

ЭЛЕМЕНТЫ СТРУКТУРЫ И ЭВОЛЮЦИИ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ ПОДВОДНЫХ ГОР ЭРИМО — ТАКУЙЁ: ДИСТАНЦИОННЫЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Дарницкий В. Б., Булатов Н. В. (ТИНРО-Центр)

На основе анализа карт космических изображений океана к востоку от Японии в ИК-диапазоне за 1979-1982, 1985-1988 гг., дешифрованных в ТИНРО, а также редких океанографических измерений восстановлены некоторые главные особенности горизонтальной структуры вихревых систем над кластером подводных гор Эримо, Такуйё и двух безымянных и их эволюции в синоптическом и сезонном диапазонах. Привлечены также другие доступные источники информации для рассмотрения вертикальной структуры вод этой вихревой системы. В период последней в XX в. волны численности сардины-иваси здесь наблюдались повышенные концентрации ее промыслового запаса, что подтверждается анализом данных из функционировавшей в те годы системы мониторинга промыслов РИФ.

Первая работа по анализу океанографии Субарктического фронта в СЗТО с применением спутниковой информации была опубликована в 1975 г. (Максимихин, Фукс, 1975). В 1976 г. в ТИНРО была организована лаборатория космических методов исследования океана. Насколько популярны были новые технологии наблюдений из космоса ясно по тому факту, что с января 1980 г. стал выходить академический журнал «Исследования Земли из космоса».

Настоящая статья является продолжением работ по изучению океана космическими средствами, история которых излагалась ранее (Булатов, 1984; Булатов и др., 1995; Булатов, 2000).

Вихрь Эримо, как локализованный над подводными горами объект, ранее не изучался. Однако он попадал в поле зрения исследователей как один из теплых вихрей Субарктического фронта, и во многих публикациях виден на приводимых иллюстрациях именно в этом районе, например, в работах (Лобанов, 1981; Ильичев и др., 1991; Булатов, Обухова, 2003; Муауке et al., 1985). Мы же здесь основное внимание обращаем на влияние кластера подводных гор на вихри топографического генезиса и в соответствии с этим даем название вихрю (вихрям) по одноименному названию подводной горы Эримо. Самого этого термина до сих пор в научной литературе не было, поскольку «не было» этого объекта исследований, как такового.

Ранее в Атлантике при помощи серии свободно дрейфующих буев достоверно удалось установить существование антициклонических вихрей, формировавшихся при взаимодействии потока с подводными горами Углового поднятия. При этом наблюдалось соответствие горизонтальных масштабов вихрей и подводных поднятий. Буи совершали

вращательные движения по часовой стрелке со средней скоростью около 30 см/с, а максимальная скорость достигала 135 см/с. Диаметр вращения вихрей изменялся от 40 до 100 км (Richardson, 1980).

Течение Ойясио, как известно, сопровождается интенсивной генерацией вихрей вдоль Курильской гряды (Фукс и др., 1997; Дарницкий, Булатов, 1997; Дарницкий, Лучин, 1997; Рогачев, Гогина, 2001). Струйный поток Ойясио обладает также хорошо выраженными бифуркационными свойствами (Дарницкий, Булатов, 1998, 2000).

Бифуркация Ойясио обычно наблюдается между 40°-42° с.ш., 144°-147° в.д. на площади около 21600 кв.миль. Именно в этом «квадрате» расположен кластер подводных гор: г. Эримо (40°52 с.ш., 144°50 в.д.) высотой 3 км, ее вершина поднимается до 4 тыс.м; г. Такуйё (41°20 с.ш., 146°06 в.д.) высотой 4 км, вершина поднимается до горизонта 3 тыс.м. Восточнее этих гор (40°35 с.ш., 146°50 в.д.) расположена безымянная подводная гора высотой 4.5 км с вершиной на горизонте 1500 м. Севернее нее (41° с.ш., 146°50 в.д.) расположена вершина четвертой горы этого кластера высотой 2.5 км с вершиной на горизонте 3500 м (Geological Map of Japan, 1978). Географический "центр тяжести" кластера подводных гор расположен в районе 41° с.ш., 146° в.д. Здесь также обычным является периодическая генерация антициклонов различного масштаба или стационарирование вихрей, движущихся с юга (Лобанов и др., 1991), их горизонтальные размеры изменяются от 60-80 до 120-140 миль. В случае спиральных вращений вод больших масштабов вокруг этих подводных гор общее пространство с вихревым движением охватывало площадь около 57600 кв.миль. В таком случае кластер подводных гор воздействует на поле течений как одна подводная гора, суммирующая в себе топографические параметры четырех подводных гор. Судя по площади антициклонической завихренности, кластер подводных гор в три раза усиливает его воздействие на поле масс по сравнению с одиночной горой (Дарницкий, Бомко, 2002).

Акватория океана к югу и востоку от Японии, с особым акцентом на Южный Циклонический Меандр Куроисио (ЮЦМК), в течение многих лет интенсивно изучается традиционными океанографическими методами (Нелезин, Манько, 1999). ДВНИГМИ получены климатические и межгодовые особенности океанографии этого района. В ТИНРО значительные успехи достигнуты при анализе спутниковых материалов и традиционных океанографических наблюдений (Булатов, 1995, 2000) на синоптических масштабах.

На ИК-изображениях выделяются почти все основные динамические образования, существующие как элементы структуры вод, которые в главных чертах подтверждаются данными океанографических съемок (Булатов, Дарницкий, 1994, 1998). В

то же время сравнение многочисленных спутниковых изображений поверхности океана и данных судовых наблюдений показывают, что на ИК-изображениях хорошего качества могут быть обнаружены также термические фронты с градиентами не менее $1^{\circ}\text{C}/\text{км}$, но на большинстве изображений заметны в основном более значительные контрасты температуры воды. Поэтому, в однородных водных массах за пределами фронтальных зон судовые съемки отражают, как правило, более сложное вихревое поле с большим количеством разномасштабных вихрей, чем можно видеть на ИК-изображениях. По этой же причине ветви возвратного противотечения Куроисио не всегда видны на ИК-изображениях, в то время, когда они хорошо проявляются на картах динамической топографии. Напротив, некоторые необычные формы меандров Куроисио, например, грибовидные, обнаружены только благодаря наличию ИК-изображений, если в это время формируются достаточные термические градиенты. Например, грибовидная форма меандра Куроисио, ориентированная вдоль 135°в.д. , была обнаружена на спутниковом снимке. Ножка огромного гриба от его основания в потоке Куроисио до шляпки у побережья о. Хонсю распространялась от $28^{\circ}\text{-}29^{\circ}$ с.ш. Эту волно-вихревую структуру можно трактовать как подветренную волну Россби, — в такой оригинальной форме в этом районе она ранее не наблюдалась (Дарницкий, Булатов, 2000).

Не менее важные элементы динамики можно обнаружить на спутниковых снимках и в районе северной ветви Субарктического фронта (Дарницкий, Булатов, 2002).

Материалы и методика наблюдений

Основные особенности строения Субарктического фронта СЗТО по океанографическим наблюдениям установлены более 30 лет тому назад (Булгаков, 1972; Куроисио..., 1972; Покудов, Вельяотс, 1976 и др.). Библиография по этому вопросу давно уже превысила многие сотни работ с освещением различных аспектов изучения природы и структуры фронта, однако динамику внутренних структур фронта по этой информации определить не представлялось возможным, поскольку указанные работы основывались на усреднении данных наблюдений.

В настоящей работе использовались результаты визуального дешифрирования ИК- и ТВ-изображений океана, полученных с американских ИСЗ «NOAA». На ИК-изображениях свободной от облачности поверхности океана термические фронты выделялись как узкие зоны или линии резкого скачкообразного изменения яркости тона. На изображениях хорошего качества обычно выделяются контрасты светового тона с градиентами ТПО $1\text{-}2^{\circ}\text{C}$. По результатам дешифрирования строились карты фронтологического анализа или карты термической структуры поверхности океана. На

них идентифицируются струйные течения, океанические фронты, вихри различного происхождения, теплые и холодные интрузии. Данные судовых наблюдений использовались как реперные. Подробное изложение методики приводится в «Рекомендациях...» (Булатов, 1984). Аналогичная методика дешифрирования снимков использовалась и американскими океанологами (Новогрудский и др., 1978).

Данные спутникового мониторинга, публиковавшиеся ТИПРО (для внутреннего пользования) в выпусках «Гидрометеорологических и промысловых бюллетеней основных районов промысла» (№ 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 33, 37, 38, 39, 40, 41 за 1985 г.), и более редкие наблюдения за период с 1979 по 1982 и 1986, 1987-1988 гг. использованы в зависимости от их дискретности и качества снимков.

Результаты наблюдений

Исходя из наличия космических снимков в 1985 г. вихревая зона в районе гор Эримо и Такуйё впервые была зафиксирована 22-24 марта*. Субарктические воды к востоку от о. Хоккайдо расклинивались грибовидной структурой более холодных фронтальных вод, в которой по обе стороны от «гриба» наблюдалось взаимопротивоположное вращение теплых, присоединенных к телу гриба, вод. Горизонтальный масштаб этой перемежающейся вихревой триады имел размеры $3 \times 2^\circ$, в центре которой расположены подводные горы (Рис. 1 А), инициировавшие вихревую динамику вод над ними.

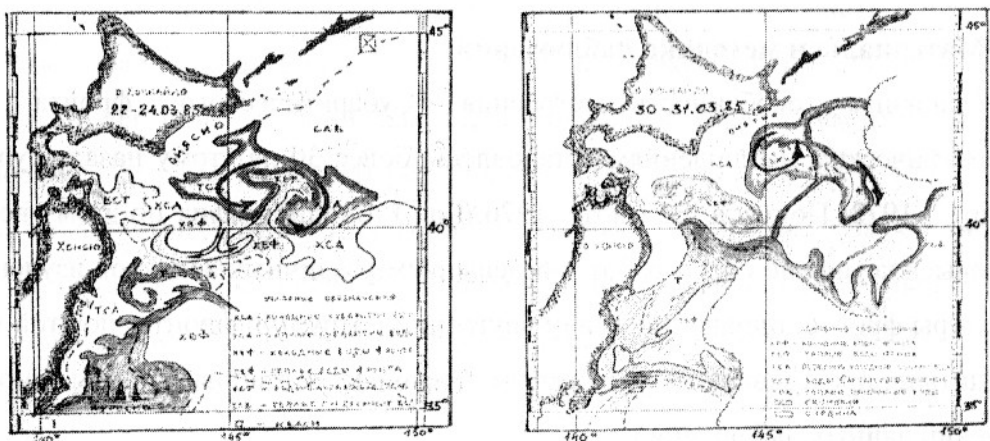


Рис. 1. Фрагменты космических изображений Субарктического фронта вблизи Японии в период 22-24.03 (А) и 30-31.03.1985 г. (Б).

Направления вращения вод в вихревой системе показано жирными стрелками.

Через неделю увеличились размеры шляпы «гриба», при этом его внутренняя структура включала холодные воды с циклоническим вращением слева от оси (ножки)

* Указание дат анализировавшихся снимков поверхности океана подразумевает их отсутствие между описываемыми в хронологическом порядке наблюдениями.

гриба, справа наблюдались теплые воды антициклонического вращения. Подпитка «гриба» происходила в стриммерах холодными водами с севера на юг и теплыми, – с юга в противоположных струях (Рис. 1 Б), заметных на снимке в виде «рукавов» протяженностью 100-120 миль.

В апреле облачные поля не позволили судить о форме вихря. На космическом снимке за 1-2 мая антициклонический вихрь, заключавший теплую воду, значительно уменьшился в размерах (в 2 раза), сохраняя южный стриммер в виде хвоста, соединявшего его с питающей водной массой, располагавшейся к югу от 39° с.ш. Центр вихря имел координаты $\approx 41^\circ$ с.ш., 145° 35 в.д.

9-10 мая по данным дешифровки космических снимков ИСЗ NOAA район гор Эримо характеризовался бифуркацией, где в причудливом сочетании наблюдались грибовидные вихри различной ориентации и стриммеры различных направлений. При этом зона вихревых взаимодействий вновь увеличилась, превышая по площади квадрат $3 \times 3^\circ$ (32 400 кв.миль). Вихрь лекалообразной формы наблюдался с восточной стороны от гор Эримо. К 17 мая на этой площади произошло слияние и укрупнение фрагментов вихревых взаимодействий вод и в результате образовался теплый крупномасштабный грибовидный вихрь.

В летний период океан над районом гор Эримо был закрыт облачностью. В осенний период (3-4 ноября) над горами Эримо наблюдался крупномасштабный эллипсовидный вихрь с холодным ядром диаметром около 60 миль – размер всего антициклона был по малой и большой осям эллипса около 150-200 миль соответственно.

Через месяц - 5 декабря антициклон обрамлялся с запада и востока облачностью. Центр его с однородными теплыми водами располагался над горами Эримо. Размеры вихря были около 180 миль. 11-15 декабря на снимке был виден только СЗ фрагмент вихря, который не был закрыт облаками. Через неделю – снимок (за 20-22 декабря) отразил уменьшение горизонтального размера вихря по осям до 100 x 160 миль. Сохранялась теплая водная масса внутри вихря. Еще через неделю (30 декабря 1985 г.) на снимке была видна только восточная половина вихря, свидетельствующая о его незначительной эволюции.

В 1986 г. принято только 8 снимков, на которых был отчетливо виден вихрь Эримо. Он начал прослеживаться в зимний период с 7-9.02.1986. Антициклон имел концентрированную форму с ответвлениями струй по его периферии, свидетельствующих о вращении вод по часовой стрелке. В конце марта (27.03.1986) ветвистость антициклона усилилась и изменилась его горизонтальная структура, он увеличился в размерах и имел перемежающиеся теплые и холодные кольца вод, вращающиеся по часовой стрелке. Антициклон, особенно его северный фронт, сместились к югу, что, вероятно, было

вызвано усилением северных ветров (Куренная, 1990). В начале апреля (3-6.04.1986) вихрь Эримо состоял из двух ядер – к главному вихрю с юга присоединился вихрь меньшего масштаба. Эта сдвоенная структура состояла из вод (полос) различного происхождения – субарктических и вод зоны смешения. К середине апреля (17.04.1986) система эволюционировала, увеличивая площадь, охваченную вихревым движением.

Максимального развития вихрь Эримо достиг 8-10 мая, сохраняя ветвистость обрамления (7 ветвей). Тело вихря состояло из теплых вод зоны смешения – размер эллипса вдоль большой оси достиг 300 миль, которая была ориентирована параллельно о.Хоккайдо. В начале третьей декады (21-23 мая) вихрь уже имел холодное ядро, на которое в виде полос накручивались теплые воды фронта. Источник этих вод почти на всех снимках был виден в виде рукава теплых вод, поступавших в вихрь с юга.

К концу мая (28.05.1986) вихрь имел спиралевидную структуру из чередующихся теплых и холодных полос вод, вращавшихся вокруг теплого ядра (Рис. 2А). В середине июня резко усилились поступления теплых вод и вихрь приобрел асимметричную форму с большим количеством теплых вод в южной половине вихря. Ядро же вихря на этот раз состояло из холодных вод течения Ойясио, поступавших к центру вихря с севера (Рис. 2 Б).

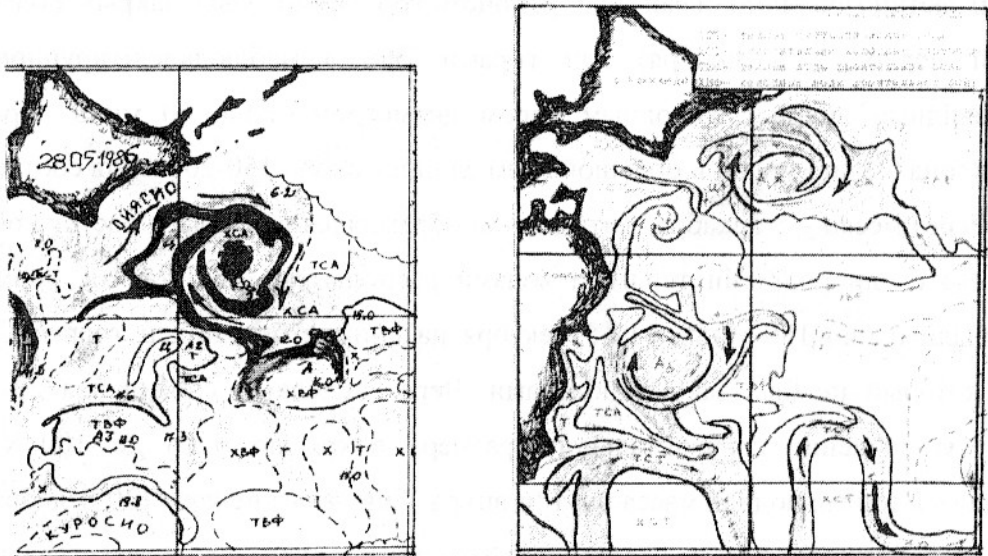


Рис. 2. Фрагменты космических изображений Субарктического фронта вблизи Японии в период 28.05 (А) и 13-15.06.1986 г. (Б).

На рис. 2А видна сдвоенная спиралевидная структура вихря Эримо.

На некоторых снимках были также видны вихри и у центральной (относительно о.Хонсю) группы гор (Рис. 2Б). Однако более регулярный характер имел на космических снимках топографический вихрь Эримо, периодически изменявший термическую структуру ядра.

Из 14 снимков поверхности океана, полученных в 1987 году, вихрь Эримо-Такуйё, наблюдался только на 7 снимках в периоды: 12.03, 25.03, 3-4.04, 6.04, 17-18.04, 7-8.12 и 26.12. 1987 г. Эволюцию вихрей можно было наблюдать только на снимках с середины марта, в течение апреля и, частично, в декабре. Начало формирования вихря Эримо было заметно на снимке от 12.03.1987 по массе теплых вод (10°) диаметром 60 x 100 миль, дислоцированной над подводными горами. Окружающие субарктические воды имели более низкую температуру $6-8^\circ$. В конце марта (25.03.1987) вихрь был образован из второго меандра Куроисио к востоку от Японии, на что указывало направление ножки грибовидной структуры, по которой к центру поступали теплые воды с юга. Из примечательных особенностей можно отметить существование кучевого облака над теплой шляпкой «гриба». Образование облачных структур над теплыми вихрями было замечено ранее Булатовым (Булатов, Обухова, 2003). Гриб имел температуру $6-8^\circ$ в районе шляпки и 11° в рукаве гриба, соединявшего его с меандром Куроисио. Окружавшие гриб субарктические воды имели температуру $2-4^\circ$. Из-за больших градиентов температуры гриб был хорошо очерчен на космическом снимке термическими фронтами различной интенсивности. Через неделю 3-4.04.1987 г. произошла существенная трансформация вихревого поля: вместо одиночной грибовидной структуры наблюдалась цепочка из 3-х антициклонов, соединявшихся между собой струйными рукавами. Центральный антициклон наблюдался над кластером подводных гор. На космическом снимке хорошо была видна система рукавов, по которым проходила подпитка антициклонов теплыми водами Куроисио и Субарктического фронта (Рис. 3А).

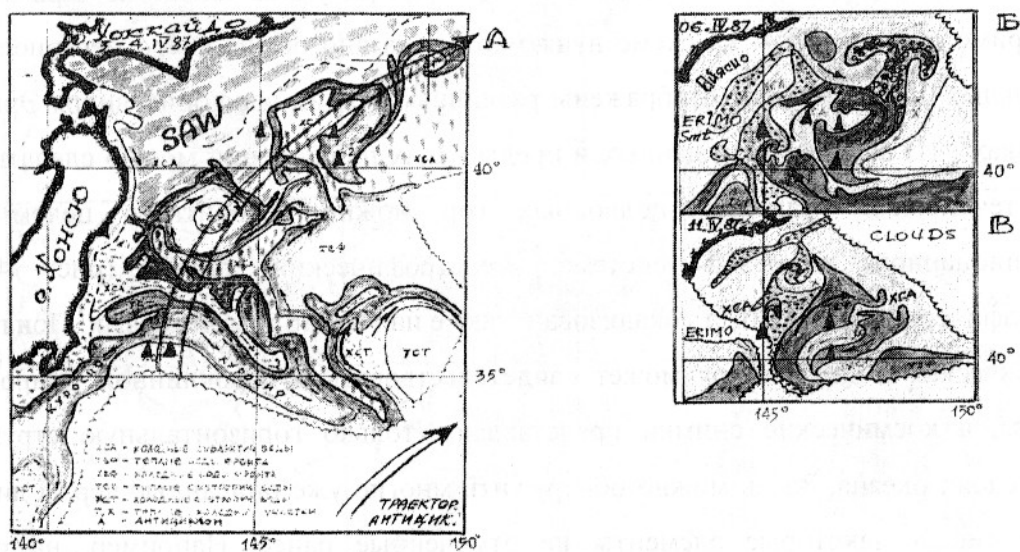


Рис. 3. Фрагменты космических изображений Субарктического фронта вблизи Японии в период 3-4.04 (А), 6.04. (Б) и 11.04 (В) 1987 г.

Через 2 дня на снимках без облачности наблюдалось разветвление вихревых структур на грибовидные и хаотические фрагменты, которые продолжали менять свою структуру до 11.04.1987 в районе гор Эримо и Такуйё (Рис. 3Б,В).

В этот же период проводили наблюдения в ТОИ ДВО РАН, используя данные ИСЗ (типа «Космос-1500») по зондированию природной среды с помощью радиолокационной станции бокового обзора (Митник и др., 1989). Практически синхронные РЛ- и ИК-изображения были получены ими 15.04.1987 г. Эти и другие вихри также отслежены в указанном районе. Авторам удалось определить ширину тепловодной спирали, которая менялась от 5 миль в хвосте до 25-30 миль в центре круговорота. Еще через неделю 17-18.04.1987 г. вихрь представлял собой антициклоническую структуру, состоящую из полос различной формы с различными термическими характеристиками. В летний период облачные поля не позволили наблюдать поверхность СЗТО.

В начале декабря 7-8.12.1987 г. вихрь имел почти круговую форму с волнистыми обводами и подпитывался с юга теплыми водами фронта. В конце декабря 26.12.1987 г. вихрь Эримо имел овальную, близкую к круговой, форму с подпитывающим рукавом из системы теплых вод Сангарского течения. С ним взаимодействовали стримеры субарктических вод различной формы. Южнее вихря наблюдался антициклон над центральной группой гор, подпитка которого происходила водами Куроисио по рукаву, соединявшему его с первым меандром Куроисио.

На рис. 4 представлены спутниковые изображения с дискретностью в основном 2-4 месяца и схема геострофических течений восточнее северной части о. Хонсю в период с апреля 1979 по март 1982 г. Как видно из этой серии рисунков только на первом снимке вихрь Эримо отсутствует – на схеме пунктиром показано обычное его местоположение. На остальных 10-ти снимках отображены различные стадии эволюции вихря Эримо (А1 на рисунках). Из анализа этих данных и предыдущих наблюдений можно сделать вывод, что о течениях у кластера подводных гор можно говорить в целом как о квазистационарной вихревой системе. Геострофический вихрь (рис. 4.2) на океанографической съемке был локализован также над подводными горами. Понятно, что геострофическая модель вихря может свидетельствовать о бароклинной природе этой структуры, а космические снимки представляют только горизонтальную структуру в верхних слоях океана. Здесь можно обнаружить многие уже описанные черты динамики вихря Эримо и некоторые элементы не отмеченные ранее. Например, на рис. 4.9 наблюдался выброс теплых вод из вихря в северном направлении. Аналогичные результаты представлены за 2000-2001 гг. в работе (Булатов, Обухова, 2003). Однако, в большинстве случаев, наблюдается жесткая локализация вихря Эримо над кластером подводных гор без видимых движений в северном направлении. Данные работ (Булатов,

Лобанов, 1983; Lobanov, Vulatov, 1993; Козлов, Гурулев, 1994; Рогачев, Гогина, 2001) свидетельствуют о том, что теплые вихри следуют вдоль Курильской гряды, по крайней мере, до ее середины, и реже – до п-ва Камчатка.

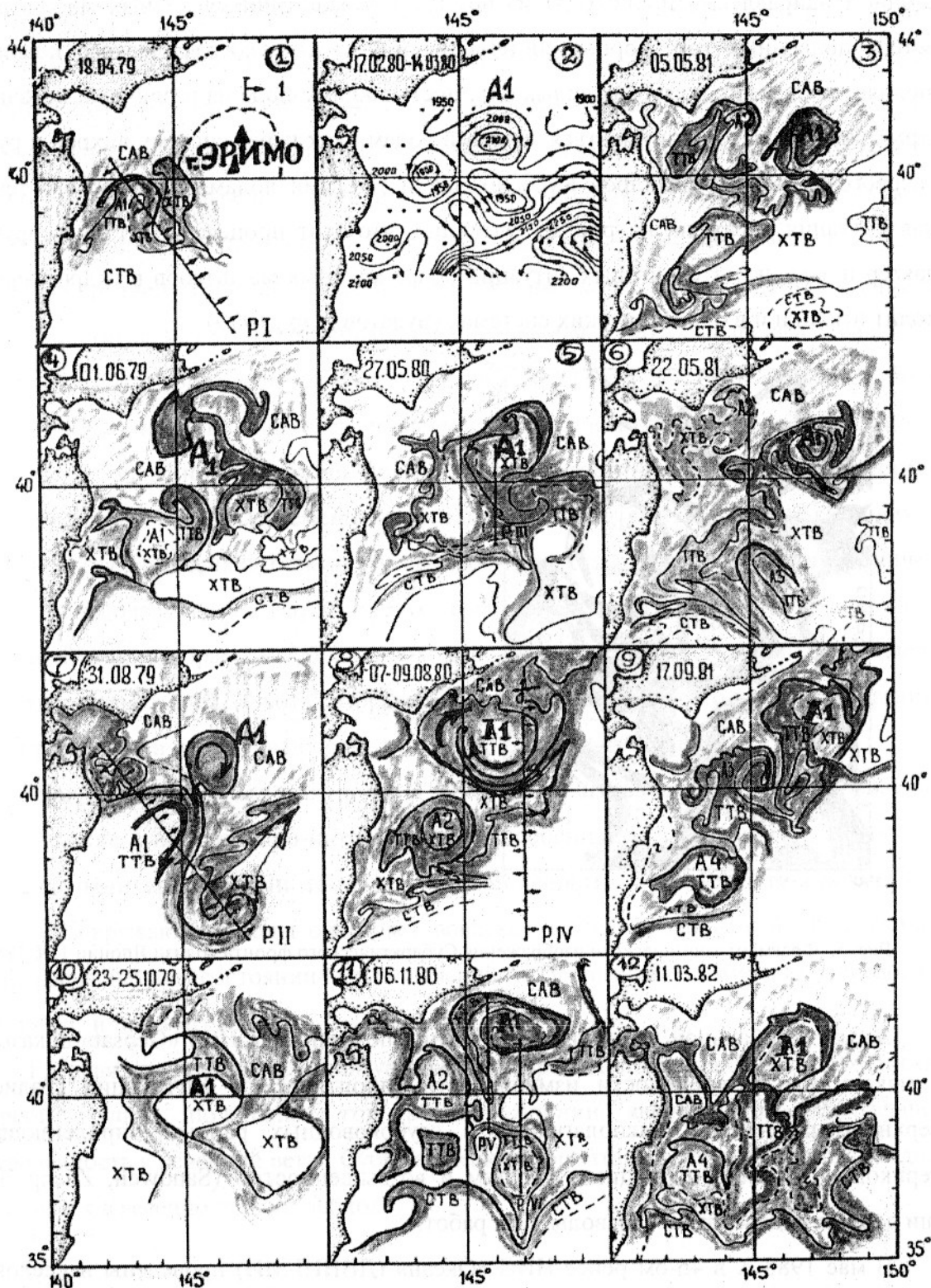


Рис. 4 Фрагменты космических изображений Субарктического фронта вблизи Японии в период с 1979 по 1982 гг.

Анализ представленных данных может свидетельствовать о том, что вихрь Эримо в данном случае служит источником теплых вод, распространяющихся в вихрях и струях вдоль Курильской гряды. Периодические выбросы теплых вод в северном и северо-восточном направлении происходят из постоянно вращающихся водных масс в районе кластера подводных гор. Горная система, в силу своего географического положения, выполняет роль аккумулятора теплых вод, поступающих сюда из различных источников. Вихрь Эримо может подпитываться теплыми водами как через систему вихрей и рукавов из первого и второго меандров Куроисио, так и теплыми водами Сангарского течения. Такая ситуация отражена на рис. 5. Очевидно, что этот процесс носит пульсирующий характер и зависит от сдвиговых ситуаций более крупных масштабов в гидросфере. Это находит отклики и в биологических системах (Булатов и др., 1999).

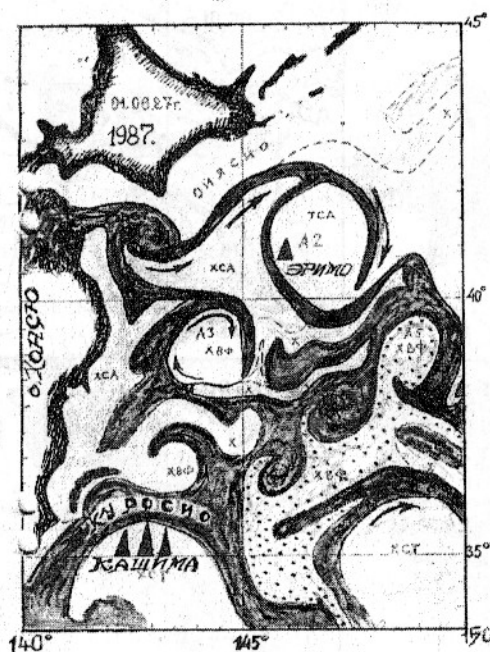


Рис. 5. Фрагмент космического изображения Субарктического фронта вблизи Японии 1.06.1987 г.

Анализ глобальной изменчивости течений по данным с ИСЗ «Geosat» показывает, что максимумы интенсивности изменчивости синоптических флуктуаций градиентов поверхностных течений располагаются в глубоководных районах, прилегающих к материковому склону, подводным хребтам и возвышенностям (Sandwell, Zhang, 1989). Наши данные подтверждают выводы этой работы.

В мае 1988 г. в 46-ом рейсе НИС «Океан» (ДВНИГМИ) проведены исследования динамики теплого вихря с помощью дрейфующих буев. Вихрь хорошо выделялся на спутниковых фотографиях, которых в мае этого года было получено шесть, с 3-х, 5-тидневной дискретностью (Ильичев и др., 1989). Диаметр вихря составил около 180 миль.

По результатам гидрологической съемки глубина антициклонического прогиба изопикн превышала нижний горизонт наблюдений – 1700 м. Характерной чертой вихря являлся хорошо развитый изотермический слой – термостад толщиной около 400 м с температурой 7.55°C. Геострофические скорости на расстоянии 70-90 миль от центра вихря составляли 70 см/с. Вертикальная мощность в кольце этих теплых вод составляла 100-150 м. По космическим снимкам была хорошо видна синоптическая динамика элементов вихревого поля. К середине месяца струя вовлекаемых в вихрь теплых вод шириной около 20 миль завершила полный оборот по его периферии. Наблюдался также поворот по часовой стрелке эллиптической формы вихря в целом. Однако вращение формы вихря происходило значительно медленнее, чем движение струи по периферии вихря. При средней скорости дрейфа буев с плавучим якорем около 2 узлов максимальная скорость достигла 4.27 уз. Таким образом, наблюдавшаяся скорость дрейфа буев в 2-3 раза превышала геострофическую скорость. Быстрые движения 3-х буев относительно друг друга указывали на волновой характер наблюдавшихся возмущений. Дрейф буев показал, что на фоне медленной эволюции формы вихря скорости течений отдельных структур могут достигать 3-4 уз. Перемещение с такими скоростями вовлекаемых в вихревое движение струй объясняет резкую изменчивость структуры теплых антициклонических вихрей, наблюдаемых на спутниковых изображениях (Ильичев и др., 1989). На представленных авторами изображениях топологическая структура вихря менялась с дискретностью 3-5 дней. И хотя авторы не обсуждают генезис этого вихря, географически он был расположен именно над подводными горами Эримо и Такуйё.

При наблюдении теплых колец Гольфстрима на внешней границе обнаружены также резкие инверсионно-интрузионные особенности струйного характера с максимальными градиентами температуры и солёности. Фронтотенетическое действие кольца на окружающие воды обостряет вовлекаемые извне фронты и поддерживает в сильно расчлененном состоянии всю периферийную фронтальную зону вихря в слое 0-150 м (Гинзбург и др., 1981).

Главная причина хорошей визуализации вихревого поля на космических снимках у северной группы подводных гор вблизи Японии является их географическая приуроченность к северной ветви Субарктического фронта, где термохалинные градиенты обостряются в весенне-летний период.

Обсуждение результатов

Касаясь истории вопроса можно отметить, что японский океанолог Суда еще в 1936г. показал, что теплые антициклонические вихри образуются из первого меандра Куроисио к востоку от Японии, движутся в северном направлении, теряя при этом энергию

(Suda, 1936). Позже японские океанологи Каваи (Kawai, 1955) и Курода (Kuroda, 1968) подтвердили выводы Суда и установили, что теплые вихри могут достигать о. Хоккайдо. Диаметр вихрей варьирует от 20 до 160 миль.

Хата (Hata, 1974) исследовал термическую структуру антициклонического вихря Курошио и показал, что теплые воды в нем опускаются на глубины более 1000 м. За 21 месяц отслеживания этого вихря средняя скорость его перемещения оказалась 0.7 миль в сутки. Китано (Kitano, 1974, 1975, 1979) установил, что теплые вихри имеют среднюю скорость дрейфа на север и северо-восток от 0.3 до 2 миль в сутки. Самые холодные из трех категорий выделенных им вихрей, ранжирование которых он производил по температуре, существуют от 2 до 10 месяцев. Температура при этом понижается в вихрях от 10-17°C в центре фронтальной зоны (самые южные вихри имеют температуру водной массы Курошио обычно выше 17-22°C в различные периоды) до 4-10°C в самых северных, более холодных вихрях. В работах японского океанолога Муто (Muto, 1977 А, Б) установлено, что распространение теплых вихрей ограничивается двумя районами: районом А восточнее о. Хонсю, куда вихри поступают из первого меандра Курошио, следуя на север, и районом Б – в 120 милях к юго-востоку от о. Хоккайдо. Организаторы экспедиции КИСЗ-80 В.В.Покудов и В.П. Тунеголовец (1983) заметили, что к концу 70-х годов основные черты меандрирования и вихреобразования в системе Курошио к югу и востоку от о. Хонсю были уже известны. В их работе дан довольно полный обзор исследований, посвященных изучению вихрей СЗ Пацифики.

Отдельные вихри в течение продолжительного времени также отслеживались в работах (Булатов и др., 1988; Лобанов и др., 1991; Bulatov, Lobanov, 1991).

В последние годы XX века эволюция вихрей изучалась уже на основе спутниковых альтиметрических наблюдений (Ichikawa, Imawaki, 1994). В 1987 г. им удалось проследить жизненный цикл среднemasштабного циклонического ринга Курошио от момента его отделения и смещения вместе с меандром до последующего присоединения к Курошио и дрейфа в потоке на восток. В 2002 г. такие исследования начаты и в ТИНРО-Центре с их ориентацией на поиск биологических объектов (Старицын и др., 2003).

Японская ретроспективная информация за период 1955-1964 гг. может служить статистическим подтверждением найденных особенностей в распределении антициклонических вихрей Курошио. Как установлено В. А. Бурковым и Ю. В. Павловой (1979) на 10-летнем периоде изучения термических карт на поверхности и горизонте 200м, распределение теплых и холодных вихрей к востоку от Японии имело следующие статистические закономерности. Холодные циклонические вихри в своем распределении следуют с севера на юг вдоль берегов Хонсю и Хоккайдо (до 200 км), затем полоса холодных вихрей сменяется полосой теплых антициклонических вихрей. Наконец, в

океанической восточной части вихревое поле вновь обнаруживает тенденцию к преобладанию холодных циклонических вихрей. Именно в этом теплом «коридоре» (142°-146° в.д.) – а по космическим данным ширина коридора иногда заметна до 147°-148° в.д. (реже до 150°) – расположены подводные горы, сгруппированные в кластеры к востоку от Японии (Дарницкий, Булатов, 2002). Полоса теплых вихрей, обусловлена взаимодействием течений с подводными горами к востоку от Японии. По обе стороны от этой полосы располагаются циклонические холодные вихри. Эта статистическая информация, в которой авторы (Бурков, Павлова, 1979), по-видимому, не располагали данными о рельефе дна, свидетельствует о реальности доминирующей роли рельефа подводных гор в генерации антициклонов Куроисио. Горы служат генераторами и волноводами для движения антициклонов Куроисио в поперечном к его основному потоку, северном направлении. Это принципиально отличает характер их движения от антициклонов Гольфстрима, которые следуют вдоль потока главной струи в обратном направлении (Бурков, Павлова, 1979). Иллюстрацией синоптического развития вышеуказанных особенностей движения вихрей вдоль осей кластеров подводных гор может служить (рис. 3А).

Важная особенность, которую можно заметить только по космическим снимкам, - это наличие рукавов, соединяющих мигрирующие на север вихри с основной струей Куроисио. При этом эти рукава могут питать как вихревые структуры, так и неструктурированные хаотические объемы воды слева от оси Куроисио. Ранее считалось, что теплые водные массы могут поступать, в основном, путем трансфронтального обмена в антициклонических вихрях (Бурков, Павлова, 1979). Как видно из рис. 6А теплые рукава могут подпитывать не один вихрь, а одновременно несколько вихрей из различных секторов меандрирующей струи Куроисио.

Теплый вихрь с двумя рукавами теплой воды спирального типа наблюдался также в системе Восточно-Австралийского течения к югу от Австралии (Griffiths, Pearce, 1985).

На рис. 6Б в районе первого антициклонического меандра Куроисио отражен момент начального возникновения, отделяющихся в обратном направлении четырех теплых струй размерами 30-40 миль. Это – начальные стадии ответвляющихся от основного потока струй Куроисио, которые хорошо видны на разных стадиях развития и на других рис.: 1А, 3А, 6А. Струи ответвляются из основного потока Куроисио в районе его бифуркации над подводными горами Кашима. Положение гор схематично показано только на рис.6А,Б в виде нескольких треугольников. На самом деле горы Кашима представляют собой кластер из 6 подводных гор разной высоты. Они и являются причиной разбиения струи на отдельные рукава, загибающиеся в обратном направлении к потоку.

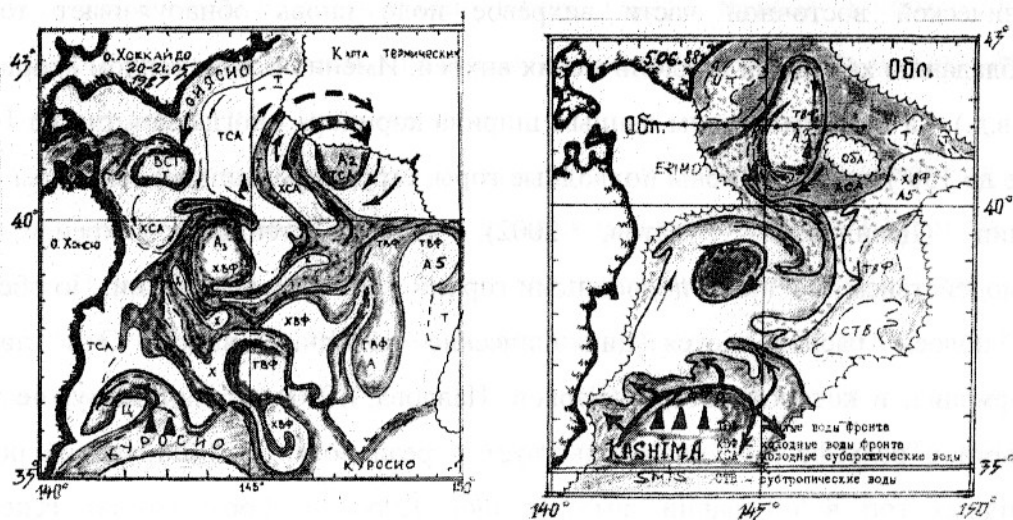


Рис. 6. Фрагменты космических изображений Субарктического фронта вблизи Японии в период 20-21.05.1987 (А) и 5.06.1988 г. (Б)

Таким образом, горы играют роль триггерного механизма, как для возникновения самого меандра, так и последующего раздробления струи Куроисио на отдельные рукава. Ранее аналогичная ситуация была рассмотрена на примере бифуркации течения (Darnitskiy, Vomko, 2002).

Теоретические исследования показывают, что вихревые системы не являются монотонно распределенными, а, как правило, состоят из отдельных рукавов (Степанова, 2004). В ходе лабораторных экспериментов обнаружилось, что при закручивании жидкости возникает не только два вихревых движения – тороидальное и движение с вертикальной осью, но также отмечено образование на свободной поверхности спиральных волн при более крупномасштабных возмущениях. Для этих структур еще не создано теоретического описания.

Космические съемки, а вернее было бы сказать, случайные наблюдения из космоса в период отсутствия облачности, не сопровождались систематическими океанографическими наблюдениями. Японскими океанографами выполнены разрезы 6-8.06.1988 г., период выполнения которых случайно совпал с космической съемкой за 5.06.1988 г. Разрез океанографического судна «Ошоро Мару» вдоль 41°30' с.ш. (между 142°-147°в.д.) пересек вихрь Эримо почти по центру (Miyake et al., 1995). По японским данным оказалось, что вихрь имел в тот период горизонтальные размеры около 150 км на глубине 100 м и вертикальную мощность 500 м. По данным космической съемки (Рис. 6Б) этот вихрь имел эллиптическую форму с размерами малой оси 150-160 км, а большая ось, ориентированная в меридиональном направлении, была около 270 км. Таких одновременных наблюдений, к сожалению, недостаточно.

Заметим, что наряду с другими вихрями СЗ Пацифики вихрь Эримо наблюдался на космических снимках и в последующих исследованиях (Булатов и др., 1999; Булатов, 2000; Дарницкий, Булатов, 2000, 2002; Булатов, Обухова, 2003; Darnitskiy, Bulatov, 2002), однако, на нем внимание не акцентировалось.

Японские океанологи изучили также тонкоструктурные особенности вихревого поля. Как и во многих других областях Субарктического фронта (Gregg et al., 1973; Федоров, 1976; Беляев, Гезенцевей, 1977; Фёдоров, 1978; Навроцкий, 1978; Беляев, Ноздрин, 1979; Навроцкий, 1991 А, Б, В; Шевцов, 2004) здесь наблюдалось тонкоструктурное расслоение, обусловленное взаимодействием субарктических и субтропических вод в районе антициклонического вихря. Авторы объясняют ступенчатую термохалинную структуру усилением процессов двойной диффузии тепла и солей (Miyake et al., 1995). Интересно отметить: несмотря на то, что толщина основного образования антициклонического вихря была около 500 м, усиление тонкой структуры наблюдалось и под ядром вихря в слое 600-1000 м.

Тонкоструктурные съемки этого района (подводные горы Эримо и Такуйё) также были выполнены НПС «Новоульяновск» (ТИНРО) в сентябре 1987 г. в период интенсивного промысла сардины-иваси (в этом году наблюдался максимальный вылов этого объекта российским промысловым флотом). Космический снимок ИСЗ NOAA-10 был получен 20.09.1987 г. На снимке отчетливо наблюдалось спиральное циклоническое и антициклоническое взаимодействия теплых стриммеров вод зоны смешения (15-16°C) и холодных вод Ойясио (10-12°C). Чередующиеся полосы теплых и холодных вод наблюдались на всей площади космической съемки, в зону сканирования которой попала и океанографическая съемка. Тонкая структура в верхнем 500-метровом слое была хорошо выражена, особенно в полях солености и растворенного кислорода. Индивидуальные профили температуры, солености, условной плотности и растворенного кислорода сильно варьировали от станции к станции с перемежающейся интенсивностью тонкой структуры в различных слоях. Наибольшая изрезанность профилей наблюдалась вблизи ядра вихря, сглаживаясь по мере удаления в невозмущенные вихревым движением основные структуры вод (Darnitskiy et al., 2003). Суммарная толщина прослоек изменялась от 40 до 220 м, перепады солености в тонкоструктурных прослойках изменялись при этом от 0.10-0.35‰ до 0.64-0.70‰. (Табл. 1). Результаты таблицы свидетельствуют о перемежающейся интенсивности интрузионных взаимодействий вод с глубиной.

Таблица 1

Характеристики инверсионных слоев в пограничной зоне Субарктического фронта над подводными горами Эримо и Такуйё

№ ст.	N	H _В , м	H _Н , м	ΔH _{макс} , м	ΣΔH, м	ΔS _{макс} , ‰
294	4	30	160	47	144	0.69
304	5	25	200	50	100	0.50
302	5	30	400	56	220	0.81
289	6	10	250	53	200	0.50
286	4	50	480	56	110	0.60
293	5	35	400	52	160	0.63
285	4	55	420	63	120	0.29
281	3	57	115	23	60	0.53
274	2	35	125	48	85	0.75
307	-	-	-	6	-	0.46
300	3	25	130	25	40	0.41
296	2	50	150	50	75	0.30
308	3	50	170	31	79	0.28
291	2	18	200	56	105	0.38
283	4	18	200	16	80	0.35
292	2	41	100	35	50	0.94
284	2	78	160	40	68	0.96
299	2	40	80	20	40	0.81
306	1	28	55	29	20	0.45
297	-	83	75	12	-	0.60

Условные обозначения:

N – количество крупных слоев, H_В, м – верхняя граница тонкоструктурных расслоений (ТР), H_Н, м – нижняя граница ТР, ΔH_{макс}, м – максимальная толщина индивидуальных прослоек, ΣΔH, м – суммарная толщина ТР, ΔS_{макс}, ‰ – максимальные перепады солености в ТР.

Масштабы взаимодействующих в вихревом поле структур значительно превышают масштаб тонкоструктурных расслоений в вихрях Атлантики, измеренных А.Парамоновым с соавторами (Парамонов и др., 1981). Максимальные перепады солености у них были 0.16‰, толщины инверсионных прослоек не превышали 5-25 м. Очевидно региональные

особенности вихреобразования играют значительную роль, отражаясь на изменчивости тонкой структуры водных масс.

Экспериментальное изучение волно-вихревого вертикального обмена на границе двухслойной жидкости показало, что в двухслойной жидкости образуются «протуберанцы» – периодические выбросы более тяжелой соленой жидкости из нижнего слоя в верхний. В ходе эксперимента обнаружено возникновение слоистой структуры стратифицированных течений и показано, что на границе между пресными и солеными слоями могут возникать «протуберанцы», обусловленные неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца, и вертикальное перемещение стратифицированных слоев жидкости меньших масштабов (Журавлев и др., 2004). Это находит подтверждение в результатах мониторинга антициклонического вихря A_2 , организованного дальневосточными океанологами в 1986-1987 гг. (Булатов и др., 1988). Ими было установлено, что перемешивание водных масс вихря с окружающими его водами происходило на нижней границе изопикнического слоя, а слой смешанных вод в антициклоне поднимался от нижних горизонтов к верхним. Этот эффект может служить объяснением механизма образования холодных вод в ядре антициклонов, что наблюдалось неоднократно.

Существование тонких прослоек с различными гидрофизическими характеристиками в океане должно влиять и на поведение рыб, а особенно мелких гидробионтов, для которых масштабы микроструктуры и их пульсаций оказываются сопоставимы с размерами их организмов (Набатов, 1993). Действительно, стайное поведение рыб может реагировать на тонкоструктурные прослойки, как своего рода информационные каналы: визуальные, звуковые, химические и электромагнитные поля. Например, акустические характеристики тонкоструктурных образований в океане в свою очередь имеют свою тонкую структуру – в слое скачка наблюдаются максимальные значения отрицательных градиентов скорости звука. На глубинах залегания подводного звукового канала (ПЗК) градиенты скорости звука чередуются как положительные, так и отрицательные, а по величине они на порядок меньше, чем в вышележащем слое. Глубже оси ПЗК градиент скорости звука близок к гидростатическому и его флуктуации находятся на уровне аппаратурных погрешностей (Гостев, Швачко, 1984). Спектральный анализ выявил подобие спектров скачков скорости звука, полученных на различных глубинах и большую изменчивость дисперсионных возмущений с глубиной. Это происходит из-за рассеяния звука на неоднородностях дискретных рассеивателей океанской среды в виде тонкоструктурных особенностей.

В этой связи не случайна обнаруженная Фишером (Fischer, 1973) двухслойная реакция стай на хищников. В.Н. Шабалин (1974) дает такое объяснение этому факту. Если стая рыб случайно разделяется тонкоструктурной прослойкой, обладающей частичным

экранирующим действием, то отдельные каналы связи между особями, располагающимися над и под прослойкой, ослабляются в большей или меньшей степени один относительно другого. Тогда реакции рыб, являющиеся общими для стаи должны отличаться от таковых в однородной по стратификации среде. Термоклинные и халинные прослойки, блокируя малонаправленные каналы связи, такие как боковая линия, возможно меньше ослабляют визуальный канал. Поэтому особи стаи по одну сторону прослойки, располагающие всеми каналами связи между собой, спонтанно и почти синхронно вовлекаются в реакцию, которая передается нижним особям случайно, когда уже произошли существенные, визуально-заметные, сдвиги в динамике движения верхней части стаи. В любом случае тонкоструктурное расслоение оказывает значительное влияние на биологические поля (Навроцкий, Задонская, 1991; Набатов, 1993).

Очень важные результаты были получены в 42-м рейсе НИС «Академик Курчатов» ИОАН СССР в 1985 г. Измерения характеристик вертикальной тонкослойной микроструктуры и придонного пограничного слоя осуществлены В.Н. Набатовым над подводной горой Ампер в Северной Атлантике. Куполообразный подъем изопикнических поверхностей над вершиной горы при условии квазигеострофического равновесия соответствовал антициклоническому вихрю над ее вершиной, причем антициклонический вихрь сопровождался апвеллингом. Верхний квазиоднородный слой был турбулирован слабо, а придонный пограничный слой над горой, наоборот, очень сильно. В нем пульсации скорости составляли 4-5 см/с, что на порядок превосходит обычный уровень пульсаций в верхнем слое океана. Оба слоя от вершины к склонам горы расширялись и над склоном сливались с разрушением разделявшего их пикноклина, сопровождавшегося развитием тонкослойной микроструктуры. При удалении от подводной горы обычная структура открытого океана восстанавливалась (Монин, Озмидов, 1986). Растущие по толщине от вершины к склонам горы сильно турбулизованный придонный пограничный слой и слабо турбулизованный верхний квазиоднородный слой авторы интерпретируют с применением теории подобия для геофизических турбулентных пограничных слоев. Переходная зона над склоном предсказывается как зона слияния верхнего и нижнего пограничных слоев и разрушения разъединяющего их пикноклина. На подводных горах со слишком глубокими вершинами она образовываться не будет. Эти исследования также могут служить одним из объяснений существования антициклонов с холодными ядрами.

Многие черты мезоструктуры, видимые на космических снимках, например, система грибовидных течений с плотной упаковкой, концентрация завихренности в головной части вихря, сильно вытянутые дипольные структуры, получены также и методами контурной динамики (МКД). Океанологические приложения МКД применительно к задачам о топографическом циклогенезе впервые были сформулированы

В.Ф. Козловым (1983). Некоторые результаты, полученные методами контурной динамики, находят отражение в природных процессах и могут служить дополнительным источником информации при интерпретации природных феноменов (Козлов, 1985; Метод..., 1990). Например, свободная антициклоническая завихренность может перераспределяться в пару вихрей, соединенных тонкой нитью, которая накручивается на вновь сформировавшиеся ядра. Элементы такой вихревой динамики можно видеть и на представленных космических снимках. В.Ф. Козловым (1985) изучено формирование грибовидного термика, всплывающего по вертикали вверх – при этом под воздействием завихренности нарушается его симметрия. Несимметричные грибовидные изображения вихрей характерны также и для космических изображений поверхности океана, что видно на представленных иллюстрациях.

Сильно завихренные термики, перемещаясь в горизонтальном направлении, длительное время могут сохранять инверсию плотности на одних и тех же горизонтах. Это может служить одним из самоподдерживающих механизмов тонкой структуры в вихревом поле движения.

Можно ли оценить временные масштабы топографических вихрей по имеющейся информации? Наиболее сложно оценить долгопериодный масштаб жизни вихрей, поскольку возникает проблема идентификации вихрей по их индивидуальным характеристикам, а они постоянно эволюционируют, смещаются в пространстве и т.д. Учитывая тот факт, что из нескольких определяющих параметров вихревого движения у подводных гор: β -эффект, топографический параметр и набегающий поток - изменяются только характеристики последнего, они и приводят к постоянно эволюционирующему вихревому движению. Но сами топографические вихри на различной стадии эволюции должны наблюдаться всегда, что в большинстве случаев и демонстрируют ИК-изображения океана. Другой вопрос: всегда ли они видны на поверхности? Анализ более, чем полутора тысяч снимков свидетельствует о том, что не всегда. За 10-летний период (1955-1964) Бурковым и Павловой (1979) в районе гор Эримо было отмечено шесть теплых вихрей. Исходя из данных космической информации, представленных за семилетний период: (1979-1982; 1985-1988), топографические вихри отслеживались почти всегда, за исключением периодов, когда поверхность СЗТО не была видна из-за наличия облачности. Однако весьма нелогично было бы предполагать отсутствие вихрей в эти периоды. В зимние месяцы вихри могут носить баротропный характер из-за преобладания квазиоднородных субарктических вод над районом подводных гор, - и в это время они или не наблюдаются на поверхности океана, или прослеживаются лишь их следы. В таком случае вихри могут существовать в виде теплых линз на промежуточных горизонтах, как это наблюдалось над горами Ампер и Жозефин в Атлантике (Зубин, Озмидов, 1987).

Также и вихри Эримо – в зависимости от их накрытия (в верхних слоях) однородными субарктическими или субтропическими водными массами – они или не видны на ИК-изображениях, или напротив, хорошо видны в случае взаимодействия вод с контрастными по физическим характеристикам водами.

Помимо вихревого поля подводные горы создают и другие геофизические аномалии (Darnitskiy, Kanevskiy, 1998). Например, величины геомагнитных аномалий в районе кластера этих гор достигают 400-600 Гамм, увеличиваясь в 3-4 раза по сравнению с фоновыми значениями напряженности геомагнитного поля, составляющего 100-200 Гамм (Geomagnetic Anomalies Map of Japan, 1978).

С точками бифуркаций течений связаны также некоторые узловые моменты в функционировании экосистем. В таких районах наблюдаются повышенные концентрации биологических объектов (Darnitskiy, Vomko, 2002). В период высокой численности сардины-иваси, например, значительная часть ее мигрирующего запаса облавливалась СССР и Японией, в том числе и в этом районе. По данным промысловой статистики этот «квадрат» был одним из центров распределения промыслового запаса сардины-иваси. Сопряженные районы являются местом нагула скумбрии, сайры, морского леща и др. видов. Максимальный вылов сардины-иваси промысловым флотом достиг здесь 384.7 тыс. т в 1980 г. Периодические увеличения объемов вылова наблюдались в 1983, 1985, 1989-1990 и 1992 гг. Разномасштабные флуктуации вылова, по-видимому, связаны с колебаниями Субарктического фронта и изменчивостью кормовой базы рыб. Межгодовые колебания таких масштабов отмечались в полях различных океанографических параметров. Близкие циклы вылова промысловых животных наблюдались и в смежном районе Курильской островной экосистемы (Darnitskiy, Belyaev, 1998).

Выводы

1. Используя дистанционные методы исследования океана, частично восстановлена дискретная эволюционная динамика вихревой системы у кластера подводных гор Эримо, Такуйё и 2 безымянных, отражающая различные режимы движения: регулярного (вихревого) и хаотического.

2. Вертикальная структура вод имеет хорошо выраженные тонкоструктурные расслоения вследствие взаимодействия субарктических, субтропических и вод зоны смешения в вихревом поле у подводных гор.

3. В силу своего географического положения вихри гор Эримо-Такуйё, вероятнее всего, образуются и распадаются без систематической горизонтальной адвекции, поскольку с севера этому препятствуют течения южных направлений и стена субарктических холодных вод. В то же время они периодически подпитываются струями

из первого и второго меандров Куроисио, кроме того сюда могут поступать воды и из Сангарского течения.

4. В силу блокировки вихревых систем подводными горами они здесь имеют большие временные масштабы, чем другие вихри Субарктического фронта. Аналогичная ситуация наблюдается и в Атлантике у гор Ньюфаундленского хребта (Fofonoff, Hendry, 1985).

5. Ветвистость, часто наблюдаемая на краях вихревых структур, может быть обусловлена внутренними волнами, имеющими хорошее развитие над вершинами гор (Дарницкий, Старицын, 1978; Дарницкий, 1988, 1991; Darnitskiy, 2001). Японскими океанологами при изучении турбулентности буксируемым турбулиметром совместно с акустическими измерениями в штилевую погоду (Kaneko et al., 1986) также было обнаружено образование пакетов короткопериодных внутренних волн перед подводными возвышенностями вблизи южной Японии. Они вызывали возмущения структуры вод и на свободной поверхности океана.

6. Вихрь Эримо пульсирует у его центра тяжести, периодически сжимаясь до 60-80 миль, или увеличивая площадь вихревого, спиралевидного и хаотического движения до размеров, охватывающих площадь $3 \times 3^\circ$ и более.

7. Ядро вихря периодически меняет свою структуру в зависимости от преобладающей адвекции субарктических или субтропических вод, а в центре вихревого движения – оно может быть холодным или теплым.

8. Вертикальное развитие вихря по инструментальным измерениям охватывает слой от 500 до 1700 м, однако глубже соответствующих наблюдений не было. Судя по интенсификации тонкой структуры под теплым ядром вихря, его вертикальное развитие превышает указанные глубины.

9. Глубинная структура топографических вихрей, судя по теоретическим работам последних лет (Зырянов, 1995, 2003; Козлов, Кошель, 2003; Гряник и др., 2003; Борисов и др., 2003) может существенно отличаться от структуры течений в верхних горизонтах.

10. Поскольку кластер подводных гор Эримо и Такуйё служит аккумулятором теплых вод, блокирующихся в вихревом движении, он периодически, в импульсном режиме может давать выбросы дискретных объемов теплых вод на север вдоль Курильской гряды. В последствии эти ядра теплых вод в антициклонических вихрях дрейфуют вдоль Курильского желоба (Козлов, Гурулев, 1994; Булатов, Самко, 2002).

11. В этом «квадрате» отмечены циклические режимы промысловой продуктивности мигрирующих стад сардины-иваси в период последней вспышки ее численности. Предполагается большое влияние на эти процессы динамики вихревого поля в районе подводных гор. Судя по теоретическим исследованиям, циклические и

хаотические режимы функционирования популяций могут возникать и без внешних воздействий (Фрисман, 1996). Поэтому результирующая цикличность подвержена взаимодействию хаотических и регулярных режимов функционирования как гидрофизических (Козлов, Кошель, 2003), так и биологических процессов.

Литература

- Беляев В.С., Гезенцевей А.Н. О тонкой структуре поля температуры в районе Куроиси // Изв. АН СССР ФАО, 1977. Т. 13. № 9. С. 971-979.
- Борисов А.В., Мамаев И.С., Соколовский М.А. (ред) Фундаментальные и прикладные проблемы теории вихрей. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 704 с.
- Булатов Н.В. Структура вод Субарктической фронтальной зоны по данным спутниковых изображений. Автореф.дисс...к.г.н. ТОИ ДВО РАН, 1995. 25 с.
- Булатов Н.В., Дарницкий В.Б., Савин А.Б. Океанологические факторы среды, способствующие переносу ранней молодежи лемонемы (*Laemoneta longipes*, *Moridae*) от нерестилиц к районам нагула // Исследование Земли из космоса, 1999. № 1. С. 97-104.
- Булатов Н.В., Обухова Н.Г. Пример использования визуальной информации для изучения влияния теплых рингов Куроиси на гидрологические условия в южнокурильском районе // Визуализация в исследованиях биоресурсов Мирового океана. Владивосток, ТИНРО-Центр, 2001. С. 33-52.
- Булатов Н.В. Исследования по использованию космической информации в изучении океана и рыбном промысле // ТИНРО – 75 лет (от ТОНС до ТИНРО-Центра). Владивосток, ТИНРО-Центр, 2000. С. 209-218.
- Булатов Н.В. Рекомендации по использованию спутниковых снимков в океанологических исследованиях. – Владивосток: ТИНРО, 1984. 44 с.
- Булатов Н.В., Дарницкий В.В. Структура и динамика океанских вихрей в Северной Пацифике (по спутниковым и океанографическим съёмкам) // Междун. конф. «Северная Пацифика: гидрометеорология, охрана окружающей среды, география». Владивосток: ДВГУ – ТИГ ДВО РАН – ДВНИГМИ, 1994. С. 35-36.
- Булатов Н.В., Лобанов В.Б., Ломакин А.Ф., Рогачев К.А., Толмачев К.П. История А₂: структура и динамика синоптического вихря Куроиси. Препр.Владивосток: ТОИ ДВО АН СССР, 1988. 45 с.
- Булатов Н.В., Муктепавел Л.С., Никитин А.А., Харченко А.М. Изучение океана в ТИНРО космическими средствами // ТИНРО-70 (под ред. В.П. Шунтова). Владивосток: ТИНРО-Центр, 1995. С. 101-112.
- Булатов Н.В., Дарницкий В.В. Южный циклонический Меандр в районе хребта Идзу // Междун.симпоз. «Океанические фронты и сопутствующие явления» посв. памяти К.Федорова. – Санкт-Петербург, 1998 г.
- Булатов Н.В., Дарницкий В.Б. Технология спутникового мониторинга СЗ Пацифики и некоторые научные результаты // Конф. «Информационные ресурсы об океане – актуальные проблемы формирования, распространения и использования в научных исследованиях и в морской деятельности» ОИР-2002. Тез.докл. Обнинск, 2002. С. 148-150.
- Булатов Н.В., Лобанов В.Б. Исследование мезомасштабных вихрей восточнее Курильских островов по данным метеорологических спутников Земли // Исслед. Земли из космоса, 1983. № 3. С. 40-47.
- Булатов Н.В., Самко Е.В. Основные черты фронтальных зон северо-западной части Тихого океана // Статус пелагических и донных сообществ и условий их обитания в

- дальневосточных морях на рубеже XX и XXI столетий: Изв. ТИНРО, 2002. Т. 130. Ч. I. С. 12-23.
- Булгаков Н.П. Основные черты строения и положения Субарктического фронта в северо-западной части Тихого океана. В сб.: Субарктический фронт в северо-западной части Тихого океана. Владивосток, ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1972. С. 10-25.
- Бурков В.А., Павлова Ю.В. Поле синоптических вихрей в Куроиси // Океанология, 1979. № 4. С. 584-591.
- Гидрометеорологический и промысловый бюллетень основных районов промысла (вып. № 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 33, 37, 38, 39, 40, 41). Владивосток, 1985, 1986, 1987, 1988. Архив ТИНРО.
- Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Кузьмина Н.П., Скляр В.Е., Федоров К.Н. особенности термохалинной структуры фронтальных разделов теплых колец Гольфстрима // «Океанологические исследования», М., 1981. № 34. С. 33-48.
- Гряник В.М., Соколовский М.А., Веррон Ж. Динамика бароклинных вихрей с нулевой суммарной интенсивностью (хетонов) // В кн.: Фундаментальные и прикладные проблемы теории вихрей. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. С. 547-622.
- Дарницкий В.Б., Бомко С.П. Бифуркация течений Курило-Камчатского и Ойясио и их влияние на промысел // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: Материалы III научн.конф. – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатНИРО, 2002. С. 277-279.
- Дарницкий В.Б., Булатов Н.В. Охотоморские вихри Прикурильского района // Комплексные исследования экосистемы Охотского моря. – М.: ВНИРО, 1997. С. 36-39.
- Дарницкий В.Б., Булатов Н.В. О процессах фронтальной динамики в зоне Субарктического фронта восточнее о-вов Хонсю и Хоккайдо // Междун. симпоз. «Океанические фронты и сопутствующие явления» посв. памяти К. Фёдорова. – Санкт-Петербург, 1998.
- Дарницкий В.Б., Булатов Н.В. Бимодальность и бифуркации струйных течений Северной Пацифики. // Науч.конф. «Гидрометеорология Дальнего Востока и окраинных морей Тихого океана», посвящ. 50-летию ДВНИГМИ. Тез.докл. Владивосток, ДВНИГМИ, 2000. С. 16-18.
- Дарницкий В.Б., Булатов Н.В. Структура Субарктического фронта от Японии до 180° // Океанология, 2002. Т. 42. № 3. С. 337-347.
- Дарницкий В.Б., Лучин В.А. Особенности горизонтальной структуры климатических течений Охотского моря с месячной дискретностью // Комплекс. исслед. экосистемы Охотского моря. – М.: ВНИРО, 1997. С. 19-25.
- Дарницкий В.Б., Старицын Д.К. Об изменчивости океанологических условий и вихреобразования в районе банки Уанганелла // Исследования по биологии рыб и промысловой океанографии. – Владивосток: ТИНРО, 1978. Вып. 9. С. 26-34.
- Дарницкий В.Б. Волны Россби и Кельвина в районе горы Лира, океанологические последствия // Биологические ресурсы талассобатиальной зоны мирового океана. Всесоюзн. совещ.: Тез. докл. – М.: ВНИРО, 1988. С. 17-19.
- Дарницкий В.Б. Короткопериодные внутренние волны, волны Россби и Кельвина в районах подводных гор Гавайского и Императорского хребтов // Биологические ресурсы талассобатиальной зоны Мирового океана. – М.: ВНИРО, 1991. С.191-203.
- Журавлев Н.П., Глебова О.А., Шелковникова Н.К. Волновихревой вертикальный обмен на верхней границе двухслойной жидкости // Физические проблемы экологии (Экологическая физика). Четвертая Всероссийская научная конференция. Тез.докл. М., МГУ, 2004. С. 50-51.
- Зубин А.Б., Озмидов Р.В. Линза средиземноморских вод в районе подводных гор Ампер и Жозефин. // Докл. АН СССР, 1987. Т. 292. № 3. С. 716-719.

- Зырянов В.Н. Топографические вихри в динамике морских течений. // М.: ИВП РАН, 1995. 239 с.
- Зырянов В.Н. Топографические вихри в стратифицированном океане. // В кн.: Фундаментальные и прикладные проблемы теории вихрей. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. С. 623-673.
- Ильичев В.И., Лобанов В.Б., Рогачев К.А. Особенности динамики теплого вихря Куроисио: быстрые движения внутренних структур при медленном вращении формы // Докл. АН СССР, 1989. Т. 308. №5. С. 1224-1227.
- Козлов В.Ф. Метод контурной динамики в модельных задачах о топографическом циклогенезе в океане // Изв. АН СССР. ФАО, 1983. Т. 19. № 8. С. 845-854.
- Козлов В.Ф. Метод контурной динамики в океанологических исследованиях: результаты и перспективы // Морской гидрофиз. журн. Севастополь, 1985. № 4. С. 10-15.
- Козлов В.Ф., Гурулев А.Ю. О перемещении вихрей вдоль глубоководных желобов // Метеорология и гидрология. 1994. № 6. С. 70-78.
- Козлов В.Ф., Кошель К.В. Хаотическая адвекция в моделях фоновых течений геофизической гидродинамики. // В кн.: Фундаментальные и прикладные проблемы теории вихрей. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. С. 471-504.
- Куренная Л.А. О влиянии ветра на гидрологические фронты // Дистанционные исследования океана. Владивосток: ТИНРО, 1990. С. 55-62.
- Куроисио и прилегающие районы Тихого океана. Под ред. А.М. Муромцева. – «Тр. ГОИН», 1972. Вып. 106. 212 с.
- Лобанов В.Б. Возможности исследования океанологических фронтов по спутниковым данным // Исследование гидрометеорологических параметров тропической зоны океана дистанционными методами. Владивосток, ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1981. С. 8-15.
- Лобанов В.Б., Рогачев К.А., Булатов Н.В., Ломакин А.Ф., Толмачев К.П. Долгопериодная эволюция теплого вихря Куроисио // Докл. АН СССР, 1991. Т. 317, № 4. – С. 984-988.
- Максимихин Д.И., Фукс В.Р. Опыт дешифрирования фронта Ойяисио по спутниковым инфракрасным снимкам. – Уч. зап. ЛГУ, 1975. № 379. С. 101-109.
- Метод контурной динамики в океанологических исследованиях. (Под ред. В.Ф. Козлова). Владивосток: ДВО РАН СССР, 1990. 134 с.
- Митник Л.М., Булатов Н.В., Лобанов В.Б. Синоптические вихри в океане на спутниковых радиолокационных изображениях // Докл. АН СССР. 1989. Т. 307. № 2. С. 454-457.
- Монин А.С., Озмидов Р.В. О пограничных слоях над подводными горами // «Докл. АН СССР», 1986, 287. № 6. С. 1470-1473.
- Набатов В.Н. О влиянии океанической турбулентности на биодинамику мелких организмов. Тез. докл. IX конф. по промысловой океанологии. М., 1993. С. 59-61.
- Навроцкий В.В. Спектральный анализ среднemasштабных колебаний температуры и скорости в верхнем слое океана // Гидрофизические исследования в Северо-Западной части Тихого океана. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1978. С. 101-115.
- Навроцкий В.В., Левенко А.М., Павлова Е.П. Тонкая вертикальная структура температуры в зоне субарктического фронта (МЕГАПОЛИГОН) // ДАН СССР, 1991. Т. 316. № 2. С. 468-474.
- Навроцкий В.В. Спектральный анализ тонкой структуры во фронтальной зоне Куроисио // ДАН СССР, 1991. Т. 316. № 3. С. 726-730.
- Навроцкий В.В., Задонская Т.А. Тонкая вертикальная структура и мезопланктон в зоне Субарктического фронта (МЕГАПОЛИГОН) // ДАН СССР, 1991. Т. 316. № 4. С. 983-987.
- Нелезин А.Д., Манько А.Н. Изменчивость термодинамической структуры вод северо-западной части Тихого океана. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та. 1999. 128 с.

- Новогрудский Б.В., Скляр В.Е., Федоров К.Н., Шифрин К.С. Исследование океана из космоса. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 55 с.
- Парамонов А.Н., Иванов А.Ф., Кушнир В.М. Инверсии температуры в главном пикноклине синоптического вихря. // *Океанология*, 1981. Т. 21. № 6. С. 989-995.
- Покудов В.В., Вельяотс К.О. Основные особенности гидрологического режима и положения границ Субарктического фронта в северо-западной части Тихого океана в зимний период. - Л.: Гидрометеиздат, Тр. ДВНИГМИ, 1976. Вып. 62. С. 3-61.
- Покудов В.В., Туноголовец В.П. Вихри Филиппинского моря // *Результаты экспедиции КИСЗ-80*. Л., Гидрометеиздат, 1983. 100 с.
- Рогачев К.А., Гогина Л.В. Вихри течения Ойясио // *Природа*, 2001. № 12. С. 36-42.
- Старицын Д.К., Филатов В.Н., Фукс В.Р. Опыт использования спутниковой альтиметрической информации для оценки океанологических условий промысла сайры // *Рациональное природопользование и управление морскими биоресурсами: экосистемный подход. Тез. докл. Междунар. конф.* – Владивосток: ТИПРО-Центр, 2003. С. 185-189.
- Федоров К.Н. Тонкая термохалинная структура вод океана. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 184 с.
- Фёдоров К.Н. Тонкая структура гидрофизических полей в океане. В кн.: *Океанология*. Т. 1. Физика океана. Гидрофизика океана. М., Наука, 1978. С. 113-147.
- Фрисман Е.Я. Эволюция характера динамики численности популяции: переход к хаосу // *Исслед. по мат. биол.* – РАН. Пуш. науч. центр. Ин-т мат. пробл. биол. – Пущино, 1996. С. 75-87, 191.
- Фукс В.Р., Мичурин Д.Н., Бобков А.А., Старицын Д.К. и др. Истоки Ойясио. // Санкт-Петербург, Изд. «Полис», 1997. 248 с.
- Шабалин В.Н. Некоторые результаты и методы океанологических исследований с применением водолазного труда. «Обзорная информация» сер. 9. «Промысловая океанология». М., ЦНИИТЭИРХ, 1974. Вып. I. С. 1-57.
- Шевцов В.П. Мезомасштабная структура гидрофизических полей в северо-западной части Тихого океана по акустическим данным // *Океанология*, 2004. Т. 44. № 3. С. 364-372.
- Bulatov N.V., Lobanov V.B. Monitoring of the Kuroshio warm-core rings during 1986-1990. In: *The Sixth Japan and East China Seas Study Workshop*. Fukuoka, Japan, 1991. P. 17.
- Bulatov N.V., Darnitskiy V.B. Space and oceanographical monitoring of the Kuroshio and Subarctic front region in 70-90th: some scientific results. // *International Symposium on Oceanography of the East Marginal Seas. CREAMS-2000*. Vladivostok. p. 24.
- Darnitskiy V.B. Inside and interdaily water dynamics above the tops of Hawaiian and Imperial Seamounts. // *North Pacific Marine Science Organization (PICES) Tenth Annual Meeting*. Victoria, Canada, 2001. P. 66.
- Darnitskiy V.B., Belayev V.A. The quasi-cyclic processes in the ecosystems near of the Kuril Islands // *The Second PICES Workshop on the Okhotsk Sea and Adjacent Areas*. Nemuro, Hokkaido, Japan, 1998. P. 6.
- Darnitskiy V.B., Bomko S.P. The second bifurcation of the Kuroshio to east of Japan (Part I, II) // *North Pacific Marine Science Organization (PICES). Eleventh Annual Meeting. Abstr.* Qindao, China, 2002. P. 141-142.
- Darnitskiy V.B., Bulatov N.V. Horizontal Structure of Subarctic Front from Japan up to 180° based on satellite and oceanographic observations // *International Symposium on North Pacific Transitional Areas. Abstr.* La Paz, Mexico, 2002. P. 35-36.
- Darnitskiy V.B., Kanevskiy I.N. Influence of the world ocean bottom relief on magnetic fields and distribution of acoustic waves. *The Fourth International Scientific Symposium «Role of Ocean Sciences for Sustainable Development»*. Okinawa, Japan, 1998. P. 126-127.
- Darnitskiy V.B., Vologdin V.N., Rostov I.D. Fine structure of waters in region of the Subarctic front to east from Japan and southern Kuril Islands // *North Pacific Marine Science*

- Organization (PICES) Twelfth Annual Meeting. Seoul, Republic of Korea, 2003. P. 132-133.
- Ichikawa K., Imawaki S. Life history of a cyclonic ring detached from the Kuroshio extension as seen by the Geosat altimeter // *J. Geophys. Res. C.* – 1994. – 99. № 8. P. 15.953-15.966.
- Fofonoff N.P., Hendry R.M. Current variability near the Southeast Newfoundland Ridge. // *J. Phys. Oceanogr.*, 1985. 15. № 7. P. 963-984.
- Gregg M.C., Cox C.S., Hacker P.W. Vertical microstructure measurements in the central North Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, 1973. V. 3. № 4. P. 458-469.
- Griffiths R.W., Pearce A.F. Satellite images of an unstable warm eddy derived from the Leeuwin Current. *«Deep-Sea Res.»*, 1985. № 11. P. 57-58.
- Hata K. Behavior of a warm eddy detached from Kuroshio. – *Kenkyu jino.*, 1974. Vol. 26. № 7. P. 295-321.
- Kaneko A., Hiroyuki H., Kawatete K., Mizuno S., Masuda A., Miita T. A note on internal wavetrains and the associated undulation of the sea surface observed upstream of seamounts. // *«Нихон кайё гаккайси»*, *J. Oceanogr. Soc. Jap.*, 1986. 42. № 1. P. 75-80.
- Kawai H. Rings south of the Kuroshio and their possible roles in transport of the intermediate salinity minimum and in formation of the skipjack and albacore fishing grounds. – *The Kuroshio IV. Proc. Of the Forth Symp. for the Co-operating Study of the Kuroshio and Adjacent Regions.* Japan Academy, Tokyo, 1979. P. 250-273.
- Kitano K. A Kuroshio anticyclonic eddy. – *J. Phys. Oceanogr.*, 1974. V.4. № 4. P. 670-672.
- Kitano K. Some properties of the warm eddies generated in the confluence zone of the Kuroshio and Oyashio currents. – *J. Phys. Oceanogr.*, 1975. V. 5. № 2. P. 245-252.
- Kitano K. Recent developments in the studies of the warm rings of Kuroshio, a review. – *The Kuroshio IV. Proc. Of the Forth Symp. for the Co-operating Study of the Kuroshio and Adjacent Regions.* Japan Academy, Tokyo, 1979. P. 243-249.
- Kuroda T. The warm water mass of Kuroshio with special reference to recent conditions. – *Bull. Jap. Soc. Fish., Oceanogr.*, 1968. № 12. P. 42-47.
- Lobanov V.B., Bulatov N.V. Physical structure and behavior of the Kuril eddies // *Nemuro Workshop on Western Subarct. Circulation' 93: Abstracts.* Hokkaido, Japan, 1993. P. 4.
- Miyake H., Sasaki S., Yamaguchi H., Masuda K., Anma G. and Kamei Y. Thermohaline Staircases in the Warm-Core Ring off Cape Erimo, Hokkaido and Their Fluxes Due to Salt Finger. *Journal of Oceanography (Japan)*, 1995. V. 51. P. 99-109.
- Muto S. A hydrographic study on the warm water mass in the North Eastern sea of Japan. II. – *Bull. Tonoku Reg. Fish Res. Lab.*, 1977. № 35. P. 31-71.
- Muto S. A hydrographic study on the warm water mass in the North Eastern sea of Japan. I. – *Bull. Tonoku Reg. Fish Res. Lab.*, 1977. № 38. P. 31-71.
- Richardson P.L. Anticyclonic eddies generated near the Corner Rise seamounts. – *J. Mar. Res.*, 1980. V. 38. № 4. P. 673-686.
- Sandwell D.T., Zhang B. Global mesoscale variability from the geosat exact repeat mission: correlation with ocean depth // *J. Geophys. Res. C.*, 1989. – 94. № 12. C. 17971-17984.