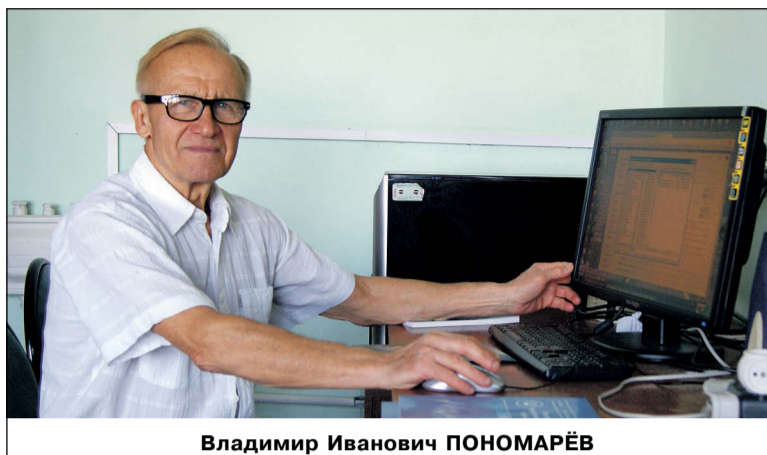


Лауреат премии ДВО РАН имени выдающихся учёных Дальнего Востока

В ПОМОЩЬ ЧЕЛОВЕКУ

Морские вихри и струйные течения. Модели и наблюдения.



Владимир Иванович ПОНОМАРЁВ

– Целью работ являлось исследование сезонной и синоптической изменчивости мезомасштабной циркуляции в Центральной котловине Японского моря и на шельфе северо-западной части Японского моря, в том числе в заливе Петра Великого и в Татарском проливе, – рассказывает В.И. Пономарёв. – Исследование выполнялось на основе численного гидродинамического моделирования, результаты которого верифицировались с использованием данных контактных и дистанционных (спутниковых) наблюдений.

– Какова роль мезомасштабной циркуляции?

– Она определяет термо-гидродинамические процессы на поверхности и в толще моря, горизонтальный масштаб которых изменяется в зависимости от вертикального градиента плотности морской воды от десятков до сотен километров, а временной масштаб от суток до нескольких месяцев. Взаимодействующими динамическими структурами циркуляции являются струйные течения, вихри, связанные с гидрологическими фронтами температуры, солёности и плотности морской воды, а также низкочастотные планетарные волны Россби, топографические волны Россби и Кельвина. Мезомасштабная циркуляция – это своего рода погода в толще океана, являющаяся предметом как теоретических исследований, так и оперативной океанографии, необходимой для диагноза и прогноза состояния морской среда.

Подобно прогнозам погоды современные оперативные прогнозы динамических процессов и опасных явлений в морях и океане производятся с использованием, как классических методов морских прогнозов, так и

методов гидродинамического моделирования синоптической циркуляции в атмосфере и мезомасштабной в океане с усвоением данных спутниковых и контактных измерений.

– Владимир Иванович, какие исследования были выполнены в рамках проекта и предусматриваются ли проведение экспедиций?

– Серия численных экспериментов по моделированию сезонной и синоптической изменчивости мезомасштабной циркуляции в Центральной котловине и на континентальном шельфе северо-западной части Японского моря, в том числе в заливе Петра Великого выполнялась в рамках проектов ДВО РАН. Применялась вихререзающая версия слоистой гидродинамической модели циркуляции океана, разработанной Н.Б. Шапиро и Э.Н. Михайловой в Морском гидрофизическом институте (МГИ) РАН (г. Севастополь).

Для задания в модельных экспериментах начальных условий для температуры, солёности и плотности морской воды в расчётных областях Японского моря использовались данные океанографических съёмок, полученные в морских экспедициях, проводимых в рамках международного проекта CREAMS с участием многих сотрудников ТОИ ДВО РАН, включая и меня.

Вихререзающая версия модели МГИ была адаптирована и реализована для условий пересечённого рельефа дна Японского моря совместно с ведущим инженером, в настоящее время – старшим научным сотрудником ТОИ П.А. Файманом для двух расчётных областей с разрешением около 2 км в крупной области и 1.25 км в районе залива Петра Великого и прилегающей части глубокого моря.

По итогам конкурса 2019 года на соискание премий ДВО РАН имени выдающихся учёных Дальнего Востока России Владимиру Ивановичу ПОНОМАРЁВУ, ведущему научному сотруднику лаборатории физической океанологии ТОИ ДВО РАН, кандидату физико-математических наук присуждена премия ДВО РАН им. академика В.И. Ильичёва за серию работ с соавторами под названием «Численное гидродинамическое моделирование мезомасштабной циркуляции в северо-западной части Японского моря».

В результате выбора наилучшей комбинации численных схем решения конечно-разностных уравнений, параметризации горизонтального и вертикального турбулентного обмена импульсом, теплом и солью удалось успешно моделировать синоптическую изменчивость мезомасштабной циркуляции в глубокой части, над крутым континентальным склоном и на шельфе северо-западной части Японского моря в различные сезоны года.

В заливе Петра Великого численные эксперименты проводились без учёта ледяного покрова. Поэтому результаты моделирования рассматриваются и верифицируются для тёплого времени года. Все численные эксперименты со слоистой моделью МГИ выполнялись при заданных с суточным разрешением условиях в атмосфере из метеорологического реанализа NCEP.

С помощью вихререзающей гидродинамической модели RIAM OM, разработанной в Институте прикладной механики Университета Кюсю в Японии, П.А. Файманом выполнены численные эксперименты по моделированию мезомасштабной циркуляции в области, включающей северную часть Японского моря, Охотское море и прилегающую часть Тихого океана. Основной численный эксперимент для этой серии работ проводился для многолетнего периода с 1991-го по 2000 год с использованием данных спутниковых наблюдений концентрации ледяного покрова и температуры воды на поверхности океана, а также с ассимиляцией климатических средних месячных данных для солёности морской воды.

– Какие результаты и в какие сроки были получены?

– Используя рассчитанные в отмеченном выше эксперименте поля переменных модели с суточным разрешением, в представленной серии работ в 2018 году для северной части Татарского пролива получены новые результаты, касающиеся сезонной и синоптической изменчивости системы струйных тече-

ний и мезомасштабных вихрей, обусловленной сменой летнего муссона на зимний на сезонном временном масштабе и сменой метеорологических ситуаций на синоптическом временном масштабе.

Под влиянием ветра южных румбов и циклонической завихренности вектора напряжения трения ветра, характерных для тёплого сезона, вдоль восточного склона Татарского жёлоба и шельфа острова Сахалин в модельном эксперименте генерируется направленное на юг течение тёплых и солёных трансформированных субтропических вод, а вдоль кромки континентального шельфа – всегда направленное на юг течение Шренка, что хорошо известно из наблюдений. Над центральной частью жёлоба пролива в этом случае генерируются циклонические вихри. Ранее считалось, что такая циклоническая циркуляция в Татарском проливе характерна для любого сезона.

С помощью модели RIAM OM удалось показать, что под влиянием ветров западного и северных румбов, характерных для холодного периода года, над прилегающим к шельфу острова Сахалин восточным склоном жёлоба Татарского пролива севернее 48°с.ш., формируются направленное на юг устойчивое холодное Восточно-Сахалинское течение и меридиональная дорожка мезомасштабных антициклонических вихрей к западу от него. Этот результат моделирования является новым, и его удалось подтвердить при анализе спутниковых снимков высокого разрешения.

Меридиональная дорожка циклонических мезомасштабных вихрей генерируется над континентальным склоном жёлоба пролива к востоку от хорошо известного южного течения Шренка, моделируемого и наблюдаемого над кромкой континентального шельфа при воздействии ветра любого направления. С помощью модели показано, что при ветрах западного и северных румбов между этими вихревыми дорожками вдоль оси жёлоба Татарского пролива генерируется направленное на север тёплое противотечение.

Формирование и усиление такой циркуляции, впервые изученной с помощью численной гидродинамической модели, в значительной мере обусловлены перепадом уровня моря между Амурским лиманом и Татарским проливом за счёт ветрового нагона на прилегающей части Охотского моря и стока реки Амур.

Из анализа слагаемых уравнения вихря скорости течения следует, что сезонное изменение мезомасштабной циркуляции обусловлено как внешним фактором – изменением направления вектора касательного напряжения трения ветра, так и нелинейными эффектами влияния рельефа дна и адвек-

ции вихря скорости. Таким образом, с использованием методов гидродинамического моделирования и анализа данных наблюдений, определены основные физические закономерности сезонной и синоптической изменчивости мезомасштабной циркуляции в Татарском проливе.

При моделировании мезомасштабной циркуляции в Японском море впервые изучены основные особенности формирования и эволюции мезомасштабных вихревых структур в Центральной котловине моря, над континентальным склоном и на шельфе Приморья, включая внешний шельф залива Петра Великого.

Результаты гидродинамического моделирования в глубоких слоях моря подтверждены данными STD измерений термохалинной структуры вод, а также выполненными научным сотрудником ТОИ И.В. Машкиной оценками траекторий дрейфа и скорости течения в глубинном слое моря, полученными по данным дрейфующих буев Арго. Модельные расчёты на поверхности моря верифицировались данными о вихревых структурах и скоростях течений, полученными старшим научным сотрудником ТОИ В.А. Дубиной при анализе спутниковой информации.

– А что происходит в заливе Петра Великого?

– В численных экспериментах с наиболее высоким горизонтальным разрешением (1.25 км) для области, включающей залив Петра Великого и прилегающую часть глубокого моря, впервые моделировалась эволюция как мезомасштабных вихрей, так и короткоживущих (1-2 суток) субмезомасштабных вихрей с диаметром до 10-12 км. Показано, что мезомасштабные антициклоны образуются, как правило, у юго-восточной границы внешнего шельфа залива (у мыса Поворотный) над кромкой шельфа и континентального склона Центральной котловины моря. В тёплый период года они перемещаются с Приморским течением к западной границе залива.

Один из антициклонических вихрей выходит на квазистационарный режим в западной части залива на траверзе мыса Гамова под влиянием рельефа материкового склона, шельфа, очертания берега. Осенью формируется направленное на северо-восток устойчивое тёплое течение вдоль западного склона шельфа залива Петра Великого и антициклонический вихрь смещается от западной границы в центральную часть залива. Это юго-западное течение значительно усиливается, становится наиболее протяжённым в западной части залива при смене летнего муссона на зимний.

Субмезомасштабные циклонические вихри, как правило, образуются и перемещаются в струйных течениях, в том числе



Сотрудники лаборатории физической океанологии ТОИ ДВО РАН, работающие с момента её образования

Командировка

Антарктическая экспедиция



В.И. ПОНОМАРЁВ и научный сотрудник лаборатории ледовых исследований ТОИ ДВО РАН **Светлана ШКОРБА**

на периферии мезомасштабных антициклонов. Эти вихри регулярно образуются, перемещаются и диссипируют, образуя зоны дивергенции скорости течения и отрицательные аномалии температуры в верхнем перемешанном слое моря за счёт направленной к поверхности моря вертикальной скорости и вовлечения холодных вод из нижележащего слоя. Из численных экспериментов с гидродинамической моделью следует, что диаметр субмезомасштабных вихрей возрастает при увеличении толщины верхнего перемешанного слоя моря.

Мы показали взаимосвязь мезомасштабных антициклонических и субмезомасштабных циклонических вихрей в заливе Петра Великого в начале холодного сезона. С помощью модели МГИ смоделировали процесс разрушения мезомасштабного антициклонического вихря на внешнем шельфе залива под влиянием вторжения меньшего циклона. Такое вторжение реализуется при хорошо выраженном чередовании областей положительной и отрицательной завихренности и локальных максимумов скорости струйных течений в спиральной структуре антициклонического вихря.

Субмезомасштабный циклон вторгается в мезомасштабный антициклон с его периферии со струйным течением с циклонической завихренностью. В результате адвекции циклона в центральную часть антициклона этот мезомасштабный вихрь диаметром около 60 км распадается несколько вихревых структур меньшего масштаба. В образовавшуюся вихревую систему входят, как антициклонические, так и циклонические мезомасштабные вихри.

Серия работ выполнена при поддержке комплексных программ фундаментальных исследований ДВО РАН, проектов № 15-1-1-047, 15-1-1-003, 18-1-010 (научный руководитель – кандидат географических наук В.Б. Лобанов), а также гранта РНФ 16-17-10025 (научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор С.В. Пранц).

– Владимир Иванович, а как могут быть использованы результаты цикла работ?

– Полученные результаты численных экспериментов использовались для анализа переноса и перемешивания вод в заливе Петра Великого и Татарском проливе, анализа эволюции антициклонических вихрей Приморского течения, сезонной эволюции вертикальной структуры антициклонического вихря в глубокой части Японской котловины. Разработанные и реализованные в лаборатории Сер-

гея Владимировича Пранца методы Лагранжева анализа позволили определить происхождение вод – с какой границы пришли частицы воды в северную часть Татарского пролива за конкретные интервалы времени, сколько времени находятся частицы в вихревых структурах, как вихри и течения обмениваются частицами.

Полученные результаты в области моделирования мезомасштабной циркуляции в северо-западной части Японского моря имеют значение для дальнейшего развития, как фундаментальных, так и прикладных исследований, в том числе в области оперативной океанографии.

В перспективе результаты гидродинамического моделирования могут служить, например, для получения оперативных карт скорости струйных течений, циркуляции в мезомасштабных вихрях в каждые конкретные часы или сутки во всех слоях моря, в том числе в заливе Петра Великого, Татарском проливе, в глубокой части Японского моря.

– Могут ли полученные результаты иметь практическое значение? В чём оно?

– Полученные результаты имеют практическое значение. Одним из примеров, является поиск унесённых течением и ветром, потерявших управление, телефонную и радиосвязь лодок и маломерных судов. Такие события нередко случались, в том числе с детьми и их родителями, которые оказывались в своих управляемых лодках совсем не там, где их искали, руководствуясь лодочными и средними сезонными схемами скоростей течений в заливе Петра Великого. Это связано именно с синоптической изменчивостью мезомасштабной циркуляции и системы струйных течений в заливе.

– Какие исследования планируете на ближайшие годы?

– В ближайшие годы планируется использование гидродинамической модели с высоким горизонтальным разрешением для исследования мезомасштабной циркуляции в Японском море и прилегающей части Охотского моря, водообмена в проливах между этими морями.

С использованием методов численного моделирования и анализа данных наблюдений планируется исследование мезомасштабной и субмезомасштабной циркуляции на внутреннем шельфе залива Петра Великого, в том числе под зимним ледяным покровом в Амурском и Уссурийском заливах.

– Удачи вам и новых научных свершений!

Анастасия КУЛИКОВА
Фото Леонида МАКОГИНА

В настоящее время Российская академия наук проводит комплексную экспедицию по теме: «Ресурсные исследования криля и экосистемы Южного океана (атлантический сектор Антарктики)» на борту НИС «Академик Мстислав Келдыш» (рейс № 79) с декабря 2019-го по апрель 2020 года. Экспедиция выполняется по маршруту п. Калининград – п. Монтевидео – п. Ушуйя – п. Калининград. Научная программа экспедиции направлена на решение ключевых задач в области исследования природных комплексов антарктических вод, которые поставлены перед фундаментальной наукой «Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации» (Указ Президента РФ от 01 декабря 2016 г.), «Стратегией развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года» (распоряжение Правительства РФ от 8 декабря 2010 г.) «Стратегией развития деятельности Российской Федерации в Антарктике на период до 2020 года и на более отдалённую перспективу», подписанной Президентом РФ 30 октября 2010 г.; получение новых результатов, необходимых для оценки состояния экосистем Антарктики и Южного океана и влияния на них климатических изменений, оценки роли и места Антарктики в глобальных климатических изменениях, активизации российского присутствия в Южном полушарии и выполнения международных обязательств Российской Федерации как стороны Договора об Антарктике и Конвенции по сохранению морских живых ресурсов Антарктики.

Основная научная цель экспедиции – оценка современных климатических трендов и их влияния на природные комплексы Южного океана, биологическую продуктивность, структуру и пространственную организацию пелагических и донных экосистем Антарктики, а также оценка потенциальных возможностей изъятия биологических ресурсов и иных форм антропогенного воздействия. В работах принимают участие сотрудники десяти организаций: ИО РАН, ННЦМБ ДВО РАН, ТОИ ДВО РАН, МГИ РАН, ФИЦ ИНБЮМ РАН, ИПЭЭ РАН, ИПМТ ДВО РАН, НИИ

«Аэрокосмос», ИОГЕН РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова. Первый атлантический этап экспедиции успешно завершился 8 января в порту Монтевидео.

На первом этапе работы выполнялись по ходу судна в Атлантическом океане. В этот период сотрудники ТОИ ДВО РАН провели исследования содержания и потоков ртути в системе «океан-атмосфера», изучение оптически и биооптически характеристик толщи вод, исследования первичной продукции и её региональной и временной изменчивости, оценку фотосинтетического потенциала фитопланктона, исследования содержания метана в воде и его потока в атмосферу, а также интенсивности микробных процессов, обеспечивающих круговорот углерода и метана в водной толще. В ходе выполнения этих задач был получен большой массив уникальных данных, а также образцов воды, планктона и др., которые в настоящее время обрабатываются в береговых лабораториях и на судне. Например, участники экспедиции ТОИ ДВО РАН впервые выполнили измерения концентрации метана в районах экваториального течения Ломоносова и канала Вима. Наиболее значимым результатом стало обнаружение повышенной концентрации метана в придонном и глубинном водных горизонтах канала Вима, связанных с переносом охлаждённой антарктической воды из Аргентинской котловины в Бразильскую котловину. Этот результат позволяет по-новому оценить роль придонных течений в глобальном переносе метана и должен учитываться при построении климатических моделей, а также при построении моделей газопереноса на границе «океан-атмосфера». При исследовании Ломоносовского течения можно сделать вывод, что в центре, где наибольшая скорость, наблюдаются минимумы интенсивности микробных процессов. А по краям течения происходит увеличение скоростей деструкции Сорг и сульфатредукции. Распределение частотных пиков метанотрофии и метаногенеза в меридиональном разрезе через Атлантический океан позволяет сделать вы-

вод о наличии разной степени влияния факторов окружающей среды на эти процессы.

Также, в рамках этой экспедиционной программы по теме ФНИ «Комплексные исследования окружающей среды Южного океана» в период с 9 по 16 января 2020 года состоялась рабочая встреча сотрудников ТОИ ДВО РАН с учёными Факультета научных исследований Республиканского Университета (г. Монтевидео, Уругвай).

Республиканский Университет является старейшим и вторым по величине высшим учебным заведением Южной Америки. Кроме образовательной деятельности, сотрудники Факультета научных исследований выполняют проекты в области морской геологии, изучения глобальных процессов изменения климата, экстремальных океанологических событий, биогеохимии, гидрохимии, в том числе в эстуариях, гидробиологические и микробиологические исследования, а также занимаются вопросами устойчивого развития прибрежных территорий, проводят наземные исследования в области геофизики и геологии Уругвая.

В ходе визита были обсуждены актуальные вопросы, связанные с исследованиями в Антарктике, в области седиментологии, межбассейновыми корреляциями сигналов проявлений глобальных процессов, обусловленных явлениями «Эль-Ниньо», сейсмико-тектонической активизации, продукционными процессами в толщах вод. В частности, коллеги сообщили о значительных гидрохимических изменениях в гидролого-гидрохимическом режиме крупных рек Южной Америки, об аномальной цветности цианобактерий и других особенностях. Необходимо отметить, что в этот период в Южном полушарии лето, и в Университете были каникулы. Научные сотрудники используют это время для проведения экспериментальных работ, написания публикаций и подготовки диссертаций.

В итоге визита коллеги выразили заинтересованность в установлении сотрудничества с Дальневосточным отделением РАН, особенно в области океанологии. Коллеги также заинтересованы в сотрудничестве в области образования с Дальневосточным федеральным университетом, в обмене студентами и аспирантами. Экспедиционные исследования океанологи Уругвая проводят, как правило, совместно на научно-исследовательских судах Перу. Они выразили заинтересованность в совместных экспедициях и выполнении сравнительных экспериментальных работ с НИИ ДВО РАН.

В рамках командировки была достигнута договорённость о подписании Меморандума о взаимопонимании и отобраны образцы горных пород и воды для сравнительных исследований.

А в это время экспедиция на НИС «Академик Мстислав Келдыш» начала выполнение исследований второго этапа в проливе Дрейка.

Ренат ШАКИРОВ,
доктор геолого-минералогических наук



Участники рабочей встречи на Факультете научных исследований (слева направо): Каролина БУЭНО (аспирант), Доктор Эрнесто БРУНОЛИ, Ренат Белалович ШАКИРОВ и Доктор Густаво НАГИ.