

УДК 621.397+57.084.2

В.К. ФИЩЕНКО, П.С. ЗИМИН, А.В. ЗАЦЕРКОВНЫЙ,
А.А. ГОНЧАРОВА, А.Е. СУБОТЭ, А.В. ГОЛИК

Стационарные системы подводного видеонаблюдения: возможности применения для мониторинга биоты прибрежных акваторий залива Петра Великого (Японское море)

В ТОИ ДВО РАН ведутся работы по развертыванию стационарных систем подводного видеонаблюдения прибрежных акваторий зал. Петра Великого. Одно из возможных применений – мониторинг биоты. В статье представлено текущее состояние систем наблюдения, обсуждаются подходы к задаче составления экспертами описаний зафиксированных на видео сцен подводной жизни, представлены три программные методики, которые могут применяться для обнаружения и подсчета движущихся рыб, регистрации и анализа дыхательных ритмов рыб, регистрации и анализа обеспечивающих приток питательных веществ движений конечностей усоногих рачков баянусов.

Ключевые слова: система подводного видеонаблюдения, морское биоразнообразие, обнаружение движущихся рыб, дыхательные ритмы рыб, баянусы.

Stationary underwater video observation systems: opportunities for Peter the Great Bay (the Sea of Japan) coastal zone biodiversity state monitoring. V.K. FISHCHENKO, P.S. ZIMIN, A.V. ZATSERKOVNIY, A.A. GONCHAROVA, A.E. SUBOTE, A.V. GOLIK (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

POI FEB RAS develops and deploys fixed underwater video observation systems for Peter the Great Bay coastal zone. These systems are being used, in particular, for biota state registering and analyzing. In this article we show the current state of observation systems and discuss approaches for a description of the underwater life made by experts. Also we develop three software methods applied to the video data analysis of the following: detection and counting of moving fishes, investigation of a fish breathing rhythms, study of balanuses' leg waving frequency, that provide the inflow of nutrients.

Key words: underwater observation system, marine biodiversity, detection of moving fishes, fish breathing rhythm, balanus.

Введение

Задача сохранения биоразнообразия морских прибрежных акваторий в условиях возрастающего антропогенного воздействия и глобальных климатических изменений

*ФИЩЕНКО Виталий Константинович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, ЗИМИН Петр Степанович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, ЗАЦЕРКОВНЫЙ Александр Владимирович – ведущий инженер, ГОНЧАРОВА Анна Александровна – старший инженер, СУБОТЭ Алексей Евгеньевич – начальник отдела, ГОЛИК Андрей Владимирович – научный сотрудник (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток). *E-mail: fischenko@poi.dvo.ru

Работа выполнена при частичной поддержке программы фундаментальных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» на 2018–2020 гг. (проект 18-1-004).

требует организации непрерывного наблюдения за его состоянием [2]. Для этого используют различные методы начиная от статистического анализа данных по уловам рыбодобывающих предприятий и заканчивая генетическим анализом гидробионтов, доставляемых в лаборатории с исследуемых акваторий. В последние годы для контроля состояния морского биоразнообразия все чаще применяются системы подводного видеонаблюдения [1, 16]. Фактически на каждом снимке или видеозаписи, сделанной подводной камерой, запечатлено «мгновенное состояние» подводной сцены. Эксперты, анализируя большую совокупность видеоматериалов, могут сделать обобщенные выводы о многообразии видов, устойчиво присутствующих на исследуемой акватории, исследовать их реакцию на опасные природные и антропогенные процессы – штормы, тайфуны, загрязнения акваторий промышленными стоками, нефтепродуктами, а также своевременно обнаруживать появление представителей новых для изучаемой акватории видов, привнесенных из других районов Мирового океана.

В работе [16] представлен обзор систем подводного видеонаблюдения за состоянием морского биоразнообразия, разработанных и применявшихся в мире в период с 1952 по 2012 г. Их можно условно разделить на мобильные и стационарные. Мобильные системы включают видеокamеры, которые могут перемещаться под водой с целью охвата наблюдением значительных по площади акваторий. К ним относят видеосистемы, буксируемые надводными судами, а также камеры, установленные на автономных и телеуправляемых подводных аппаратах. Стационарные видеосистемы устанавливаются на дне и непрерывно наблюдают некоторую сцену, отсылая моментальные снимки и видеозаписи в береговую инфраструктуру хранения данных либо на судно, связанное с видеосистемой. Оба подхода дополняют друг друга: мобильные системы дают представление о пространственном распределении морских сообществ, стационарные – об их временной динамике в точках наблюдения.

В ДВО РАН первыми для исследования донных сообществ стали применяться технологии мобильного видеонаблюдения. В начале 2000-х годов совместно со специалистами Института биологии моря и Института проблем морских технологий ДВО РАН с использованием автономных подводных аппаратов были проведены видеонаблюдения на ряде акваторий зал. Петра Великого и на этой основе составлены обобщенные описания видового состава встречающихся на этих акваториях биологических объектов (см., например, [6]). Понятно, однако, что наблюдения с помощью подводных аппаратов не могут в полной мере решить проблему непрерывного контроля состояния биоты залива, прежде всего вследствие нерегулярности наблюдений. Это опасно, особенно в случае попадания в залив заносных видов, которые, теоретически, могут нарушить сложившийся баланс за очень короткое время.

В 2012 г. в Тихоокеанском океанологическом институте ДВО РАН были начаты работы по конструированию и развертыванию в зал. Петра Великого стационарных систем подводного видеонаблюдения. Их предполагалось использовать для решения трех задач: контроля мест подводной постановки научного оборудования; разработки и применения перспективных методик оценивания параметров гидрологических процессов – течений, волнения, цвета, мутности воды; отработки методик мониторинга биоты залива. Первый стационарный комплекс видеонаблюдения был установлен в конце 2012 г. в бухте Алексева (о-в Попова). В работе [8] оцениваются его возможности, представлены результаты анализа видового состава попавших в поле действия камеры рыб и особенностей его временной динамики в разные сезоны 2013 г. Позднее были установлены еще два комплекса наблюдения, существенно пополнены базы видеоданных, разработаны несколько программных методик, связанных с задачами описания зафиксированной на видео жизни подводных сообществ.

Далее в работе будет представлено современное состояние системы подводного наблюдения, описаны разработанные программные методики и приведены примеры их использования.

Современное состояние системы стационарного подводного видеонаблюдения акваторий зал. Петра Великого и проблема составления биологических описаний подводных сцен

В настоящее время система включает три комплекса подводного видеонаблюдения. Упомянутый выше комплекс в бухте Алексеева размещен в 100 м от берега на глубине 4 м. В нем используется сетевая камера GeoVision GV-BX120D с разрешением кадра 1280 x 720 пикселей и фиксированным фокусным расстоянием, обеспечивающим горизонтальный угол обзора наблюдаемой сцены 35°. В 2014 г. в бухте Алексеева недалеко от первого был установлен второй комплекс, оснащенный IP-камерой TANTOS TSi-Plе2VPZ, имеющей лучшее разрешение – 1920 x 1080 пикселей и моторизованный объектив, обеспечивающий дистанционное регулирование угла обзора наблюдаемой сцены в диапазоне 27–91°. В ноябре 2016 г. третий комплекс подводного видеонаблюдения, оснащенный такой же камерой, был установлен в бухте Витязь (Хасанский район) в 200 м от берега на глубине 15 м.

Конструктивно каждый комплекс представляет собой установленный под водой на массивном основании металлический водонепроницаемый бокс, внутри которого находится камера и система управления. Одна из сторон бокса выполнена из прочного стекла, через него камера наблюдает подводную сцену. Дальность видимости объектов в дневное время в зависимости от глубины постановки и мутности воды варьирует от 1 до 7–8 м. Для наблюдения в ночное время используются фонари подсветки, которые дистанционно могут включаться и отключаться. С берега к боксу подведен кабель электропитания и связи, обеспечивающий возможность передачи управляющих команд и цифрового видео на расстояние до 500 м. Береговой пункт связи каждого комплекса подключен к телекоммуникационной инфраструктуре сети мониторинга зал. Петра Великого [5]. Это обеспечивает возможность пересылать по высокоскоростным радиоканалам сети мониторинга в ее хранилища данных во Владивостоке значительные объемы видеoinформации, а также вести круглосуточную непрерывную трансляцию «живого видео» в сеть ДВО РАН и Интернет. Еще одно преимущество подключения комплексов видеонаблюдения к сети мониторинга – возможность использования при интерпретации подводного видео дополнительных данных, полученных другими близкорасположенными средствами наблюдения, например автоматическими метеостанциями, измерителями температуры, течений и волнения.

С каждой подводной камеры в общую базу видеоданных во Владивостоке поступает один моментальный снимок в минуту и одна минутная видеозапись каждый час. К настоящему времени накоплены значительные объемы видеoinформации, включающие сотни тысяч изображений и десятки тысяч видеозаписей. Доступ к этим данным предоставляется зарегистрированным пользователям океанологической информационно-аналитической системы ДВО РАН [13]. Кроме того, реализована отдельная информационная система «Подводное видео ТОИ ДВО РАН» [9], дающая открытый доступ к видеoinформации всем заинтересованным лицам. Пользователи могут запрашивать изображения и видео, выбирая нужные камеры, устанавливая интересующий временной период и частоту выборки данных. Пользователи с особыми правами (эксперты) могут сопровождать видеоданные комментариями в произвольной форме, создавать из общей базы персональные коллекции, передавать доступ к ним коллегам либо использовать их в образовательном процессе.

Наличие обширной базы видеоматериалов и средств доступа к ним считаем важным результатом развертывания комплексов видеонаблюдения, поскольку в изображениях и видео объективно запечатлены текущее состояние биоразнообразия наблюдаемых акваторий и его временная динамика за несколько лет наблюдений. Понятно, однако, что эта биологическая информация запечатлена в форме графических образов, по-разному воспринимаемых разными людьми и неудобной для автоматической обработки и обобщения. Поэтому желательно на каком-то этапе эту информацию извлечь из графических файлов,

сопоставив каждому видео и снимку его биологическое описание – перечень всех попавших в поле зрения камеры биологических объектов с указанием их вида и, по возможности, ряда дополнительных параметров: длины, ширины, среднего размера, ориентации, площади, формы объекта. В этом случае пользователи смогут делать целевые выборки из базы видео с указанием интересующих их видов, будет облегчен процесс исследования временной изменчивости видового разнообразия на исследуемой акватории, включая долговременные тренды, годовые, сезонные, суточные и часовые циклы, можно будет количественно оценивать влияние на биоту залива внешних условий.

В иностранной литературе процесс формирования таких биологических описаний называют составлением аннотаций морских изображений [18]. Его выполняют опытные эксперты-биологи на основе визуального просмотра изображений и видео с применением средств автоматизации, облегчающих эту работу (см., например, разработку MBARI Института морских исследований при Океанариуме зал. Монтерей [19]). Нами ранее была разработана подобная система автоматизации процесса составления биоописаний морских сцен в связи с задачей анализа данных мобильных видеонаблюдений, проводившихся в рамках Целевой комплексной программы ДВО РАН «Биологическая безопасность Дальневосточных морей России» [7]. Система допускает распределенную работу нескольких экспертов в сети Интернет. Эксперт выбирает из общей базы видеоданных нужное изображение, далее с помощью «мыши» оконтуривает эллипсом каждый биологический объект и сопоставляет ему биологический вид из предварительно сформированного списка. Параметры эллипса – координаты центра, длина, ширина, вытянутость, ориентация, площадь – приписываются объекту. По ним можно судить о возрасте объекта, примерно оценивать общий объем биомассы на обозреваемом участке акватории. (Отметим, что в работе [18] тоже рекомендуется при составлении аннотаций включать в них эти геометрические параметры биологических объектов.) Мы планируем эту ранее разработанную систему адаптировать к данным систем стационарного видеонаблюдения.

Следует отметить, что работа экспертов, даже с использованием подобных средств «малой автоматизации» процесса биоописания, очень трудоемка, поэтому актуальна разработка средств полной автоматизации, которые исключили бы ручную работу экспертов, оставив за ними лишь контроль качества работы автоматических алгоритмов. Однако многими специалистами признается, в частности в [18], что задача полной автоматизации составления биоописаний подводных сцен, применимой для всех акваторий Мирового океана и условий наблюдения, очень сложна и почти неразрешима.

Часто исследователи ограничиваются разработкой адаптированных к условиям видеонаблюдения более простых систем распознавания для описания каких-либо практически важных аспектов состояния биоты. Например, для рыбодобывающих предприятий ценной была бы информация о наличии либо отсутствии на акватории промысловых рыб. Нами в настоящее время разрабатываются и исследуются различные алгоритмы и программы анализа регистрируемых подводными камерами изображений и видео, которые могут оказаться полезными при изучении сообществ прибрежных вод зал. Петра Великого. Далее в статье будут представлены три программные методики и примеры их использования. Первая формально имеет отношение к задаче автоматизации составления биоописаний, рассматривается ее частная упрощенная постановка. Две другие методики касаются возможности оценивания по видео параметров протекания физиологических процессов – дыхания и питания у некоторых видов морских гидробионтов. Публикаций, где бы рассматривалась подобная постановка задачи, мы не встречали; как правило, исследования физиологического состояния гидробионтов проводятся не в среде их обитания, а в лабораторных условиях.

Задача обнаружения и подсчета движущихся рыб

Одной из практически полезных при автоматизации анализа данных подводного видеонаблюдения является задача обнаружения и подсчета рыб различных видов,

присутствующих в поле зрения камеры. Имеются примеры ее успешного решения при изучении коралловых рыб, которые, как правило, наблюдаются на фоне очень прозрачной воды, имеют специфическую форму и контрастную окраску [15]. В случае не очень прозрачной воды, при наличии сложного окружающего фона, при способности некоторых видов рыб принимать окраску, сливающуюся с фоном, не только распознавание вида, но даже задача обнаружения рыб становится нетривиальной, особенно если исходная информация представлена статичным изображением.

Нами была разработана и применяется при анализе данных систем видеонаблюдения программа обнаружения и подсчета движущихся рыб FishCounter [11]. Ключевой в программе является процедура удаления фона, которая была реализована на основе алгоритма, предложенного в работе [20]. При обработке очередного кадра видео для каждого пиксела принимается решение – отнести его к фону или к движущемуся объекту. Используется байесовское решающее правило, в которое входит оценка «фоновой» плотности распределения яркости пиксела, рассчитанная по нескольким предыдущим кадрам. Вычисления в алгоритме оптимизированы, так что обработка всех пикселов кадра занимает доли секунды. После удаления (обнуления яркости) фоновых пикселов с помощью стандартных процедур компьютерного зрения производится детектирование связанных объектов и построение описывающих их прямоугольных рамок. В принципе программа пытается детектировать все перемещающиеся объекты, которые могут быть и не рыбами, но под водой чаще всего это рыбы. Подсчет рыб ведется для каждого анализируемого кадра видеопотока, после чего рассчитывается среднее арифметическое число рыб, присутствующих на наблюдаемой сцене. Как и все программы обнаружения и распознавания объектов, FishCounter может ошибаться, обнаруживая ложные объекты и пропуская истинные. Специального исследования качества алгоритмов обнаружения нами пока не проводилось, поскольку сложно подготовить методически корректную представительную выборку видеозаписей, соответствующих «одинаковым условиям наблюдения». На рис. 1 приведен пример работы программы при анализе видеозаписи подводной сцены, зарегистрированной камерой в бухте Витязь в декабре 2016 г. В данном случае программа обнаружила и оконтурила рамками пять рыб. Как видно на рисунке, это особи терпуга, они наблюдаются на весьма сложном фоне и имеют окраску, близкую к фону.

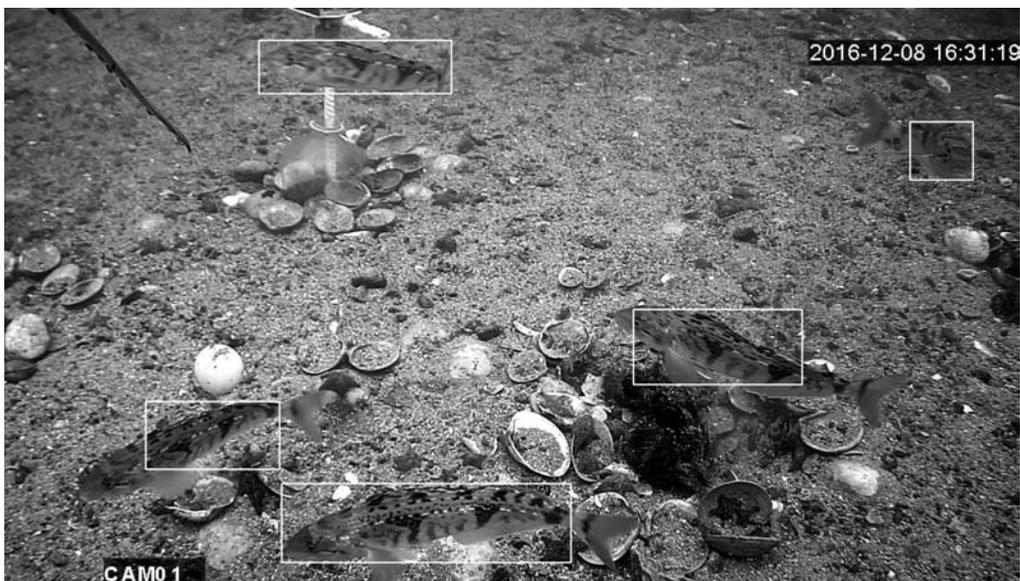


Рис. 1. Автоматическое обнаружение движущихся рыб программой FishCounter

Регистрация и анализ дыхательных ритмов рыб

Помимо задачи составления биописаний подводных сцен, видеонаблюдение может быть полезно для оценки некоторых параметров физиологического состояния животных. Функционирование живых организмов, как правило, сопряжено с осуществлением ими периодических движений тех или иных частей их тела (сердца, жабр, плавников, мышц и т.д.). Эти движения обеспечивают выполнение жизненно важных функций организма – кровотока, дыхания, питания и т.д. Важными показателями нормальной жизнедеятельности, по-видимому, являются ритмичность движений, ее стабильность во времени, непрерывность этого периодического процесса. Если положение биологического объекта в поле зрения подводной камеры стабильно, а периодический процесс визуально заметен, то можно автоматизировать процесс его регистрации и последующего анализа. Для этого могут быть использованы две программы из системы аналитической поддержки сети научного мониторинга зал. Петра Великого. Программа QAVIS (Quick Analyzer of Video and Images for Scientists) [10, 17] предназначена для оперативного анализа изображений и видео, наблюдаемых на экране компьютера. Некоторые результаты анализа представляются в виде временных сигналов, которые могут быть сохранены в файлы и затем обработаны второй программой – OceanSP [14].

Оба примера использования этих программ для регистрации и анализа периодических движений связаны с наблюдением биологических объектов, расположенных на искусственном рифе. Последний был организован на базе двух перенесенных в бухту Алексеева из открытой части моря рыбацких кухтылей, обжитых мидиями, актиниями, асцидиями. Кухтыли были размещены в поле зрения второй подводной камеры.

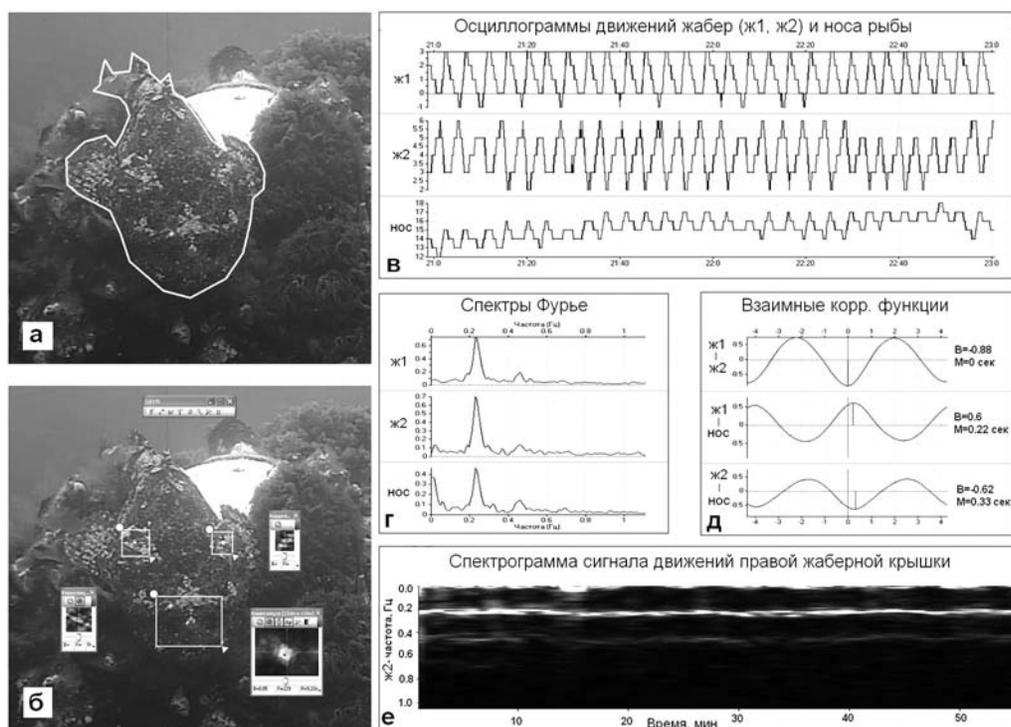


Рис. 2. Регистрация и анализ дыхательных ритмов керчака, бухта Алексеева, 19 апреля 2016 г., температура воды 5 °С: а – керчак на кухтыле, б – процесс регистрации движений жабр и носа рыбы, в – сигналы горизонтальных движений жабр и вертикальных движений носа, г – спектры Фурье всех сигналов движения, д – взаимные корреляционные функции между сигналами движения жабр и носа, е – спектрограмма одночасовой записи сигнала движений жаберной крышки

Первый пример связан с исследованием дыхательных ритмов рыб. В результате просмотра трансляции видео в апреле 2017 г. было замечено, что левый кучтыль облюбовал керчак. В течение нескольких дней он регулярно располагался на верхней части кучтыля и почти неподвижно проводил по нескольку часов, вероятно, ожидая добычу. На рис. 2а керчак вручную оконтурирен, поскольку из-за своей маскирующей окраски он почти не отличим от окружающего фона. На видео было заметно дыхание керчака – у него слегка раздвигались и сдвигались жаберные крышки, а также вздымалась и опускалась носовая часть. С помощью программы QAVIS были зарегистрированы несколько записей, длительностью от 1 до 3 ч, сигналов этих движений. Поясним подробно технологию регистрации, демонстрируя одновременно возможности самой программы, которая нами позиционируется как удобный универсальный набор инструментов для ученых, исследования которых связаны с получением и анализом изображений и видео. Пользователь выбрал один из четырех базовых инструментов программы – «Корреляция», установил «мышкой» три прямоугольных селектора желтого цвета на жаберные крышки и нос керчака (рис. 2б), зафиксировал начальные изображения под селекторами и запустил процесс регистрации. После этого программа на каждом такте своей работы считывает текущие изображения под селекторами и рассчитывает их взаимные корреляционные функции с первоначальными изображениями.

Корреляционные функции отображаются в отдельных информационных окнах, а в выходной файл данных записываются координаты корреляционных максимумов – измеренные в пикселях смещения текущих изображений относительно первоначальных в горизонтальном и вертикальном направлениях. В нашем случае это смещения жаберных крышек и носа рыбы. После остановки процесса регистрации сформированные временные сигналы считываются из файла и анализируются программой OceanSP. На рис. 2в сверху вниз показаны двухминутные осциллограммы сигналов горизонтальных движений левой и правой жаберных крышек, а также вертикальных движений носовой части. Отметим, что сигналы близки к гармоническим, при этом их размах очень невелик – около 2 мм. Пики в спектрах Фурье (рис. 2г) показывают, что в сигналах наиболее значимо представлена основная гармоническая компонента дыхания с частотой 0,22 Гц (13,2 вдоха в минуту). Взаимные корреляционные функции на рис. 2д согласованы с механизмами жаберного дыхания рыб [3]: горизонтальные движения жаберных крышек находятся строго в противофазе (экстремум нормированной корреляции $V = -0,88$ отрицательный, наблюдается при нулевом сдвиге сигналов $M = 0$ с), вертикальные движения носа на 0,2–0,3 с опережают движения жаберных крышек. На рис. 2е представлена рассчитанная на основе оконного преобразования Фурье спектрограмма одночасовой записи сигнала движений левой жаберной крышки. По горизонтальной оси отложена шкала времени, по вертикальной – шкала частот (сверху вниз). Каждое вертикальное сечение спектрограммы представляет собой полутоновое отображение амплитудного спектра, рассчитанного по небольшому фрагменту сигнала вблизи соответствующей временной отметки. Чем большие значения амплитуды колебаний сигнала на некоторых частотах, тем более яркими точками они отображаются. В совокупности последовательность вертикальных полутоновых отображений локальных спектров, рассчитанных для всех моментов времени, дает наглядное представление о временной динамике частного состава анализируемого сигнала. В нашем случае очевидно, что частотный состав сигнала дыхания керчака практически неизменен. На протяжении всего часа в спектрограмме присутствует яркая горизонтальная полоса на частоте 0,22 Гц, следовательно, керчак в течение этого времени стабильно дышал с частотой 13,2 вдоха в минуту. Отметим, что позднее наблюдались случаи, когда частота дыхания керчака довольно резко изменялась до нового значения, после чего вновь стабильно сохранялась долгое время. В частности, около 2 ч керчак дышал с частотой 8,4 вдоха в минуту. В литературе по ихтиологии, в частности в [4], отмечается, что ритмы дыхания рыб зависят от многих факторов – температуры воды, содержания в ней кислорода и углекислого газа, возраста рыбы, ее массы и т.д. В рассмотренном случае температура воды

была около 5 °С. Рыбы сопоставимых размеров, например карпы, при такой температуре дышат с частотой 16–18 вдохов в минуту, несколько большей, чем наблюдавшаяся у керчака. Следует признать, что рассмотренный случай с многочасовым нахождением рыбы в статичном положении очень редкий, поэтому проведение систематических исследований дыхания рыб различных видов в их естественной среде обитания описанным выше способом вряд ли осуществимо. Однако частоту их дыхания можно оценить приблизительно: для этого, поскольку рыбы активно используют для забора воды рот, достаточно зарегистрировать 3–4 цикла открывания–закрывания рта, что занимает 15–20 с, а, как показали подводные видеонаблюдения, многие рыбы находятся в поле зрения камеры до десятков секунд.

Регистрация и исследование показателей жизнедеятельности баянусов

Помимо мидий, актиний и асцидий искусственный риф обжили баянусы – усоногие рачки, живущие в раковинах и подгоняющие к себе воду с питательными веществами и насыщенную кислородом взмахами конечностей [12].

С одной стороны, баянусы являются одним из основных компонентов биологического обрастания судов и гидротехнических сооружений. С другой – вносят значительный вклад в процессы самоочищения моря, фильтруя значительные объемы воды. Поэтому они – важный объект изучения для морских биологов и экологов.

Возможно, важнейшие наблюдаемые показатели жизнестойкости баянусов – частота, стабильность и непрерывность взмахов конечностей. Для регистрации взмахов удобно использовать инструмент «Временная развертка» программы QAVIS. Пользователем в место видео, где конечности баянуса различимы на фоне, устанавливается круглый селектор. Программа регистрирует сигнал изменения во времени (временную развертку) средней яркости внутри селектора, несущий информацию о частоте взмахов. Всего было проведено несколько сеансов регистрации таких сигналов длительностью от нескольких часов до нескольких суток в разные сезоны года.

На рис. 3 демонстрируется процесс одновременной регистрации сигналов взмахов конечностей шести баянусов, измерения проводилась 12 июня 2016 г. На рис. 4 показаны Фурье-спектры и частотно-временные спектрограммы, рассчитанные по 10-часовым

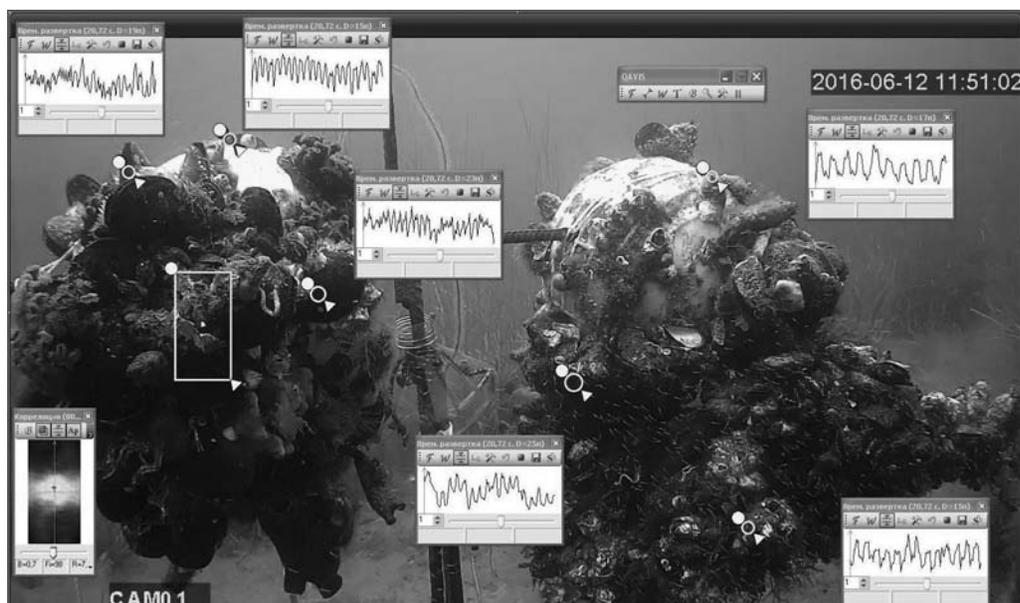


Рис. 3. Регистрация сигналов взмахов конечностей шести баянусов

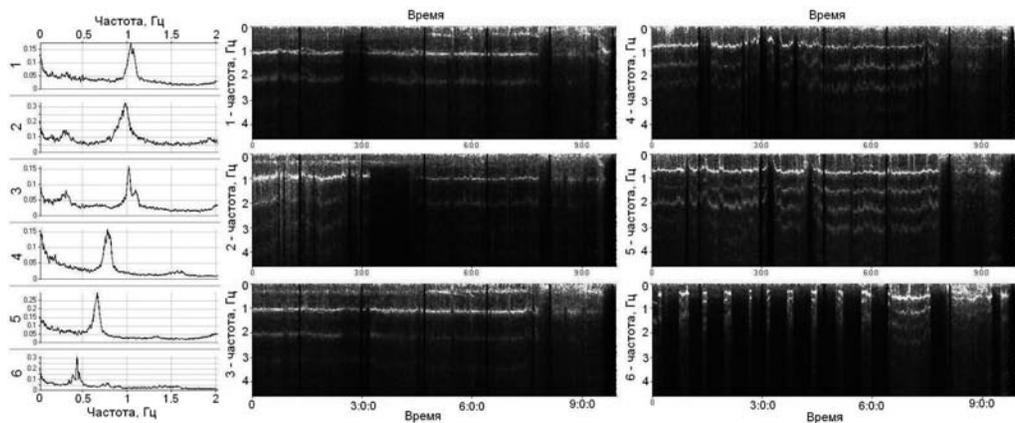


Рис. 4. Фурье-спектры (слева) и спектрограммы (справа) сигналов движения конечностей шести балянусов. Измерения проводились летом

записям этих сигналов. Положение наиболее мощного пика в спектрах указывает на основную частоту: у трех первых балянусов она равна примерно 1–1,1 Гц, у двух несколько меньше – 0,8 и 0,7 Гц, у последнего наименьшая – 0,45 Гц. В каждой спектрограмме видны несколько горизонтальных полос. Самая верхняя из них отслеживает частоту движений, остальные являются ее гармониками, обусловленными тем, что регистрируемый сигнал не является идеальной синусоидой, а имеет более сложную форму. Чем ровнее базовая полоса в спектрограмме, тем стабильнее частота взмахов. На рисунке видно, что наиболее стабильны частоты у первого и третьего балянусов, у остальных она претерпевает небольшие колебания относительно среднего значения – у них «аритмия».

Что касается времени непрерывного махания, то, как видно на спектрограммах, некоторые балянусы устойчиво машут конечностями по нескольку часов, другие делают перерывы – базовая полоса в их спектрограмме прерывается. У этих особей своеобразная «одышка». Наиболее неблагоприятна в этом смысле ситуация у последнего, шестого балянуса.

Подобные измерения проводились несколько раз в течение лета и начала осени. Основной результат примерно тот же – базовая частота взмахов для разных особей немного отличается, в основном она находится в диапазоне 0,7–1,1 Гц, стабильность частоты движений и время непрерывной работы довольно сильно отличаются у разных особей.

Следующий цикл измерений движений конечностей балянусов (3 экз.) был выполнен 5 января 2017 г., когда температура воды стала близкой к 0 °С (рис. 5). Зимой частота взмахов в 3–4 раза ниже, чем в летний период. В представленном случае частоты очень близки между собой и равны 0,275, 0,28, 0,29 Гц. Существенно возросла стабильность: отслеживающие ее частотные полосы на спектрограммах очень ровные, пики в спектрах Фурье заметно более острые, чем пики в летних измерениях. Длительность циклов непрерывного махания в среднем больше, чем в летних наблюдениях.

Приведем результаты еще одного исследования, связанного с балянусами. В августе 2016 г. система автофокусировки камеры TANTOS ошиблась, и вместо искусственного рифа камера сфокусировалась на смотровом стекле подводного бокса. Получилась очень резкая и отчетливая картина происходящих на стекле процессов биологического обрастания. В частности, на стекле оказалось довольно много полупрозрачных особей молодых балянусов, у которых еще не сформировались раковины. В центре каждой особи была заметна темная мышца, изменяющая свое положение синхронно с взмахами конечностей. Это дало основание реализовать методику регистрации взмахов на основе отслеживания яркости в местах изображения, где эта мышца появляется и исчезает. На рис. 6а демонстрируется процесс регистрации сигналов движений темной мышцы, на

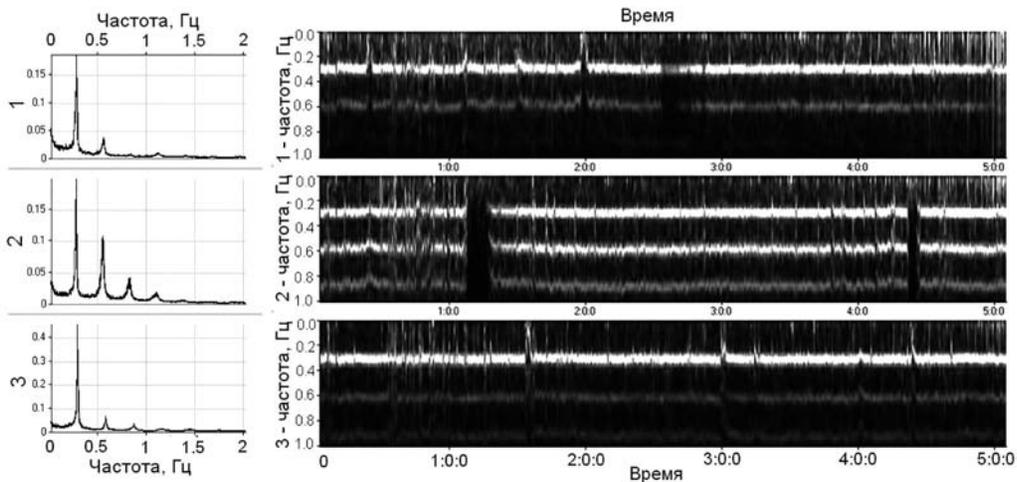


Рис. 5. Фурье-спектры (слева) и спектрограммы (справа) сигналов движения конечностей трех баянусов. Измерения проводились зимой

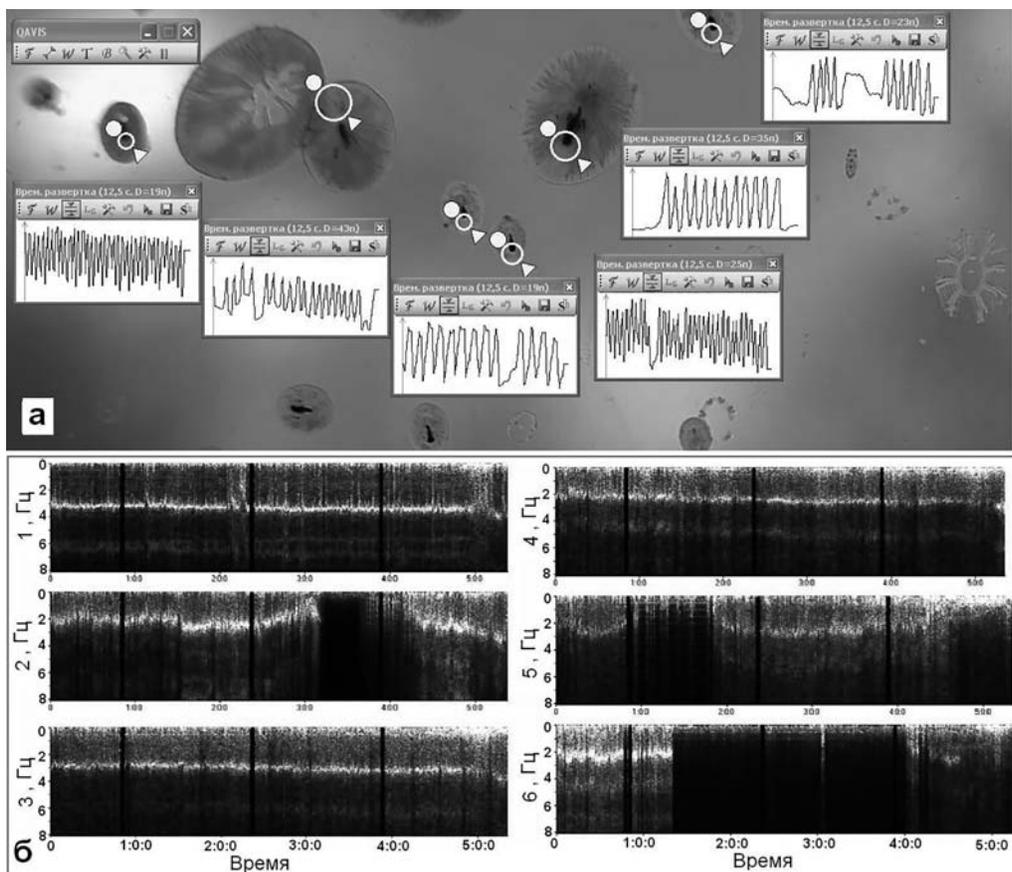


Рис. 6. Исследование частоты взмахов конечностей молодых баянусов, закрепившихся на смотровом стекле видеосистемы: *а* – регистрация сигналов взмахов, *б* – спектрограммы пятичасовых сигналов для 6 особей баянусов

рис. 6б показаны спектрограммы 5-часовых сигналов для шести молодых баянусов. Основное отличие от взрослых особей – очень высокая частота взмахов, достигающая 3,5 Гц. При этом, как и взрослые особи в летний период, молодые особи баянусов заметно различаются между собой по стабильности основной частоты и по длительности циклов непрерывного махания.

Заключение

Системы стационарного подводного видеонаблюдения имеют значительный потенциал для решения задач непрерывного наблюдения за состоянием биоты прибрежных акваторий. Поэтому в последние годы их активно развертывают в разных странах мира. В ТОИ ДВО РАН создан существенный задел в этом направлении. В настоящее время действуют три системы. Накоплены значительные массивы видеоданных, которые могут быть использованы в научных исследованиях ДВО РАН и в образовательном процессе вузов Дальнего Востока. Разрабатываются программные методики, позволяющие автоматизировать отдельные задачи составления биоописаний подводных сцен, в частности подсчет движущихся рыб на основе анализа видео. Показана возможность применения систем подводного видеонаблюдения для оценивания параметров периодических движений некоторых морских гидробионтов, с помощью которых они осуществляют свои жизненно важные функции – дыхание и питание.

Авторы вполне осознают, что почти все результаты работы, касающиеся применения систем стационарного подводного видеонаблюдения для получения знания о состоянии подводной биоты, носят предварительный, оценочный характер и нуждаются в профессиональной оценке со стороны морских биологов. Основной нашей целью было, скорее, не получение новых знаний в области морской биологии, а демонстрация на приведенных примерах возможностей новой для российских исследователей, но активно развивающейся в последние 5–10 лет за рубежом технологии изучения жизни в прибрежных акваториях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адрианов А.В., Тарасов В.Г., Щербатюк А.Ф. Применение и перспективы сезонного видеомониторинга на особо охраняемых морских акваториях залива Петра Великого // Вестн. ДВО РАН. 2005. № 1. С. 19–26.
2. Адрианов А.В. Современные проблемы изучения морского биологического разнообразия // Биология моря. 2004. № 1. С. 3–19.
3. Аминев В.А., Яржомбек А.А. Физиология рыб. М. Легкая и пищ. пром-сть, 1984. 200 с.
4. Анисимова И.М., Лавровский В.В. Ихтиология: учеб. пособие. М.: Высш. школа, 1983. 255 с.
5. Ангушев 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 // Современные информационные технологии для научных исследований: материалы конф. Магадан, 2008. С. 146–148.
6. Жариков В.В., Лысенко В.Н. Оценки биологических характеристик эпифауны в Дальневосточном морском заповеднике ДВО РАН с использованием подводного аппарата // XI Дальневост. конф. по заповедному делу. Владивосток, 6–9 октября 2015 г.: материалы конф. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 166–170.
7. Ивин В.В., Фищенко В.К. Распределенная информационно-аналитическая система «Биологическая безопасность дальневосточных морей Российской Федерации» // Биологическая безопасность дальневосточных морей Российской Федерации: материалы Целевой комплексной программы ориентированных фундаментальных научных исследований Дальневосточного отделения РАН на 2007–2012 гг. / отв. ред. А.В. Адрианов. Владивосток: Дальнаука, 2014. С. 153–180.
8. Маркевич А.И., Суботэ А.Е., Зимин П.С., Фищенко В.К. Первый опыт использования системы длительного подводного видеонаблюдения для биологического мониторинга в заливе Петра Великого (Японское море) // Вестн. ДВО РАН. 2015. № 1. С. 86–91.
9. Подводное видео ТОИ ДВО РАН. – <http://poi.dvo.ru/u-cam/> (дата обращения: 18.07.2017).
10. Программа для ЭВМ «Программа экспресс-анализа изображений и видео (QAVIS)»: Св-во о рег. № 2017611593 Российская Федерация, заявл. 08.12.2016, зарег. 06.02.2017 / В.К. Фищенко, А.А. Гончарова. Заявка № 2016663409.

11. Программа для ЭВМ «FishCounter»: Св-во о рег. № 2016612101 Российская Федерация, заявл. 24.12.2015, зарег. 18.02.2016 / Л.А. Подольский, А.Е. Суботэ. Заявка № 2015662770.
12. Соколовский А.С. Морские желуди. – <http://museumimb.ru/sea-acorns.html> (дата обращения: 18.07.2017).
13. Фищенко В.К., Голик А.В., Антушев С.Г. О проекте корпоративной океанологической информационно-аналитической системы ДВО РАН и задаче развертывании глобальной GRID-инфраструктуры Отделения // Открытое образование. 2008. № 4. С. 47–64.
14. Фищенко В.К., Гончарова А.А. Программа обработки океанологических сигналов OCEANSP и ее применение в задачах физики геосфер // Материалы докл. 8-го Всерос. симпоз. «Физика геосфер». Владивосток, 2013. С. 216–219.
15. Fisher R.B., Yun-Heh Chen-Burger, Giordano D. et al. Fish4Knowledge: Collecting and Analyzing Massive Coral Reef Fish Video Data. Springer Intern. Publ., 2016. 319 p. doi:10.1007/978-3-319-30208-9
16. 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.
17. QAVIS: a quick analyzer of video and images for scientists. – <http://oias.poi.dvo.ru/qavis/> (дата обращения: 18.07.2017).
18. Schoening T., Osterloff J., Nattkemper T.W. RecoMIA – Recommendations for Marine Image Annotation: Lessons Learned and Future Directions // Fron. Mar. Sci. 2016. – doi.org/10.3389/fmars.2016.00059.
19. VARS. Video Annotation and Reference System (VARS). – <http://www.mbari.org/vars/> (дата обращения: 18.07.2017).
20. Zivkovic Z., Heijden F. Efficient adaptive density estimation per image pixel for the task of background subtraction // Pattern Recognition Letters. 2006. Vol. 27, iss. 7. P. 773–780. doi:10.1016/j.patrec.2005.11.005