

Использование спутниковой информации для мониторинга термодинамических условий океана и выделения районов, благоприятных для концентрации пелагических рыб и кальмара

Е.В. Самко, Н.В. Булатов, В.М. Петрук – ФГУП «ТИНРО-Центр»

Как известно, океанологические наблюдения производятся для того, чтобы знать возможно ближе к реальности, в каком состоянии находится изучаемый район океана, какие процессы в нем протекают. С некоторого времени, особенно после проведения гидрофизических полигонов и открытия синоптической изменчивости океана, океанологам стало ясно, что одних только судовых наблюдений недостаточно для того, чтобы следить за процессами, происходящими на обширных акваториях в океане.

Спутниковые наблюдения с их высоким пространственно-временным разрешением, регулярностью получения, равномерным обзором обширных акваторий и низкой стоимостью по сравнению с судовыми данными представляются весьма важным дополнением к судовым наблюдениям, способным дать информацию с достаточной подробностью на больших акваториях (например, СЗТО и дальневосточные моря). При этом, принимая во внимание наблюдающуюся в последнее десятилетие тенденцию к уменьшению океанологической информации, полученной контактными методами, являвшейся ранее основной при диагнозе и прогнозе условий обитания гидробионтов, роль и значение спутниковой информации (СИ), поток которой, учитывая новые виды СИ, значительно увеличился, существенно возрастают. Некоторые технологии дистанционного зондирования могут применяться в любую погоду и позволяют осуществлять круглогодичный мониторинг по любому району Мирового океана, обеспечивая надежными данными о состоянии океана любого заинтересованного пользователя на регулярной основе. Это позволяет с оптимизмом смотреть на перспективу использования СИ в качестве основы для диагноза и прогноза фоновых условий открытой части океана и дальневосточных морей.

В то же время у спутниковой информации есть и минусы по сравнению с судовыми данными. В отличие от судовых контактных измерений до значительных глубин спутниковые наблюдения – это косвенные измерения интенсивности излучения в различных диапазонах спектра, прошедшего в атмосфере сотни километров и искаженного влиянием атмосферы (озон, водяной пар и др.). Причем непосредственно излучающей является поверхностная пленка океана толщиной в сотые доли миллиметра, температура которой может существенно отличаться от температуры на глубине 1 м.

Облачность непрозрачна для видимого и ИК-излучений, и ее присутствие в элементе разрешения (пикселе) делает полученные значения непригодными для океанологического анализа. По признанию специалистов, даже использование нескольких мето-

дов фильтрации облачности не позволяет полностью устранить ее влияние. Недостатком экспертного (визуального) метода анализа данных является и трудность его формализации.

Для радиодиапазона длин волн облачность почти полностью прозрачна. Но и зондирование в радиодиапазоне является косвенным измерением и имеет свои проблемы. Например, при пассивном зондировании с помощью СВЧ-радиометров интенсивность собственного излучения водной поверхности значительно слабее, чем в ИК-диапазоне, и значит, пространственное разрешение СВЧ-радиометров гораздо меньше, чем ИК-радиометров. Альтиметрические данные отображают рельеф поверхности океана через различие времени прохождения радиолокационного луча, отраженного поднятиями и впадинами океанской поверхности, т.е. также требуют специфической обработки. В связи с вышеизложенным становится ясно, что первостепенной задачей являются валидация и океанологическая интерпретация полученной спутниковой информации.

В ТИНРО-Центре спутниковая информация используется свыше 30 лет. Большую часть времени это были ИК- и ТВ- (видимый диапазон) изображения, принятые в аналоговом режиме. Для их интерпретации были подобраны практически все гидрологические станции и разрезы, квазисинхронные (± 1 сут.) со спутнико-

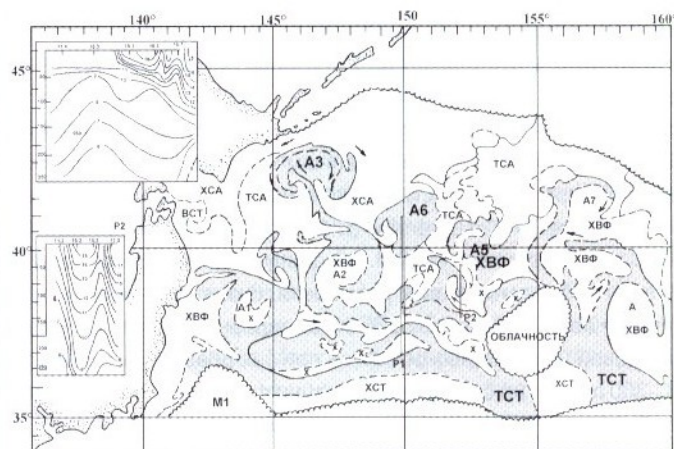


Рис. 1. Карта термической структуры поверхности океана: САВ – субарктические воды; ТВФ – теплые; ХВФ – холодные воды фронтальной зоны; ХСА – холодные САВ; ТСА – теплые САВ; ВФЗ – воды фронтальной зоны; ТВФ – теплые ВФЗ; ХВФ – холодные ВФЗ; СТБ – субтропические воды; ТСТ – теплые СТБ; ХСТ – холодные СТБ; Т – теплые; Х – холодные участки; А – антициклонические; С – циклонические вихри; О1, О2, О3 – ветви Ойясио; ВСТ – воды Сангарского течения

выми данными. Кроме того, проводились специальные спутниковые наблюдения, которые дали наиболее интересные результаты. Выполненные работы позволили получить представление о типичной трехмерной структуре не только крупномасштабных океанических образований, таких как течения, теплые и холодные ринги течений и их фронты (структура которых была известна из классической океанологии), но и средне- и даже мелкомасштабных образований – таких как стримеры и «вихри закручивания» на границах течений (Булатов Н.В. *Особенности формирования циклонических меандров и вихрей в зоне Субарктического фронта*// Исслед. Земли из космоса, 1982, № 3, с. 53–58; Булатов Н.В. *О структуре и динамике полос теплых вод севернее Субарктического фронта*// Изв. ТИНРО, 1980, Т. 104, с. 50–57; Булатов Н.В. *Спутниковые наблюдения взаимодействия вихрей с течениями*// Дистанционные исследования океана. Владивосток: ТИНРО, 1990, с. 32–44). Подобные работы проводились и зарубежными исследователями. Результаты дешифровки изображений представлялись в виде карт фронтологического анализа (рис. 1).

В последние годы в получении и использовании спутниковых данных произошли существенные изменения. Во-первых, у ТИНРО-Центра появилась возможность получать ИК-изображения высокого разрешения (около 1 км) в ложных цветах с температурной шкалой, обеспечивающей достаточную точность определения ТПО. Это позволяет значительно уточнить характеристики выделяемых районов; изучать не только адвективную (положение и перемещение фронтов, течений и вихрей), но и локальную составляющие переноса тепла. Например, проследить изменения температуры теплых рингов по мере их продвижения к северу.

Вторым обстоятельством является возможность получения альтиметрических данных об уровне океана. Значительно усовершенствованный метод спутниковых измерений (альтиметрические измерения) позволяет с постоянной периодичностью картировать топографию поверхности океана. Спектр возмущений высоты морской поверхности, измеряемый с борта искусственного спутника Земли, включает в себя почти все физические процессы – от капиллярных и ветровых волн до изменений уровня моря, обусловленных бароклинностью морской воды и глобальными изменениями климата.

Отметим, что уровень океана можно рассматривать как интегральный показатель интенсивности термодинамических процессов, отражающих абиотические условия обитания и распределения промысловых организмов (Фукс В.Р. *Спутниковая альтиметрия в промысловой океанографии*// Вопросы промысловой океанографии. Вып. 1. М.: ВНИРО, 2004, с. 126–146). Уровень океана является более показательным предиктором абиотических условий, чем температура воды, так как он отражает термодинамические условия всей толщи, а не только поверхности океана; дает более адекватное описание течений, вихрей, зон апвеллинга и даунвеллинга; напрямую связан с изменчивостью атмосферных условий.

Как правило, для определения особенностей динамических процессов на основе спутниковой альтиметрии используются данные об аномалиях уровня океана, которые являются отклонением от среднего уровня за весь период наблюдений. Использование альтиметрической информации позволяет получить выраженную нестационарную составляющую поля скорости и практически не учитывает стационарную составляющую. Таким образом, на картах, построенных по этим данным, должны быть отражены меандрирование течений и различные типы вихрей, т.е. те динамические процессы, которые ответственны за внутрисезонную и внутригодовую изменчивость динамики вод.

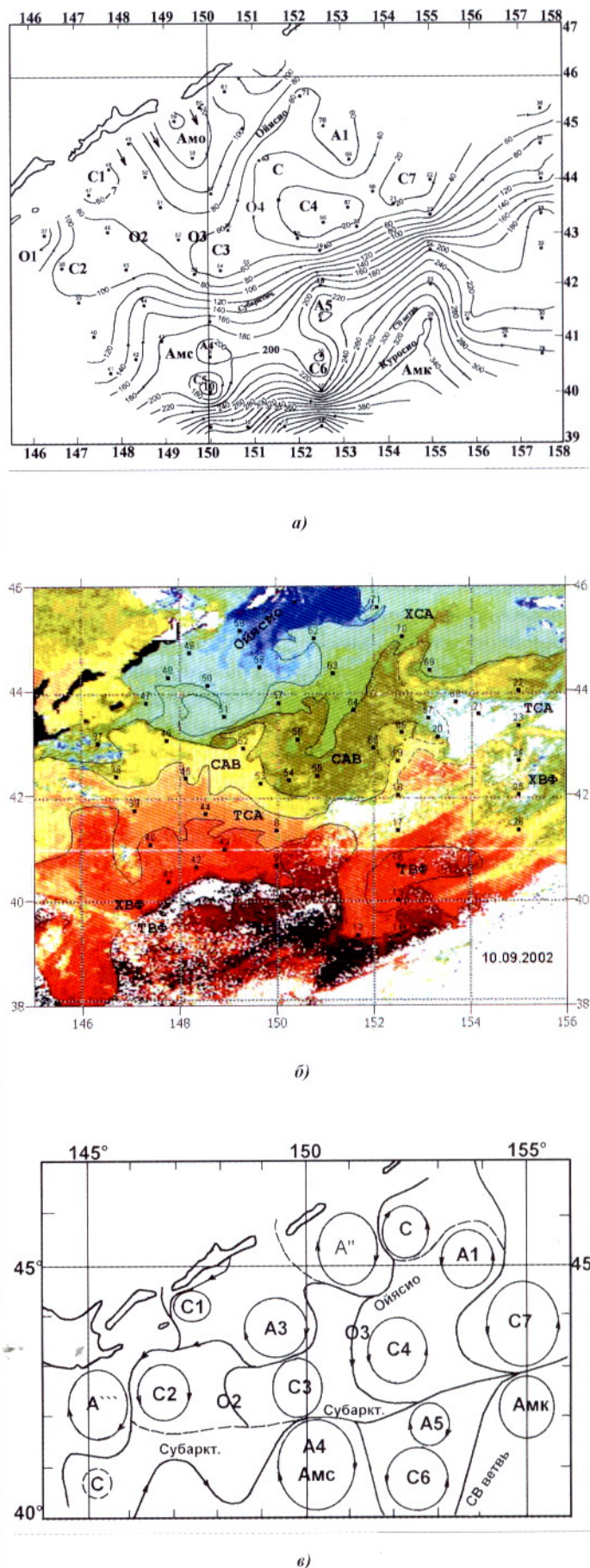


Рис. 2. Карта динамической топографии: по данным судовых наблюдений (а); ИК-изображение в ложных цветах (б); схема течений и вихрей по альтиметрическим данным (в). (Условные обозначения те же, что и на рис. 1)

Следует отметить, что альтиметрическая информация является для нас новым видом СИ. В связи с этим встает вопрос соответствия различных типов информации: ИК, альтиметрической, судовой. Совместный анализ судовых данных, полученных на НИС «Профессор Леванидов» в Южно-Курильском районе и зоне Субарктического фронта (съемка 21 июля – 10 августа 2002 г.), и спутниковых (ИК и альтиметрических) показывает, что, несмотря на различия во времени наблюдений и пространственно-временном разрешении, отмечается их достаточно хорошее соответствие (рис. 2, а, б).

ИК-изображения дают наиболее подробное представление о распределении ТПО и динамических образованиях в поверхностном слое океана. На них получили отображение почти все динамические образования, выделенные на карте динамической топографии, за исключением тех, которые оказались между гидрологическими станциями или еще не сформировались к моменту съемки. Как обычно, циклонические вихри были выражены как малоградиентные, слабоупорядоченные области и лишь отдельные из них имели вихреобразные очертания (Булатов Н.В., Самко Е.В., Петрук В.М. *Отображение океанических образований на спутниковых ИК-изображениях при разновременных наблюдениях*// Тез. докл. семинара «Математическое моделирование и информационные технологии в исследованиях биоресурсов Мирового океана». Владивосток, 2004, с. 46–47).

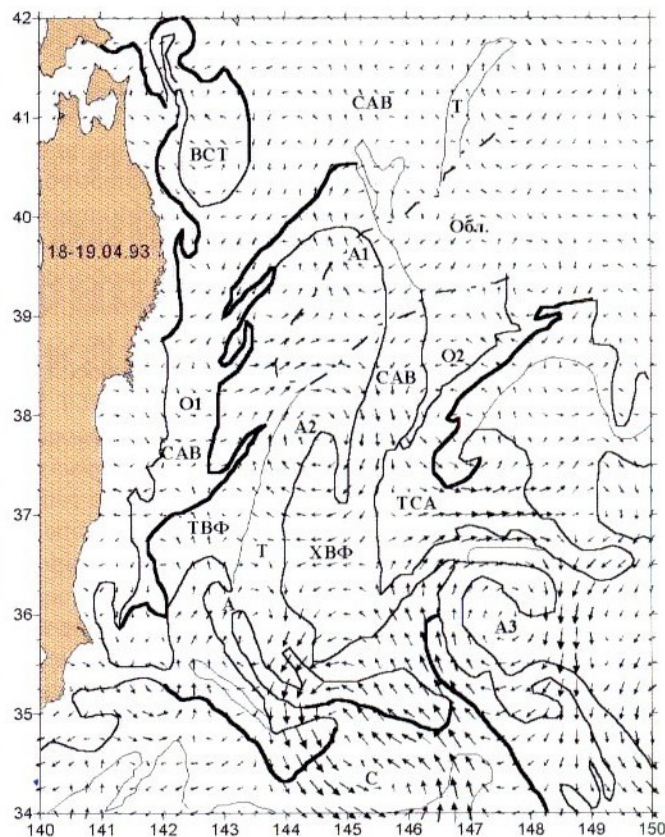
В поле течений, рассчитанных по альтиметрическим данным, как и следовало ожидать, практически не выделялись указанные выше течения, но вихревые образования проявлялись достаточно хорошо. Слабее и менее устойчиво выделялись циклонические вихри в прибрежной зоне, что, очевидно, связано с влиянием приливов. Если объединить наиболее устойчиво (ежедекадно) выделяющиеся в поле течений образования, то получится схема течений, подобная карте динамической топографии, где роль постоянных течений выполняют цепи секторов определенных вихрей (рис. 2, в).

Сравнение карт фронтологического анализа с картами течений, рассчитанных по альтиметрическим данным (за 1992 – 1993 гг.) для субарктической фронтальной зоны с большими термохалинными контрастами и скоростями течений (Петрук и др., 2004), позволило проследить, как при движении вихря в западном направлении деформируется фронт Куроисио, приспособляясь к полю течений (рис. 3).

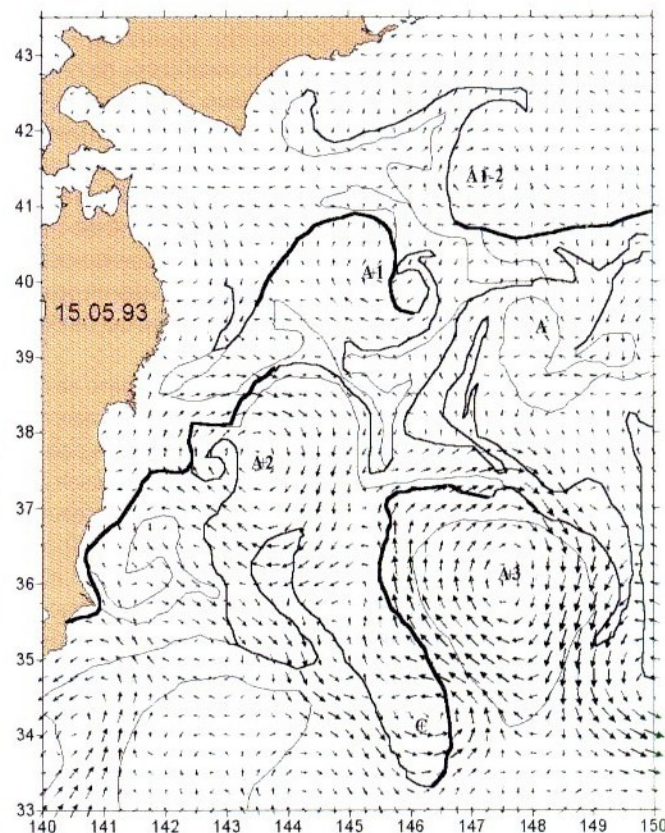
При анализе этих видов СИ в некоторых случаях наблюдается несоответствие термических фронтов полю течений. Так, в осенне-зимний период в зоне северо-восточной ветви Куроисио наблюдалось отступление фронтов к югу, в то время как вихри продолжали перемещаться к северу. На наш взгляд, это явление можно объяснить воздействием на поверхность океана зимнего муссона, сдерживающего или даже сдвигающего верхний слой в противоположном движению вихря направлении.

Таким образом, используемая в ТИНРО-Центре СИ достаточно точно отображает термодинамические процессы, происходящие в океане, и должна в полной мере использоваться при их мониторинге. Применение для этих целей цифровых ИК и альтиметрических данных позволяет проследивать более полно, нежели по одному виду наблюдений, термические и динамические характеристики наблюдаемых образований.

Говоря о спутниковом мониторинге, нельзя не упомянуть о мониторинге ледовых условий. Спутниковые данные дают детальную пространственную информацию о ледовой обстановке на исследуемой акватории. Обзорность наряду с оперативностью являются одним из основных преимуществ такой информации. Технические возможности съемочных систем на борту спутника TERRA позволяют получать синтезированные изобра-



а)



б)

Рис. 3. Деформация термических фронтов вихревыми образованиями, определенными по альтиметрическим данным. Течения, рассчитанные по альтиметрическим данным (стрелки); термические фронта на поверхности океана по результатам дешифровки ИК-изображений, полученных с ИСЗ NOAA: обостренные (толстые линии), умеренные (средние), слабые (тонкие линии). (Условные обозначения те же, что на рис. 1)

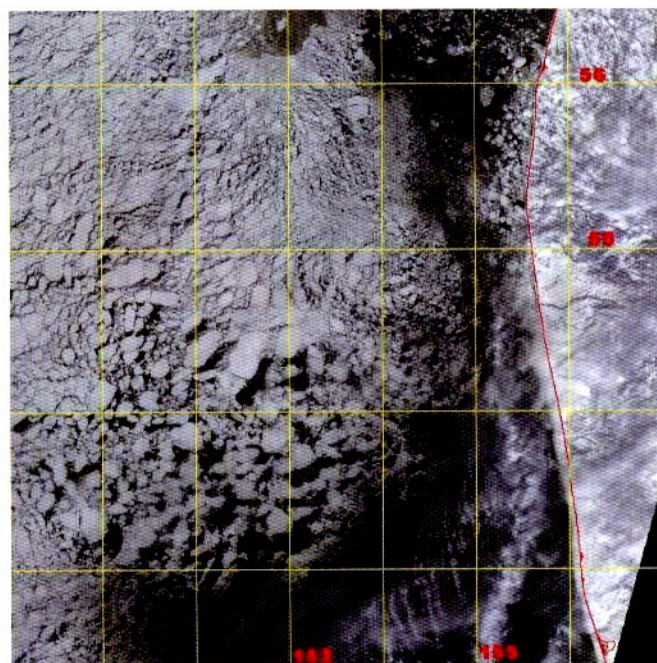
жения высокой информативности с пространственным разрешением 350 м. Учитывая достаточную точность привязки и дешифровки спутниковых данных, возможные ошибки представления положения кромки льда или зон тяжелого льда много меньше среднеквадратического отклонения этих величин, а ошибки фиксирования полей сплоченности, возраста и форм льда не превышают одного балла (рис. 4).

Список получаемых в результате анализа параметров включает в себя подробные сведения о сплоченности, возрасте и формах льда, а также о деформационных процессах в ледяных массивах (сжатие – разряжение льда) и (в весенний период) о разрушенности льда. Благодаря четкости контрастов синтезированных изображений спутников серии NOAA можно определить ряд геометрических показателей пространственного распределения льда: кромку, каналы, разводья, завихренность, заснеженность.

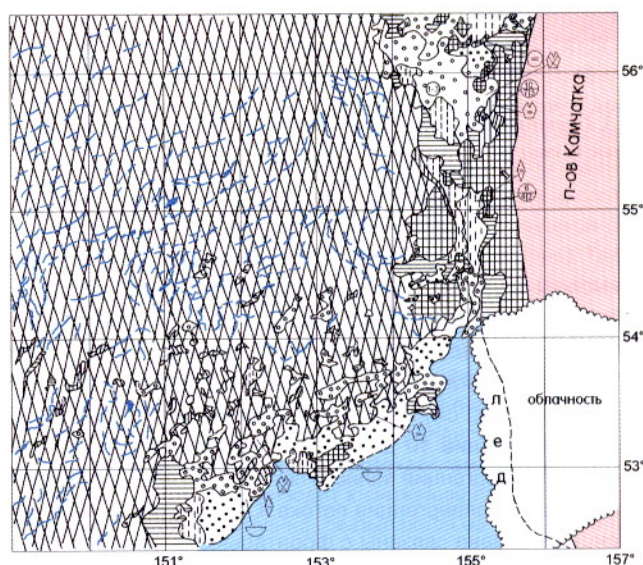
Уже в эпоху аналоговой СИ начались работы по выделению океанологических образований, благоприятных для концентрации пелагических рыб (сайры, сардина, скумбрия). Адекватными спутниковым были данные системы «РИФ» (дата, координаты, улов). Нужно подчеркнуть, что приуроченность скоплений рыб к фронтальным зонам, фронтам известна давно. Однако фронтальные зоны и фронты имеют протяженность в сотни и тысячи миль, а промысловые скопления образуются на весьма ограниченных участках. В данном случае речь идет именно о выделении этих участков акватории. В настоящее время вместо данных системы «РИФ» нами используются данные ежедневных промысловых планшетов с промысла сайры. Как обычно, районы промысла воспринимались как участки, благоприятные для формирования промысловых концентраций рыб, хотя это верно лишь при равномерном обследовании обширных районов.

Наиболее продуктивные районы можно разделить на следующие группы. Прежде всего это прибрежные апвеллинговые районы у берегов о. Кунашир и островов Малой Курильской гряды. Они хорошо известны и, с точки зрения дистанционного зондирования, наименее интересны. Вторую группу составляют циклонические вихри закручивания – слева от первой ветви Ойясио и на субарктическом фронте (рис. 5, а). Неслучайно в свое время им уделялось значительное внимание и в зарубежной литературе. Разновидностью районов этого типа являются периферии более крупных циклонических вихрей и циклонические вихри в южных частях восточных ветвей Ойясио. Следующий тип районов промысла сайры – интрузии вод фронтальной зоны в субарктические воды (рис. 5, б, центральная часть). В вершине таких интрузий часто наблюдаются мезомасштабные циклонические вихри. Все эти образования характеризуются интенсивным горизонтальным и вертикальным перемешиванием вод. Причем непосредственное наличие обостренного фронта необязательно.

К исследованиям этого направления относится и совместный анализ распределения промысла кальмара Бартрама у Южных Курил и данных спутниковой альтиметрии, целью которых являлось определение динамических условий, благоприятных для образования промысловых скоплений кальмара (Самко Е.В., Капштер А.В., Слободской Е.В. Совместный анализ распределения промысла кальмара Бартрама и данных спутниковой альтиметрии// Тез. докл. IX Всерос. конф. по проблемам рыбного промыслового прогнозирования. Мурманск, 2004, с. 273–274). Рассмотрев данные контрольных обловов кальмара Бартрама дрейфтерными сетями, выполненных в летне-осенний период 1998 – 2002 гг., и распределение аномалий уровня океана по альтиметрическим картам Колорадского Центра аэродинамических исследований, можно утверждать, что между топографией уровня поверхности океана и формированием



а)



б)

Условные обозначения

Сплоченность льда: - 9-10; 7-8; 6-4; - 1-4; - >1

- кромка льда; - граница плавающего льда; - каналы; - разводья

Формы плавучего льда:

- мелкобитый лед; - большие поля; - крупнобитый лед; - обширные ледяные поля; - обломки ледяных полей;

Применение графических символов:

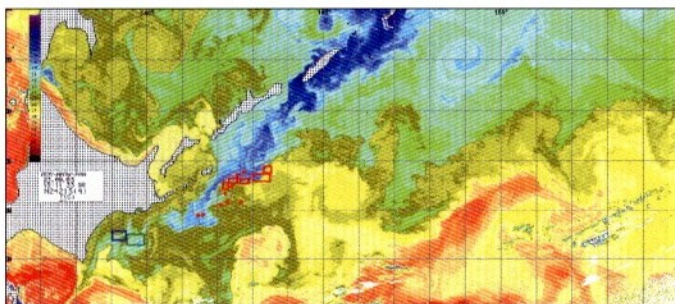
- серый; - белый; - серо-белый; - средней толщины (70-120 см);

Обобщенные характеристики льда:

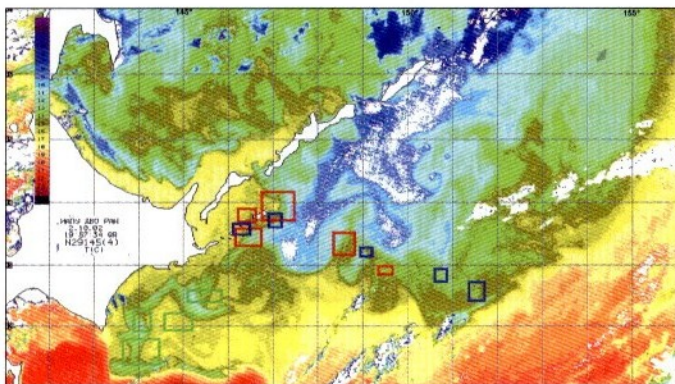
- сплоченность в баллах; - возрастной состав дрейфующих льдов: 10 - общая сплоченность; 6 - количество более старого льда; 4 - количество более молодого льда;

2 - заснеженность льда;

Рис. 4. Спутниковое изображение (NOAA) ледовой обстановки на Юго-Западном шельфе Камчатки (район промысла минтая) за 18.03.2002 г. (а); карта ледовой обстановки на юго-востоке Охотского моря (б)



а)



б)

Рис. 5. Спутниковое ИК-изображение в ложных цветах и районы промысла сайры: ■ – российским; ■ – японским; ■ – корейским флотами

промысловых участков кальмара Бартрама имеется зависимость, которую хорошо иллюстрирует рис. 6: на нем приведены диаграммы распределения суммарных уловов (кг на 100 м сетей), число результативных постановок в зависимости от величины аномалий (ζ , см) за предшествующие 10 дней. При отрицательной тенденции происходит дивергенция полного потока, в то время как при положительной – конвергенция потока. Области повышенной дивергенции в океане связаны с фронтальными зонами и интенсивным апвеллингом, определяющим, как правило, высокую общую биологическую и промысловую продуктивность, а области конвергенции течений обуславливают скопления кормового планктона и планктоноядного нектона.

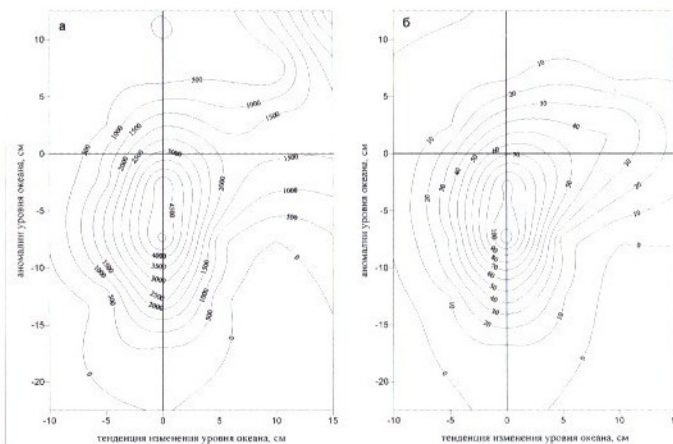


Рис. 6. Зависимость суммарных уловов (кг/100 м сетей) кальмара Бартрама (а) и числа результативных постановок (б) в 1998 – 2002 гг. от величины аномалий уровня океана и тенденции изменения уровня океана

Хорошо видно, что максимальные величины как по суммарным уловам, так и по числу результативных постановок отмечаются при слабоотрицательных значениях отклонений уровня от равновесия (до -10 см), чаще всего на склонах циклонов, в областях дивергенции полного потока, близкой к нулю ($\Delta\zeta \approx 0$). При этом исследование показало, что наибольшая вероятность удачного проведения промысловых операций с удовлетворительным и более высоким результатом присуща акваториям с такими же уровнями характеристиками.

Аналогичные работы были проведены и для сайрового промысла (Старицын Д.К., Филатов В.Н., Фукс В.Р. Основы использования спутниковой альтиметрической информации для оценки океанологических условий промысла сайры// Изв. ТИНРО, 2004. Т. 137, с. 398–408), причем их результаты уже нашли свое применение при оперативном управлении флотом на промысле сайры.

Использование данных альтиметрических измерений, введенное в практику в 2002 г. и применяемое с самого начала промысла, позволило существенно ограничить район поиска новых, перспективных для промысла скоплений сайры. При этом вдвое сократились как количество задействованных в поиске судов, так и временные затраты флота на обнаружение скоплений сайровых косяков в океанических районах и перевод туда промысловой экспедиции.

