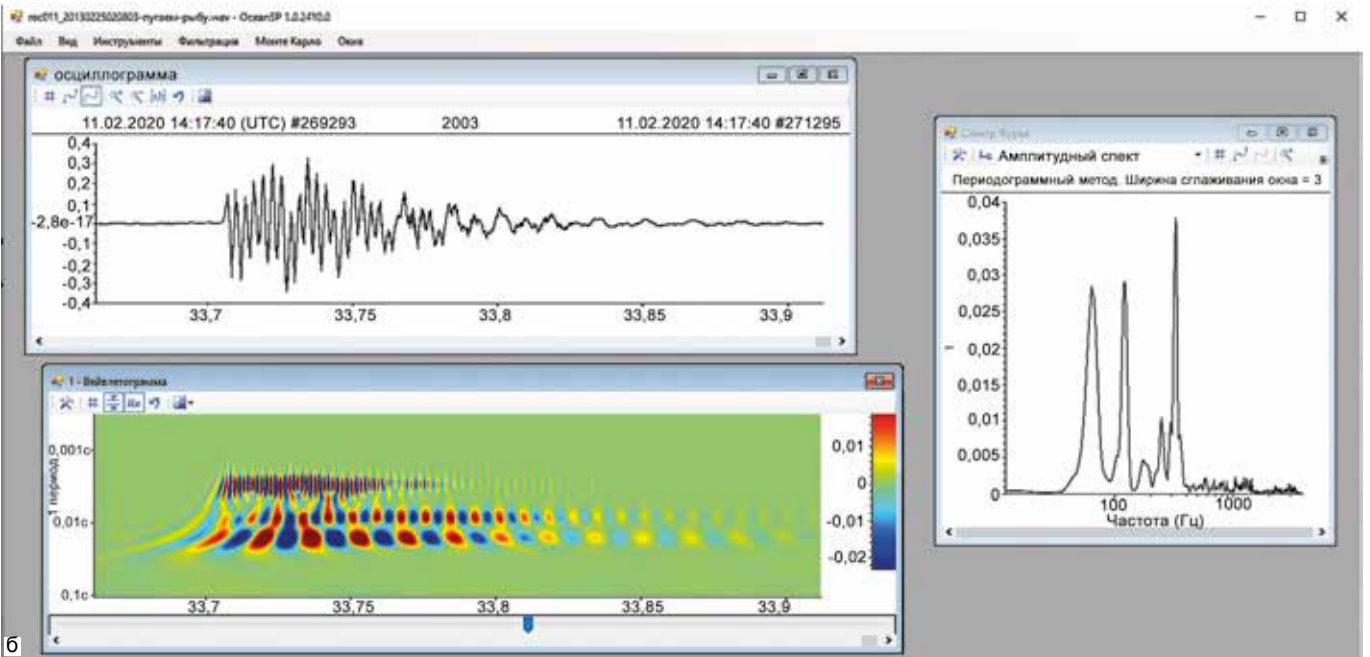


Рис. 8. Исследование реакции рыб на акустические импульсы: а – снимок с камеры через одну секунду после импульса; б – анализ акустического импульса

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в статье результаты работ, проводимых в ТОИ ДВО РАН, демонстрируют эффективность применения систем стационарного подводного наблюдения на прибрежных акваториях залива Петра Великого. С помощью разработанных и развернутых подводных систем накоплен значительный объем видеoinформации, для интерпретации которой разработаны интерфейсы для специалистов-пользователей. Разработаны и апробированы

количественные методики по описанию состояния морского биоразнообразия в точках установки камер, методики оценивания гидрологических характеристик среды. Показана возможность применения звукового канала видеосистем для обнаружения и анализа акустических сигналов, производимых плавсредствами.

Показана перспективность применения стационарных подводных камер при исследовании эффективности технических средств воздействия на поведение морских гидробионтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mallet D., Pelletier D. Underwater video techniques for observing coastal marine biodiversity: A review of sixty years of publications (1952-2012) // Fisheries Res. 2014. Vol. 154. P. 44–62.
2. Robert B. Fisher, Yun-Heh Chen-Burger, Daniela Giordano et al. Fish4Knowledge: Collecting and Analyzing Massive Coral Reef Fish Video Data. Springer Int. Publishing, 2016. 319. p. doi: 10.1007/978-3-319-30208-9.
3. Адрианов А.В., Ивин В.В., Щербатюк А.Ф. Использование подводной робототехники в биологических исследованиях на Дальнем востоке России // Материалы Целевой комплексной программы ориентированных фундаментальных научных исследований Дальневосточного отделения РАН «Биологическая безопасность дальневосточных морей Российской Федерации». Владивосток: Дальнаука, 2014. С. 79–121.
4. 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 конференции «Современные информационные технологии для научных исследований». Магадан, 2008. С. 146–148.
5. 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.
6. Schoening T., Osterloff J., Nattkemper T. W. RecoMIA – Recommendations for Marine Image Annotation: Lessons Learned and Future Directions. Frontiers in Marine Science. 2016. doi.org/10.3389/fmars.2016.00059.
7. VARS. Video Annotation and Reference System (VARS). – URL: <http://www.mbari.org/vars/> (дата обращения: 04.02.2020).
8. Ивин В.В., Фищенко В.К. Распределенная информационно-аналитическая система «Биологическая безопасность дальневосточных морей Российской Федерации» // Материалы Целевой комплексной программы ориентированных фундаментальных научных исследований Дальневосточного отделения РАН «Биологическая безопасность дальневосточных морей Российской Федерации». Владивосток: Дальнаука, 2014. С. 153–180.
9. 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.
10. Соколовский А.С. Морские желуди. – URL: <http://museumimb.ru/sea-acorns.html> (дата обращения: 04.02.2020).
11. Официальный канал ТОИ ДВО РАН в YouTube. Нерест мидий. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ocJw8fKpH04> (дата обращения: 11.02.2020).
12. Официальный канал ТОИ ДВО РАН в YouTube. Поединок японской мохоголовой собачки с актинией. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ZuP6XItsrfq> (дата обращения: 11.02.2020).
13. Программа для ЭВМ «Программа экспресс-анализа изображений и видео (QAVIS)». Св-во о рег. № 2017611593. Российская Федерация / В.К. Фищенко, А.А. Гончарова. № 2016663409, заявл. 08.12.2016, зарег. 06.02.2017, Бюл. № 2
14. Программа для ЭВМ «Программа анализа океанологических сигналов (OceanSP)». Св-во о рег. № 2018611821. Российская Федерация / В.К. Фищенко, А.А. Гончарова. № 2017660892, заявл. 26.10.2017, зарег. 07.02.2018, Бюл. № 2
15. Фищенко В.К. Регистрация морского волнения береговыми сейсмическими станциями // Материалы докл. Всерос. симпозиума «Физика Геосфер». Владивосток: Дальнаука, 2017. С. 111–120.

