

О МОНИТОРИНГЕ МОРСКИХ РЫБОПРОМЫСЛОВЫХ РАЙОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И ИНФОРМАЦИИ ОТ МОРСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ¹

Алексанин А. И.², Щербатюк А. Ф.³

(ФГБУН Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток)

В настоящее время спутниковые данные обеспечивают значительный объем информации для оценки промысловых районов, а современные автономные необитаемые надводные и подводные аппараты позволяют вести промысловую разведку, собирая информацию как о донных гидробионтах, так и о наличии косяков пелагических рыб. Их применение повышает эффективность поиска рыбопромысловых скоплений за счет оценки объема скоплений и размеров рыб. Использование подобных систем в коммерческом рыболовстве позволит существенно снизить нагрузку на рыбодобывающие суда за счет получения знаний об объектах промысла от указанных выше систем, а также понизить влияние на окружающую среду за счет уменьшения расхода топлива во время их поиска. В статье рассматривается проблема построения краткосрочных рыбопромысловых прогнозов. Выделяются две задачи организации эффективного рыбного промысла: оценка перспективных районов и поиск промысловых скоплений. Для их решения рассмотрено использование сочетания средств спутникового дистанционного зондирования и автономных робототехнических систем.

Ключевые слова: автономные робототехнические комплексы, спутниковый мониторинг океана, краткосрочный рыбопромысловый прогноз.

1. Введение

Краткосрочные рыбопромысловые прогнозы длительностью до двух недель составляются «с целью определения картины распределения и основных перемещений промысловых концентраций биологического вида в рамках его традиционного района обитания» [6]. Они нужны для решения следующих

¹ Работа частично поддержана Программой «Приоритет 2030».

² Анатолий Иванович Алексанин, д.т.н. (aleks@iacp.dvo.ru).

³ Александр Федорович Щербатюк, д.т.н., чл.-корр. РАН (alex-scherba@yandex.ru).

задач: выбор районов промысла, определение стратегии поиска промысловых скоплений, оптимизация затрат на поиск, добычу и реализацию улова.

Для дальневосточного региона страны, на который приходится основной объем рыбной добычи, в ТИНРО-Центре создана и успешно апробирована автоматизированная система оперативного рыбопромыслового прогнозирования и управления [5]. Она базируется на адаптационных технологиях и в своей работе использует несколько источников информации. Одним из них являются накопленные судовые исследования, позволяющие получить представление о биологических особенностях промысловых видов и океанологические данные по традиционным районам их промысла. Другим источником являются спутниковые данные, дающие информацию о текущем состоянии поверхности океана и позволяющие оценить районы с комфортными условиями для конкретного рыбопромыслового объекта (РО).

Развитие средств дистанционного зондирования океана обеспечивает новые возможности по решению задач краткосрочного прогноза рыбопромысловых районов. Расширяется использование спутниковой информации. Широко применяются методики расчета и обнаружения мезомасштабных вихрей, струй, фронтов, выносов рек, биопродуктивности морей. Используются устойчивые связи этих параметров с особенностями концентрации РО в рыбопромысловые скопления [12, 15]. Зная условия обитания и поведение промысловых рыб [11] можно оценить расположение рыбопромысловых районов по спутниковой информации. Развиваются методики использования акустических, оптических и радарных сенсоров судна совместно со спутниковой информацией для улучшения управления и добычи РО [19].

В последнее время все шире начинает использоваться информация с автономных средства исследований – дрейфующих буев, глайдеров и других морских робототехнических комплексов различного назначения. Их использование в рыболовстве имеет большие перспективы. Удешевление их производства делает данные системы более доступными и позволяет получить средства сбора информации о перспективных районах промысла, а также повысить эффективность работы рыбодобывающего

флота. Для этих целей можно использовать три типа автономных аппаратов: беспилотные летающие аппараты, безэкипажные катера и автономные необитаемые подводные аппараты. Получение ими регулярной информации меняет методику оценки рыбопромысловых районов и управления рыбопромысловыми работами.

Использование воздушных дронов в рыболовстве обеспечивает значительную экономию судовых ресурсов. Воздушные дроны создают возможности обнаружения, определения местоположения и отслеживания объектов [16]. Основным источником данных, который дрон предоставляет для поддержки рыболовства, являются видеоизображения высокого разрешения. Местоположение дрона определяется с требуемой точностью на основе данных от спутниковой навигационной системы, чтобы было известно, где были собраны данные по отношению к принимающему судну. Указанная информация передается на обеспечивающее судно в режиме, близком к реальному времени. Полученные данные можно спроецировать на карту, чтобы обеспечить представление о местонахождении объектов на поверхности воды или небольшой глубине в локальных окрестностях вокруг судна. Возможна установка дополнительных датчиков, например, инфракрасной камеры, которая может заполнить карту информацией о температуре поверхности моря. Кроме того, дрон может выполнять обработку изображений на основе собранных данных для автоматического обнаружения, определения местоположения и идентификации объектов в воде. Например, Planck Aerosystems [16] в настоящее время имеет возможности обработки изображений для обнаружения птиц, водорослей, китов и других морских объектов.

Для того чтобы реализовать возможности воздушных дронов в данном приложении, необходимо решить несколько технических и эксплуатационных задач, включая надежные способы запуска и посадки. Получаемые с дронов результаты, так же как и результаты авиаразведки, порой сложно интерпретировать. Степень видимости промысловых объектов зависит от состояния поверхности моря, облачности, прозрачности воды. Волнение ограничивает область, где на изображении уверенно выделяются объекты. Тени от облаков могут быть схожими

с косяками рыб. Низкая прозрачность воды ограничивает возможности видеонаблюдений. Для наведения дрона на объект требуется высокая скорость передачи изображений.

Перспективным источником информации для решения задачи обнаружения и отслеживания рыбопромысловых объектов являются морские робототехнические комплексы. В последнее время наиболее широкое распространение среди таких комплексов в данной области получили подводные глайдеры и безэкипажные катера [13, 17, 20]. Одним из наиболее экономичных способов получения рыбопромысловой информации является использование глайдеров, которые являются одним из типов автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Глайдеры предназначены для длительной непрерывной работы в течение до нескольких месяцев и обеспечивают регулярную передачу информации о температуре, скорости течения, а также в виде эхограмм сканирования о распределении nekтона и рыбопромысловых объектов в пелагическом слое.

В данной работе рассматриваются возможности использования робототехнических средств и данных дистанционного зондирования для решения задач краткосрочных прогнозов рыбопромысловых районов и организации оптимального рыбного промысла.

2. Задача оценки перспективных районов и поиск промысловых скоплений

Поведение РО определяется оптимальным рационом питания – получением максимальной калорийности в единицу времени при минимизации затрат на поиск пищи [14]. Это позволяет выработать стратегию определения перспективных районов и организовать разведку промысловых объектов.

Источниками питания рыбопромысловых объектов являются зоопланктон, nekтон и бентос. В пелагическом слое воды существуют кормовые цепочки, обуславливающие питание промысловых объектов. Фитопланктон по концентрации его пигмента хлорофилла-а является основным индикатором наличия потенциальной промысловой зоны. Его наличие можно контролировать по данным спутниковых наблюдений за поверхностью

морей. Зоопланктон привязан к полям фитопланктона и так же, как и фитопланктон, перемещается течениями. Наконец, нектон питается фито- и зоопланктоном и является подвижным объектом.

Для краткосрочного прогноза промысловых районов необходимо решение следующих задач:

- определение областей с необходимыми пищевыми ресурсами для конкретных промысловых объектов;
- построение признаков, сопутствующих рыбопромысловым скоплениям, и оценка вероятностей нахождения в заданном регионе скоплений конкретных РО;
- формирование оптимального управления промыслом мигрирующих РО в процессе путины по фактам обнаружения рыбопромысловых скоплений.

Развитие средств дистанционного зондирования океана и удешевление автономных необитаемых аппаратов открывают новые возможности по решению задач краткосрочного прогноза рыбопромысловых районов. При этом расширяется использование спутниковой информации посредством расчета взаимосогласованных полей параметров, строящихся по совокупности спутниковых данных и локальной информации от МРК. В качестве ключевых параметров рассматриваются биологические параметры воды (биомасса фитопланктона, концентрация хлорофилла-а и вид доминирующих водорослей). При этом также учитываются карты температуры поверхности океана и термические фронты, глубина перемешанного слоя, поверхностные течения и прочее.

Использование спутниковых карт совместно с показаниями эхолотов, расположенных на МРК, позволит получить данные о суточной вертикальной миграции нектона, которая наблюдается на эхограммах. Это позволит обнаружить районы высокой концентрации нектона для прогноза рыбопромыслового района для РО, питающегося в основном нектоном. Учет биологических особенностей РО позволит оценить перспективность кормовой зоны для вероятности обнаружения промысловых скоплений РО.

3. Использование информации от спутниковых систем и морских робототехнических комплексов для мониторинга морских рыбопромысловых районов

Современные проблемы рыбного промысла требуют разработки технических решений и методов для оперативного мониторинга рыбопромысловых районов моря и управления ресурсами океана. Новые подходы должны сочетать в себе возможности для наблюдения за большими акваториями и локальных морских измерений для получения регулярной и детальной информации о рыбопромысловых районах.

3.1. СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА РЫБОПРОМЫСЛОВЫХ РАЙОНОВ

Для мониторинга быстро меняющихся характеристик морской поверхности на огромных пространствах наилучшими источниками данных являются геостационарные и полярно-орбитальные спутники с пространственным разрешением изображений от 250 м до 70 км и частотой покрытия одной и той же территории от нескольких минут до суток. Необходимо использовать изображения во всех спектральных диапазонах: видимом, инфракрасном (ИК) и микроволновом (пассивное микроволновое зондирование). В Центре коллективного пользования регионального мониторинга окружающей среды ДВО РАН разработаны собственные оригинальные продукты для информационного обеспечения рыбопромысла, особенности которых излагаются ниже.

Важным базовым продуктом дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются карты температуры поверхности океана (ТПО). Карты ТПО позволяют выделить районы, комфортные для конкретного РО. Они показывают положения термических фронтов и их пространственно-временную изменчивость. Фронты являются естественным препятствием при миграции промысловых объектов, что способствует их концентрации. Спутниковый центр ДВО РАН располагает технологией расчета всепогодных ежедневных карт температуры поверхности океана (ТПО) на основе оценки наиболее вероятной температуры [8],

что обеспечивает четкие фронты (рис. 1). Строятся ночные, дневные, трехдневные и десятидневные карты. Альтернативные карты NASA (<http://ourosean.jpl.nasa.gov/SST/>) строятся на основе осреднения, что приводит к размыванию положения фронтальных зон на картах, построенных за несколько дней.

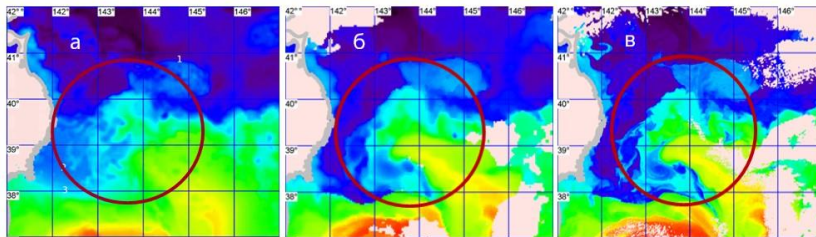


Рис. 1. Фрагменты карт ТПО (белым цветом выделены участки суши и облачность): а) суточная композиционная карта ТПО NASA за 15.03.2013; б) суточная композиционная карта ТПО Спутникового центра ДВО РАН за 15.03.2013; в) эталонная карта ТПО (одного сеанса сканирования) за 2013.03.15. Кругами выделена область сравнения термических структур композиционных карт с эталонным изображением

Биопродуктивность морей показывают карты концентрации пигмента фитопланктона хлорофилла-а (рис. 2а). И хотя прямой связи между концентрацией пигмента и рыбопромысловых объектов нет, карты позволяют очертить потенциальные кормовые районы, в которых наиболее интенсивно идет рост биомассы. Важно также знать интенсивность роста фитопланктона в различных районах. Это показывают карты удельной флуоресценции фитопланктона (рис. 2а), рассчитывающиеся как отношение высоты линии флуоресценции к концентрации хлорофилла-а. Удельная флуоресценция показывает интенсивность собственного излучения фитопланктона. Большие величины параметра говорят об избытке световой энергии, что часто связано с недостатками биогенов для роста микроводорослей, а малые указывают на интенсивный рост.

В замерзающих морях рыбопромысловые районы часто находятся на кромке льда и связаны с мелкомасштабными цир-

куляциями. Микроволновые карты льда имеют грубое пространственное разрешение. Композиционные карты льда (рис. 3), строящиеся по тем же принципам, что и ТПО, позволяют решить проблему облачности в зоне добычи РО.

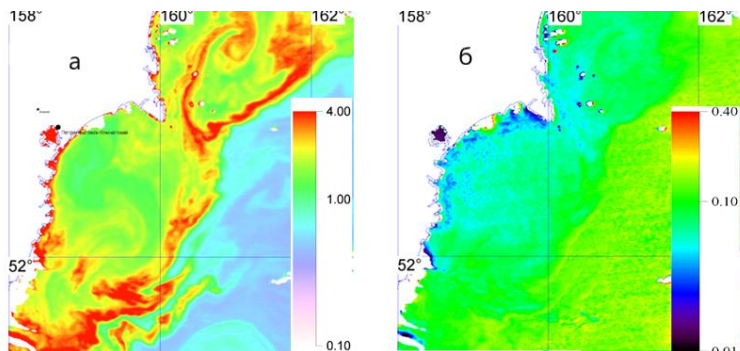


Рис. 2. а) Концентрация хлорофилла-а, юго-восток п-ва Камчатка за 9.09.2020; б) соответствующая удельная плотность флуоресценции фитопланктона

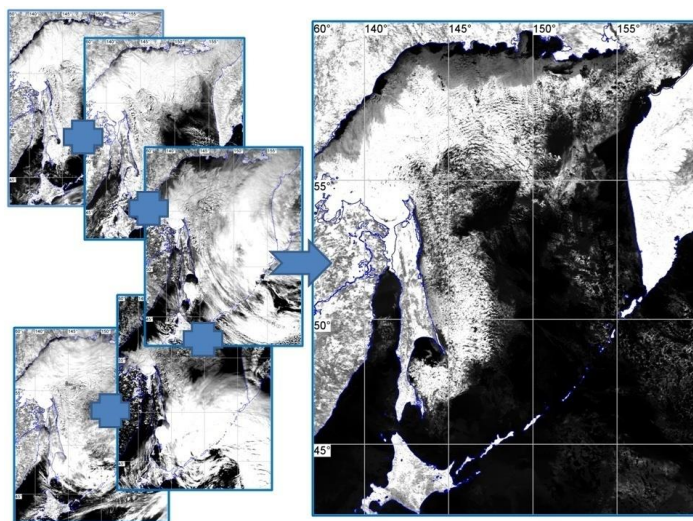


Рис. 3. Схема построения композиционной карты льда и получившаяся структура ледовых полей Охотского моря за февраль 2009 г.

В Центре создан и верифицирован оригинальный алгоритм расчета скоростей поверхностных течений по последовательности спутниковых оптических изображений [2]. Отличительной особенностью метода является расчет априорной точности векторов скорости, которая имеет высокую корреляцию с реальной точностью. Знание течений играет важную роль при краткосрочном прогнозе рыбопромысловых районов и управлении флотом на путине. Данный метод дает более детальные и более точные карты океанических потоков, чем альтиметрические наблюдения (рис. 4).

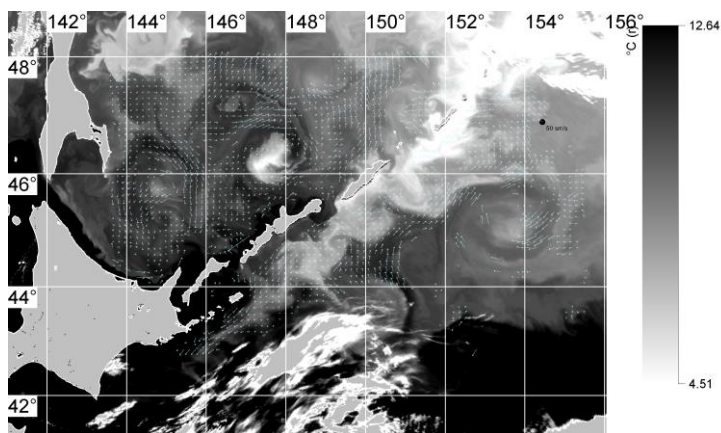


Рис. 4. Карта ТПО и скорости поверхностных течений за 10 октября 2019 г.

Из-за облачности скорости течений строятся не часто. Для оценки направлений течений разработан оригинальный алгоритм расчета доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК). ДОТК – это статистически значимые касательные к изотермам в заданной окрестности [3]. Они строятся на большей части акватории и показывают структуру потоков (рис. 5). Доказано, что ДОТК имеют корреляцию с направлениями реальных скоростей, превышающую 0,9. При прогнозировании рыбопромысловых районов важно знать положения циклонических вихрей. Они часто имеют более холодное ядро воды, которая прогревается на поверхности и имеет слабые контрасты.

При визуально-ручном дешифрировании ИК-изображений такие вихри часто пропускаются. ДОТК их обрисовывает, так как величина ДОТК определяется не величинами градиентов температуры на воде, а только ориентациями градиентов.

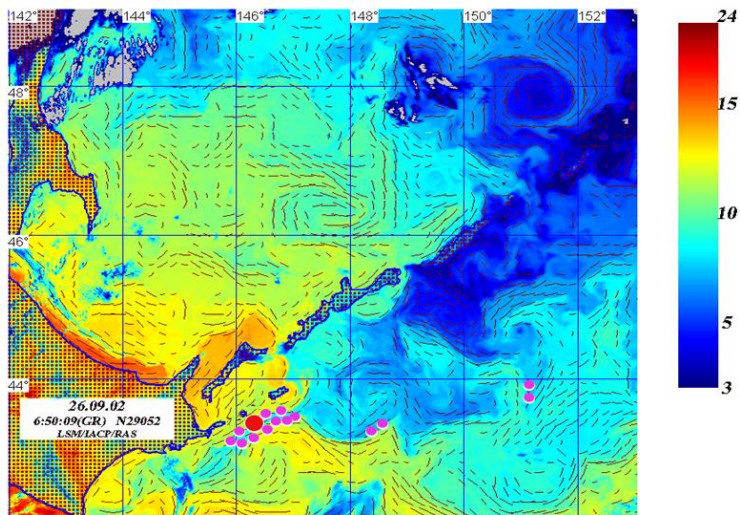


Рис. 5. Пример карты температуры, термических структур и уловов сайры за 2002 год. Кругами отмечены уловы. Красный кружок – максимальный улов

3.2. ПОДВОДНЫЕ ГЛАЙДЕРЫ

Подводный глайдер представляет собой автономный необитаемый подводный аппарат, который перемещается в вертикальном направлении посредством изменения плавучести и в горизонтальном – за счет крыльев и стабилизаторов, установленных на корпуса аппарата. Для связи аппарат использует систему сотовой или спутниковой связи. Сотовая связь функционирует вблизи берега, спутниковая связь используется при работе в открытом океане. В настоящее время наиболее известными являются три типа глайдеров: Seaglider разработан в Вашингтонском университете, Spray разработан в Scripps Institution of Oceanography и Slocum разработан Webb Research

Согр. В стадии испытаний находится подводный глайдер ФГБОУ ВО СПбГМТУ и АО «НПП ПТ «Океанос» [9] (рис. 6).



*Рис. 6. Подводный глайдер ФГБОУ ВО СПбГМТУ
и АО «НПП ПТ «Океанос»*

Глайдеры предназначены для измерения параметров воды и течений в процессе выполнения периодических наклонных траекторий. Основная идея использования глайдеров заключается в выполнении измерений в океане группами небольших и недорогих аппаратов. Одним из преимуществ использования такой группы является то, что можно варьировать их количество и плотность в зависимости от масштаба измеряемых процессов и необходимой детализации. Другим преимуществом использования группы глайдеров служит их мобильность, что позволяет отслеживать локальные перемещающиеся процессы.

Ограничения в использовании глайдеров для обследования заданных акваторий связаны, с одной стороны, с низкой скоростью движения, которая не превышает 0,5 м/сек, и их неспособностью выполнять заданные прямолинейные движения для равномерной площадной съемки из-за пилообразного характера их траекторий. С другой стороны, масса и энергопотребление полезной нагрузки для глайдеров существенно ограничены, что значительно сужает перечень пригодного для установки на них

оборудования только малогабаритными сенсорами с микропотреблением.

За последнее десятилетие за счет миниатюризации и существенного снижения энергопотребления в результате использования новых технологий в полезную нагрузку глайдера был включен широкий круг сенсорного оборудования, включая флуориметры, датчики растворенного кислорода, доплеровский профилограф (ADCP), датчики органических веществ и многое другое. Это позволило расширить использование одной и той же платформы, не ограничиваясь своей основной задачей – формированием профилей STD. Эти дополнительные датчики позволили провести новые исследования в таких областях, как мертвые зоны гипоксии, эволюция красных приливов и прочее.

Одной из областей исследований с потенциальным использованием глайдеров является управление рыболовством. Оценка рыбных запасов зависит от наборов данных, полученных в результате промысловых или независимых съемок, которые используются для установления ограничений на вылов. В восточной части Мексиканского залива многие экономически важные виды являются бентосными и обычно привязаны к предпочтительным типам местообитаний. Государственные, федеральные и академические группы координируют усилия по созданию оценок популяции для конкретных мест обитания, первым шагом которых является создание карт мест обитания для проведения визуальных исследований. Обычно это делается путем первоначального создания подробных батиметрических карт регионов и оценки типов дна с помощью видео и других методов для характеристики структуры морского дна, среды обитания и распределения биоты.

В течение последних нескольких лет в многочисленных исследованиях в данной области предпринимается попытка оценить популяции рыб, точность расположения, миграцию и другие важные характеристики, интегрировав пассивные акустические регистраторы, приемники телеметрии и рыболовные эхолоты в глайдер, выполняющий повторяющиеся разрезы в тестовом регионе. В работе [20] тестовым регионом был выбран искусственный риф – газопровод Gulfstream Natural Gas Pipeline, в значительной степени линейный объект между Тампа-Бей

и Мобил-Бей. Выборка была сезонной и сосредоточена на восточной части этого объекта между 30- и 50-метровыми изобатами на шельфе Западной Флориды. Во время экспериментов использовались акустические данные, собранные глайдером, для определения нескольких точек с высокой плотностью рыбы, для которых еще нет карт местообитаний с показателями численности рыбы.

3.3. БЕЗЭКИПАЖНЫЕ КАТЕРА

Безэкипажные катера находят все более широкое применение для решения множества задач, как в прибрежных акваториях, так и вдали от берега. Для обеспечения продолжительной работы безэкипажных катеров используется энергия ветра или морского волнения.

Безэкипажный катер Sailbuoy. В рамках научно-исследовательского проекта, описанного в докладе [17], была разработана и продемонстрирована концепция автономной системы поиска рыбы в пелагических промыслах. В безэкипажном катере Sailbuoy (рис. 7) с ветровой тягой требования конечных пользователей, включающие длительный срок службы, низкие эксплуатационные расходы и простоту развертывания и извлечения, были удовлетворены путем выбора коммерчески доступных системных компонентов с проверенной производительностью и надежностью, в том числе эхолот 200 кГц и встроенный бортовой компьютер. Безэкипажный катер Sailbuoy оборудован двухсторонней спутниковой связью Iridium. Специально разработанное программное обеспечение для бортовой обработки сигналов в реальном времени было реализовано вместе с программным обеспечением для сжатия данных, позволяющим передавать важную информацию в реальном времени по спутниковой линии связи.

Концепция была успешно проверена во время полевых испытаний разработанного прототипа в Норвегии в 2016 году, где удалось получить сжатые эхограммы, позволяющие наблюдать косяки норвежской весенней нерестовой сельди, отдельных рыб и морское дно на глубине до 280 м. Не наблюдалось ухудшения способности обнаруживать косяки рыбы из-за качки при волнении на море и значительной высоте волн до 1,5 м.



Рис. 7. Безэкипажный катер Sailbuoy

Разработаны и протестированы алгоритмы автоматического обнаружения морского дна и косяков рыб. Будущая работа включает улучшенную механическую интеграцию эхолота и внедрение возможности бортового автономного обнаружения косяков рыбы для уведомления конечного пользователя в режиме реального времени по спутниковой связи.

Волновой глайдер. Волновой глайдер, представляет собой безэкипажный катер, использующий энергию волн для поступательного движения за счет свободно поворачивающихся крыльевых движителей. Также в нем предусмотрено использование солнечной энергии для подзарядки бортовых аккумуляторов. Описание принципа работы волнового глайдера дано, например, в [1].

Волновой глайдер Wave Glider от компании Liquid Robotics имеет двухсекционную структуру (рис. 8). Надводная часть (поплавок) с литий-ионными батареями и солнечными панелями связана с подводным рулевым модулем кабелем длиной 8 м. Крылья подводного модуля совершают колебательные движения и придают надводной части скорость около 0,6 м/сек.



Рис. 8. Волновой глайдер Wave Glider от компании Liquid Robotics

Использование Wave Glider от Liquid Robotics может обеспечить мобильное и комплексное решение для обнаружения и слежения за скоплениями рыб или акустически помеченных животных в режиме реального времени и определения характеристик окружающей их среды. Wave Glider может следовать сложной траекторией, включающей серию путевых точек, фиксированных направлений или активного пилотирования. Благодаря пассивному характеру двигательной установки Wave Glider SV2 производит очень низкий уровень акустического шума, важного для обнаружения морских животных.

Возможные способы повысить информативность глайдера включают интеграцию других типов и вариантов датчиков. Одним из таких датчиков может быть эхолот, буксируемый или

установленный непосредственно на поплавке Wave Glider. Этот датчик сможет обеспечить съемку вертикального профиля в толще воды и выявление скоплений РО. На основе полученных данных можно оценить массу РО и выявить присутствие пелагических хищников. Другим возможным датчиком может быть пассивный гидрофон, способный обнаруживать морских млекопитающих или звуки, издаваемые самими рыбами. В работе [13] рассмотрено использование Wave Glider от Liquid Robotics для обеспечения мобильного и комплексного решения задачи обнаружения и слежения за помеченными гидробионтами в режиме реального времени.

Волновой глайдер, разработанный в ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет, представлен в работе [18].

3.4. МОРСКОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС МАРК, ВКЛЮЧАЮЩИЙ АВТОНОМНЫЕ НЕОБИТАЕМЫЕ ПОДВОДНЫЙ И ВОДНЫЙ АППАРАТЫ

Морской автономный робототехнический комплекс (МАРК) [7], в состав которого входят автономные необитаемые подводный и водный аппараты (АНПА и АНВА) (рис. 9), был разработан в научно-образовательном центре (НОЦ) «Подводная робототехника», образованном на основе ДВФУ и ИПМТ ДВО РАН. Для комплекса созданы системы программного управления и навигации, которые обеспечивают совместную работу разнородных аппаратов в группе. В состав оборудования берегового центра управления входят пост оператора и навигатора комплекса, а также рабочее место для оперативной обработки получаемой информации.

Одним из главных достоинств комплекса МАРК является то, что для его работы не требуется обеспечивающего судно – он может запускаться с берега и самостоятельно возвращаться на береговую базу. Потенциально АНВА может транспортировать АНПА к месту работы и обеспечивать его навигационную привязку (рис. 10).



Рис. 9. Морской автономный робототехнический комплекс МАРК



Рис. 10. Комплекс МАРК: АНВА транспортирует АНПА

После доработки, АНВА также сможет обеспечить периодическую подзарядку АНПА за счет энергии, получаемой от солнечных панелей и собственного аккумуляторного источника (рис. 11).



Рис. 11. Комплекс МАРК: АНВА с солнечными панелями

Возможен способ применения комплекса МАРК, когда АНВА самостоятельно обеспечивает решение задачи обнаружения и слежения за скоплениями РО и определения характеристик окружающей их среды, а АНПА используется для уточнения размеров и состава особей обнаруженного скопления. При этом он в автоматическом режиме отделяется от буксирующего его АНВА, погружается на указанную глубину, выполняет заданную миссию и возвращается к носителю.

4. Методы поиска и отслеживания скоплений РО с использованием БЭК и глайдеров

Рассмотрим задачу поиска скоплений РО на заданной акватории на основе использования группы БЭК, оснащенных соответствующим эхолотационным оборудованием. Предположим, что необходимо обследовать перспективный по спутниковым данным район на предмет наличия малоподвижных рыбопромысловых скоплений.

Предлагаемый алгоритм обследования включает два этапа. На первом этапе область предполагаемого нахождения скоплений РО разбивается на число частей в соответствии с количеством имеющихся БЭК. Сформированные области распределя-

ются между БЭК и организуется покрытие каждой области горизонтальным меандром с шагом h между галсами. Шаг h выбирается равным половине размера минимальной области, которая может рассматриваться как скопление РО. На основе произведенных всеми БЭК измерений создается список точек пересечения границ скоплений РО. В данных точках траектории БЭК пересекают линии, соответствующие заданному порогу плотности РО. На основе данного набора точек грубо формируются связные области скоплений РО и оценивается их количество.

На втором этапе организуется детальное обследование выделенных скоплений РО с целью уточнения их размеров и местоположения. Для формирования траектории движения БЭК вдоль границ областей скоплений РО используется кусочная аппроксимация границы на основе точек пересечения границы. После окончания двумерного оконтуривания очередного скопления РО, выполняется оценка его объема и 3D формы. Это производится путем анализа эхограмм, полученных всеми БЭК, принимавшими участие в оконтуривании данного скопления РО.

При групповой работе БЭК необходимо обеспечить автоматическое планирование совместных действий. В общем случае под планированием понимается процесс выработки последовательности действий, позволяющий выполнить поставленную задачу. В случае планирования действий группировки БЭК этот процесс состоит из нескольких частей. При этом необходимо произвести «декомпозицию цели», разбив её на задания. Затем следует выработать последовательность выполнения заданий для каждого БЭК. Среди всех планов требуется выбрать тот, который минимизирует некоторый функционал (например, суммарный пробег всех БЭК). Наконец, следует осуществлять контроль над выполнением плана и его корректировку в случае возникновения непредвиденных ситуаций.

Задача составления плана сходна с задачей о назначениях или нескольких странствующих коммивояжёрах (multiple travelling salesman problem (MTSP)), для которой существуют методы получения как точных, так и приближённых решений, которые описаны, например в [21]. Один из алгоритмов, который доставляет точное решение задачи, основан на идее дина-

мического программирования и представляет собой модификацию алгоритма Хельда – Карпа, решающего задачу коммивояжера (TSP). Среди алгоритмов, доставляющих приближенное решение, но работающих более оперативно в реальном времени, широкое практическое распространение получил алгоритм, представляющий собой модификацию аукционного метода для централизованного планирования. В данном случае все имеющиеся задания упорядочиваются. Каждое очередное задание во всех вариантах выполнения добавляется к уже существующему частичному плану каждого БЭЖ. Аппарат, имеющий минимальную стоимость частичного плана после вставки нового задания, объявляется выигравшим «аукцион», и задание назначается ему. Алгоритмы группового поведения МРК в задаче обследования локальных неоднородностей морской среды рассмотрены, например, в [10].

Рассмотрим применение группы простейших БЭЖ типа Wave Glider на примере сайровой путины. Сайра – скоростная, мигрирующая рыба, обитающая в приповерхностном слое воды с температурой 8–14°C. Промысел в дальневосточном районе обычно ведется в районе Курильских островов и южнее. При миграции сайры выбирает попутные течения, что приводит к повышению ее концентрации и сужению зоны поиска. Скорость перемещения косяка сайры по прямой составляет около 80 км за сутки. При переходе термического фронта сайра останавливается и привыкает к новой температуре воды. Поэтому термические фронты в зоне ее миграции служат индикаторами возможного наличия промысловых скоплений. Осенняя миграция проходит по ветвям течения Ойясио. Ширина ветвей – около 100 км. Ветвей не более трех. Спутниковые карты (рис. 5) дают их положение и позволяют оценить наиболее вероятные пути миграции сайры [4].

На рис. 12 показан циклический осмотр заданной ветви течения с помощью группы из N БЭЖ с целью обнаружения скоплений РО. Предположим, что минимальный линейный промысловый размер скопления РО составляет $L = 1$ км. При указанной выше прямолинейной скорости движения скопления РО $V_{PO} = 80$ км/сутки, оно будет проходить отрезок, длиной L за время $T = 0,3$ часа.

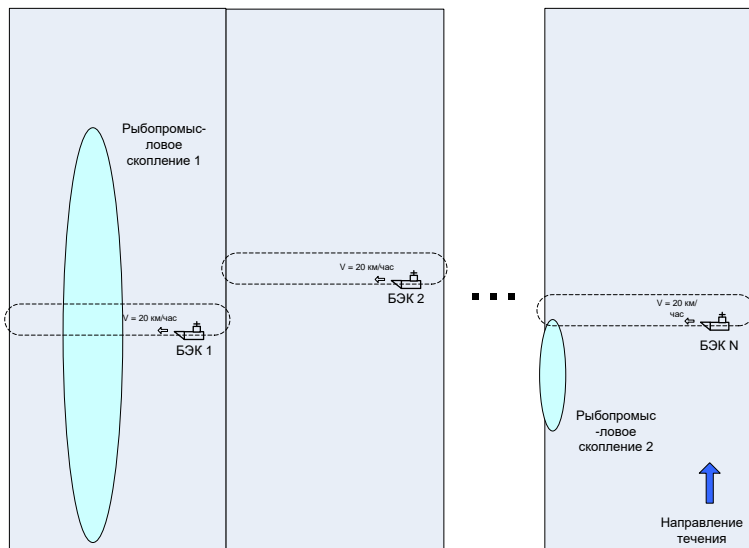


Рис. 12. Циклический осмотр заданной ветви течения с помощью группы из N БЭК с целью обнаружения скопления РО

Предположим, что скорость движения БЭК составляет $V_{БЭК} = 20$ км/час. Рассмотрим случай, когда БЭК оснащен простым эхолотом, обеспечивающим обнаружение скопления РО под аппаратом в заданном диапазоне глубин. Для того, чтобы не пропустить данное скопление РО, группа из N БЭК должна за время T пересечь ветвь течения шириной $H = 100$ км хотя бы один раз. При этом минимальное количество БЭК, необходимых для выполнения поставленного задания, равно: $N = H / (T * V_{БЭК}) \approx 17$. В случае, когда БЭК оснащен высокочастотным гидролокатором бокового обзора (ГБО), обеспечивающим полосу обзора под аппаратом шириной 200 метров, количество БЭК N_1 , необходимых для выполнения поставленного задания, будет равно: $N_1 \approx 14$.

В последнее время в безкипажном режиме все чаще используются маломерные катера, которые могут оснащаться достаточно габаритным и энергопотребляющим гидролокационным рыбопоисковым оборудованием. Например, установленный на маломерный катер рыбопоисковый гидролокатор кругового

обзора MAQ-22 RDT обеспечивает обнаружение скопления РО массой 1 т на расстоянии 2,6 км. В этом случае для решения поставленной выше задачи потребуется три таких катера.

Районы, в которых обнаружены скопления планктона, также можно обследовать на наличие малоподвижных рыбопромысловых скоплений с помощью глайдеров, оснащенных малогабаритными фотокамерами или эхолотами. В связи с их неспособностью выполнять заданные прямолинейные движения для равномерной площадной съемки из-за пилообразного характера их траекторией, возможно организовать с их помощью сканирование заданной акватории нерегулярной сеткой галсов для дальнейшей аппроксимации измерений в узлах прямоугольной сетки с целью удобного для анализа представления их в виде графиков или карт.

5. Заключение

Использование морских робототехнических комплексов (МРК) для промысловой разведки косяков пелагических рыб являются более экономичным средством, чем рыболовецкое судно с экипажем. Регулярное и сканирование заданных акваторий позволит значительно удешевить поиск и отслеживание рыбопромысловых скоплений и повысит его эффективность, а также повысит рентабельность добычи мелких рыбопромысловых скоплений. Экономическая эффективность технологии поиска зависит от конкретных задач и объектов рыбного промысла. Следует отметить, что оснащение МРК может быть выбрано для решения конкретных задач, что также понизит стоимость конечного решения. Использование группы МРК позволиткратно увеличить площадь покрытия и значительно уменьшить время поиска.

Комплексный подход состоит в следующем. На основе спутниковых данных целесообразно осуществлять предварительную оценку расположения рыбопромысловых районов. Эта информация может использоваться для указания МРК мест поиска, которые отправляются в отмеченные места и автоматическом режиме осуществляют эхолокационное сканирование толщи воды на предмет обнаружения рыбопромысловых скоплений

с точным указанием мест их обнаружения. При этом вся информация оперативно передается рыболовным судам. В дальнейшем МРК либо продолжает отслеживание обнаруженных косяков, либо по окончании работ в данном районе переходит или доставляется в следующий район работ.

Литература

1. АГЕЕВ М.Д. *Концепция автономного подводного аппарата, использующего солнечную энергию и энергию морского волнения* // Подводные исследования и робототехника. – 2008. – №2. – С. 4–15.
2. АЛЕКСАНИН А.И., АЛЕКСАНИНА М.Г., КАРНАЦКИЙ А.Ю. *Автоматический расчет скоростей поверхностных течений океана по последовательности спутниковых изображений* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т.10, №2. – С. 131–142.
3. АЛЕКСАНИНА М.Г. *Автоматическое выделение поверхностных структур океана по инфракрасным данным спутников NOAA* // Исследование Земли из космоса. – 1997. – №3. – С.44–51.
4. АНТОНЕНКО Д.В., НОВИКОВ Ю.В. *О нагульных миграциях сайры в северо-западной части тихоого океана* // Известия ТИНРО. – 2017. – Т. 188. – С. 115–124.
5. БАЙТАЛЮК А.А., КУЗНЕЦОВ М.Ю., КУЛИК В.В., САМКО Е.В. *Современные информационные технологии в краткосрочном прогнозировании рыбного промысла* // Морские информационно-управляющие системы. – 2015. – №2.
6. БОЧАРОВ Л.А. *Системный анализ в краткосрочном рыбопромысловом прогнозировании*. – Л.: Наука, 1990. – 208с.
7. ГОЙ В.А., ДУБРОВИН Ф.С., КУШНЕРИК А.А., МИХАЙЛОВ Д.Н., СЕРГЕЕНКО Н.С., ТУФАНОВ И.Е., ЩЕРБАТЮК А.Ф. *Морской робототехнический комплекс, включающий автономные необитаемые подводный и водный аппараты* // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – №3. – С. 67–72.
8. ДБЯКОВ С.Е., КАЧУР В.А. *Построение композиционных карт температуры поверхности океана, ориентированных на сохранение термических структур* // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – 2016. – Т. 13, №2. – С. 84–94.

9. ЗАНИН В.Ю., МАЕВСКИЙ А.М., КОЖЕМЯКИН И.В. *Использование морской робототехники в задачах оперативной океанографии: отечественный и зарубежный опыт* // Морские информационно-управляющие системы. – 2020. – №1.
10. ТУФАНОВ И.Е., ЩЕРБАТЮК А.Ф. *Разработка алгоритмов группового поведения АНПА в задаче обследования локальных неоднородностей морской среды* // Управление большими системами. – 2012. – Вып. 36. – С. 262–284.
11. ЯРЖОМБЕК А.А. *Образ жизни и поведение промысловых рыб.* – М.: ВНИРО, 2016. – 200 с.
12. BELKIN I.M. *Remote Sensing of Ocean Fronts in Marine Ecology and Fisheries* // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13. – 883. – 34p.
13. CARLON R. *Tracking Tagged Fish Using a Wave Glider* // Proc. of the MTS/IEEE Conf. OCEANS-2015, Washington.
14. CHARNOV E. *Optimal Foraging, the Marginal Value Theorem* // Theoretical population biology. – 1976. – Vol. 9. – P. 129–136.
15. CHASSOT E., BONHOMMEAU S., REYGONDEAU G., NIETO K. et al. *Satellite remote sensing for an ecosystem approach to fisheries management* // ICES Journal of Marine Science. – 2011. – Vol. 68, No.4. – P. 651–666.
16. COLLINS G., TWINING D., WELLS J. *Using Vessel-Based Drones to Aid Commercial Fishing Operations* // Proc. of the MTS/IEEE Conf. OCEANS-2017, Aberdeen.
17. HAUGE R., PEDERSEN G., KOLLTVEIT E., MICHELSEN CH. *Fish finding with autonomous surface vehicles for the pelagic fisheries* // Proc. of the MTS/IEEE Conf. OCEANS-2016, Monterey.
18. https://samgtu.ru/uploads/science/volnovoy_glayder.pdf (дата обращения: 02.07.2022).
19. KLEMAS V. *Fisheries applications of remote sensing: An overview* // Fisheries Research. – 2013. – Vol. 148. – P. 124–136.
20. LEMBKE CH., MANN D. F., SILVERMAN A., GRAY J. *Utilizing Gliders and Acoustics to Identify Fish Habitat Hotspots* // Proc. of the MTS/IEEE Conf. OCEANS-2018, Charleston.
21. *The Travelling Salesman Problem and Its Variations* / Eds.: G. Gutin, A.P. Punnen]. – Springer, 2002. – 830 p.

ON MONITORING OF MARINE FISHING AREAS USING SATELLITE DATA AND INFORMATION FROM MARINE ROBOTIC SYSTEMS

Anatoly Aleksanin, Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS, Vladivostok, Far Eastern Federal University, Vladivostok, D.Sc., Chief Researcher (aleks@iacp.dvo.ru).

Alexander Scherbatyuk, Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS, Vladivostok, Far Eastern Federal University, Vladivostok, D.Sc., Chief Researcher, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (alex-scherba@yandex.ru).

Abstract. Satellite data provide a significant amount of information for assessing fishing areas, and modern autonomous uninhabited surface and underwater vehicles make it possible to conduct commercial reconnaissance, collecting information about both bottom aquatic organisms and the presence of schools of pelagic fish. Their use increases the efficiency of the search for fishing aggregations by estimating the volume of aggregations and the size of fish. The use of such systems in commercial fishing will significantly reduce the load on fishing vessels by obtaining knowledge about fishery objects from the above systems, as well as reduce the impact on the environment by reducing fuel consumption during their search. The article deals with the problem of providing short-term fishing forecasts. There are two tasks of organizing an effective fishery: the assessment of promising areas and the search for fish concentrations. To solve them, the use of a combination of satellite remote sensing and autonomous robotic systems is considered.

Keywords: autonomous robotic systems, satellite monitoring of the ocean, short-term fishing forecast.

УДК 551.46.077+556.04+ 639.2.053

ББК 26.221

DOI: 10.25728/ubs.2022.100.11

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии В.Г. Лебедевым.*

Поступила в редакцию 02.07.2022.

Опубликована 30.11.2022.