Анализ спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла в заливе Петра Великого (Японское море)

В. В. Навроцкий, В. А. Дубина, Е. П. Павлова, Ф. Ф. Храпченков

*Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия
E-mail: vnavr@poi.dvo.ru*

Результаты ежедневных спутниковых съёмок концентрации хлорофилла на акватории залива Петра Великого были проанализированы за период 2008–2017 гг. Проведена группировка снимков по преобладанию одного из четырёх физических факторов, участвующих в формировании пространственного распределения хлорофилла: «берег», адвекция, вихри, конвекция. Под словом «берег» для краткости обозначены все возможные поставки вещества с суши (реки, подводные стоки, антропогенные сбросы, ветер). Обнаружена тенденция сезонных изменений типов пространственного распределения хлорофилла в связи с сезонными изменениями роли различных физических механизмов в поставке в фотический слой необходимых для первичной продукции биогенов. В большинстве случаев картина формируется при одновременном воздействии нескольких факторов. Преобладающим по частоте проявления и величине концентрации хлорофилла на рассматриваемой акватории был фактор близости берега, особенно сильно выраженный в период август–октябрь. Для объяснения наблюдаемых сезонных различий в распределении хлорофилла и их связи с физическими процессами привлечены результаты экспериментов, проводимых в прибрежной зоне с глубинами до 20–40 м. Показано, что одним из наиболее важных механизмов, определяющих характер взаимосвязи биологических и динамических характеристик на рассматриваемой акватории, являются инерционные и гравитационные внутренние волны.

Ключевые слова: спутники, хлорофилл, шельф, континентальный склон, прибрежная зона, прилив, вихри, апвеллинг, внутренние волны

Одобрена к печати: 10.01.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-158-170

Введение

Хлорофилл является основным компонентом растений, обеспечивающим фотосинтез живого вещества на планете. В океане эту функцию выполняет фитопланктон. Хотя соотношение концентрации хлорофилла (Кхл) и биомассы фитопланктона меняется в зависимости от ряда физических и биологических факторов, этот параметр широко используется для глобальных и локальных оценок первичной продукции (Boyce et al., 2014; Correa-Ramirez et al., 2012; Gregg et al., 2003). Наблюдения Кхл с использованием спутников оказались особенно ценными, поскольку они поставляют практически синхронную глобальную информацию о важнейших параметрах экосистем океана. Исследование взаимосвязей этих параметров с физическими процессами в океане и атмосфере важно не только для понимания происходящего, но и для возможности прогнозирования состояния морских экосистем в различных районах Мирового океана. В зонах с большим речным стоком поглощение света детритом и жёлтым веществом, сравнимое с его поглощением пигментами фитопланктона, может приводить к завышению спутниковых значений концентрации хлорофилла по сравнению с локально измеряемыми значениями *in situ*. Эти локальные расхождения не являются существенными при рассмотрении достаточно крупномасштабных структур и их изменений на временных масштабах порядка нескольких месяцев за длительный период времени.

Глобальные карты распределения Кхл в океане, построенные по наблюдениям *in situ* и особенно по спутниковым съёмкам, показывают, что максимальные значения Кхл находятся в пограничных зонах океан – суша, которые включают в себя шельф. В большинстве работ высокая продуктивность шельфа рассматривается в связи с взаимодействием приливов,

мезомасштабных вихрей и апвеллинга в зоне континентального склона (Callendar et al., 2011; Piontkovski, Al-Jufaili, 2013; Whitney et al., 2005). Такой подход вполне оправдан и эффективен в морях, где вдоль открытых к океану берегов проходят достаточно сильные устойчивые течения, такие как Калифорнийское, Перуанское, Куро시오, Гольфстрим, Бразильское, и вносимые ими возмущения в биологические структуры имеют масштабы порядка сотен километров. В этих течениях обусловленный силой Кориолиса экмановский перенос приводит к апвеллингу и подъёму обогащённых биогенами вод вдоль всего континентального склона. Мезомасштабные вихри переносят эти воды в обе стороны от границы шельфа.

В большинстве окраинных и полузакрытых морей вдольбереговые течения не настолько сильны и устойчивы, как указанные выше, и эффекты вызванного экмановским переносом апвеллинга могут быть незначительны. Главными объектами исследований становятся субмезомасштабные вихри, внутренние волны, турбулентность (Кукарин и др., 2013; Навроцкий, Павлова, 2012; Навроцкий и др., 2010; Masunaga et al., 2015; Moum et al., 2007; Navrotsky et al., 2013).

С точки зрения биопродуктивности и экологии наиболее важными являются шельфовые зоны морей и океанов. Оценки притока с суши, сделанные по суммарному поступлению органического углерода C_{org} , дают величину около 1 % от всей первичной продукции океана (Романкевич и др., 2009). Но распределение этого притока, так же как и первичной продукции, очень неравномерное. В олиготрофных водах, которые занимают большую часть Мирового океана, Кхл на три порядка меньше, чем на окраинах океана, а на шельфе и в прилегающей части открытого моря распределение первичной продукции существенно зависит от динамических процессов в этих зонах. Цель настоящей работы — понять, какие динамические процессы и их взаимодействия определяют характер пространственно-временной структуры Кхл на акватории шельфа и прилегающей части моря.

Анализ распределений хлорофилла

Ежесуточные спутниковые данные о концентрации хлорофилла были взяты из базы данных <http://ocean.nowrap3.go.jp/TeraCatIII/seaCalNG.php>, в которой содержатся результаты измерений со спутников Aqua с использованием спектрорадиометра MODIS. Описание принципов измерений и алгоритмов вычисления Кхл находится на сайте https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/chlor_a/#sec_2. Этими данными пользуются многие исследователи как для локальных, так и для глобальных оценок первичной продукции и ряда других параметров. Спутники Aqua и Terra вращаются вдоль меридианов между полюсами, при этом MODIS измеряет излучение в 36 спектральных полосах между 0,405 и 14,385 мкм в пространственной полосе 2330 км поперёк и 10 км вдоль траектории полёта. Измерения проводятся с пространственным разрешением 250, 500 и 1000 м в зависимости от спектральной полосы, рассчитываемые значения Кхл выдаются в единицах мг/м³.

Нами были проанализированы снимки за период 2008–2017 гг. На изображениях показаны изобаты 200 и 1000 м, которые близки к границам залива и границе шельфа. Была проведена группировка снимков по преобладанию в анализируемых распределениях Кхл одного из четырёх факторов: «берег», адвекция, вихри, конвекция. Главными критериями группировки были: а) частота проявления типичной ориентации относительно береговой линии и границы шельфа; б) величина Кхл; в) проявление в распределении очевидного механизма. Рассмотрим характерные особенности в каждой из выделенных групп.

«Берег» (рис. 1, см. с. 160). Максимальные значения Кхл наблюдаются в узкой прибрежной полосе. В большинстве случаев значения Кхл больше 10 мг/м³, что заметно превышает средний уровень эвтрофических зон океана. Уменьшению Кхл при удалении от берега, как на снимках 22.10.2014, 04.10.2015, 21.05.2016, 21.09.2016, 25.09.2017, соответствует одновременное уменьшение значений этого показателя на большей части акватории почти на два порядка. Это значит, что наблюдаемое распределение Кхл определяется переносом хлорофилла из прибрежной зоны. Явно видимым механизмом такого переноса являются мезомасштабные

и субмезомасштабные вихри (например, снимки 22.08.2009, 16.09.2009), которые образуют полосы и небольшие области повышенных значений и сглаживают контрасты в зоне шельфа. Но они не определяют значения Кхл. Большие пространственные градиенты концентрации между прибрежной зоной и остальной частью шельфа можно объяснить не только значительным притоком терригенных биогенов, но и недостаточностью механизмов их выноса из прибрежной зоны. Отметим, что максимальные стоки с суши, также как и максимальное естественное цветение хлорофилла, наблюдаются весной и в начале лета, а в анализируемых данных максимум Кхл преобладает в период июль – октябрь.

Рис. 1. Типичные распределения Кхл с преобладанием эффекта близости берега

Адвекция (рис. 2). В формировании Кхл большую роль играет перенос течением хлорофилла или фитопланктона из зоны, где их большие значения обусловлены различными факторами: турбулентностью, близостью берега, речным стоком. Приморское течение, входящее в залив с северо-востока вдоль границы шельфа, до входа в залив проходит вдоль очень короткого шельфа близко к берегу, генерирует шельфовые волны, интенсивные вихри и горизонтальную турбулентность (Ладыченко, Лобанов, 2013; Пономарев и др., 2011), захватывая прибрежный хлорофилл. Большие значения Кхл могут распространяться вдоль склона и в обе стороны от него, на шельф и в открытое море, частично смыкаясь с тёплыми водами вдоль западных берегов залива и частично поворачивая на юг от континентального склона. Максимальные значения Кхл сравнимы с максимальными значениями в прибрежном типе, но более расплывчаты. В некоторых случаях они прижаты к границе шельфа и деформируются квазипериодическими вихрями (снимки 16.04.2009, 15.04.2017). Этот тип распределения ярче всего проявляется весной, когда сток с суши максимален, и поздней осенью. Связь с Кхл в прибрежных водах залива практически отсутствует.

Рис. 2. Типичные распределения Кхл с преобладанием эффекта адвекции

Вихри (рис. 3). Структура и вихри находятся во взаимодействии: флуктуации Кхл могут формироваться при участии связанных с вихрями горизонтальных и вертикальных движений и в то же время вихри деформируют уже существующее поле Кхл. Этот тип распределения меньше других зависит от сезона, легко комбинируется с прибрежными процессами и адвекцией и может создавать квазипериодические структуры. Примером является снимок 25.03.2017 на рис. 3, где повышенные вследствие склонового апвеллинга Кхл переносятся вихрями в сторону берега. Вихри внутри шельфовой зоны, как правило, меньше вихрей в зоне склона и выходящих за пределы шельфа и могут создавать вытянутые и квазиволновые структуры поля хлорофилла.

Рис. 3. Типичные распределения Кхл с преобладанием эффекта вихрей

Конвекция (рис. 4). Пространственное распределение формируется под воздействием плотностной конвекции при появлении отрицательных градиентов плотности и/или при интенсивных стонных ветрах на мелководной акватории. Когда глубина дна небольшая, насыщенные биогенами придонные воды могут очень быстро попадать в фотический слой и создавать равномерное повышение Кхл одновременно на большой акватории при отсутствии значительных градиентов скорости течений. Границы таких зон могут быть резкими вследствие ограниченности потенциальной энергии разности плотностей или пространственной структуры поля стонного ветра.

Рис. 4. Типичные распределения Кхл с преобладанием эффекта термической конвекции

Как и следовало ожидать, в большинстве случаев наблюдаемые структуры нельзя приписать действию только одного параметра: они могут формироваться при участии разных физических и неучитываемых химико-биологических факторов. Но есть два критерия для выделения преобладающего фактора на данной акватории: период времени и величина воздействия. В нашем случае эффект берега преобладал и по общему времени его проявления, и по величине воздействия на Кхл. Очевидно, что пополнение океана терригенным веществом проходит через прибрежную зону. Поэтому основное внимание мы уделяем динамическим процессам в прибрежной зоне и их взаимодействию с процессами в зоне континентального склона.

Результаты наблюдений

Эксперименты и наблюдения в прибрежной зоне и на шельфе проводились в разные годы. Используемые в данной статье измерения были выполнены вблизи мыса Шульца и бухты Витязь, географическое описание района можно найти в статьях (Навроцкий и др., 2010; Navrotsky et al., 2013). Колебания температуры измерялись с использованием гирлянд термисторов от 30 до 40 датчиков через каждые 0,5 м, нижний датчик — на расстоянии около 0,5 м от дна. Вблизи гирлянд производились измерения скорости течений и температуры приборами S4A (InterOcean, USA), RDCP-600 (AANDERAA), а также колебаний давления и придонной температуры с помощью SBE26 (USA). Измерения флуоресценции хлорофилла выполнялись в фиксированных точках и на разрезах для изучения локальных короткопериодных колебаний. Основное внимание и время уделяется длительным измерениям процессов, которые происходят при наличии устойчивой стратификации.

Устойчивый пикноклин в зоне континентального склона препятствует подъёму глубинных насыщенных биогенами вод в фотический слой и одновременно обуславливает генерацию внутренних волн (ВВ) приливом, вихрями и другими возмущениями. В работах (Навроцкий и др., 2003; Navrotsky, 1999; Navrotsky et al., 2004) на основании наблюдений и моделирования было показано, что при распространении ВВ в сторону берега они взаимодействуют с пикноклином таким образом, что приводят к его расщеплению, утолщению и заглублению. В результате формируется стратифицированный придонный слой. В прибрежной зоне разрушение ВВ в придонном слое приводит к усиленному вертикальному перемешиванию и ресуспензии донных осадков и, соответственно, к резкому увеличению концентрации всех терригенных веществ, включая биогены.

Различия в режимах формирования полей Кхл при разной стратификации мы проиллюстрируем с использованием результатов экспериментов в мае—июне и сентябре—октябре 2017 г. На *рис. 5* (см. с. 165) показаны колебания температуры и трёх компонент удельных потоков тепла (произведений пульсаций температуры на пульсации компонент скорости течений) на горизонте 23 м при глубине дна 24 м по измерениям 1—8 июня и 3—10 сентября 2017 г., которые проводились на выходе из бух. Витязь на расстоянии около 200 м от берега. Амплитуды максимальных пульсаций температуры достигали 3—4 °C в июне и 10—12 °C в сентябре. Амплитуды потоков тепла в сентябре были не в 3—4 раза (как можно было ожидать из отношения амплитуд пульсаций температуры), а в 25 раз больше, чем в июне. Это значит, что мы наблюдаем изменение динамического режима, и это хорошо проявляется в характере пульсаций и потоков: в сентябре и пульсации, и потоки тепла имеют чётко выраженную периодичность, соответствующую внутренним волнам, создающим колебания придонной температуры (см. *рис. 5*).

При одинаково направленном и почти постоянном вкладе солёности в плотность в данном районе моря произведения пульсаций температуры на пульсации скорости пропорциональны потокам массы и тем самым описывают интенсивность и пространственно-временную структуру горизонтального и вертикального перемешивания.

Статистические характеристики колебаний температуры и модуля горизонтальной скорости течений в сентябре и июне 2017 г. приведены в *таблице*. Среднеквадратичные колебания температуры σ_T и скорости течений σ_V характеризуют полную энергию процессов.

Отношение этих величин в сентябре и июне равно 5,53 для температуры и 4,31 для скорости течений. Отношения среднеквадратичных флуктуаций к средним значениям характеризуют относительную интенсивность процесса, которая может быть одинаковой для автомодельных процессов даже при большом различии полных энергий. В данном случае эти отношения равны 2,83 для температуры и 1,62 для скорости. Это значит, что мы наблюдаем изменение динамического режима, обусловленное стратификацией. Отношение между среднеквадратичными пульсациями температуры и скорости 1,86 говорит о том, что относительная роль колебаний температуры выше в этом процессе, чем колебаний скорости.

Рис. 5. Колебания температуры и удельных потоков тепла в придонном слое в июне и сентябре 2017 г.

Средние значения температуры и модуля скорости течений в сентябре и июне, среднеквадратичные отклонения, их отношения к средним значениям и отношения всех параметров в сентябре к их значениям в июне

Время	Параметры								
	$\bar{T}$	$T_{\min}$	$T_{\max}$	σ_T	$\sigma_T/\bar{T}$	V	σ_V	σ_V/V	σ_T/σ_V
Сентябрь	12,24	3,94	19,85	4,15	0,34	15,40	8,45	0,55	0,65
Июнь	6,15	4,69	8,43	0,75	0,12	5,80	1,96	0,34	0,35
Отношение	1,99	0,84	1,80	5,53	2,83	2,65	4,31	1,62	1,86

Наглядное представление о значении стратификации и обусловленных ею внутренних волн для биологических процессов можно получить из рис. 6 (см. с. 166), где показан временной разрез колебаний температуры в 10-метровом придонном слое при глубине дна 20 м. Перепад температур был больше 20°, структура плотности сильно устойчива, но на верхней границе и внутри холодного придонного слоя наблюдается перемешивание.

Рис. 6. Временной разрез колебаний температуры в 10-метровом придонном слое 23–30 сентября 2009 г.

Внутренние волны с амплитудами 5–10 м при распространении на шельфе приводят к периодическим вертикальным смещениям концентрирующегося на пикноклине фитопланктона, перемещая его в разные условия освещения. Это уже чувствительное воздействие, но главный эффект создаётся при выходе на мелководье, и мы его наблюдаем на рис. 6. При приближении ВВ к берегу на некоторой глубине, зависящей от амплитуды, волна начинает отрываться от термоклина (на нашем рисунке после 48 ч) и превращается в «болюс» (после 66 ч) с холодной водой и короткими ВВ внутри. Этот достаточно новый термин в гидродинамике понадобился для обозначения дискретных, устойчиво стратифицированных объёмов жидкости, распространяющихся в практически однородной среде (Bourgault et al., 2008; Moore et al., 2016). Данный процесс аналогичен заплеску поверхностных волн на пологом пляже. От тёплого квазиоднородного верхнего слоя болюсы отделены высокоустойчивыми прослойками, и биологические объекты попадают в резко различные условия с интервалами по времени, близкими к приливным и инерционным, и по пространству порядка 10–20 км. При этом формируется тонкая горизонтальная структура гидрофизических и гидробиологических параметров, которую, в принципе, можно наблюдать со спутников, насколько об этом позволяют судить иллюстрации в статье О. Ю. Лавровой и К. Д. Сабина (2016). Необходимо отметить, что чисто инерционные колебания в поле скорости, о которых идёт речь в указанной статье, не могут обеспечить интенсивное перемешивание ни в открытом океане, ни в прибрежной зоне, поскольку вертикальная составляющая в этих колебаниях мала. Для этого им надо или генерировать турбулентность в некотором слое, что маловероятно в связи с небольшими значениями вертикальных градиентов скорости, или передать свою энергию инерционно-гравитационным волнам. Именно этот процесс резонансного взаимодействия инерционных колебаний и инерционно-гравитационных волн в зоне континентального склона приводит к чередованию приливного (12 ч) и квазиинерционного (16–17 ч) периодов во многих наших измерениях (см. рис. 6).

Наблюдаемый на рис. 6 процесс с большой дисперсией параметров создаёт среду, аналогичную фронтальной зоне (но ещё более контрастной), и метаболизм живых организмов, соответственно, усиливается. С точки зрения притока биогенов главным свойством болюсов является то, что при большой устойчивости они переносят энергию породивших их внутренних волн туда, где нормальные к берегу течения отсутствуют. В конечном итоге они разрушаются и турбулизируют придонный слой, и это может происходить на значительно больших глубинах, чем те, до которых доходят эффекты разрушения поверхностных волн. Тем самым они приводят к перемешиванию придонного слоя, ресуспензии осадков и насыщению прибрежных вод терригенным веществом на большом пространстве с разным составом донных наносов. Разномасштабные вихри различного происхождения вместе с приливными течениями

и горизонтальной турбулентностью выполняют основную часть работы по горизонтальному водообмену, а тем самым — по обмену органическим и минеральным веществом между прибрежной зоной, шельфом и открытым морем.

Заключение

При формировании рассмотренных пространственных распределений хлорофилла наиболее явно зависимыми от сезона оказываются процессы, связанные с поставкой биогенов в приповерхностный слой: процессы в прибрежной зоне, течения и конвекция. Существенных изменений роли вихрей в перераспределении уже имеющегося количества хлорофилла в течение года не отмечено. Преобладание механизма конвекции в ноябре — январе не требует пояснений. Максимальные эффекты поверхностного Приморского течения в период ноябрь — апрель выходят далеко за пределы залива и связаны как с источниками его формирования, так и с тем, что оно проходит вплотную к побережью Приморского края.

Максимальный эффект прибрежных процессов проявляется в августе — октябре. Это связано с важнейшим фактором, кардинально меняющим динамику шельфовой зоны, — формированием пикноклина. Апвеллинг в этот период слабо выражен, поскольку резкий термоклин препятствует притоку биогенов из глубоких слоёв и цветению хлорофилла в приповерхностном слое, который просматривается спектрорадиометром MODIS.

Наиболее эффективным механизмом энергетического взаимодействия между внешельфовой и прибрежной зонами являются внутренние волны. Генерация инерционно-гравитационных внутренних волн за счёт энергии приливов, вихрей, течений и инерционных колебаний, их трансформация в болюсы и разрушение на мелководье обеспечивают: а) вертикальное перемешивание придонного слоя и приток биогенов; б) вентиляцию прибрежных вод, поскольку они приносят воду с глубин ниже термоклина. Оба эти процесса необходимы для продуктивности и устойчивости шельфовых экосистем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 15-05-03805, 15-01-03942, 16-05-00899а), а также гранта ДВО РАН (проект № 15-I-1-047дв).

Литература

1. 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.
2. Лаврова О. Ю., Сабинин К. Д. Проявления инерционных колебаний на спутниковых изображениях морской поверхности // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 4. С. 60–73.
3. Ладыченко С. Ю., Лобанов В. Б. Синоптические вихри в районе залива Петра Великого по спутниковым данным // *Исследование Земли из космоса*. 2013. № 4. С. 3–15.
4. Навроцкий В. В., Изергин В. Л., Павлова Е. П. Генерация внутренних волн вблизи границы шельфа // *Доклады АН*. 2003. Т. 388. № 2. С. 249–253.
5. Навроцкий В. В., Ляпидевский В. Ю., Павлова Е. П., Храпченков Ф. Ф. Внутренние волны и перемешивание в шельфовой зоне моря // *Известия ТИНРО*. 2010. Т. 162. № 3. С. 24–37.
6. Навроцкий В. В., Павлова Е. П. Внутренние волны и их биологические эффекты в шельфовой зоне моря // *Вестник ДВО РАН*. 2012. № 6. С. 22–31.
7. Пономарев В. И., Файман П. А., Дубина В. А., Ладыченко С. Ю., Лобанов В. Б. Синоптическая вихревая динамика над северо-западным материковым склоном и шельфом Японского моря (моделирование и результаты дистанционных наблюдений) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011. Т. 8. № 2. С. 100–104.
8. Романкевич Е. А., Ветров А. А., Пересыпкин В. И. Органическое вещество Мирового океана // *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50. № 4. С. 401–411.

9. *Bourgault D., Kelley D. E., Galbraith P. S.* Turbulence and boluses on an internal beach // *J. Marine Research*. 2008. V. 66. P. 563–588.
10. *Boyce D. G., Dowd M., Lewis M. R., Worm B.* Estimating global chlorophyll changes over the past century // *Progress in Oceanography*. 2014. V. 122. P. 163–173.
11. *Callendar W., Klymak J. M., Foreman M. G. G.* Tidal generation of large submesoscale eddy dipoles // *Ocean Science*. 2011. V. 7. P. 487–502.
12. *Callendar-Ramirez M. A., Hormazabal S. E., Morales C. E.* Spatial patterns of annual and interannual surface chlorophyll-a variability in the Peru–Chile Current System // *Progress in Oceanography*. 2012. V. 92–95. P. 8–17.
13. *Gregg W. W., Conkright M. E., Ginoux P., O'Reilly J. E., Casey N. W.* Ocean primary production and climate: Global decadal changes // *Geophysical Research Letters*. 2003. V. 30. No. 15. P. 1809. DOI: 10.1029/2003GL016889.
14. *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 Research*. 2015. V. 110. P. 85–99.
15. *Moore C. D., Koseff J. R., Hult E. L.* Characteristics of bolus formation and propagation from breaking internal waves on shelf slopes // *J. Fluid Mechanics*. 2016. V. 791. P. 260–283.
16. *Moum J. N., Klymak J. M., Nash J. D., Perlin A., Smith W. D.* Energy transport by nonlinear internal waves // *J. Physical Oceanography*. 2007. V. 37. P. 1968–1988. DOI: 10.1175/JPO3094.1.
17. *Navrotsky V. V.* Mixing caused by internal waves and turbulence: a comparative analysis // *J. Marine Systems*. 1999. V. 21. No. 1–4. P. 131–145. DOI: 10.1016/S0924-7963(99)00010-X.
18. *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 Research*. 2004. V. 24. P. 1375–1395. DOI: 10.1016/j.csr.2004.03.008.
19. *Navrotsky V. V., Liapidevskii V. Yu., Pavlova E. P.* Features of internal waves in a shoaling thermocline // *Intern. J. Geosciences*. 2013. V. 4. P. 871–879. DOI: 10.4236/ijg.2013.45081.
20. *Piontkowski A., Al-Jufaili S.* Coastal upwellings and Mesoscale Eddies of the Western Arabian Sea: Some Biological Implications // *Intern. J. Oceans and Oceanography*. 2013. V. 7. No. 2. P. 93–115.
21. *Whitney F. A., Crawford W. R., Harrison P. J.* Physical processes that enhance nutrient transport and primary productivity in the coastal and open ocean of the subarctic NE Pacific // *Deep-Sea Research II*. 2005. V. 52. P. 681–706.

Analysis of satellite observations of chlorophyll concentration in the Peter the Great Gulf (Japan Sea)

V. V. Navrotsky, V. A. Dubina, E. P. Pavlova, F. F. Chrapchenkov

V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia
E-mail: vnavr@poi.dvo.ru

Results of daily satellite snapshots of chlorophyll concentration (CHL) in the Peter the Great Gulf area were analyzed for the period 2008–2017. Grouping of the snapshots is performed subject to prevailing of one of the four factors affecting chlorophyll concentration: shore proximity, current, eddies, convection. Seasonal tendency, revealed in chlorophyll spatial distributions, is considered in relation to seasonal changes of role of different physical mechanisms in delivery of necessary for primary production biogens into the photic layer. In most cases the pictures are formed by simultaneous action of several factors, but by frequency and CHL magnitude, the prevailing factor in the considered area was shore proximity. To explain the observed seasonal differences in chlorophyll distributions and their interrelations with physical processes, results of experiments in the near-shore region with depths of 20–40 m were used. In the satellite data maximum values of CHL in the near-shore region are not observed in the periods of maximum runoff from land, but it is observed in the periods of strong thermocline and maximum intensity of internal waves (IW) in the near-bottom layer. IW breaking leads to sharp amplification of mixing and bottom sediments resuspension. Internal waves are generated by interaction of tides, eddies, and currents over the continental slope with changeable steepness and curvature, and

they carry energy of these large-scale motions to shores. Eddies of different scales and tidal currents are, at the same time, the main mechanisms of the near-shore waters ventilation and chlorophyll and phytoplankton redistribution over the area with additional input of local horizontal turbulence of different origin. Effect of upwelling along the shelf boundary, which most frequently appears in papers as the main object in study of shelf productivity, in our conditions reveals itself only indirectly against the background of other factors in absence of seasonal thermocline.

Keywords: satellites, chlorophyll, shelf, continental slope, near-shore region, tide, eddies, upwelling, internal waves

Accepted: 10.01.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-158-170

References

1. Kukarin V. F., Lyapidevskii V. Yu., Navrotsky V. V., Khrapchenkov F. F., Evolyutsiya vnutrennikh voln bol'shoi amplitudy v zone zapleska (Evolution of large amplitude internal waves in the "swash" zone), *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2013, Vol. 6, No. 2, pp. 35–45.
2. Lavrova O. Yu., Sabinin K. D., Proyavleniya inertsionnykh kolebaniy na sputnikovyykh izobrazheniyakh morskoi poverkhnosti (Manifestations of inertial oscillations in satellite images of the sea surface), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 60–73.
3. Ladychenko S. Yu., Lobanov V. B., Sinopticheskie vikhri v raione zaliva Petra Velikogo po sputnikovym dannym (Synoptic eddies in the Peter the Great Gulf according to satellite data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 4, pp. 3–15.
4. Navrotsky V. V., Izergin V. L., 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.
5. Navrotsky V. V., Lyapidevskii V. Yu., Pavlova E. P., Khrapchenkov F. F., Vnutrennie volny i peremeshivanie v shelfovoi zone morya (Internal waves and mixing in the shelf zone of sea), *Izvestiya TINRO*, 2010, Vol. 162, No. 3, pp. 24–37.
6. Navrotsky V. V., Pavlova E. P., Vnutrennie volny i ikh biologicheskie efekty v shelfovoi zone morya (Internal wave and their biological effects in the shelf zone of sea), *Vestnik DVO RAN*, 2012, No. 6, pp. 22–31.
7. Ponomarev V. I., Fayman P. A., Dubina V. A., Ladychenko S. Yu., Lobanov V. B., Synopticheskaya vikhrevaya dinamika nad severo-zapadnym sklonom i shelfom Yaponskogo morya (modelirovanie i rezultaty distantsionnykh nablyudenii) (Synoptic vortical dynamics over the nord-western continental slope and shelf of the Japanese Sea (modeling and results of remote observations)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 482–485.
8. Romankevich E. A., Vetrov A. A., Peresypkin V. I., Organicheskoe veshchestvo Mirovogo okeana (Organic matter in the World ocean), *Geologiya i geofizika*, 2009, Vol. 50, No. 4, pp. 401–411.
9. Bourgault D., Kelley D. E., Galbraith P. S., Turbulence and boluses on an internal beach, *J. Marine Research*, 2008, Vol. 66, pp. 563–588.
10. Boyce D. G., Dowd M., Lewis M. R., Worm B., Estimating global chlorophyll changes over the past century, *Progress in Oceanography*, 2014, Vol. 122, pp. 163–173.
11. Callendar W., Klymak J. M., Foreman M. G. G., Tidal generation of large submesoscale eddy dipoles, *Ocean Science*, 2011, Vol. 7, pp. 487–502.
12. Correa-Ramirez M. A., Hormazabal S. E., Morales C. E., Spatial patterns of annual and interannual surface chlorophyll-a variability in the Peru–Chile Current System, *Progress in Oceanography*, 2012, Vol. 92–95, pp. 8–17.
13. Gregg W. W., Conkright M. E., Ginoux P., O'Reilly J. E., Casey N. W., Ocean primary production and climate: Global decadal changes, *Geophysical Research Letters*, 2003, Vol. 30, No. 15, p. 1809, DOI: 10.1029/2003GL016889.
14. 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 Research*, 2015, Vol. 110, pp. 85–99.
15. Moore C. D., Koseff J. R., Hult E. L., Characteristics of bolus formation and propagation from breaking internal waves on shelf slopes, *J. Fluid Mechanics*, 2016, Vol. 791, pp. 260–283.
16. Moum J. N., Klymak J. M., Nash J. D., Perlin A., Smith W. D., Energy transport by nonlinear internal waves, *J. Physical Oceanography*, 2007, Vol. 37, pp. 1968–1988, DOI: 10.1175/JPO3094.1.

17. 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.
18. 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 Research*, 2004, Vol. 24, pp. 1375–1395, DOI: 10.1016/j.csr.2004.03.008.
19. Navrotsky V. V., Lyapidevskii V. Yu., Pavlova E. P., Features of internal waves in a shoaling thermocline, *Intern. J. Geosciences*, 2013, Vol. 4, pp. 871–879, DOI: 10.4236/ijg.2013.45081.
20. Piontkovski A., Al-Jufaili S., Coastal upwellings and Mesoscale Eddies of the Western Arabian Sea: Some Biological Implications, *Intern. J. Oceans and Oceanography*, 2013, Vol. 7, No. 2, pp. 93–115.
21. Whitney F. A., Crawford W. R., Harrison P. J., Physical processes that enhance nutrient transport and primary productivity in the coastal and open ocean of the subarctic NE Pacific, *Deep-Sea Research II*, 2005, Vol. 52, pp. 681–706.