

2.5. ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ

УДК: 551.46

DOI/10.48612/spbrc/48e9-2h39-rdpr

Водно-вихревые и биогеохимические процессы в глубине и на границе раздела «вода – воздух» в широком диапазоне масштабов. Исследования Санкт-Петербургских океанологов

*А.А. Родионов, Д.А. Романенков, А.Ю. Дворников, М.А. Родионов,
А.В. Зимин, Т.И. Малова*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук 199004, Санкт-Петербург, 1-я линия Васильевского острова, дом 30

В настоящей статье приводятся основные научные достижения Санкт-Петербургского филиала Института океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук за последние два года.

1. Динамика океана

В период 2021–2022 гг. основные направления исследований Лаборатории численных экспериментов по динамике океана включали:

- моделирование поверхностных и внутренних приливов в море Лаптевых и приливные изменения его регионального климата;
- технологию прямого моделирования и исследования морских волн;
- моделирование приводного волнового пограничного слоя.

Рассмотрим подробнее отмеченные направления.

Моделирование поверхностных и внутренних приливов в море Лаптевых и приливные изменения его регионального климата. В рамках исследования приливных изменений регионального климата моря Лаптевых на основе высокоразрешающего моделирования были воспроизведены пространственные распределения климатических характеристик и интегральных по глубине составляющих бюджета бароклинной энергии в море. Микроструктурные измерения в море Лаптевых показали эпизодическое, коррелирующие с полусуточным приливом, усиление диссипации кинетической энергии турбулентности на шельфе и на континентальном склоне примерно на два порядка величины по сравнению с фоновыми значениями. Современные модели климата моря могут включать приливное воздействие, но их пространственного разрешения недостаточно для корректного воспроизведения внутренних приливных волн. Считается, что даже при

явном учете приливного форсинга, если пространственное разрешение недостаточно, требуется дополнительная параметризация приливного диапикнического перемешивания, обусловленного эффектами внутренних приливных волн. Все существующие параметризации приливного перемешивания основаны на приближении «слабого взаимодействия», когда различие частот фоновой и приливной турбулентности велико, и можно пренебречь нелинейным взаимодействием между ними. В этом случае влияние приливного диапикнического перемешивания учитывается путём сложения его с фоновым турбулентным перемешиванием. В большинстве параметризаций для определения коэффициента диапикнической диффузии k_p используется формула Осборна:

$$k_p \approx 0,2 \cdot \left\langle \frac{-\dot{\epsilon}}{\rho} \right\rangle \cdot N^{-2} ,$$

где $\dot{\epsilon}$ – локальная скорость диссипации бароклинной приливной энергии; ρ – средняя плотность морской воды; N – частота плавучести Брента-Вяйсяля; угловые скобки означают усреднение за приливный цикл.

Основное различие подходов заключается в определении диссипации бароклинной приливной энергии. Наиболее популярные параметризации предполагают, что диссипация бароклинной приливной энергии может быть описана орографическим сопротивлением, в этом случае аргументами для ее определения выступают диссипация баротропной приливной энергии и вертикальный масштаб вырождения, на котором диапикническая диффузия убывает по экспоненциальному закону с расстоянием от дна.

Предлагается другой способ учета диапикнического перемешивания, основанный на непосредственных модельных оценках диссипации бароклинного прилива. Для этого была решена вспомогательная задача воспроизведения динамики бароклинного прилива (волна M_2) и его энергетических характеристик в море Лаптевых с помощью трехмерной гидростатической модели высокого разрешения QUODDY-4 [1]. На рисунке 1 представлены результаты анализа расчетов. Максимальные значения диапикнической диффузии до 10^{-1} $\text{м}^2/\text{с}$ приходятся на районы с выраженной приливной динамикой (Хатангский залив) и изрезанным рельефом дна (окрестности свала глубин, северо-западная часть моря). Был оценен вертикальный масштаб вырождения внутренних приливных волн как расстояние от дна, ниже которого коэффициент диапикнической диффузии превышает 10^{-5} $\text{м}^2/\text{с}$. На шельфе масштаб вырождения равен 20–30 м, на континентальном склоне – 100–400 м, в глубоководной части моря – 50–100 м. Наблюдаемая пятнистая структура обеих характеристик на рисунке 1 говорит в пользу использования предложенной параметризации приливного диапикнического перемешивания, в сравнении с

параметризациями через орографическое сопротивление, в которых вертикальный масштаб вырождения задается постоянной величиной.

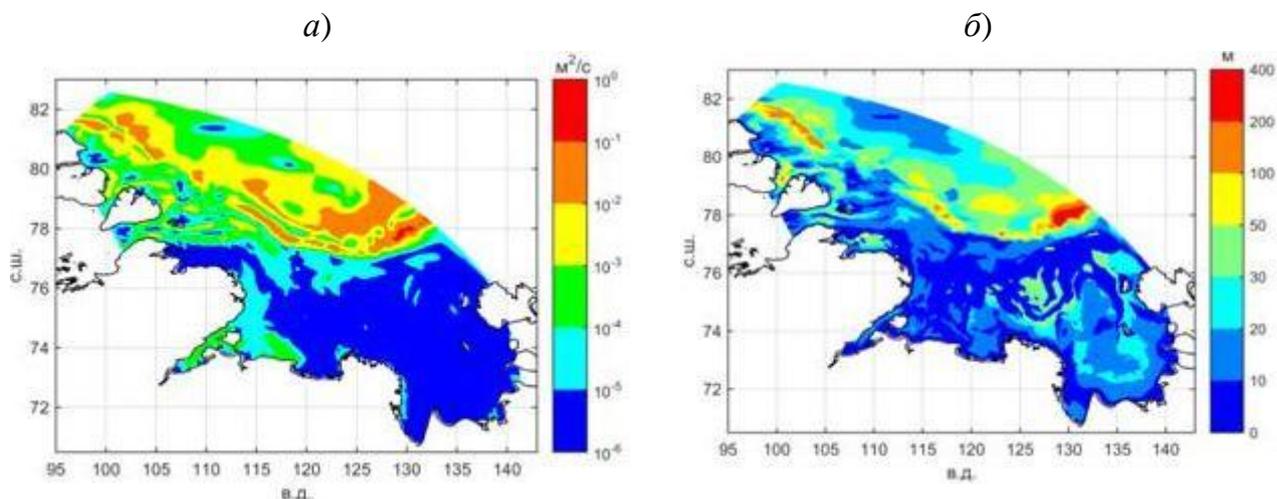


Рис. 1. Результаты моделирования бароклинного прилива в море Лаптевых:
а – средний по глубине коэффициент приливной диапикнической диффузии;
б - вертикальный масштаб вырождения внутренних приливных волн

Для апробирования предложенной параметризации была выполнена серия численных экспериментов по установлению климата моря Лаптевых в летний период с учетом и без учета приливного диапикнического перемешивания. Детали модельных расчетов, а также характеристики сеток и внешних воздействий изложены в [2]. По результатам моделирования нескорректированный и скорректированный (за счет приливной диапикнической диффузии) коэффициенты вертикального турбулентного перемешивания отличаются друг от друга на несколько порядков величины. Можно ожидать, что вклад эффектов внутренних приливных волн в формирование климата моря Лаптевых будет значимым наряду с другими климатообразующими факторами. Следующий пример из результатов моделирования иллюстрирует этот вывод. Оценивая средние (по площади моря) приливные изменения температуры (рис. 2) и солености в сравнении с климатической нормой, убеждаемся, что общепринятое игнорирование приливных изменений температуры и солености морской воды оправдано лишь частично: оно справедливо для средних (по площади моря) значений и не справедливо для экстремальных величин. Это означает, что существующие сейчас методы прогноза и расчета экстремальных значений температуры и солености морской воды в части объема моря в данном случае нуждаются в ревизии. Результаты исследования должны использоваться в региональных климатических моделях арктических морей.

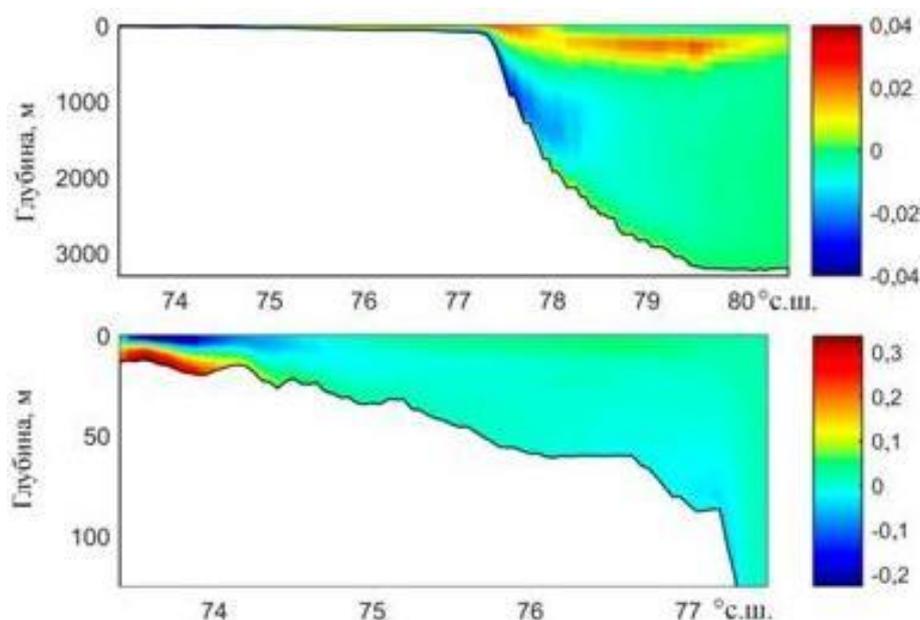


Рис. 2. Приливные изменения температуры морской воды ($^{\circ}\text{C}$) вдоль меридионального разреза 120° в.д. в море Лаптевых. На верхнем фрагменте они показаны вдоль всего разреза, на нижнем – вдоль его мелководной части в увеличенном масштабе

Технология прямого моделирования и исследования морских волн.

Выполнено сравнение основных подходов к прямому моделированию поверхностных волн, основанных на полных потенциальных уравнениях динамики жидкости со свободной поверхностью [3]. Большинство таких моделей предназначены для изучения прикладных и инженерных задач. Рассмотрена приближенная схема, основанная на двумерных уравнениях [4]. Этот подход применяется к моделированию двумерных периодических волновых полей с разрешением по фазе. Основная идея схемы вытекает из представления потенциала скорости как суммы линейных и нелинейных составляющих. Решение для линейной составляющей известно аналитически, следовательно, нелинейная составляющая должна быть вычислена с помощью уравнения Пуассона с нулевым граничным условием на поверхности. Такой подход предлагает новый способ упростить вычисления, рассматривая двумерное уравнение Пуассона на поверхности. Роль прямого моделирования возрастет в связи с тем, что его можно будет использовать для уточнения спектрального моделирования. Схема позволяет воспроизводить статистический режим волн с высокой точностью, согласующейся с аналогичными результатами, полученными в точной трехмерной модели. На рисунке 3 показаны результаты сравнения решений в двух постановках. Близость кривых, соответствующих каждой постановке, доказывают идентичность результата моделирования, но затрачиваемое на расчет время в двумерной модели оказывается примерно на два порядка меньше.

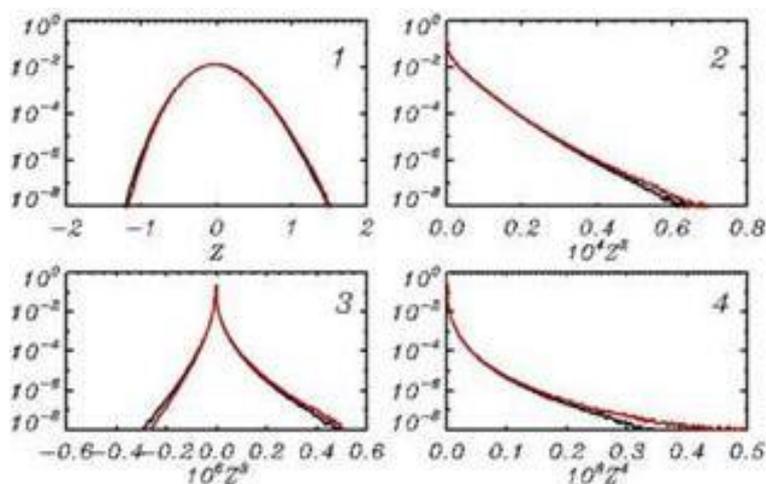


Рис. 3. Сопоставление вероятности высокого порядка распределения статистических моментов волновой поверхности, рассчитанной с точной трехмерной (черный цвет) и упрощенной двумерной (красный цвет) волновыми моделями. Панели 1–4 представляют безразмерные величины $Z^n = (\eta/H_s)^n$, $n=1, 2, 3, 4$, соответственно (η – высота волн, H_s – характерная высота волн)

Моделирование приводного волнового пограничного слоя.

Сформулирована модель ветрового волнения [5], включающая два компонента: одномерную волновую модель пограничного слоя (ВПС) и двумерную волновую модель. Объединенная модель используется в двух вариантах: при наличии и отсутствии волнового потока импульса. Проведена серия экспериментов для разных внешних параметров: скорости ветра на верхней границе волнового пограничного слоя и возраста обратной волны. Изучены вертикальные профили скорости ветра, турбулентного и волнового потоков импульса, которые были сопоставлены с результатами, полученными по модели волнового пограничного слоя. Сравнение показало, что результаты совместного моделирования в точности совпадают с результатами модели волнового пограничного слоя в случае полностью развитых волн и существенно отличаются, если рассматривать развивающиеся волны. Показано, что создаваемый волной поток импульса вызывает значительные отклонения профиля скорости ветра в нижней части пограничного слоя волн от логарифмического профиля (рис. 4). Использование при совместном моделировании спектра, меняющегося в процессе развития ветрового волнения, является наиболее достоверным и полным способом описания взаимодействия ветра и волн. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что моделирование объединенной динамики волнового пограничного слоя и волн не дает количественно или качественно принципиально новых результатов, если рассматривается полностью развитое волнение. Однако для слаборазвитого волнения это оказывается неверно. В частности, результаты расчетов по модели волнового пограничного слоя для рассмотренных метеорологических характеристик являются в разной степени

завышенными по сравнению с результатами совместного моделирования. Это подтверждает также гипотезу о необходимости учета волнового потока импульса при исследовании волнового пограничного слоя. Существующие модели, изучающие пограничный слой над водной поверхностью, как правило, не учитывают разделение общего потока импульса на волновую и турбулентную составляющую, следовательно, не учитывается и отклонение профиля скорости ветра от логарифмического распределения, примененного при описании пограничного слоя атмосферы. Проиллюстрированные результаты экспериментов демонстрируют, что профиль скорости ветра с учетом вклада волнового потока импульса существенно отличается от логарифмического, причем с увеличением скорости на верхней границе ВПС такие отличия становятся все более значимыми, достигая вблизи поверхности разницы в 40–50 %. Подобные отклонения проявляются при всех заданных значениях обратного возраста волны. Можно полагать, что включение в прогностические волновые модели параметризаций волновых потоков импульса может улучшить качество прогноза ветрового волнения.

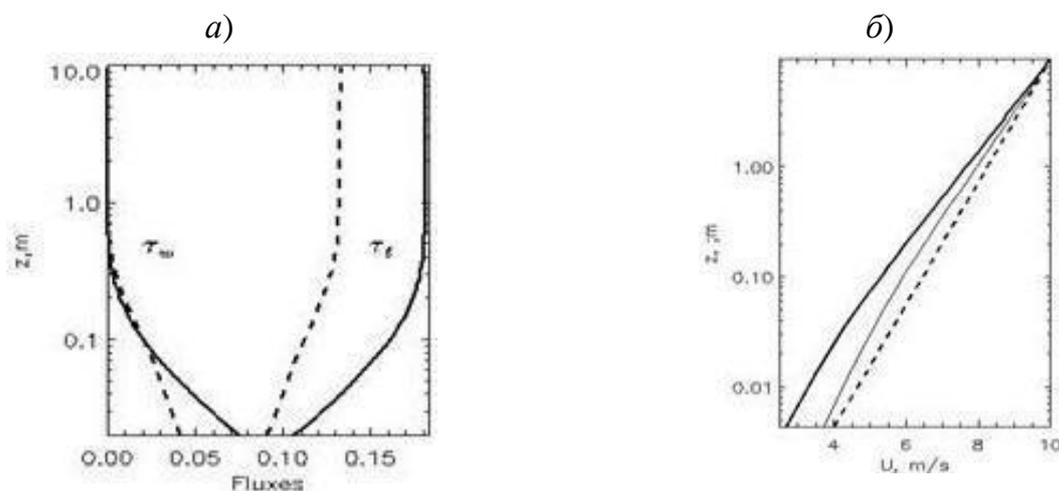


Рис. 4. Результаты расчета по совместной модели ветровых волн и волнового пограничного слоя: *a* – профили турбулентного τ_t и волнового τ_w потоков импульса для $U_{10}=10$ м/с (сплошные кривые – модель ВПС, пунктирные – совместная модель при возрасте волн $\Omega_0=8$; *б* – профили скорости ветра для $U_{10}=10$ м/с (толстые сплошные кривые – модель ВПС, тонкие сплошные кривые – совместная модель, пунктирные кривые – совместная модель без учета волнового потока импульса (ВПИ) при возрасте волн $\Omega_0=8$

2. Океанические биогеохимические процессы

Одно из основных направлений работ Лаборатории моделирования океанских биогеохимических циклов в 2022 г. приведено ниже.

Актуальная задача современной лимнологии – диагноз и долгосрочное прогнозирование состояния водных экосистем крупных озер для планирования

экономической деятельности, рационального использования и охраны внутренних водоёмов. При наличии многих пользователей ресурсов крупных озер, таких как энергетика, водный транспорт, питьевое и промышленное водоснабжение, биоресурсы, рекреация, принятие управленческих решений должно быть основано в основе современной системы управления водными ресурсами. Современные системы управления ресурсами крупных озер должны быть основаны на математических моделях, которые позволяют проводить оценку текущего состояния экосистемы и прогнозировать ее будущее при различных социо-экономических сценариях в условиях изменений климата.

Для решения задач, связанных с диагнозом и прогнозом состояния экосистемы Онежского озера, была разработана трехмерная эко-гидродинамическая модель, учитывающая процессы, протекающие как в водной среде, так и в донных отложениях. В качестве подмодели биогеохимических циклов использовалась модель, разработанная и успешно применявшаяся для Балтийского моря. В качестве гидродинамической основы модели была использована модель Массачусетского технологического института MITgcm. Модель использовалась для реконструкции динамики экосистемы Онежского озера за три десятилетия (1985–2015 гг.) на сетке с горизонтальным шагом 2×2 км. Одним из важнейших показателей, отражающих состояние экосистемы водоёма, является первичная продукция. Сравнение с доступными данными натурных наблюдений первичной продукции (рис. 5) показывает, что модель достаточно хорошо воспроизводит динамику экосистемы Онежского озера.

Пространственная неоднородность первичной продукции и биомассы фитопланктона в сезонной изменчивости хорошо видна при сравнении среднемноголетнего сезонного цикла для открытых районов и губ Онежского озера (рис. 6 *з, д*). На рисунке хорошо видно, что в центральном и южном лимнических районах озера наблюдается ярко выраженный весенний максимум, летняя фаза и незначительный осенний пик цветения, связанный с началом осеннего конвекционного перемешивания. В отличие от открытых районов в Петрозаводской губе наблюдаются два практически равных по величине пика первичной продукции в конце мая и в конце июля, при этом второго ярко выраженного пика в биомассе не наблюдается. Это говорит о том, что летний пик первичной продукции обусловлен развитием летних видов фитопланктона, который дает незначительный вклад в общую биомассу. Аналогичная сезонная изменчивость наблюдается и в Кондопожской губе, но с тем отличием, что по сравнению с Петрозаводской губой осенний пик цветения сдвинут на середину сентября. Полученный результат хорошо согласуется с представлениями в фенологии первично-продукционного процесса в Онежском озере, описанного на основе данных натурных наблюдений [6].

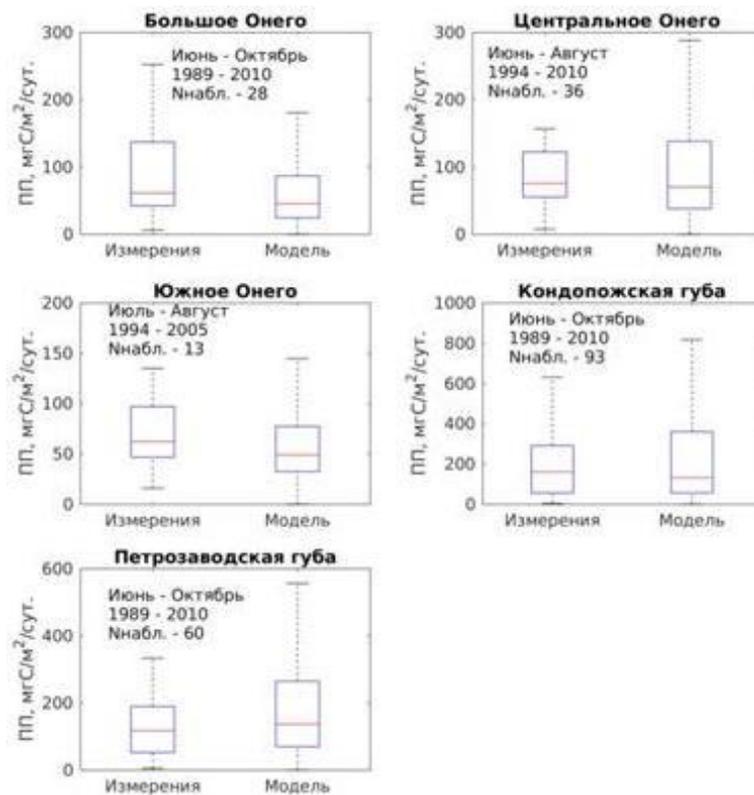


Рис. 5. Сопоставление результатов моделирования первичной продукции с данными натуральных наблюдений в различных лимнических районах Онежского озера

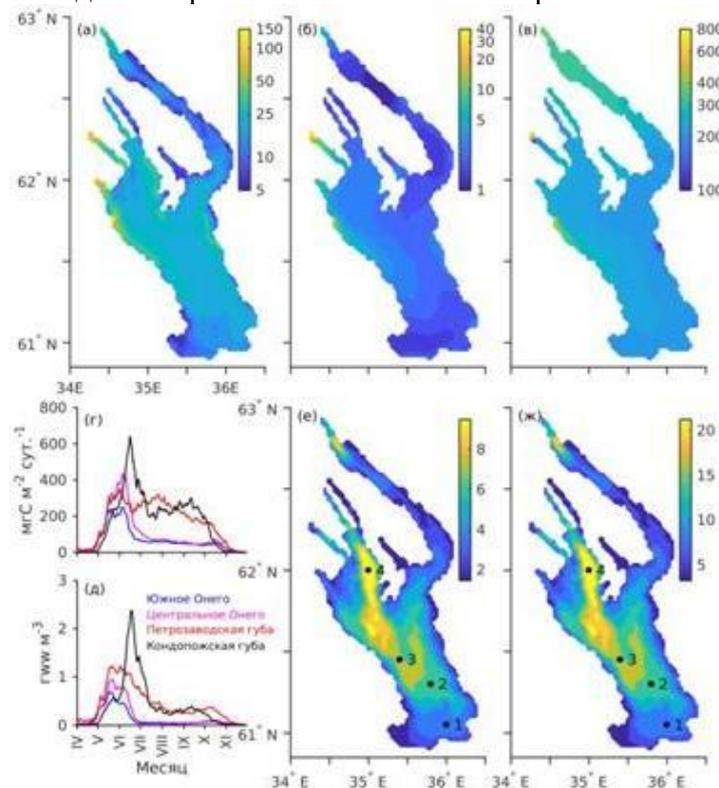


Рис. 6. Осредненное за период 1985–2015 гг. распределение годовой первичной продукции, $гC/m^2/год$ (а), содержание фосфора, $мг/м^3$ (б) и азота, $мг/м^3$ (в) в период максимального накопления в зимний период, средней сезонный ход первичной продукции (г) и биомассы фитопланктона (д) в различных районах Онежского озера и содержание в донных отложениях фосфора, $мгP/m^2$ (е) и азота, $мгN/m^2$ (ж)

Анализ численных экспериментов, выполненных на разработанной модели, подтвердил наличие мощного весеннего цветения диатомовых водорослей, предполагавшееся в опубликованной ранее фенологической схеме, основанной на данных натуральных наблюдений. Начало весеннего цветения определяется увеличением светового потока в условиях обратной стратификации и впоследствии поддерживается весенней конвекцией, характерной для пресноводных водоёмов.

Полученные количественные оценки баланса фосфора и азота, основанные на результатах моделирования, показывают, что вклад весеннего цветения в формирование годовой продукции Онежского озера составляет около 50 % от годовой продукции, которая, в свою очередь, равна 176 232 тоннам углерода в год. Интенсивность внутреннего круговорота фосфора и азота значительно превышает обмен через внешние границы системы. Время лимнического оборота, определяемого внешними воздействиями, составляет 3,2 года для фосфора и 12,4 года для азота. Время оборота в системе «водная колонка – донные отложения» составляет 47 лет для фосфора и 17 лет для азота. Более короткое время оборота азота объясняется денитрификацией донных отложений, часто игнорируемой в лимнологических исследованиях других крупных озёр.

Основываясь на результатах верификации, можно сделать вывод о том, что разработанная модель может быть использована для проведения оценок будущего состояния Онежского озера при различных сценариях социо-экономического развития региона в условиях меняющегося климата.

3. Оптика океана и атмосферы

На протяжении последнего времени одной из основных задач в Лаборатории оптики океана и атмосферы была обработка накопленных массивов экспериментальных данных, а именно данных лидарного зондирования морских акваторий. Цель обработки серии лидарных эхо-сигналов – поиск и определение параметров квазипериодических процессов, обусловленных распространением короткопериодных внутренних волн. Необходимо зарегистрировать наличие квазипериодических структур, определить период, амплитуду, количество колебаний в волновом пакете и время его прихода.

Для комплексной обработки данных лидарной съёмки использовались три метода: аппроксимационный метод, метод вейвлет-анализа и метод Гильберта-Хуанга. Каждый из них основан на анализе формы спада эхо-сигнала и её изменения в серии зондирований. В работе [7] показана эффективность применения аппроксимационного метода при обработке сигналов лидарного зондирования толщи морской воды с двухслойной стратификацией гидрооптических характеристик. Суть

метода заключается в выделении участков спада эхо-сигнала и подборе для них параметров аналитической функции аппроксимации, вид которой следует из лидарного уравнения [8]. Найденное таким образом положение границ слоев соответствует положению пикноклина. Положение границ между слоями под воздействием разных гидрофизических факторов меняется со временем. Обработка массива данных лидарного зондирования позволяет дистанционно регистрировать эти изменения.

Достоинством данного метода является возможность получения наглядной картины вертикальных смещений положения границ между слоями, приуроченными к положению термоклина, позволяющей оценить период, амплитуду, количество колебаний в цуге и время регистрации квазипериодических структур. В настоящее время метод является довольно трудоемким, поскольку существующая программа обработки требует участия оператора для анализа каждого эхо-сигнала.

Два других использованных в работе метода основаны на спектральном анализе изменения амплитуд эхо-сигналов с фиксированной глубины, несущей информацию о значении коэффициента обратного рассеяния. В этом случае анализ данных лидарного зондирования представляет собой задачу поиска квазипериодических изменений амплитуды сигнала обратного рассеяния на заданных горизонтах.

На рисунках 7–9 показаны примеры результата комплексной обработки данных лидарного зондирования на одном из галсов, выполненных в акватории Черного моря с борта судна.

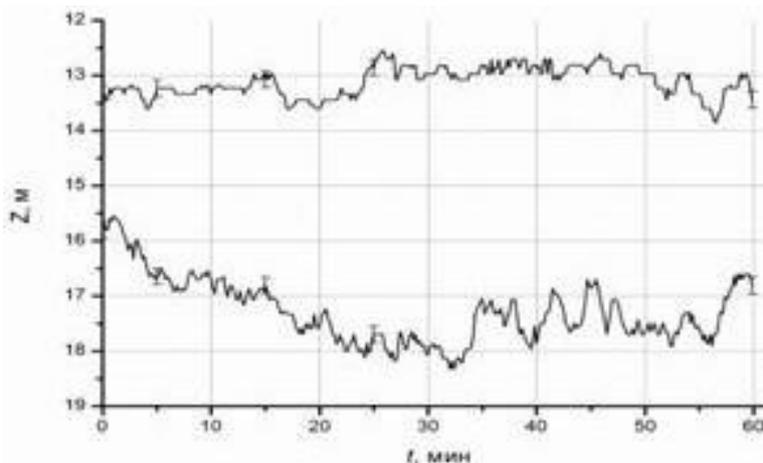


Рис. 7. Положение верхней и нижней границ промежуточного слоя, полученные в результате обработки данных лидарной съемки на галсе №1 аппроксимационным методом

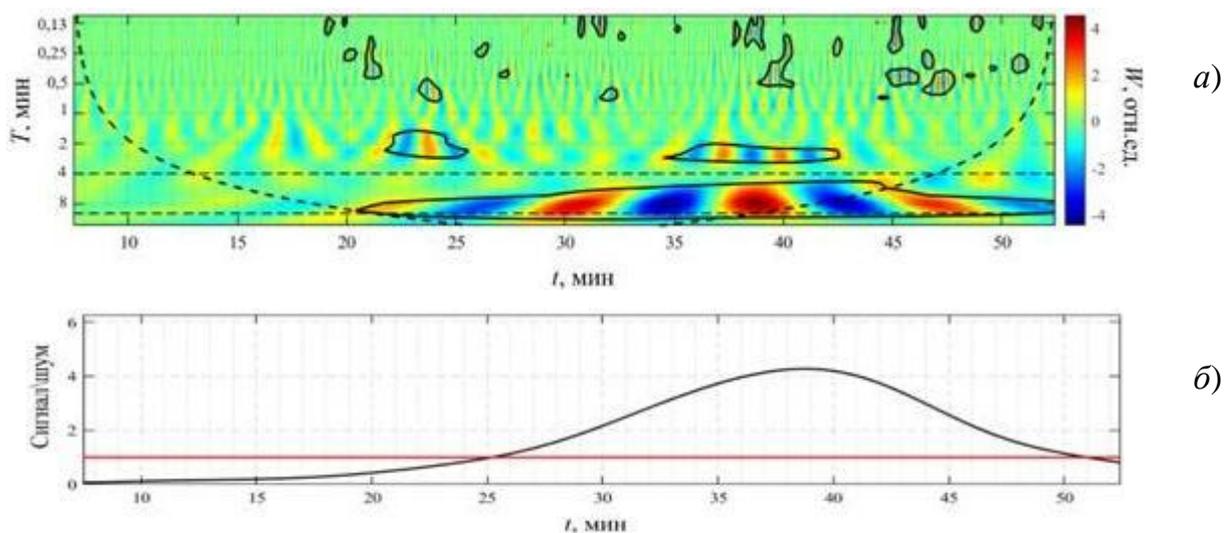


Рис. 8. Результат обработки данных галса №1 с фиксированной глубины 17 м с помощью вейвлет-анализа: *а* – амплитуды коэффициентов вейвлет-преобразования, *б* – усредненная по временным масштабам мощность вейвлет-спектра, нормированная на 95 %-й уровень значимости по отношению к фоновому красному шуму

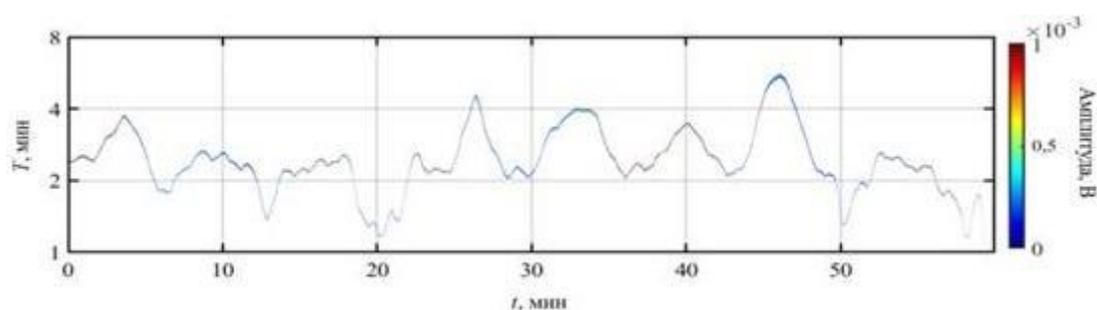


Рис. 9. Вид внутренней модовой функции, характеризуемой периодами от 1 до 8 мин, полученной при обработке распределения амплитуд эхо-сигналов с глубины 17 м на галсе № 1 методом Гильберта-Хуанга

Результаты, полученные с использованием спектральных методов, а именно период и локализация квазипериодических структур на галсе, для всех обработанных галсов достаточно хорошо согласуются между собой и с результатом, полученным аппроксимационным методом. Некоторые расхождения в положении и периодах выделенных колебаний обусловлены нестрогой периодичностью и малым количеством периодов, затрудняющих спектральный анализ.

Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки. Наиболее наглядным является аппроксимационный метод, позволяющий получить картину вертикальных смещений областей с резкими градиентами показателя ослабления, приуроченных к слою скачка плотности. Преимущество примененных спектральных методов – вейвлет-анализа и преобразования Гильберта-Хуанга – возможность

быстрой обработки большого массива данных, позволяющая определить период и локализацию квазипериодических процессов.

В настоящее время в аппроксимационном методе используется метод экспертной оценки, что делает его применение весьма трудоемким. Поэтому при обработке больших массивов данных целесообразно на первом этапе проводить быструю обработку автоматизированными спектральными методами, а детальную обработку аппроксимационным методом проводить только для тех участков съемки, на которых выявлены квазипериодические процессы. Такой подход позволяет относительно быстро получить наиболее полную информацию.

4. Геофизические пограничные слои

В 2022 г. основные направления работ Лаборатории включали:

- анализ характеристик короткопериодных внутренних волн и малых вихрей на принципиально различных шельфах приливных морей;
- оценку корректности использования математических конструкций в физических моделях;
- исследование условий стабильности и фазового превращения газовых гидратов в пористых осадках при отрицательных температурах;
- совершенствование методик обработки данных дистанционных и контактных наблюдений;
- оценку изменчивости физико-географических характеристик фронтальных зон арктических морей в условиях современного меняющегося климата.

Наиболее важные результаты были достигнуты в части решения проблемы развития представлений о поле короткопериодных внутренних (КВВ) волн в Мировом океане. Разработан метод количественной оценки вклада различных механизмов в генерацию КВВ, основанной на комплексном анализе данных спутниковых наблюдений с привлечением контактных измерений и приливной модели.

На рисунке 10 показана блок-схема разработанного метода оценки вклада различных механизмов в генерацию КВВ.

На основе применения данной методики в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе Тихого океана были выделены ранее не описанные районы частой встречаемости КВВ. Показано, что в Баренцевом море до 64 % проявлений КВВ в месяц находится в очагах генерации полусуточных внутренних приливных волн (ВПВ), а в Курило-Камчатского регионе до 70 % проявлений КВВ в месяц находится в очагах генерации суточных ВПВ. То есть в исследуемых регионах доминирует механизм генерации КВВ при локальной дезинтеграции полусуточных и суточных субинерциальных ВПВ.

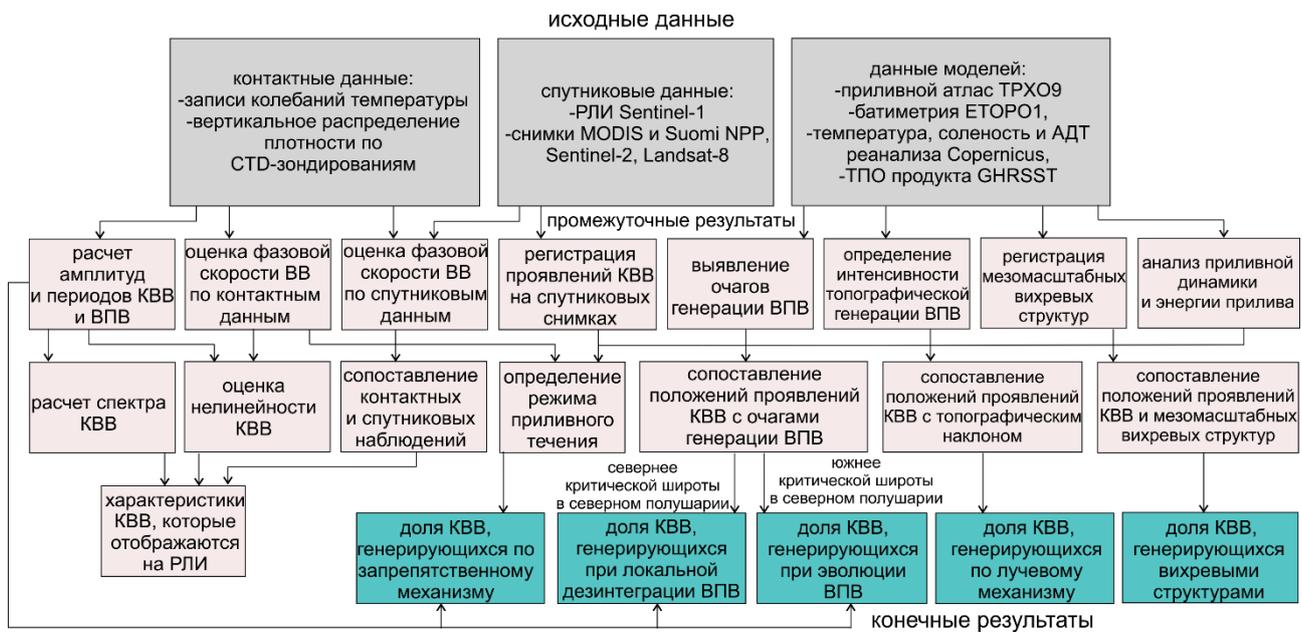


Рис. 10. Блок-схема метода количественной оценки вклада различных механизмов в генерацию КВВ

Вне очагов генерации ВПВ на акватории прибрежных районов Тихого океана от мыса Лопатка до мыса Опасный до 78 % КВВ в месяц генерируются при взаимодействии мезомасштабных вихревых структур с сезонным пикноклином.

На рисунке 11 продемонстрирован случай регистрации проявлений КВВ в области мезомасштабной вихревой структуры и фронтальной зоны 21 июня.

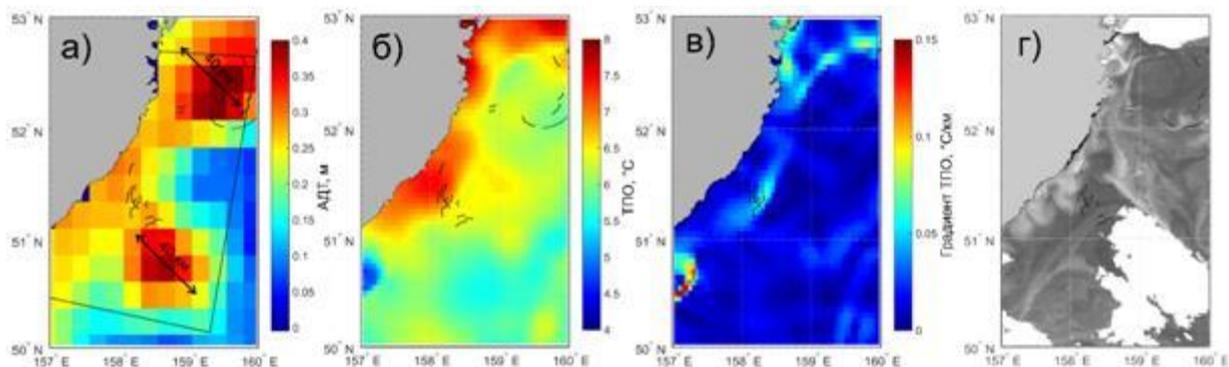


Рис. 11. Композитные карты положений проявлений КВВ с полями: *a* – абсолютной динамической топографии; *б* – ТПО; *в* – градиента ТПО; *г* – яркости зеленого канала спутникового изображения Suomi NPP. Жирной линией показана область наибольшего количества мезомасштабных вихрей в месяц

Литература

1. Каган Б.А., Тимофеев А.А. Определение диссипации бароклинной приливной энергии и связанного с ней коэффициента диапикнической диффузии как

первый шаг оценивания роли приливных эффектов в формировании климатических характеристик моря Лаптевых // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 4. С. 39–49. doi:10.7868/S2073667320040048.

2. *Каган Б.А., Софьина Е.В.* Влияние приливного диапикнического перемешивания на климатические характеристики моря Лаптевых в безледный период // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 2. С. 218–234. doi:10.22449/0233-7584-2022-2-218-234.

3. *Chalikov D.* A 2D Model for 3D Periodic Deep-Water Waves // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. 10 (3). P 410. doi.org/10.3390/jmse10030410

4. *Чаликов Д.В.* Различные подходы к моделированию морских волн // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 1. С. 19–32. doi:10.48612/fpg/u1df-m1x7-1bxg.

5. *Фокина К.В., Булгаков К.Ю.* Совместное моделирование ветровых волн и волнового пограничного слоя // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 1. С. 73–81. doi:10.48612/fpg/4pg1-agtu-u56k.

6. *Теканова Е.В., Сярки М.Т.* Особенности фенологии первично-продукционного процесса в пелагиали Онежского озера // *Известия Российской Академии Наук. Серия биологическая*. 2015. № 6.

7. *Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Родионов М.А.* Лидарный метод регистрации внутренних волн в водах с двухслойной стратификацией гидрооптических характеристик // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14. № 3. С. 86–97. doi:10.7868/S2073667321030084.

8. *Vasilkov A.P., Goldin Yu.A., Gureev B.A., Hoge F.E., Swift R.N., Wright C.W.* Airborne polarized lidar detection of scattering layers in the ocean. *Applied Optics*. 2001. Vol. 40. N. 24. P. 4353–4364. doi:10.1364/AO.40.004353.