

ТРАНСФОРМАЦИЯ И ЭФФЕКТЫ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ МОРЯ

Навроцкий В.В.¹, Ляпидевский В.Ю.²,
Павлова Е.П.¹, Храпченков Ф.Ф.¹

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, 690041, Россия, e-mail: vnavr@poi.dvo.ru

² Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск,
630090, Россия, e-mail: liapid@hydro.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 15.03.2019, одобрена к печати 30.05.2019

Анализ результатов натурных экспериментов в прибрежной зоне зал. Петра Великого (Японское море) производится с точки зрения воздействия внутренних волн (ВВ) на биологические и геоморфологические процессы в шельфовой зоне моря. Основными измеряемыми параметрами были колебания температуры, давления и скорости течений в придонном слое в прибрежной зоне с глубиной дна 20–30 м. Колебания температуры измерялись с использованием заякоренных гирлянд из 20–30 датчиков с интервалом 0,5 м, колебания скорости течений измерялись на 10–15 горизонтах с интервалом 1–3 м. Типичным процессом при распространении ВВ в сторону берега являлась их нелинейная трансформация с образованием устойчивых дискретных «болюсов» – объемов воды с холодным ядром, отделенных от окружающей среды высоко-градиентной прослойкой. Распространяясь в мелководную зону, ВВ способствуют перемешиванию, взвешиванию донных осадков и вентиляции прибрежной зоны. Болюсы могут распространяться дальше в зону мелководья, где непрерывный пикноклин отсутствует, дополняя эффекты внутренних волн и усиливая их. Показано, что биологические эффекты ВВ и болюсов обусловлены их значительным воздействием на основные параметры, определяющие первичную продукцию фитопланктона: концентрацию биогенов, освещенность и колебания температуры.

Ключевые слова: прибрежная зона, внутренние волны, болюсы, перемешивание, фитопланктон, биогены, фотосинтез, температура

Введение

Внутренние волны (ВВ) являются повсеместным явлением в Мировом океане. В шельфовой зоне помимо ВВ, возникших в открытом море и направляющихся в сторону берега, почти всегда присутствуют «собственные» ВВ, которые генерируются динамическими процессами над континентальным склоном. Наиболее регулярным источником энергии этих ВВ является поверхностный (баротропный) прилив, но значительную роль могут играть субмезомасштабные вихри и ветровые флуктуации течений в зоне континентального склона. При наличии устойчивой стратификации, формирующейся, главным образом, за счет сезонного термоклина, в средних широтах преобладает полусуточный внутренний прилив. Инерционные

колебания при наличии течений и вихрей в зоне континентального склона порождают инерционные ВВ, энергия которых может переходить на резонансной (локальной инерционной) частоте в инерционно-гравитационные ВВ. В результате максимумы на полусуточном и локальном инерционном периодах могут чередоваться или проявляться одновременно в спектрах измеряемых ВВ.

Внутренние волны в районе к югу от бухты Витязь и мыса Шульца (основной гидрофизический полигон ТОИ ДВО РАН) исследовались в разные годы разными методами. Наиболее интенсивные измерения проводились с помощью буксируемых распределенных датчиков температуры на пространственных разрезах, вертикальных зондирований на станциях поперек шельфа, длительной регистрации колебаний температуры и солености на заякоренных буйковых станциях вблизи границы шельфа, акустического доплеровского профилографа течений на ходу судна (Навроцкий, 1991; Навроцкий и др., 1989; Серебряный, 1985, 1987, 1990, 1993; Рыбак, Серебряный, 2011). Анализ результатов наблюдений позволил установить, что на шельфе залива Петра Великого преобладают ВВ, генерирующиеся над континентальным склоном в полосе 15–20 км пред границей шельфа. Были описаны синусоидальные и солитоноподобные колебания термоклина, особенности нелинейной трансформации при распространении ВВ к берегу. С использованием теоретического анализа, численного моделирования и результатов наблюдений было показано, что в результате нелинейных взаимодействий внутренних волн и средней структуры поля плотности формируется тонкая вертикальная структура, пикноклин может расщепляться и заглубляться при приближении к берегу (Navrotsky, Plichev, 1988; Навроцкий и др., 2003; Navrotsky, 1999; Navrotsky et al., 2004). Дальнейшая трансформация ВВ происходит на мелководье, где длительные судовые наблюдения затруднены. На некотором расстоянии от берега пикноклин неизбежно становится придонным, и структура внутренних волн становится намного сложнее, чем в удаленном от дна пикноклине (Кукарин и др., 2013; Навроцкий, Павлова, 2012; Ярошук и др., 2016; Navrotsky et al., 2013; Новотрясов и др., 2016). Специфические свойства ВВ, формирование болюсов и характер гидродинамических процессов в придонном стратифицированном слое в настоящее время привлекают большое внимание (Bourgault et al., 2008; Moore et al., 2016; Venayagamoorthy, Fringer, 2007). Поскольку ВВ приносят на мелководье огромную энергию, полученную от крупномасштабных процессов, нам представляется очень важным вопрос о воздействии этой энергии на окружающую среду, главным образом, на жизнь в океане.

Методы и результаты наблюдений

Воздействие внутренних волн на биологические, биохимические и геоморфологические процессы всегда вызывало большой интерес (Lennert-Cody, Franks, 1999; Yang, Ye, Wang, 2010; Pan et al., 2012; Bootman et al., 2006; Masunaga et al., 2015). Поскольку удельная роль ВВ и биогеоморфологических процессов на шельфе намного больше, чем в глубоком океане, их взаимодействие представляет большой интерес как с познавательной, так и с практической точек зрения. Основной

акцент в данной статье делается на роль ВВ в биологических процессах. Главным биологическим объектом в океане является фитопланктон, а главным процессом фотосинтез. Для ответа на вопрос, каким образом ВВ воздействуют на жизнедеятельность фитопланктона, мы привлекаем некоторые результаты натуральных экспериментов, которые проводятся на гидрофизическом полигоне Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН, МЭС «Мыс Шульца» в юго-западной части зал. Петра Великого (Японское море).

В экспериментах производятся детальные и длительные измерения с помощью заякоренных гирлянд термодатчиков (комплекс аппаратуры изготовлен сотрудниками Института Гидродинамики СО РАН), измерителей скорости течений S4A (InterOcean, USA), RDCP-600 (AANDERA), Argonaut-XR и колебаний давления и температуры у дна с помощью приборов SBE26 (USA) и РУМ (Регистратор уровня моря, ТОИ ДВО РАН). Приборы устанавливаются на станциях с глубиной дна 15–30 м на расстояниях 100–300 м от берега, колебания температуры измеряются на 20–40 горизонтах с интервалом 0.5 м в придонном слое толщиной 10–20 м. Временная дискретность меняется от 20 до 40 сек в зависимости от количества датчиков на гирляндах. Температурные ряды при обработке в большинстве случаев сглаживаются для получения дискретности 1 или 2 мин, равной дискретности измерений скорости течений. С помощью RDCP измерялись три компоненты скорости течений на 10–15 горизонтах с интервалом 1 м, с помощью Argonaut-XR – на 10-ти горизонтах с интервалами 1–3 м. В данной статье мы используем результаты разных постановок в разные годы. Общее описание района работ можно найти в статьях (Кукарин и др., 2013; Новотрясов и др., 2016; Ярощук и др., 2016; Navrotsky et al., 2013).

На рис. 1 представлены результаты синхронных наблюдений колебаний температуры на различных горизонтах с использованием термогирлянд, установленных практически на одной прямой с юго-запада на северо-восток по азимуту около 40° на глубинах 30, 20, и 15 м с расстояниями между станциями 225 и 72 м соответственно. Станция с глубиной дна 15 м была на расстоянии около 100 м от берега. На разрезе рис. 1а мы видим внутренние волны с периодичностью около 17 ч (локальный инерционный период равен 17.5 ч), амплитудами до 10–15 м и захваченными ядрами холодной воды. Подошвы ВВ находятся на глубинах от 25 до 20 м, и при движении в сторону берега такие волны по аналогии с поверхностными волнами должны разрушаться. Но разрез на рис. 1б при глубине дна 20 м показывает, что ожидаемого разрушения и перемешивания не происходит, исчезли только части волн, которые были глубже 20 м, а части волн на горизонтах выше 20 м остались почти неизменными. То же самое происходит при глубине дна 15 м: остались почти неизменными верхние части волн, которые были при глубине дна 30 м. Энергия этих волн переходит в дискретные объемы холодной воды, распространяющиеся в сторону берега сквозь квазиоднородное окружение (рис. 1б, в). Подобные образования стали называть «болусы» («bolus» – заимствовано из медицины и по смыслу ближе всего к понятию «выпуклость»), но они могут быть сильно вытянуты в горизонтальной плоскости.

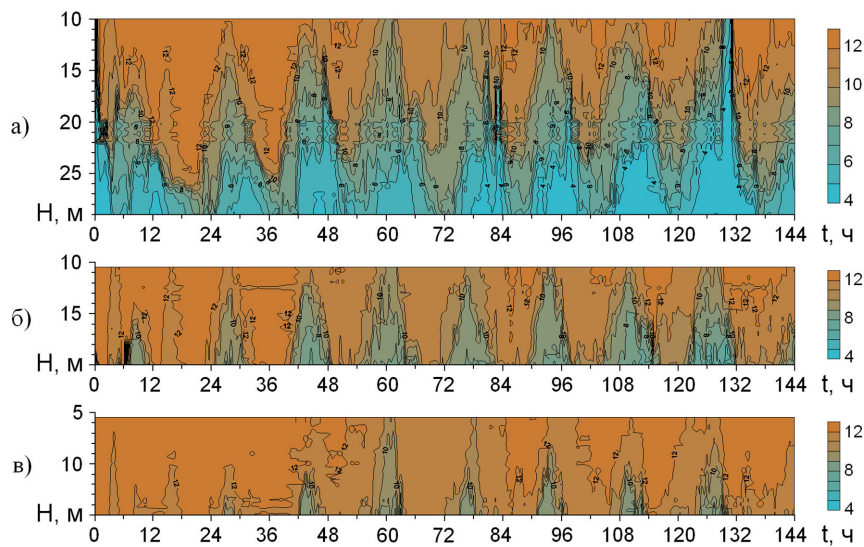


Рис. 1. Внутренние волны и порождаемые ими болюсы в придонном слое при глубине дна 30 м (а), 20 м (б), 15 м (в). Начало измерений 16.10.2013 г.

Анализ рис. 1 позволяет утверждать, что очень важным динамическим свойством наблюдаемых болюсов является их устойчивость. При локальном разрушении внутренней волны ее энергия тратится на турбулентное перемешивание только в зоне разрушения, а болюс теряет энергию породившей его волны постепенно и доставляет часть этой энергии на мелководье, где нет стратификации и внутренних волн. В результате при разрушении внутренних волн и болюсов процесс не ограничивается придонным слоем, и может образовываться зона смыкания придонного и поверхностного (ветрового) перемешивания, в которой результат ресуспензии донных осадков с образованием нефелоидных слоев может распространяться на всю толщу от поверхности до дна (Wright, Friedrichs, 2006; Butman et al., 2006; Vittori, Blondeaux, 2014; Masunaga et al., 2015).

Процесс временной трансформации ВВ и образования болюсов можно видеть на рис. 2, где представлены два температурных разреза с разрывом во времени около 8 дней. Придонный стратифицированный слой с перепадом температур больше 20° очень близок к поверхности, но в течение первых 2,5 суток отделен от поверхностного однородного слоя очень тонкой высокоградиентной прослойкой (около $5^\circ/\text{м}$). Максимумы внутренних волн с амплитудами до 8 м разделены интервалами 16–18 ч. Затем начинается перемешивание в верхней части придонного термоклина (возможно, неустойчивость Кедьвина-Гельмгольца при ветровом дрейфе в поверхностном слое), и через 3 суток стратификация в придонном слое становится более равномерной. Через неделю происходит обратный процесс: практически однородная от поверхности до дна вертикальная структура сменяется чередованием болюсов, причем первый интервал явно связан с приливным периодом, а последующие близки к 16–18 ч.

В конечном итоге внутренние волны и болюсы разрушаются и расходуют свою энергию на вертикальное и горизонтальное перемешивание в прибрежной зоне, где

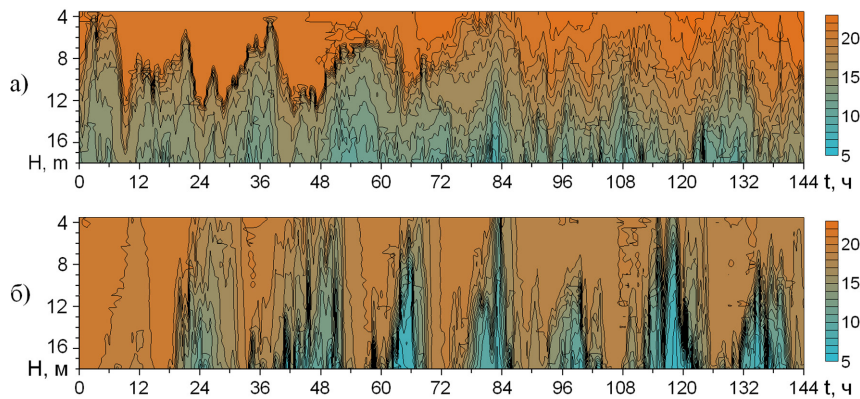


Рис. 2. Внутренние волны и их трансформация в придонном термоклине: а) 23–28 августа 2011 г.; б) 5–10 сентября 2011 г.

наиболее интенсивно происходит процесс поступления терригенного материала в океан. При этом ВВ участвуют одновременно в геоморфологическом (формирование и перераспределение донных осадков) и биологическом процессах, поскольку в терригенном материале содержится много биогенов и загрязняющих веществ.

Фундаментальным биологическим процессом в океане является фотосинтез первичной продукции, эффективность которого определяют три основных параметра: концентрация питательных веществ (биогенов), солнечная радиация и температура (Chen, 2015; Edwards et al., 2016; Gerlaet al., 2011; Regaudie-de-Gioux, Duarte, 2012; Staehr, Send-Jensen, 2006). Ниже рассматривается воздействие ВВ на эти три параметра.

Внутренние волны и биогены

На концентрацию биогенов ВВ и болюсы воздействуют двумя путями: а) модулируют процессы перемешивания и ресуспензии донных осадков в придонном слое; б) приносят в прибрежную зону воду с глубин больше, чем нижняя граница термоклина над континентальным склоном (захваченные холодные ядра), в которой концентрация биогенов повышена в процессе склонового апвеллинга.

Интенсивность и модулирующую роль ВВ в процессе перемешивания можно оценить по потокам тепла, поскольку пульсации плотности пропорциональны пульсациям температуры, и произведения пульсаций скорости на пульсации температуры пропорциональны импульсу частиц жидкости. На рис. 3 показаны пульсации температуры в придонном слое и пульсации потоков тепла на единицу массы в периоды малых (июнь) и больших (сентябрь) перепадов температуры в придонном слое. Амплитуды максимальных пульсаций температуры в сентябре были в 3–4 раза больше, чем в июне, но амплитуды потоков тепла в сентябре были не в 3–4, а в 20–25 раз больше, чем в июне. Это значит, что мы наблюдаем существенное изменение динамического режима в сторону увеличения корреляций между температурой и скоростью, и это хорошо проявляется в величине и характере пульсаций температуры и потоков: в сентябре потоки тепла имеют четко выраженную

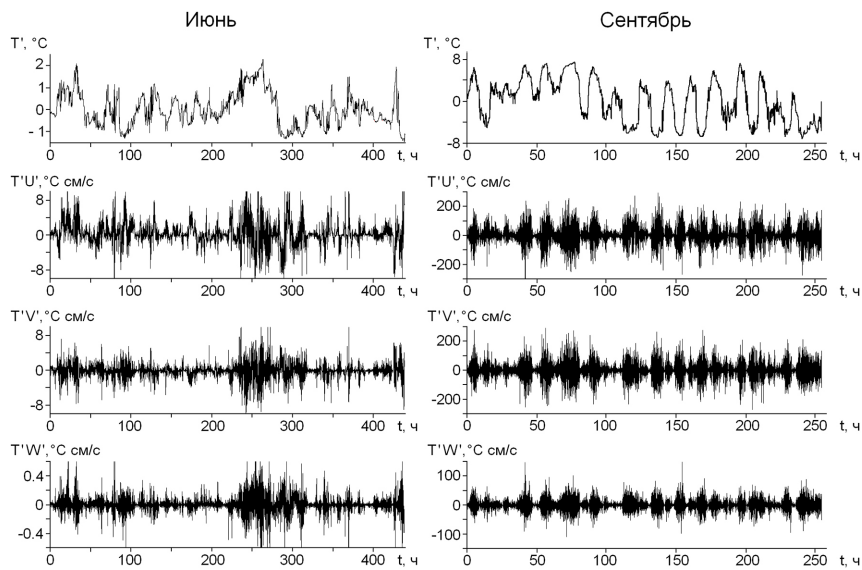


Рис. 3. Колебания температуры и удельных потоков тепла в придонном слое 29.05–16.06.2017 г. и 7.09–18.09.2017 г.

периодичность, соответствующую внутренним волнам, создающим колебания придонной температуры. Очевидно, что такую же волновую структуру будут иметь и компоненты потоков импульса.

Эффекты рассматриваемых процессов на пространственную структуру биологических процессов можно проследить при использовании спутниковых данных о концентрации хлорофилла (Кхл), которые показывают, как и многочисленные результаты наблюдений *in situ*, что максимальные значения Кхл находятся в пограничных зонах океана, включающих континентальный шельф (Романкевич и др., 2009). Нами были проанализированы ежесуточные спутниковые снимки концентрации хлорофилла-а на акватории зал. Петра Великого за период 2008–2017 гг., полученные с помощью спектрорадиометра MODIS (<http://ocean.nowrap3.go.jp/TeraCatIII/seaCalNG.php>). Была проведена группировка снимков по преобладанию различных физических факторов, участвующих в формировании пространственного распределения хлорофилла: приток вещества с суши, адвекция, вихри, конвекция. На рис. 4 приведены некоторые типичные распределения Кхл, связанные с преобладанием одного из этих факторов. Граница шельфа прослеживается по изобатам 200 и 1000 м на приведенных снимках.

В общем случае концентрация хлорофилла и фитопланктона зависит от многих факторов (температура, освещенность, соотношение растворенного и взвешенного органического вещества и др.), но при многолетних наблюдениях локальные факторы сглаживаются, и проявляются тенденции сезонного и месячного масштабов. Анализ снимков в различные месяцы рассматриваемого 10-летнего периода показал, что максимальные концентрации хлорофилла в прибрежной зоне наблюдаются, главным образом, в теплое время года при больших вертикальных градиентах плотности, а также в период осенней конвекции. Существующие в это время вихри на шельфе и в прилегающей зоне способствуют горизонтальному водообмену, но

не оказывают существенного влияния на Кхл в зоне континентального склона, где пикноклин препятствует апвеллингу. В течение холодных месяцев картина другая: максимумы в прибрежной зоне практически отсутствуют, значения Кхл на всей акватории, как правило, меньше, чем они были в прибрежной зоне, и максимальные концентрации смещаются к зоне континентального склона. Ведущей в пространственной структуре в этот период становится роль мезомасштабных и субмезомасштабных вихрей, которые перераспределяют Кхл, создаваемую апвеллингом или адвекцией.

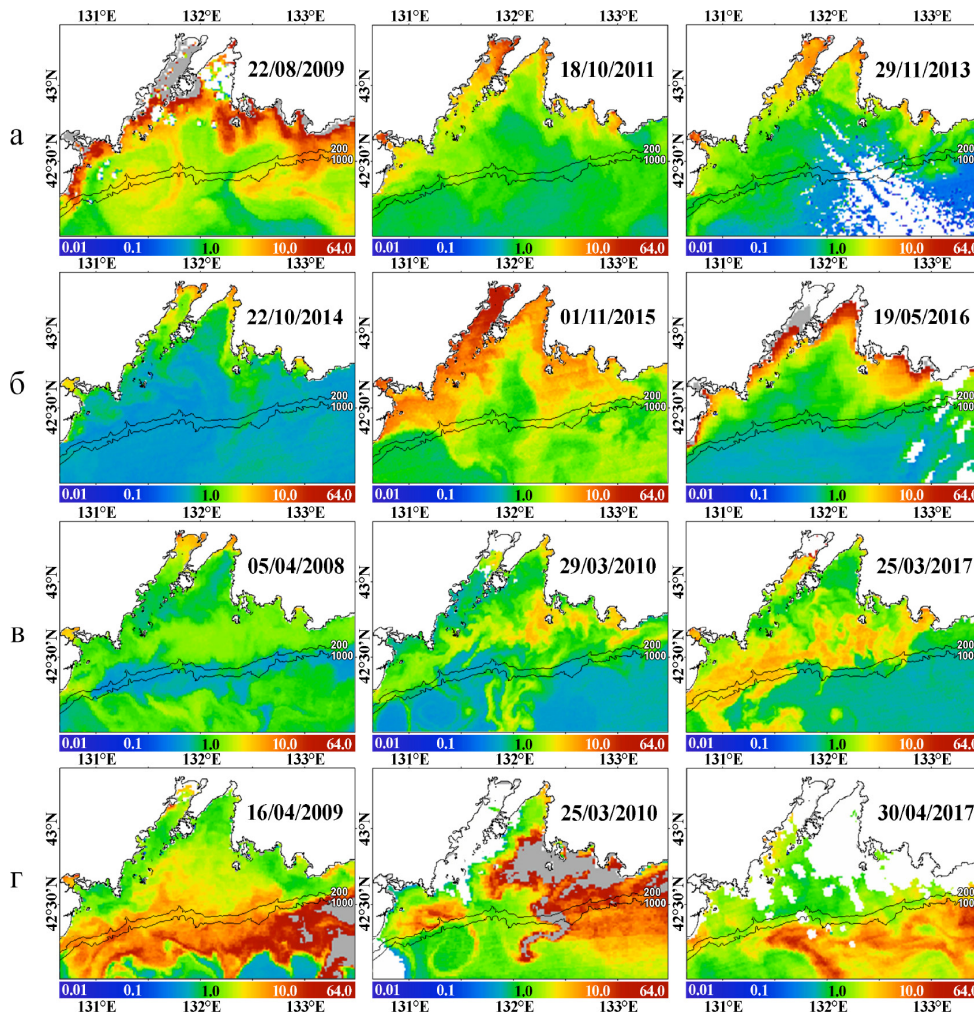


Рис. 4. Типы пространственного распределения хлорофилла-а на акватории залива Петра Великого и прилегающей части Японского моря по измерениям MODIS Aqua: а – б – преобладание эффекта близости берега при наличии вихрей; в – преобладание роли вихрей; г – преобладание роли течения при существенном участии вихрей по обе стороны от континентального склона. Кхл выражена в $\text{мг}/\text{м}^3$, шкала в логарифмическом масштабе.

Максимальное цветение фитопланктона в прибрежной зоне определяется интенсивностью перемешивания в придонном пограничном слое, поскольку здесь максимальна концентрация растворенного и взвешенного терригенного материала. Проводимые нами длительные наблюдения в прибрежной зоне Японского моря по-

казали, что при нейтральной и слабой стратификации поля плотности и отсутствии штормовых ветров придонные течения на расстоянии 2–5 м от дна малы (средние скорости около 4 см/с, среднеквадратичные около 3 см/с) и не могут генерировать турбулентность, достаточную для ресуспензии донных осадков и эффективного вертикального и горизонтального переноса терригенных примесей. При сильной стратификации участие внутренних волн и болюсов в перемешивании и поставке терригенного вещества обеспечивает необходимую концентрацию фосфора, который не возмещается водами апвеллинга. В то же время в сформированных над континентальным склоном ВВ холодные захваченные ядра содержат воду, которая была глубже термоклина и имеет повышенную концентрацию азота. Это важно для вентилирования прибрежных вод и создает условия для оптимального соотношения Редфилда между содержанием углерода, азота и фосфора, а тем самым для первичной продукции в прибрежных водах. Поэтому можно полагать, что эффект ВВ на первичную продукцию в шельфовой зоне в большинстве случаев не является лимитирующим фактором для скорости фотосинтеза.

Внутренние волны и солнечная радиация

Прямое воздействие ВВ на фотосинтез связано с солнечной радиацией (Banaszak, Neale, 2001; Fritz et al., 2008; Yang et al., 2010; Li et al., 2011). Вертикальное распределение планктона в большой степени определяется вертикальной структурой поля плотности. Поскольку большинство видов ФП пассивны, то при наличии больших ВВ планктеры перемещаются в условия с резко различной освещенностью. Биологический эффект света при этом зависит от глубины залегания пикноклина и амплитуды ВВ. Максимальная концентрация планктона наблюдается в зоне максимальных градиентов плотности, глубина которой меняется в соответствии с волной. В зал. Петра Великого освещенность большую часть года не является лимитирующим фактором роста фитопланктона. Более того, при небольшой средней глубине верхней границы пикноклина (в зал. Петра Великого это глубины от 10 до 30–40 м в зависимости от соотношения ветрового режима и солнечной радиации) и больших амплитудах ВВ следует ожидать их отрицательного воздействия на скорость роста планктона вследствие фотоингибирования. Гравитаксис, фототаксис, экранирующие пигменты и системы фотовосстановления поврежденных механизмов фотосинтеза присущи разным видам ФП в разной степени (Banaszak, Neale, 2001; Fritz et al., 2008). Виды, обладающие ими в достаточной степени, получают преимущество и при аномальных условиях радиации могут резко преобладать в локальном сообществе. Это особенно важно при усилении ультрафиолетовой части солнечного спектра, которую легче других переносят вредные для экосистем виды, формирующие «красные приливы»

Эффект температуры

Эффекты колебаний температуры на метаболизм планктона представляют особый интерес в связи с большими и быстрыми перемещениями изотерм при наличии ВВ. При этом возможно прямое воздействие на скорость протекания фотосинтеза и опосредованное воздействие на вертикальную структуру фитопланктона через зависящую от температуры вертикальную структуру поля плотности. Известно, что концентрация ФП как пассивной примеси повышена в слоях с максимальными градиентами плотности жидкости. На рис. 5 приведен пример временных колебаний температуры и флуоресценции ФП. Колебания слоев с максимальной концентрацией ФП коррелируют со второй вертикальной модой ВВ. Можно предположить, что наличие двух зон концентрации хлорофилла вместо одной с максимальным градиентом в верхней части термоклина связано с различной чувствительностью различных видов ФП к солнечной радиации, как об этом упомянуто выше.

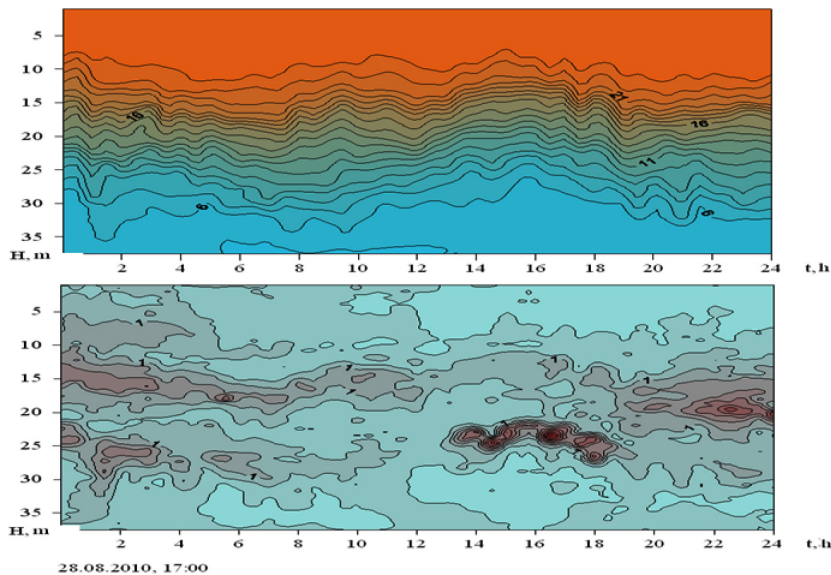


Рис. 5. Временные колебания температуры и флуоресценции фитопланктона по измерениям в шельфовой зоне зал. Петра Великого.

Что касается прямого эффекта, то для каждого отдельного вида ФП скорость роста увеличивается с увеличением температуры до оптимального ее значения, затем идет падение (унимодальная зависимость). В условиях конкурентности видов общий закон ускорения метаболизма при увеличении температуры выполняется для сообщества (Regaudie-de-Gioux, Duarte, 2012; Staehr, Sand-Jensen, 2006). В открытом море, где глубина фотического слоя может достигать 100 м и более, эффекты температуры и света обычно ковариантны: смещение вверх увеличивает, а смещение вниз уменьшает освещенность и температуру, влияя соответственно на скорость роста ФП. При ограничении или удалении от оптимальности одного из параметров усиливается чувствительность ФП по другому параметру: свет модулирует соотношение рост-температура, а температура модулирует соотношение

рост-иррадиация (Chen, 2015; Edwards et al., 2016). Важной особенностью этих соотношений является увеличение чувствительности ФП к изменению температуры при увеличении освещенности и ее уменьшение при уменьшении освещенности. Если планктеры смещаются вместе с изотермой, то эффект температуры на метаболизм будет преобладать в фазе подъема волны и для низкочастотных волн будет зависеть от соотношения фазы волны и времени суток.

Специфическая трансформация внутренних волн в прибрежной зоне моря создает специфические условия для влияния температуры на биологические процессы. На рис. 6 представлены временной разрез поля температуры на станции с глубиной дна 30.5 м в период с 12 по 29 сентября 2018 г. и детальная структура в интервале времени 20 ч. В период наблюдений происходили изменения сгонного и нагонного направления ветра, которые приводили одновременно к изменению глубины перемешанного и толщины придонного слоев. Результатом сгонного ветра был интенсивный приток глубинных холодных вод и формирование очень резких термических фронтов.

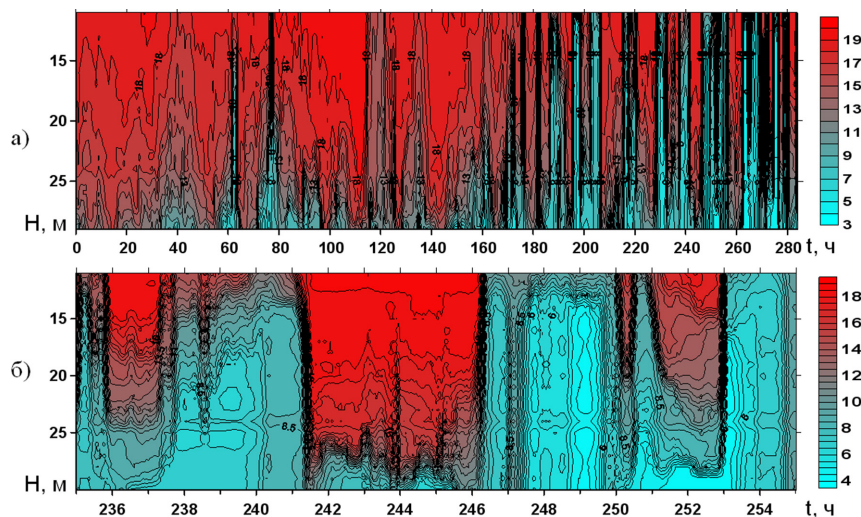


Рис. 6. Временной разрез поля температуры 17–29 сентября 2018 г. и его детализация на интервале времени 20 ч.

На рис. 6а мы видим, как увеличиваются амплитуды ВВ с холодными ядрами и формируется последовательность столбов холодной воды с интервалами от 10 до 20 ч между ними и амплитудами до 20 м и более. Наблюдаемые волны и болюсы с большими амплитудами создают большие перепады температуры, а тем самым чрезвычайно большие градиенты не только вертикальные, но и горизонтальные. Детализация поля температуры на разрезе рис. 6б позволяет оценить временную и пространственную дисперсию температурного поля. Перепады температуры до 10°C могут происходить за 10–20 мин, что при полученных ранее оценках скорости движения рассматриваемых возмущений 0,3–0,5 м/с соответствует расстояниям 200–500 м. Зоны с такими градиентами могут чередоваться с интервалами от 5–20 мин при солитоноподобных волнах в тонких придонных слоях толщиной 2–4 м (см. Ку-

карин и др., 2013) до нескольких часов при интенсивных ВВ и солитонах в мощном придонном слое. Наблюдаемые перепады температуры близки к интервалам между значениями, соответствующими минимальной и максимальной скорости роста различных видов ФП. Такие перепады наблюдаются во фронтальных зонах океана, разделяющих воды с различной структурой гидрофизических и гидробиологических характеристик. В данном случае мы имеем мини- и микрофронты с большой дисперсией температуры вследствие большой энергии колебаний в высокочастотной и коротковолновой частях соответствующих спектров. Такие зоны характеризуются повышенной смертностью отдельных организмов и повышенной общей биологической продуктивностью, обусловленной ускоренным метаболизмом большинства видов флоры и фауны.

Заключение

Внутренние волны являются важнейшим гидродинамическим процессом в океане как механизм быстрого переноса энергии при незначительном переносе массы. Больше всего внимание исследователей привлекают ВВ в интервале, ограниченном частотой плавучести (Вясяля-Брента) и инерционной частотой. В шельфовой зоне, которая является наиболее сложной и наиболее важной для людей частью моря, ВВ оказывают воздействие одновременно на биологические и геоморфологические процессы. В данной статье рассмотрены три механизма воздействия инерционно-гравитационных внутренних волн на метаболизм и пространственно-временную структуру фитопланктона в прибрежной зоне: а) усиление притока терригенного минерального и органического вещества при разрушении ВВ, перемешивании и ресуспензии осадков в придонном слое; б) изменение величины и спектральной структуры получаемой фотосинтетически активной радиации вследствие значительных вертикальных перемещений фитопланктона; в) резкое увеличение вертикальных и горизонтальных градиентов и дисперсии колебаний температуры. Первый механизм определяет массу и состав вещества, вовлекаемого в фотосинтез. Второй определяет величину и спектральный состав энергии, необходимой для фотосинтеза. Третий определяет характеристики среды, в которой происходит фотосинтез. Каждый из этих механизмов может давать как положительный, так и отрицательный эффект при конкретных условиях на конкретной акватории. В настоящее время мы не нашли информации о проведении и результатах соответствующих комплексных экспериментов, но факт концентрации жизни в пограничных зонах океана не вызывает сомнений (Романкевич и др., 2009). Из него следует, что интегрально по времени и пространству важнейшим является эффект близости суши, который реализуется при помощи различных динамических процессов при существенном вкладе внутренних волн. Очевидно, что приток терригенного вещества в океан, осуществляемый благодаря круговороту воды в системе океан-атмосфера-суша-океан, необходим для нормального функционирования океанических экосистем, но усиление отрицательного воздействия современной цивилизации в этом процессе заставляет задуматься об их будущем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты 15-05-03805, 15-01-03942, 16-05-00899 а, а также гранта ДВО РАН, проект 15-И-1-047 дв.

Литература

- Кукарин В.Ф., Ляпидевский В.Ю., Навроцкий В.В., Храпченков Ф.Ф.* Эволюция внутренних волн большой амплитуды в зоне заплеска // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2013. Т. 6. № 2. С. 35–45.
- Навроцкий В.В., Изергин В.Л., Павлова Е.П.* Генерация внутренних волн вблизи границы шельфа // *Докл. АН*. 2003. Т. 388. № 2. С. 249–253.
- Навроцкий В.В., Лазарюк А.Ю., Мальшев А.А.* Особенности структуры гидрофизических характеристик внутренних волн вблизи границы шельфа, Доклады АН СССР. 1989. Т. 309. № 1. 187–191.
- Навроцкий В.В., Павлова Е.П.* Внутренние волны и их биологические эффекты в шельфовой зоне моря // *Вестник ДВО РАН*. 2012. № 6. С. 22–31.
- Новотрясов В.В., Захарков С.П., Степанов Д.В.* Осенний внутренний прилив в прибрежной зоне Японского моря // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 8. С. 64–69.
- Романкевич Е.А., Ветров А.А., Пересыпкин В.И.* Органическое вещество мирового океана // *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50. № 4. С. 401–411.
- Рыбак С.А., Серебряный А.Н.* Нелинейные внутренние волны над наклонным дном: наблюдение акустическим профилометром // *Акустический журнал*. 2011. Т. 57. № 1. С. 85–91.
- Серебряный А.Н.* Внутренние волны в прибрежной зоне приливного моря // *Океанология*. 1985. Т. 25. Вып. 5. С. 744–751.
- Серебряный А.Н.* Внутренние волны над шельфом и вблизи материкового склона по данным буксируемого распределенного датчика температуры // *Океанология*. 1987. Т. 27. № 2. С. 225–226.
- Серебряный А.Н.* Эффекты нелинейности во внутренних волнах на шельфе // *Изв. АН. Физика атмосферы и океана*. 1990. Т. 26. № 3. С. 285–293.
- Серебряный А.Н.* Проявление свойств солитонов во внутренних волнах на шельфе // *Изв. АН. Физика атмосферы и океана*. 1993. Т. 29. № 2. С. 244–252.
- Яроцук И.О., Леонтьев А.П., Кошелева А.В., Пивоваров А.А., Самченко А.М., Степанов Д.В., Швырев А.Н.* Об интенсивных внутренних волнах в прибрежной зоне залива Петра Великого (Японское море) // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 9. С. 55–62.
- Banaszak A., Neale P.J.* Ultraviolet radiation sensitivity of photosynthesis in phytoplankton from an estuarine environment // *Limnol. Oceanogr.* 2001. Vol. 46. No. 3. P. 592–603.
- Bourgault D., Kelley D.E., Galbraith P.S.* Turbulence and boluses on an internal beach // *J. Marine Res.* 2008. Vol. 66. P. 563–588.
- Butman B., Alexander P.S., Scotti A., Beardsley R.C., Anderson S.P.* Large internal waves in Massachusetts Bay transport sediments offshore // *Continental Shelf Research*. 2006. Vol. 26. P. 2029–2049.
- Chen B.* Patterns of thermal limits of Phytoplankton // *J. Plankton Res.* 2015. Vol. 37. No. 2. P. 285–292.
- Edwards K.F., Thomas M.K., Klausmeier C.A., Litchman E.* Phytoplankton growth and the interaction of light and temperature: A synthesis at the species and community level // *Limnol. Oceanogr.* 2016. Vol. 61. P. 1232–1244.

- Fritz J.J., Neale P., Davis R.F., Peloquin J.A.* Response of Antarctic phytoplankton to solar UVR exposure: Inhibition and recovery of photosynthesis in coastal and pelagic assemblages // Marine Ecology Progress Series. 2008. Vol. 365. P. 1–16. DOI:10.3354/meps07610.
- Gerla D.J., Mooij W.M., Huisman J.* Photoinhibition and the assembly of light-limited phytoplankton communities // Oikos. 2010. Vol. 120. P. 359–368. DOI:10.1111/j.16000706.2010.18573.x.
- Lennert-Cody C.E., Franks P.J.S.* Plankton patchiness in high-frequency internal waves // MarEcol Prog Ser. 1999. Vol. 186. P. 59–66.
- Li G., Gao K., Gao G.* Differential Impacts of Solar UV Radiation on Photosynthetic Carbon Fixation from the Coastal to Offshore Surface Waters in the South China Sea // Photochemistry and Photobiology. 2011. Vol. 87. P. 329–334.
- Masunaga E., Homma H., Yamazaki H., Fringer O.B., Nagai T, Kitade Y., Okayasu A.* Mixing and sediment resuspension associated with internal bores in a shallow bay // Continental Shelf Res. 2015. Vol. 110. P. 85–99.
- Moore C.D., Koseff J.R., Hult E.L.* Characteristics of bolus formation and propagation from breaking internal waves on shelf slopes // Journal of Fluid Mechanics. 2016. Vol. 791. P. 260–283.
- Navrotsky V.V.* Mixing caused by internal waves and turbulence: a comparative analysis // J. Marine Systems. 1999. Vol. 21. No. 1–4. P. 131–145. DOI:10.1016/S0924-7963(99)00010-X.
- Navrotsky V.V., Ilychev V.I.* Vertical structure of hydrophysical characteristics and internal waves near the shelf boundary // Geojournal. 1988. Vol. 16. No. 1. P. 11–17.
- Navrotsky V.V., Liapidevskii V.Yu., Pavlova E.P.* Features of internal waves in a shoaling thermocline // Int. J. Geosciences. 2013. Vol. 4. P. 871–879. DOI:10.4236/ijg.2013.45081.
- Navrotsky V.V., Lozovatsky J.D., Pavlova E.P., Fernando H.J.S.* Observations of internal waves and thermocline splitting near a shelf break of the Sea of Japan (East Sea) // Continental Shelf Res. 2004. Vol. 24. P. 1375–1395. DOI:10.1016/j.csr.2004.03.008.
- Regaudie-de-Gioux A., Duarte C.M.* Temperature dependence of planktonic metabolism in the ocean // Global Biogeochem. Cycles. 2012. Vol. 26. GB1015. DOI:10.1029/2010GB003907.
- Pan X., Wong G.T.F., Shiah F-K., Ho T-Y.* Enhancement of biological productivity by internal waves: observations in the summertime in the northern South China Sea // J. Oceanogr. 2012. Vol. 68. No. 3. P. 427–437. DOI:10.1007/s10872-012-0107-y.
- Staehr P.A., Sand-Jensen K.* Seasonal changes in temperature and nutrient control of photosynthesis, respiration and growth of natural phytoplankton communities // Freshw. Biol. 2006. Vol. 51. P. 249–262. DOI:10.1111/j.1365-2427.2005.01490.x.
- Venayagamoorthy S.K., Fringer O.B.* On the formation and propagation of nonlinear internal boluses across a shelf break // J. Fluid Mech. 2007. Vol. 577. P. 137–159.
- Vittori G., Blondeaux P.* The boundary layer at the bottom of a solitary wave and implications for sediment transport // Progress in Oceanography. 2014. Vol. 120. P. 399–409.
- Wright L.D., Friedrichs C.T.* Gravity-driven sediment transport on continental shelves: A status report // Continental Shelf Research. 2006. Vol. 26. P. 2092–2107.
- Yang D., Ye H., Wang G.* Impacts of internal waves on chlorophyll a distribution in the northern portion of the South China Sea // Chinese Journal of Oceanology and Limnology. 2010. Vol. 28. No. 5. P. 1095–1101.

TRANSFORMATIONS AND EFFECTS OF INTERNAL WAVES IN THE NEAR-SHORE REGION OF SEA

Navrotsky V.V.¹, Liapidevskii V.Yu.², Pavlova E.P.¹,
Khrapchenkov F.F.¹

¹*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok,
691041, Russia, e-mail: vnavr@poi.dvo.ru*

²*M.A. Lavrentiev Institute of Hydrodynamics, SB RAS, Novosibirsk,
630090, Russia, e-mail: liapid@hydro.nsc.ru*

Submitted 15.03.2019, accepted 30.05.2019

Analysis of results of field experiments in the near-shore region of the Peter the Great Bay (the Sea of Japan) is made from the point of view of internal waves (IW) influence on biological and geomorphologic processes in the shelf zone of sea. The main measured parameters were fluctuations of temperature, pressure and current velocity in the near-bottom layer in the near-shore region with bottom depth of 20–30 m. Fluctuations of temperature were measured with the help of anchored strings of 20–30 thermistors with 0.5 m interval, fluctuations of current velocity were measured at 10–15 levels with 1–3 m intervals. The typical for shoreward propagated IW was their nonlinear transformation with formation of stable discrete boluses - water volumes with cold cores, separated from surrounding medium by high-gradient layers. Propagating into shallow regions, IW stimulate mixing, bottom sediments resuspension and near-shore region ventilation. The boluses can propagate farther into shallow regions where continuous pycnocline is absent, supplementing effects of IW and amplifying them. It is shown that biological effects of IW and boluses are caused by their considerable impact on the main parameters defining primary production of phytoplankton: biogens concentration, illumination, and fluctuations of temperature.

Keywords: near-shore region, internal waves, boluses, mixing, phytoplankton, biogens, photosynthesis, temperature

References

- Banaszak A. and Neale P.J.* Ultraviolet radiation sensitivity of photosynthesis in phytoplankton from an estuarine environment. *Limnol. Oceanogr.* 2001, Vol. 46, No. 3, pp. 592–603.
- Bourgault D., Kelley D.E., and Galbraith P.S.* Turbulence and boluses on an internal beach. *J. Marine Res.*, 2008, Vol. 66, pp. 563–588.
- Butman B., Alexander P.S., Scotti A., Beardsley R.C., and Anderson S.P.* Large internal waves in Massachusetts Bay transport sediments offshore. *Continental Shelf Research*, 2006, Vol. 26, pp. 2029–2049.
- Chen B.* Patterns of thermal limits of Phytoplankton. *J. Plankton Res.*, 2015, Vol. 37, No. 2, pp. 285–292.
- Edwards K.F., Thomas M.K., Klausmeier C.A., and Litchman E.* Phytoplankton growth and the interaction of light and temperature: A synthesis at the species and community level. *Limnol. Oceanogr.*, 2016, Vol. 61, pp. 1232–1244.
- Fritz J.J., Neale P., Davis R.F., and Peloquin J.A.* Response of Antarctic phytoplankton to solar UVR exposure: Inhibition and recovery of photosynthesis in coastal and pelagic assemblages. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, Vol. 365, pp. 1–16. doi: 10.3354/meps07610.

- Gerla D.J., Mooij W.M., and Huismanm J. Photoinhibition and the assembly of light-limited phytoplankton communities. *Oikos*, 2010, Vol. 120, pp. 359–368, doi:10.1111/j.16000706.2010.18573.x.
- Kukarin V.F., Lyapidevskii V.Yu., Navrotsky V.V., and Khrapchenkov F.F. Evolyutsiya vnutrennikh voln bol'shoi amplitudy v zone zapleska. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2013, Vol. 6, No. 2, pp. 35–45.
- Navrotsky V.V., Izergin V.L., and Pavlova E.P. Generatsiya vnutrennikh voln vblizi granitsy shelfa (Generation of internal waves near the shelf boundary). *Doklady Akademii Nauk*, 2003, Vol. 388, No. 2, pp. 249–253.
- Navrotsky V.V., Lazaryuk A.Yu., and Malishev A.A. Osobennosti strukturi gidrofizicheskikh harakteristik vnutrennikh voln vblizi granici shelfa. *Dokladi AN SSSR*, 1989, Vol. 309, No. 1, pp. 187–191.
- Navrotsky V.V. and Pavlova E.P. Vnutrenniye volny i ikh biologicheskiye effecty v shelfovoy zone moria (Internal wave and their biological effects in the shelf zone of sea). *Vestnyk DVO RAN*, 2012, No. 6, pp. 22–31.
- Novotryasov V.V., Zaharkov S.P., and Stepanov D.V. Osennij vnutrennij priliv v pribrezhnoj zone Yaponskogo moray. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2016, No. 8, pp. 64–69.
- Lennert-Cody C.E. and Franks P.J.S. Plankton patchiness in high-frequency internal waves. *MarEcol Prog Ser.*, 1999, Vol. 186, pp. 59–66.
- Li G., Gao K., and Gao G. Differential Impacts of Solar UV Radiation on Photosynthetic Carbon Fixation from the Coastal to Offshore Surface Waters in the South China Sea. *Photochemistry and Photobiology*, 2011, Vol. 87, pp. 329–334.
- Masunaga E., Homma H., Yamazaki H., Fringer O.B., Nagai T, Kitade Y., and Okayasu A. Mixing and sediment resuspension associated with internal bores in a shallow bay. *Continental Shelf Res.*, 2015, Vol. 110, pp. 85–99.
- Moore C.D., Koseff J.R., and Hult E.L. Characteristics of bolus formation and propagation from breaking internal waves on shelf slopes. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, Vol. 791, pp. 260–283.
- Navrotsky V.V. Mixing caused by internal waves and turbulence: a comparative analysis. *J. Marine Systems*, 1999, Vol. 21, No. 1–4, pp. 131–145. doi:10.1016/S0924-7963(99)00010-X.
- Navrotsky V.V. and Ilychev V.I. Vertical structure of hydrophysical characteristics and internal waves near the shelf boundary. *Geojournal*, 1988, Vol. 16, No. 1, pp. 11–17.
- Navrotsky V.V., Liapidevskii V.Yu., and Pavlova E.P. Features of internal waves in a shoaling termocline. *Int. J. Geosciences*, 2013, Vol. 4, pp. 871–879. doi:10.4236/ijg.2013.45081.
- Navrotsky, V.V., Lozovatsky J.D., Pavlova E.P., and Fernando H.J.S. Observations of internal waves and termocline splitting near a shelf break of the Sea of Japan (East Sea). *Continental Shelf Res.*, 2004, Vol. 24, pp. 1375–1395, doi:10.1016/j.csr.2004.03.008.
- Regaudie-de-Gioux A. and Duarte C.M. Temperature dependence of planktonic metabolism in the ocean. *Global Biogeochem. Cycles*, 2012, Vol. 26, GB1015. doi:10.1029/2010GB003907.
- Pan X., Wong G.T.F., Shiah F-K., and Ho T-Y. Enhancement of biological productivity by internal waves: observations in the summertime in the northern South China Sea. *J. Oceanogr.*, 2012, Vol. 68, No. 3, pp. 427–437, doi:10.1007/s10872-012-0107-y.
- Ribak S.A. and Serebryany A.N. Nelineinie vnutrennie volni nad naklonnim dnomna blyudenie akusticheskim profilometrom. *Akusticheskii jurnal*, 2011, Vol. 57, No. 1, pp. 85–91.
- Romankevich E.A., Vetrov A.A., and Peresipkin V.I. Organicheskoe veschestvo mirovogo okeana. *Geologiya i geofizika*, 2009, Vol. 50, No. 4, pp. 401–411.
- Serebryany A.N. Vnutrennie volni v pribrezhnoj zone prilivnogo moray. *Okeanologiya*, 1985, Vol. 25. No. 5, pp. 744–751.

- Serebryany A.N.* Vnutrennie volni nad shelfom i vblizi materikovogo sklona po dannim buksiruemogo raspredelennoho datchika temperature. *Okeanologiya*, 1987, Vol. 27, No. 2, pp. 225–226.
- Serebryany A.N.* Effekti nelineinosti vo vnutrennih volnah na shelfe. *Izv. AN. Fizika atmosfery i okeana*, 1990, Vol. 26, No. 3, pp. 285–293.
- Serebryany A.N.* Proyavlenie svoystv solitonov vo vnutrennih volnah na shelfe. *Izv. AN. Fizika atmosfery i okeana*, 1993, Vol. 29, No. 2, pp. 244–252.
- Staehr P.A. and Sand-Jensen. K.* Seasonal changes in temperature and nutrient control of photosynthesis, respiration and growth of natural phytoplankton communities. *Freshw. Biol.*, 2006, Vol. 51, pp. 249–262, doi:10.1111/j.1365-2427.2005.01490.x.
- Venayagamoorthy S.K. and Fringer O.B.* On the formation and propagation of nonlinear internal boluses across a shelf break. *J. Fluid Mech.*, 2007, Vol. 577, pp. 137–159.
- Vittori G. and Blondeaux P.* The boundary layer at the bottom of a solitary wave and implications for sediment transport. *Progress in Oceanography*, 2014, Vol. 120, pp. 399–409.
- Wright L.D. and Friedrichs C.T.* Gravity-driven sediment transport on continental shelves: A status report. *Continental Shelf Research*, 2006, Vol. 26, pp. 2092–2107.
- Yang D., Ye H., and Wang G.* Impacts of internal waves on chlorophyll *a* distribution in the northern portion of the South China Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, Vol. 28, No. 5, pp. 1095–1101.
- Yaroshchuk I.O., Leont'ev A.P., Kosheleva A.V., Pivovarov A.A., Samchenko A.M., Stepanov D.V., and Shvyrev A.N.* Ob intensivnykh vnutrennih volnah v pribrezhnoy zone zaliva Petra Velikogo (Yaponskoe more). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2016, No. 9, pp. 55–62.