

Водообмен у южного побережья Приморья в Японском море по спутниковым данным и долговременным контактными измерениям

О. О. Трусенкова¹, А. Г. Островский², А. Ю. Лазарюк¹,
С. Ю. Ладыченко¹, В. А. Дубина¹, В. Б. Лобанов¹

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

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия

Проанализированы данные съёмки с ИСЗ NOAA, Suomi/NPP и COMS северо-западной части Японского моря в инфракрасном и видимом диапазонах электромагнитного спектра с середины апреля до середины октября 2015 г., когда в районе континентального склона у япономорского побережья южного Приморья функционировал заякоренный автономный сканирующий профилограф «Аквалог». Проведён совместный анализ спутниковых изображений и временных рядов контактных измерений температуры и солёности воды в верхнем слое профилирования (64–70 м), что позволило исследовать природу термохалинных аномалий подповерхностных вод, зарегистрированных «Аквалогом». На спутниковых изображениях за 21–24 апреля западнее станции «Аквалог» был обнаружен вытянутый в меридиональном направлении фронт, к востоку от которого в сторону открытого моря поступали воды Приморского течения, чем объясняются низкая температура, солёность и плотность, зарегистрированные «Аквалогом» во второй половине апреля. К 10 мая фронт сдвинулся на северо-восток, огибая с запада антициклонический вихрь. Между водами течения и фронтом располагалась область тёплых вод, которые затягивались вихрем, а 16–21 мая были зарегистрированы чередующиеся струи тёплых и холодных вод, возникновение которых, вероятно, связано с неустойчивостью динамической структуры, включавшей фронт, вихрь и область тёплых вод. Тёплые распреснённые воды низкой плотности в начале июня были связаны с выносом прибрежных вод в открытое море (по восточной периферии крупного вихря), тёплые воды повышенной солёности (с конца июня до середины сентября) — с поступлением трансформированных субтропических вод с юга или востока. Резкое уменьшение температуры в начале октября после прохождения внетропического циклона можно объяснить влиянием вод прибрежного апвеллинга, достигших места установки «Аквалога».

Ключевые слова: Японское море, Приморское течение, синоптические и мезомасштабные динамические структуры, спутниковые изображения, инфракрасный и видимый диапазоны, сканирующий профилограф

Одобрена к печати: 20.02.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-196-206

Введение

Дистанционное зондирование из космоса — весьма ценный источник данных о состоянии и изменчивости океана. В частности, в течение 50 лет инфракрасные (ИК) изображения морской поверхности с успехом используются для наблюдений за динамическими структурами и процессами в море (Федоров, Гинзбург, 1988). Вместе с тем, как показывает сравнение судовых и спутниковых данных, даже мощные по вертикальной структуре вихри могут проявляться лишь слабыми контрастами на спутниковых ИК-изображениях, что, в частности, отмечалось для вихря, зарегистрированного в апреле 1999 г. в северо-западной (СЗ) части Японского моря (Лобанов и др., 2007).

На современном этапе структуру вихрей в толще вод исследуют с помощью дрейфующих буёв ARGO и судовых съёмок, иногда планируя их по оперативной спутниковой информации. Довольно часто также используются данные донных океанологических станций, проводящих измерения в одной географической точке в течение длительного времени, например,

с помощью акустического доплеровского профилографа течений. Однако заякоренные сканирующие приборы, осуществляющие одновременно измерения профилей скорости течения, температуры и солёности воды с вертикальным разрешением, адекватным тонкой термодинамической структуре, являются довольно редкими. Такого рода уникальные данные были получены с помощью автономного профилографа «Аквалог» (Островский и др., 2013) в области континентального склона у побережья южного Приморья в СЗ части Японского моря в тёплый период 2015 г.

В этом динамически активном районе (Ладыченко, Лобанов, 2013; Лобанов и др., 2007; Никитин и др., 2009; Пономарев и др., 2011) следует на юго-запад Приморское течение, в зоне которого формируются вихри, над континентальным склоном проходят длинные волны, сюда переносятся трансформированные субтропические воды с юга и востока. Ранее по данным «Аквалога» уже были выявлены вертикальные колебания в поле плотности на нескольких временных масштабах (с периодами 2–3,5 и 8–13 сут), которые были соотнесены с временем жизни синоптических и мезомасштабных вихрей, и регулярное колебание с периодом 18–22 сут, связанное, видимо, с прохождением волнового образования. В апреле – мае 2015 г. было зарегистрировано колебание с временем жизни примерно 1,5 мес (полтора периода), природа которого осталась не вполне ясной (Трусенкова и др., 2018). Также были обнаружены термохалинные аномалии на изопикнических поверхностях, которые свидетельствуют об интрузиях, но природу этих интрузий было затруднительно установить по результатам измерений в одной точке.

Целью данной работы является сопоставление термохалинных аномалий по данным «Аквалога» с динамическими структурами, зарегистрированными на спутниковых изображениях СЗ части Японского моря. Термохалинные индексы идентифицированных аномалий будут использованы для интерпретации данных «Аквалога» в отсутствие спутниковой информации.

Данные наблюдений

Из-за облачности период с апреля по октябрь (особенно с июля по август) 2015 г. был неблагоприятен для наблюдения СЗ части Японского моря из космоса в ИК- и видимом диапазонах электромагнитного спектра, которые имеют достаточно высокое пространственное разрешение. Всё же удалось выбрать ряд изображений для соотнесения с аномалиями термохалинной структуры, обнаруженными с помощью «Аквалога». В данной работе использованы яркостные ИК-изображения, полученные с радиометров AVHRR (4-й канал) ИСЗ NOAA с разрешением 1 км (из архива Центра регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН; <http://satellite.dvo.ru/>) и VIIRS с ИСЗ Suomi/NPP с разрешением 375 м (<https://www.bou.class.noaa.gov/saa/products/welcome>). Нами исследованы фрагменты изображений ИСЗ Suomi/NPP, на которых различимы детали, сглаженные на изображениях с ИСЗ NOAA. ИК-изображения используются для идентификации динамических структур, которые различимы на них лучше, чем в сглаженных полях температуры воды. Для оценки температурных контрастов указана цифрами температура, восстановленная по измерениям радиометра AVHRR (алгоритм Multi-channel SST).

Перенос вод также был выявлен в пространственных распределениях хлорофилла *a* по данным радиометра GOCI с геостационарного ИСЗ COMS с разрешением 500 м (<http://www.ioccg.org/sensors/GOCI.html>). Поскольку эти данные использовались в качестве трассеров, проблема строгого разделения вкладов биогенных и абиогенных факторов нами не рассматривалась.

Заякоренный профилограф «Аквалог» работал в период с 18 апреля по 14 октября 2015 г. у побережья южного Приморья (42,5° с. ш., 133,8° в. д.) над континентальным склоном, где глубина моря составляла 440 м. Профилограф, снабжённый датчиками для измерения океанологических параметров, автоматически перемещался по натянутому вертикально тросу, закреплённому между донным якорем и подповерхностной плавучестью. Вертикальные зондирования с дискретностью измерений не более 1 м охватывали толщу вод от 64 м вниз;

зондирования проводились в 00:00, 06:00, 12:00 и 18:00 Гр. каждые сутки. После первичной обработки ошибки составили 0,002 °С по температуре и 0,003 епс по солёности (Лазарюк и др., 2017), т.е., как будет показано ниже, зарегистрированные термохалинные аномалии существенно превышали эти ошибки. Профилируемый слой находился ниже сезонного пикноклина субарктической структуры вод этого района, по крайней мере летом (Talley et al., 2004), поэтому здесь рассматриваются данные контактных измерений в самом верхнем слое профилирования. Для анализа температура и солёность воды были осреднены в слое 64–70 м (рис. 1).

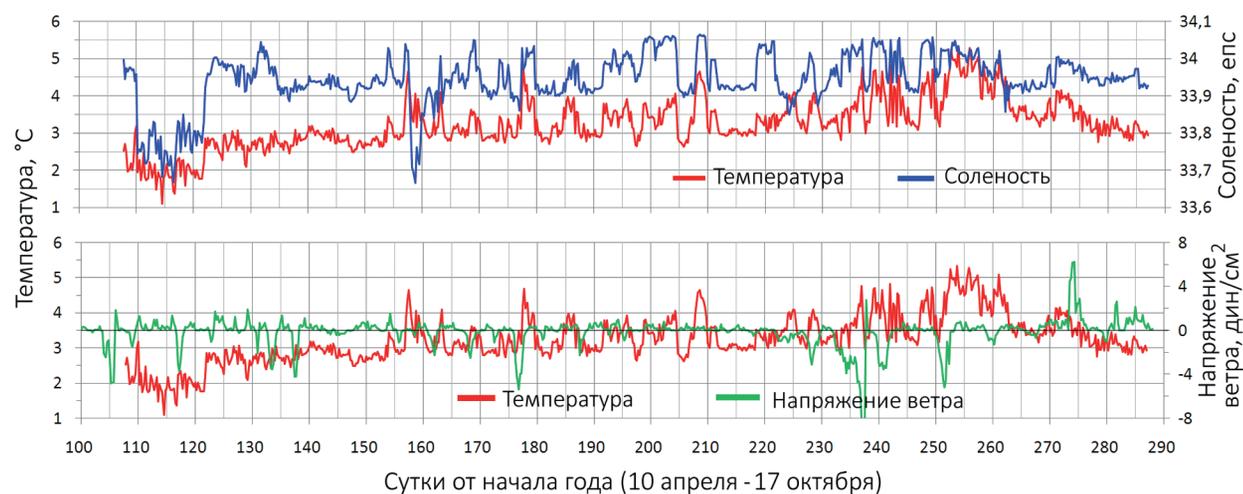


Рис. 1. Временные ряды (10 апреля – 17 октября) осреднённых в слое 64–70 м температуры (°С, красные линии) и солёности (епс, синяя линия) воды, а также вдольбереговой компоненты напряжения ветра (дин/см², зелёная линия), сглаженной с окном 1 сут, в районе станции «Аквалог» по данным реанализа CFSR/NCEP (положительные значения напряжения соответствуют западному ветру)

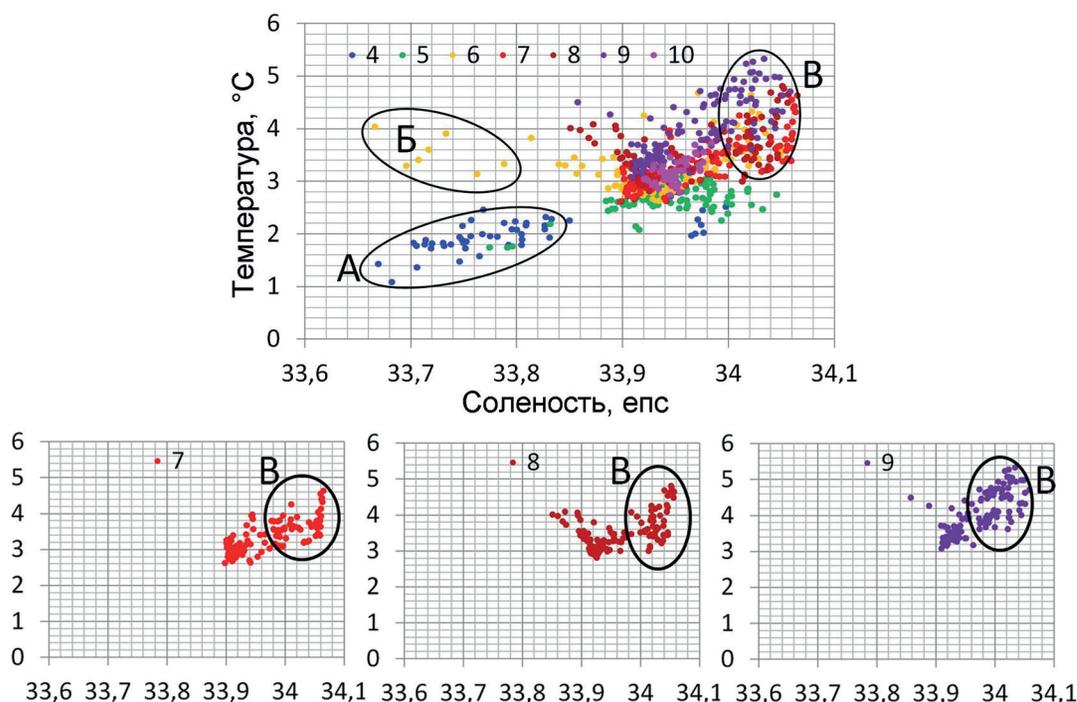


Рис. 2. Диаграммы рассеяния T -, S -индексов (°С, епс) в слое 64–70 м для всего периода наблюдения и для июля, августа и сентября; цифрами 4–10 обозначены месяцы от апреля до октября; кластер А соответствует водам Приморского течения, кластер Б — тёплым прибрежным водам, кластер В — трансформированным субтропическим водам

Результаты и обсуждение

В тёплый период 2015 г. в слое 64–70 м значения температуры и солёности воды находились в диапазонах 1,1–5,4 °С, 33,676–34,06 епс соответственно, а аномалии плотности — в пределах 26,72–27,16 кг/м³. При этом наблюдалась прямая статистическая взаимосвязь между температурой и солёностью (коэффициент корреляции составляет 0,63), что свидетельствует о вторжениях холодных распреснённых вод или тёплых вод с повышенной солёностью. Вместе с тем несколько раз регистрировались интрузии тёплых вод пониженной солёности, а с начала октября взаимосвязи между температурой и солёностью не наблюдалось. Температура воды росла от апреля к сентябрю (рис. 2, см. с. 198). По сложившимся представлениям сезонный максимум температуры на глубине 75 м в этом районе Японского моря приходится на октябрь–ноябрь (Лучин и др., 2003). Однако значения температуры воды, измеренные с помощью «Аквалого», снизились от сентября к октябрю (см. рис. 2). Термохалинные аномалии обсуждаются ниже, причём основой для их интерпретации является соответствие динамическим структурам, зарегистрированным на спутниковых изображениях поверхности СЗ части Японского моря.

Поступление вод Приморского течения

По данным «Аквалого» в период с 21 апреля по 1 мая (111–121-е сутки от начала года) в слое 64–70 м были зарегистрированы пониженные значения температуры (в среднем 1,92 °С), солёности (в среднем 33,768 епс) (см. рис. 1) и плотности (аномалии плотности составляли в среднем 26,99 кг/м³), причём температура была ниже, чем на глубине 150–200 м, а в отдельные дни даже ниже, чем на 250 м. Солёность возрастала с глубиной, что поддерживало устойчивую вертикальную стратификацию по плотности. На диаграмме рассеяния T -, S -индексов эти воды хорошо выделяются в кластер А как по температуре, так и по солёности (см. рис. 2). 2 мая (122-е сутки от начала года) температура и солёность выросли скачком на 0,5 °С и 0,15 епс соответственно, после чего слой прогревался постепенно до конца мая (см. рис. 1). Скачок теплозапаса 2 мая выделялся на фоне весеннего прогрева.

На спутниковых ИК-изображениях от 21 и 24 апреля видна широкая полоса холодных вод Приморского течения, отходящих от берега и формирующих резкий меридиональный фронт с более тёплыми водами западнее места установки «Аквалого» (рис. 3, 4, см. с. 200). Таким образом, зарегистрированные «Аквалогом» в апреле холодные воды пониженной плотности можно связать с Приморским течением; позже подобные значения аномалий плотности в слое 64–70 м не наблюдались. Воды пониженной солёности (меньше 33,8 епс) в июне имели температуру больше 3 °С и иное происхождение (см. ниже).

Как показывают ИК-изображения с высоким пространственным разрешением с ИСЗ Suomi/NPP, от 21 к 24 апреля температурный фронт несколько сдвинулся на юго-запад (см. рис. 4). Однако на ИК-изображениях 10 и 11 мая фронт располагался уже восточнее 134° в.д., огибая с запада антициклонический вихрь, — вероятно, тот, который наблюдался 21 и 24 апреля в восточной части фрагментов изображений на рис. 4 и переместился на юго-запад в период между 24 апреля и 10 мая. Между фронтом и водами Приморского течения (вдоль берега) находился клин тёплых вод, которые затягивались вихрем. К сожалению, облачность воспрепятствовала более детальному анализу эволюции этого фронта в конце апреля и первой декаде мая. Однако, как показывает скачок термохалинных параметров (см. рис. 1), 2 мая (122-е сутки от начала года) «Аквалог» оказался в зоне более тёплых и солёных вод, т. е. ещё до этого фронт начал смещаться на северо-восток.

Во второй половине мая в районе к востоку от 132° в.д. сформировалась своеобразная структура с чередованием струй тёплых и холодных вод, расположенных клином с вершиной вблизи (юго-западнее) станции «Аквалог» (рис. 5, слева, см. с. 200). На изображении высокого разрешения с ИСЗ Suomi/NPP (рис. 5, в центре) видно, что «Аквалог» находится в зоне относительно тёплых вод, что неочевидно на изображении ИСЗ NOAA.

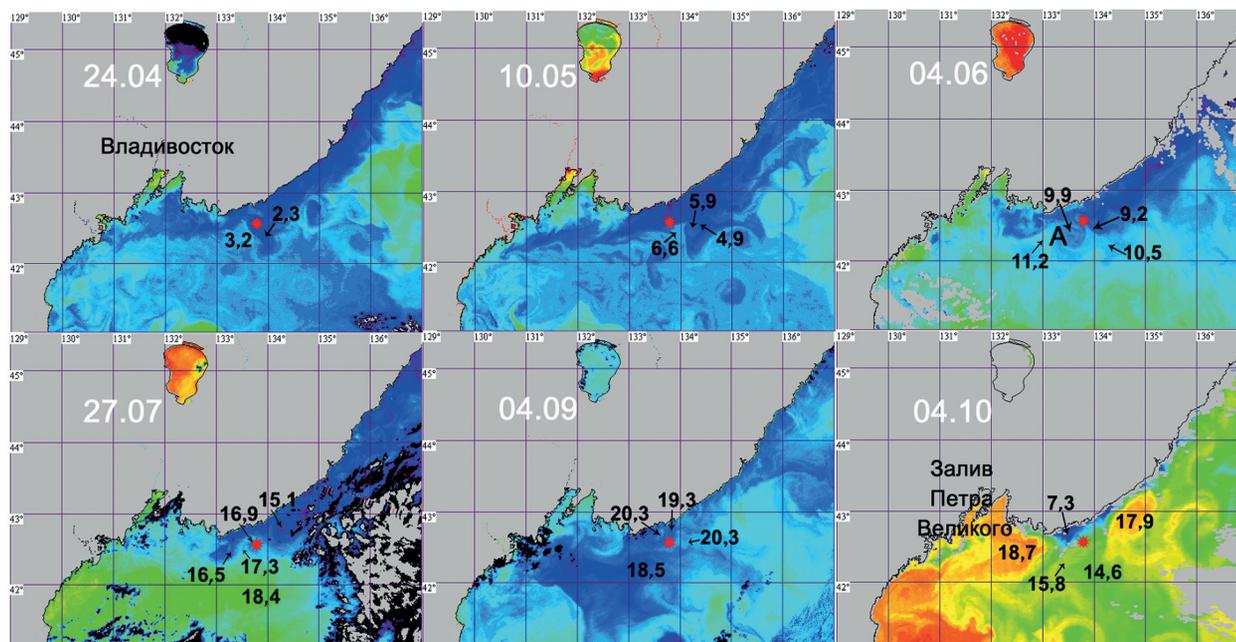


Рис. 3. Яркостные изображения поверхности СЗ части Японского моря в ИК-диапазоне по данным ИСЗ NOAA в апреле – октябре 2015 г. Здесь и далее на изображениях NOAA яркость увеличивается от синего через голубой и зелёный к жёлтому и красному, серый и чёрный соответствуют облачности; на разных изображениях используется разная шкала; цифрами показана температура воды, восстановленная по двухканальным данным радиометра AVHRR с помощью алгоритма Multi-channel SST; положение «Аквалога» показано красной звёздочкой

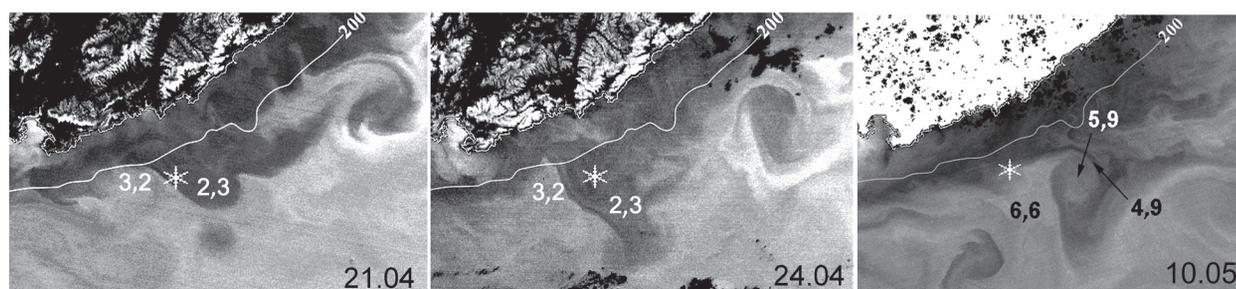


Рис. 4. Фрагменты изображений поверхности СЗ части Японского моря (41,5–43,25° с.ш., 132,25–135,25° в.д.) в ИК-диапазоне по данным ИСЗ Suomi/NPP в апреле и мае 2015 г. Здесь и на рис. 5 тёмными тонами показаны холодные воды, светлыми — тёплые; цифрами указаны значения температуры, восстановленные по измерениям ИСЗ NOAA; показана изобата 200 м

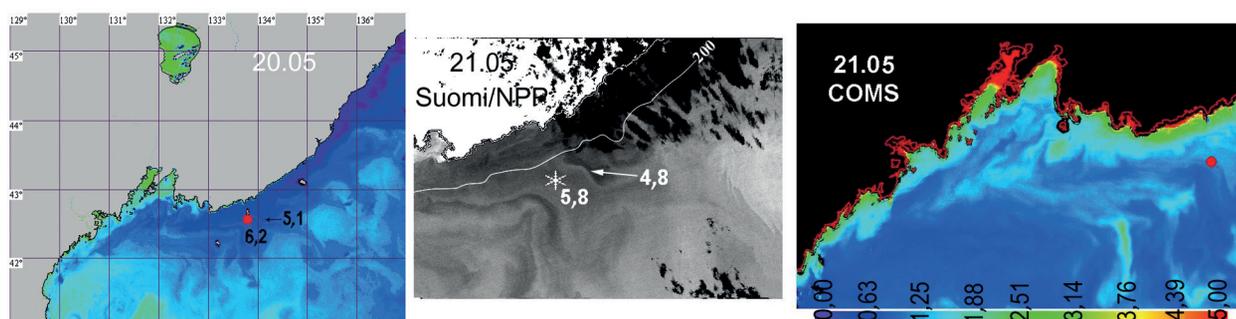


Рис. 5. Спутниковые изображения поверхности СЗ части Японского моря: слева — ИСЗ NOAA, в центре — ИСЗ Suomi/NPP, цифрами указаны значения температуры, восстановленные по измерениям ИСЗ NOAA; справа — распределение хлорофилла *a* в мае (мг/м³, ИСЗ COMS; 41,5–43,25° с.ш., 129,7°–134° в.д.)

Полосы повышенной концентрации хлорофилла *a*, по-видимому, связаны с отошедшими от берега холодными водами высокой биопродуктивности (рис. 5, справа). Вероятно, эта система полос возникла из-за неустойчивости динамической структуры, включавшей фронт, вихрь и клин тёплых вод (см. рис. 4).

Перенос прибрежных вод в сторону открытого моря

7–8 июня (158–159-е сутки от начала года) в районе «Аквалого» на фоне положительной аномалии температуры (3,5–4,0 °С относительно фоновых значений 2,8–2,9 °С в последней декаде мая) наблюдались значительные отрицательные аномалии солёности и аномалии плотности (в среднем 33,713 епс и 26,87 кг/м³ соответственно), которые почти достигли минимальных значений за весь период измерений, далеко выходя за среднеквадратичный разброс (33,94±0,05 епс и 27,02±0,05 соответственно). Это единственная ситуация, когда в слое 64–70 м были обнаружены тёплые воды пониженной солёности (кластер Б на рис. 2) и плотности.

Этому предшествовало прохождение антициклонического синоптического вихря в конце мая в районе установки «Аквалог», что следует из сравнения спутниковых снимков от 24, 30 и 31 мая и 4 июня (см. рис. 3 для 4 июня; вихрь обозначен буквой А). Вертикальная структура этого вихря — прогибы изотерм, изохалин и изопикн, связанные с антициклоническим вращением и опусканием относительно тёплых, распреснённых и лёгких вод в его центре, — наблюдалась по данным «Аквалого» с 21 по 26 мая (Лазарюк и др., 2017). В поверхностном слое центральной части вихря находились более холодные воды, поступившие с северо-востока (см. рис. 3), а в слое 64–70 м сколько-нибудь заметных аномалий в период 30 мая–4 июня (150–155-е сутки от начала года) зарегистрировано не было (см. рис. 1). 3 и 6 июня в слое 64–70 м были зарегистрированы положительные аномалии температуры (3,3 и 4,3 °С) и солёности (34,03 и 34,04 епс относительно фоновых значений 33,95–33,97 епс), а 7 июня солёность резко уменьшилась, как обсуждалось выше (см. рис. 1).

В тыловой части вихря (на восточной периферии) тёплые прибрежные воды переносились в сторону открытого моря, что отчётливо видно 4 июня (см. рис. 3). К сожалению, 5–8 июня спутниковым наблюдениям препятствовал облачный покров, а на изображении 9 июня в районе «Аквалого» наблюдается лишь остаточная полоса тёплых вод на фоне холодных. Тем не менее можно связать термохалинные аномалии, наблюдавшиеся 7–8 июня в слое 64–70 м (см. рис. 1, кластер Б на рис. 2), с переносом прогретых и распреснённых прибрежных вод в сторону открытого моря.

Адвекция тёплых вод к побережью Приморья

На ИК-изображении с ИСЗ NOAA от 27 июля хорошо видна изогнутая тёплая струя в районе станции «Аквалог» над континентальным склоном (см. рис. 3). По данным «Аквалого» 27–28 июля (208–209-е сутки от начала года) температура составила в среднем 4,3 °С, солёность — 34,06 епс, что заметно превышает средние значения для июля (3,3 °С и 33,97 епс соответственно), причём солёность была максимальной за период наблюдений.

С конца июля до начала сентября информативных изображений не было, а на снимке от 4 сентября регистрируется зональная струя, переносимая в район установки «Аквалог» тёплые воды с востока (см. рис. 3). Эти воды менее биопродуктивны, чем субарктические, а данная струя регистрируется также по пониженной концентрации хлорофилла *a* (рис. 6, слева, см. с. 202). По данным «Аквалого» за 4 сентября (247-е сутки от начала года) температура и солёность в слое 64–70 м составляли 4,3 °С и 34,04 епс соответственно, что выше, чем 1–3 сентября (3,3 °С и 33,92 епс).

Короткоживущие (1–2 сут) положительные аномалии температуры и солёности (0,5–2,0 °С и 0,05–0,15 епс соответственно) неоднократно регистрировались «Аквалогом» в период с конца июня до середины сентября (см. рис. 1). На диаграммах рассеяния *T*-, *S*-индексов

эти воды выделены в кластер В, характеризующиеся солёностью, превышающей 34,00 епс. На общей диаграмме кластер В размыт из-за сезонного увеличения температуры от июля к сентябрю, а на помесечных диаграммах он выделяется лучше (см. *рис. 2*). Эти данные наряду с аномалиями на *рис. 1* позволяют определить термохалинные свойства водной массы как 3,5–4,8 °С и 34,00–34,06 епс для июля и августа и 3,5–5,5 °С и 34,00–34,06 епс для сентября. В частности, на диаграмме на *рис. 2* хорошо выделяются вертикально расположенные точки за 27–28 июля с солёностью около 34,06 епс, максимальной за весь период измерений, и температурой, изменяющейся в пределах 3,5–4,8 °С.

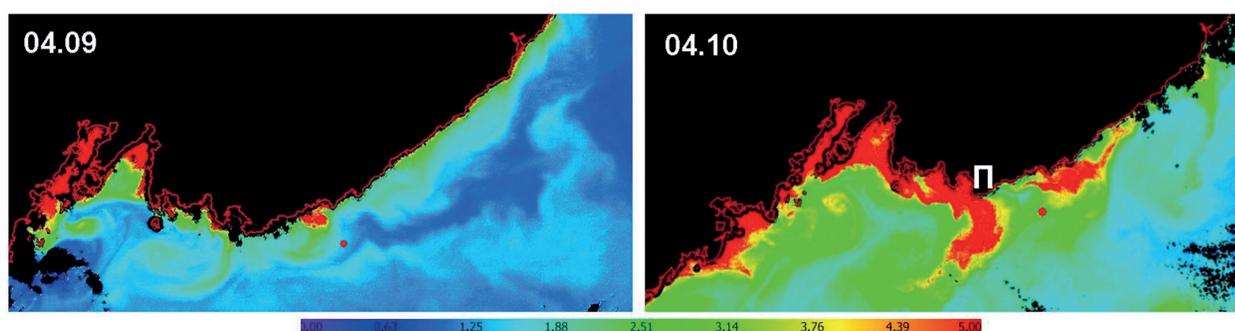


Рис. 6. Распределение хлорофилла *a* ($\text{мг}/\text{м}^3$) в СЗ части Японского моря в видимом диапазоне по данным радиометра GOCI с ИСЗ COMS в 2015 г.: *слева* — 42,25–43,75° с. ш., 130,25–135,5° в. д., *справа* — 42–43,75° с. ш., 130–135,5° в. д.; мыс Поворотный обозначен буквой П

Повышенная солёность указывает на то, что профилограф «Аквалог» зарегистрировал трансформированные субтропические воды, так как в субарктической структуре солёность на этих глубинах ниже (Зуенко, 1998; Лучин и др., 2003). На основе анализа многолетних спутниковых данных уже было установлено, что воды южной части Японского моря могут поступать к берегам Приморья как непосредственно с юга (Никитин и др., 2009), так и с востока (Danchenkov et al., 2006) в синоптических вихрях и струях течений. В период летнего муссона 2015 г. часто повторялись сильные восточные и северо-восточные ветры с абсолютной величиной вдольберегового напряжения трения в районе «Аквалога» 2 $\text{дин}/\text{см}^2$ и более (см. *рис. 1*), с которыми связана циклоническая завихренность напряжения ветра над Японским морем, благоприятствующая переносу вод с востока (Трусенкова, 2012).

Прибрежный апвеллинг

В тёплый период 2015 г. у побережья южного Приморья сильные ветры были нагонными, с восточной составляющей, за исключением 25 августа, когда дул сильный западный ветер (см. *рис. 1*). Обнаружить проявления воздействия ветра по данным «Аквалога» не удалось ни в поле плотности (в глубине залегания изопикнических поверхностей) (Трусенкова и др., 2018), ни в верхнем профилируемом слое (до октября). По-видимому, сгонно-нагонные явления, вызванные ветром, ограничивались верхним слоем вследствие сильной вертикальной стратификации в сезонном пикноклине. К октябрю из-за охлаждения поверхности моря верхний квазиоднородный слой стал толще, вследствие чего проявления апвеллинга достигли глубин профилирования «Аквалога», однако на глубине 100 м они уже не наблюдались.

По данным «Аквалога» с 30 сентября по 3 октября (273–276-е сутки от начала года) наблюдалось постепенное уменьшение температуры (от 4,1 до 3,1 °С) в слое 64–70 м, хотя обычно на этих глубинах сезонное повышение температуры продолжается до октября–ноября (Лучин и др., 2003). После 3 октября температура изменялась незначительно, её средняя величина составила $3,1 \pm 0,17$ °С. Солёность с 30 сентября до конца периода измерений также изменялась незначительно, составляя в среднем $33,94 \pm 0,01$ епс.

На ИК-изображениях 4, 9 и 13 октября зарегистрировано перемещение холодных поверхностных вод от берега в сторону открытого моря (см. *рис. 2* для 4 октября). На спутниковом изображении в видимом диапазоне (4 октября) зарегистрированы высокие концентрации хлорофилла *a* (возможно, с вкладом взвешенного вещества) в прибрежных водах южного Приморья. У мыса Поворотный и в районе станции «Аквалог» зоны с высокой концентрацией хлорофилла *a* вытянуты от побережья в сторону открытого моря (*рис. 6, справа*). Спутниковые изображения дают картину, характерную для прибрежного апвеллинга, воды которого обогащены биогенами, что способствует их высокой биопродуктивности.

30 сентября – 2 октября над территорией Приморского края и Японским морем проходил внетропический циклон, который вызвал значительное усиление ветра. Вдольбереговая юго-западная составляющая, благоприятствующая сгону вод и прибрежному апвеллингу, достигала 4–6 дин/см² в период 30 сентября – 2 октября (273–275-е сутки от начала года) (см. *рис. 1*). Таким образом, можно утверждать, что в слое 64–70 м зарегистрированы воды прибрежного апвеллинга, отходящие в сторону открытого моря на 20–25 км. Аномалий солёности в это время не наблюдалось, вероятно, потому, что до 120 м она очень слабо изменялась по глубине (не более чем на 0,02 епс).

Апвеллинг у побережья южного Приморья регулярно наблюдается в период зимнего муссона под воздействием сильных и продолжительных северо-западных ветров (Жабин, Дмитриева, 2014). 2–3 октября впервые в 2015 г. отмечено интенсивное холодное вторжение в тылу циклона, сопровождающееся сильным западным и северо-западным ветром, что и привело к развитию апвеллинга.

Заключение

Сопоставление динамических структур, зафиксированных на спутниковых изображениях поверхности СЗ части Японского моря и данных профилографа «Аквалог», функционировавшего над континентальным склоном у побережья южного Приморья в апреле – октябре 2015 г. в слое вод ниже 60 м, позволило выявить природу зарегистрированных термохалинных аномалий подповерхностных вод. Выделены: холодные распреснённые воды Приморского течения (апрель); прибрежные распреснённые и тёплые воды, переносимые в сторону открытого моря вдоль тыловой (восточной) периферии антициклонического вихря (начало июня); тёплые воды повышенной солёности, поступающие с юга или востока через систему вихрей и струй (с конца июня до середины сентября); холодные воды, связанные с прибрежным ветровым апвеллингом (начало октября). Термохалинные индексы этих вод систематизированы и приведены в *таблице*.

Термохалинные индексы вод различного происхождения в слое 64–70 м

Водная масса	Температура, °С	Солёность, епс
Воды Приморского течения (апрель)	1,0–2,5	33,67–33,85
Прибрежные воды (июнь)	3,0–4,0	33,67–33,82
Трансформированные субтропические воды (июль – август)	3,5–4,8	34,00–34,06
Трансформированные субтропические воды (сентябрь)	3,5–5,5	34,00–34,06
Воды апвеллинга (начало октября)	2,9–3,3	33,93–33,95

В продолжение работы планируется оценить глубину проникновения термохалинных аномалий, связанных с горизонтальной адвекцией, и проанализировать характер изменчивости в нижней части профилируемой толщи вод. Профилограф «Аквалог», обеспечивающий сканирование с высоким разрешением по глубине и проработавший на континентальном склоне у побережья южного Приморья в течение полугода, даёт уникальную возможность для такого исследования.

Работа выполнена в рамках госзадания по теме Минобрнауки № 0271-2019-0003, а также при частичной поддержке РФФИ (проект № 16-05-00899) и программы приоритетных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» (проект № 18-1-010).

Литература

1. *Жабин И. А., Дмитриева Е. В.* Сезонная и синоптическая изменчивость ветрового апвеллинга у побережья южного Приморья (Японское море) // Вестн. ДВО РАН. 2014. № 5. С. 25–31.
2. *Зуенко Ю. И.* Элементы структуры вод северо-западной части Японского моря // Известия ТИНРО. 1998. Т. 123. С. 262–290.
3. *Ладыченко С. Ю., Лобанов В. Б.* Синоптические вихри в районе залива Петра Великого по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2013. № 4. С. 315.
4. *Лазарюк А. Ю., Каплуненко Д. Д., Островский А. Г., Лобанов В. Б., Трусенкова О. О., Ладыченко С. Ю.* Экспериментальные исследования изменчивости термохалинной структуры вод над континентальным склоном северо-западной части Японского моря // Океанологические исследования. 2017. № 45. С. 33–51.
5. *Лобанов В. Б., Пономарев В. И., Салюк А. Н., Тищенко П. Я., Тэлли Л. Д.* Структура и динамика синоптических вихрей северной части Японского моря // Дальневосточные моря России. Кн. 1: Океанологические исследования. М.: Наука, 2007. С. 450–473.
6. *Лучин В. А., Рыков Н. А., Плотников В. В.* Гидрология вод // Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 8: Японское море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия / ред. Васильев А. С., Терзиев Ф. С., Косарев А. Н. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. С. 157–256.
7. *Никитин А. А., Данченков М. А., Лобанов В. Б., Юрасов Г. И.* Новая схема поверхностной циркуляции Японского моря с учётом синоптических вихрей // Известия ТИНРО. 2009. Т. 157. С. 158–167.
8. *Островский А. Г., Зацепин А. Г., Соловьёв В. А., Цибульский А. Л., Швоев Д. А.* Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // Океанология. 2013. Т. 53. № 2. С. 259–268.
9. *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.
10. *Трусенкова О. О.* Моделирование региональных особенностей циркуляции Японского моря под различным внешним воздействием // Известия ТИНРО. 2012. Т. 169. С. 118–133.
11. *Трусенкова О. О., Лазарюк А. Ю., Островский А. Г., Лобанов В. Б., Каплуненко Д. Д.* Короткопериодная изменчивость вертикальной стратификации вод на континентальном склоне в районе залива Петра Великого (Японское море) // Вестн. ДВО РАН. 2018. № 1. С. 49–59.
12. *Федоров К. Н., Гинзбург А. И.* Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 304 с.
13. *Danchenkov M. A., Lobanov V. B., Riser S. C., Kim K., Takematsu M., Yoon J.-H.* A history of physical oceanographic research in the Japan/East Sea // Oceanography. 2006. V. 19. No. 3. P. 18–31.
14. *Talley L. D., Tischenko P., Luchin V., Nedashkovskiy A., Sagalaev S., Kang D.-J., Warner M., Min D.-H.* Atlas of Japan (East) Sea hydrographic properties in summer, 1999 // Progress in Oceanography. 2004. V. 61. No. 2-4. P. 277–348.

Water exchange off the southern Primorye coast in the Japan Sea from satellite imagery and long-term *in situ* measurements

O. O. Trusenkova¹, A. G. Ostrovskii², A. Yu. Lazaryuk¹,
S. Yu. Ladychenko¹, V. A. Dubina¹, V. B. Lobanov¹

¹ V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia
E-mail: trolia@poi.dvo.ru

² Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia

Infrared/visible imagery from the NOAA, Suomi/NPP, and COMS satellites and data from the moored Aqualog profiler deployed off the Primorye (Russian) coast in the northwestern Japan Sea from mid April through mid October 2015 were analyzed. The nature of thermohaline anomalies in the subsurface waters (64–70 m) was revealed using the satellite data. On April 21–24 a meridional front was detected westward from the Aqualog site, with the offshore excursion of the Primorye Current eastward of this front. Therefore, cold (less than 2 °C), fresh (less than 33.77 psu), and low-density (less than 27.0 kg/m³) water detected by the Aqualog in late April was identified as originating from the Primorye (Liman) Current. By May 10 the front shifted eastward and merged with an anticyclonic eddy earlier moving south-eastward in the Primorye Current zone. There was a wedge-shaped stretch of warm water between the inshore Primorye Current and the front/eddy structure, having been entrained in the eddy interior. From May 16 through May 21 wedge-shaped interleaving belts of warm and cold water were detected, probably, generated by instability of the dynamic structure including the front, eddy, and warm water wedge. Warm (above 4.5 °C) and fresh (33.7 psu) low-density (26.7 kg/m³) water detected in early June was identified as the coastal water advected offshore at the eastern edge of a large anticyclonic eddy. Warm (above 3.5 °C) and saline (34.00 psu and more) water irregularly detected by the Aqualog from late June through mid September was identified as the transformed subtropical water coming from the south or east. The temperature decrease from 4.1 to 3.1 °C in early October after the passage of a cyclonic weather system was related to the coastal upwelling water reaching the Aqualog location.

Keywords: Japan Sea, Primorye (Liman) Current, mesoscale and submesoscale eddies, satellite infrared and visible imagery, moored autonomous profiler

Accepted: 20.02.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-196-206

References

1. Zhabin I. A., Dmitrieva E. V., Sezonnaya i sinopticheskaya izmenchivost' vetrovogo apvellinga u poberezh'ya yuzhnogo Primor'ya (Yaponskoe more) (Seasonal and mesoscale variability of wind upwelling off the southern Primorye coast (the Japan Sea)), *Vestnik DVO RAN*, 2014, No. 5, pp. 25–31.
2. Zuenko Yu. I., Elementy struktury vod severo-zapadnoi chasti Yaponskogo morya (Elements of water structure in the northwestern Japan Sea), *Izvestiya TINRO*, 1998, Vol. 123, pp. 262–290.
3. Ladychenko S. Yu., Lobanov V. B., Mesoscale Eddies in the Area of Peter the Great Bay on Satellite Data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2013, Vol. 49, No. 9, pp. 939–951.
4. Lazaryuk A. Yu., Kaplunenko D. D., Ostrovskii A. G., Lobanov V. B., Trusenkova O. O., Ladychenko S. Yu., Eksperimental'nye issledovaniya izmenchivosti termokhalinnoi struktury vod nad kontinental'nym sklonom severo-zapadnoi chasti Yaponskogo morya (Experimental studies of the thermohaline structure at the continental slope in the northwestern Japan Sea), *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2017, No. 45, pp. 33–51.
5. Lobanov V. B., Ponomarev V. I., Salyuk A. N., Tishchenko P. Ya., Talley L. D., Struktura i dinamika sinopticheskikh vikhrei severnoi chasti Yaponskogo morya (Structure and dynamics of mesoscale eddies in the northwestern Japan Sea), In: *Dal'nevostochnye morya Rossii, kniga 1, Okeanologicheskie issledovaniya* (Far Eastern Seas of Russia, Book 1, Oceanological Research), Moscow: Nauka, 2007, pp. 450–473.
6. Luchin V. A., Rykov N. A., Plotnikov V. V., Gidrologiya vod (Hydrophysics), In: *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei, T. 8: Yaponskoe more, Vyp. 1: Gidrometeorologicheskie usloviya* (Hydrometeorology and

- Hydrochemistry of the Seas, Vol. 8: Japan Sea, Issue 1: Hydrometeorological Conditions), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003, pp. 157–256.
7. Nikitin A. A., Danchenkov M. A., Lobanov V. B., Yurasov G. I., Novaya skhema poverkhnostnoi tsirkulyatsii Yaponskogo morya s uchetom sinopticheskikh vikhrei (New scheme of the surface circulation of the Japan Sea, considering mesoscale eddies), *Izvestiya TINRO*, 2009, Vol. 157, pp. 158–167.
 8. Ostrovskii A. G., Zatsepin A. G., Soloviev V. A., Tsibulsky A. L., Shvoev D. A., Autonomous system for vertical profiling of the marine environment at a moored station, *Oceanology*, 2013, Vol. 53, No. 2, pp. 233–242.
 9. Ponomarev V. I., Faiman P. A., Dubina V. A., Ladychenko S. Yu., Lobanov V. B., Sinopticheskaya vikhrevaya dinamika nad severo-zapadnym materikovym sklonom i shel'fom Yaponskogo morya (modelirovanie i rezul'taty distantsionnykh nablyudenii) (Mesoscale eddy dynamics at the northwest Japan Sea continental slope and shelf (simulation and remote sensing results)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 100–104.
 10. Trusenkova O. O., Modelirovanie regional'nykh osobennostei tsirkulyatsii Yaponskogo morya pod razlichnym vneshnim vozdeistviem (Regional circulation features in the Japan Sea simulated under the different kinds of external forcing), *Izvestiya TINRO*, 2012, Vol. 169, pp. 118–133.
 11. Trusenkova O. O., Lazaryuk A. Yu., Ostrovskii A. G., Lobanov V. B., Kaplunenkov D. D., Korotkoperiodnaya izmenchivost' vertikal'noi stratifikatsii vod na kontinental'nom sklone v raione zaliva Petra Velikogo (Yaponskoe more) (Short-term variability of the density stratification at the continental slope off Peter the Great Bay, the Japan Sea), *Vestnik DVO RAN*, 2018, No. 1, pp. 49–59.
 12. Fyodorov K. N., Ginzburg A. I., *Pripoverkhnostnyi sloi okeana* (Surface oceanic layer), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, 304 p.
 13. Danchenkov M. A., Lobanov V. B., Riser S. C., Kim K., Takematsu M., Yoon J.-H., A history of physical oceanographic research in the Japan/East Sea, *Oceanography*, 2006, Vol. 19, No. 3, pp. 18–31.
 14. Talley L. D., Tischenko P., Luchin V., Nedashkovskiy A., Sagalae S., Kang D.-J., Warner M., Min D.-H., Atlas of Japan (East) Sea hydrographic properties in summer, 1999, *Progress in Oceanography*, 2004, Vol. 61, No. 2-4, pp. 277–348.