

ХАРАКТЕР ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕРМОХАЛИННОЙ СТРУКТУРЫ ВОД НАД КОНТИНЕНТАЛЬНЫМ СКЛОНОМ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ У ПОБЕРЕЖЬЯ ПРИМОРЬЯ

Трусенкова О.О.¹, Островский А.Г.², Лазарюк А.Ю.¹, Лобанов В.Б.¹

¹*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 690041, Приморский край, г. Владивосток, Балтийская, 43, e-mail: trolia@poi.dvo.ru*

²*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: osasha@ocean.ru*

Статья поступила в редакцию 12.03.2019, одобрена к печати 26.08.2019

Работа основана на уникальных данных автономного сканирующего профилографа «Аквалог», установленного в Японском море на континентальном склоне у юго-восточного побережья Приморья в период с 18 апреля по 14 октября 2015 г. Используются: 1) массив данных на глубинах 64–300 м с дискретностью 1 м и 6 час и 2) временные ряды, осредненные в слое 320–420 м с дискретностью 6 сут. Выявлен различный характер изменчивости в верхнем и нижнем слоях профилируемой толщи вод. Выше 100–150 м кратковременные (2–4 сут) аномалии температуры и солёности имеют, в основном, одинаковые знаки. Выполненный ранее анализ спутниковой информации указывает на то, что они связаны с интрузиями вод различного происхождения. В нижнем слое эти аномалии, в основном, противоположны по знаку и живут дольше (до 10–15 сут), что можно объяснить смещениями изопикнических слоев по вертикали, вероятно, за счет прохождения динамических структур мезо- и синоптического масштабов. На основе вейвлет-преобразования установлено, что в течение всего периода наблюдений наиболее интенсивными были колебания температуры воды с периодами 80–110 сут, происходившие во всей толще профилируемых вод. Синфазно с колебаниями температуры происходили колебания пикноклина (смещения изопикнических поверхностей по вертикали) с периодами 80–110 сут. С середины августа изменчивость температуры в верхнем слое усилилась, а в нижнем ослабла.

Ключевые слова: Японское море, континентальный склон, профилирующий аппарат, температура, солёность

1. Введение

Прибрежная зона северо-западной части Японского моря (рис. 1) – динамически активный район с развитым западным пограничным Приморским течением, которое переносит воду на юго-запад, замыкая циклонический круговорот, действующий в масштабах всей северной части Японского моря. В системе Приморского течения формируются синоптические и мезомасштабные вихри, над континентальным склоном проходят длинные волны, сюда переносятся трансформированные субтропические воды с юга и востока. Значительная часть сведений о процессах синоптического и мезо- масштабов в этом районе основана на спутниковой инфор-

мации, которая охватывает, в основном, приповерхностный слой моря (Гинзбург и др., 1998; Никитин и др., 2002; Danchenkov et al., 2006; Пономарев и др., 2011; Никитин, Дьяков, 2016).

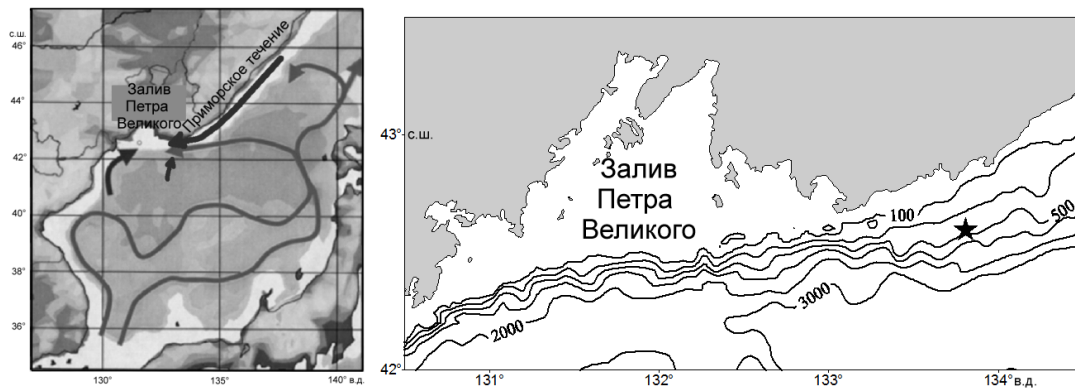


Рис. 1. Схема течений Японского моря. Стрелками показаны пути адвекции теплых вод к побережью Приморского края и Приморское течение (слева); глубина моря (м) в районе исследования, звездочкой показано положение «Аквалога» (справа).

Адекватным средством для исследования процессов в толще вод являются сканирующие автономные устройства, в течение достаточно длительного времени выполняющие измерения вертикальных профилей с достаточной дискретностью по глубине и с достаточно малым временным шагом. Такие измерения проводились у юго-восточного побережья Приморья с помощью профилографа «Аквалог» (Островский и др., 2013), установленного на заякоренной станции и функционировавшего в апреле–октябре 2015 г. По этим уникальным данным длительностью около полугода уже были выявлены вертикальные колебания в поле плотности с периодами 2–3.5 и 8–13 сут и весьма изменчивой амплитудой, соответствующие временам прохождения в районе станции динамических структур мезо- и синоптического масштабов (Трусенкова и др., 2018а). В этом районе наблюдается субарктическая структура вод или, по определению В.А. Лучина (Лучин и др., 2003), северная япономорская структура, характеризующаяся тонким пикноклином и малым бароклинным радиусом деформации Россби, составляющим только 7–10 км даже в теплый период года (Трусенкова и др., 2018а), что объясняет небольшие времена жизни вихрей. Были также зарегистрированы более регулярное колебание с периодом 18–22 сут, возможно, связанное с прохождением длинных волн, и, в апреле–мае, колебание неизвестной природы с периодом около месяца (Трусенкова и др., 2018а).

Дальнейший анализ показал, что колебания пикноклина согласованы в нижней части профилируемых вод (для изопикнических поверхностей 27.15–27.25 кг/м³). Также были зарегистрированы аномалии температуры воды на верхних изопикнических поверхностях (27.05–27.15 кг/м³), что свидетельствует об интрузиях инородных вод (Трусенкова и др., 2018б). Совместный анализ изменчивости термохалинных характеристик в верхнем слое профилирования (64–70 м) и спутниковой информации подтвердил, что аномалии в этом слое действительно связаны с

интрузиями вод различного происхождения (Трусенкова и др., 2019). Вместе с тем, очевидно, что изменчивость в верхнем и нижнем слоях профилируемых вод носит различный характер.

Данная работа является продолжением этих исследований, а ее цель – анализ термохалинных аномалий во всей толще профилируемых вод, оценка глубины проникновения аномалий подповерхностного слоя, выявление взаимосвязей между верхним и нижним профилируемыми слоями и оценка временных масштабов изменчивости.

2. Данные и методы

Заякоренная станция, оборудованная профилографом «Аквалог» (Островский и др., 2013), была установлена на континентальном склоне у юго-восточного побережья Приморья. Координаты места установки – 42.5° с.ш., 133.8° в.д., глубина – 440 м (рис. 1). В процессе измерений, выполнявшихся с 18 апреля по 14 октября 2015 г., профилограф перемещался вверх–вниз вдоль буйрепа станции между горизонтами 64–300 м, а каждые 6-е сут еще и между горизонтами 300–420 м. Зондирования проводились в сроки 0, 6, 12 и 18 час. Измерения температуры, электропроводности и давления выполнялись при подъеме и опускании зонда с помощью датчика SBE 52-MP Moored Profiler CTD с дискретностью примерно 0.2 м по вертикали. Конфигурация измерительной платформы и первичная обработка данных подробно обсуждается в работах (Островский и др., 2013; Лазарюк и др., 2017). С помощью специально разработанных методов коррекции ошибки измерения удалось привести к 0.002°C по температуре и к 0.003 епс по солености (Лазарюк и др., 2017). В итоге рассматриваемые термохалинные аномалии (от 0.1°C и 0.005 епс) значительно превышают ошибки измерения.

Все данные измерений в слое 64–300 м осреднялись по слоям 1 м, в единичных случаях отсутствия данных в слое 270–300 м производилась интерполяция во времени. По значениям температуры и солености были рассчитаны аномалии плотности; для краткости эти параметры на определенных глубинах, например, 64 м, будут обозначаться как T64, S64, σ 64. По этому массиву рассчитывались средние, среднеквадратические отклонения (СКО) и коэффициенты вариации (отношение СКО к средней величине) по времени. Дополнительно для анализа временной изменчивости были построены временные ряды с осреднением по вертикали в 10-метровых слоях (65–75, 75–85, ..., 285–295 м). Для краткости они будут обозначаться как «T70, S70, σ 70» и т.п. В слое 300–420 м проводилось осреднение данных зондирований, выполненных в течение одних суток, чтобы не допустить «просачивания» высокочастотной изменчивости (Emery, Thomson, 2014). Поскольку в этом слое изменчивость по глубине незначительна, данные были дополнительно осреднены по глубине; они будут обозначаться как «T360, S360, σ 360». Для выявления взаимосвязей термохалинных аномалий с вертикальными смещениями пикноклина привлекалась рассчитанная по данным «Аквалога» глубина залегания изопикни-

ческой поверхности 27.15 кг/м^3 , которая является адекватным индикатором этих смещений (Трусенкова и др., 2018а) и для краткости далее обозначается как D27.15.

Для временных рядов оценивалось число степеней свободы на основе автокорреляционных функций (Emery, Thomson, 2014), которое оказалось равным 17–20 для разных видов данных, то есть по критерию Фишера коэффициенты корреляции являются значимыми на 95%-м уровне статистической значимости, если они превышают 0.46–0.42.

Для выявления временных масштабов изменчивости использовалось вейвлет-преобразование с материнским вейвлетом «производная гауссиана» 9-го порядка. Предыдущая попытка использования комплексного вейвлета Морле 6-го порядка, дающего хорошее разрешение по шкале периодов, оказалась неудачной из-за высокоамплитудных колебаний (с периодом около месяца) в пикноклине в апреле–мае. Статистически значимая мощность концентрировалась вокруг этих колебаний, а в остальном спектр оказался неинформативным. Поэтому для оценки временных масштабов изменчивости применялось преобразование Хуанга–Гильберта (Трусенкова и др., 2018а), что, однако, не позволило оценить статистическую значимость полученных результатов. Вещественные вейвлеты, такие как «производная гауссиана», дают хорошее разрешение по временной шкале, а высокий (9-й) порядок вейвлета обеспечивает неплохое разрешение и по шкале периодов, что позволило получить информативные спектры с оценками статистической значимости по отношению к теоретическим спектрам красного шума. Расчеты выполнялись с помощью модифицированной процедуры Торренса и Компо (Torrence, Compo, 1998).

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Общая характеристика термохалинной изменчивости

Поскольку слой профилирования (вниз от 64 м) находится ниже сезонного пикноклина субарктической (северной япономорской) структуры вод, свойственной этому району (Лучин и др., 2003; Talley et al., 2004), изменения температуры и солености сравнительно невелики, однако значимо превышают ошибки (см. раздел 2). В среднем, термохалинные характеристики меняются с глубиной монотонно от $T_{64} = 3.3^\circ\text{C}$, $S_{64} = 33.94 \text{ епс}$, $\sigma_{64} = 27.00 \text{ кг/м}^3$ до $T_{300} = 1.1^\circ\text{C}$, $S_{300} = 34.04 \text{ епс}$, $\sigma_{300} = 27.26 \text{ кг/м}^3$ (рис. 2). В слое 300–420 м изменения с глубиной незначительны, а в среднем по слою $T_{360} = 0.9^\circ\text{C}$, $S_{360} = 34.05 \text{ епс}$ и $\sigma = 27.29 \text{ кг/м}^3$.

Для температуры и солености СКО уменьшается с глубиной, опускаясь почти до нуля к глубине 300 м, однако коэффициент вариации температуры изменяется с глубиной немонотонно, уменьшаясь от 23% на верхнем горизонте профилирования (64 м) до 12% на глубине 120–130 м, возрастая до 16.5% к 230 м и снова уменьшаясь до 13% к 300 м, что указывает на разный характер изменчивости в разных слоях (рис. 2). Как и следовало ожидать, изменчивость была наибольшей в подповерхностных водах (до глубины 80 м), глубже убывала, но снова росла в нижней части промежуточного слоя. Коэффициенты вариации солености и плотности малы (около 0.1%) и неинформативны.

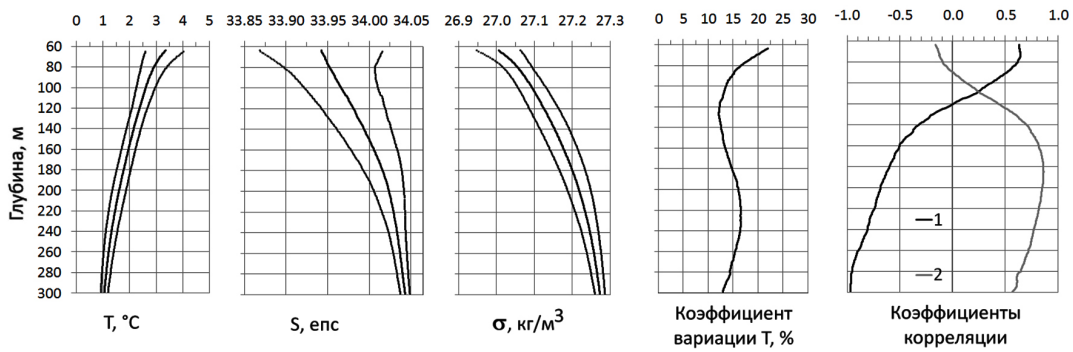


Рис. 2. Средние профили и среднеквадратичный разброс для температуры (°С), солености (епс) и аномалий плотности (кг/м³); коэффициент вариации температуры (%); коэффициенты корреляции температура – соленость (1), температура – D27.15 (2).

Ввиду значительной внутримесячной изменчивости, годовой ход термохалинных характеристик неочевиден на графиках временных рядов (рис. 3), но он более нагляден на диаграммах рассеяния термохалинных индексов, на которых разными цветами обозначены измерения в разные месяцы от апреля до октября (рис. 4). Несмотря на значительный разброс значений в пределах каждого месяца, на глубинах до 80 м заметно постепенное увеличение температуры от апреля к сентябрю на 1–3°С и уменьшение от сентября к октябрю на 1–1.5°С. В среднеголетнем плане температура на поверхности Японского моря достигает сезонного максимума в августе, тепло постепенно проникает в толщу вод, и на глубине 75 м максимум приходится на октябрь–ноябрь (Лучин и др., 2003). По измерениям «Аквалогга», температура воды на глубине 70 м неплохо аппроксимируется полиномом 2-го порядка – перевернутой параболой, вершина которой приходится на 3 сентября; связанная с трендом температура равна в этом максимуме 3.56°С, а в начале и в конце периода наблюдений – 2.03°С и 3.54°С соответственно (аппроксимация

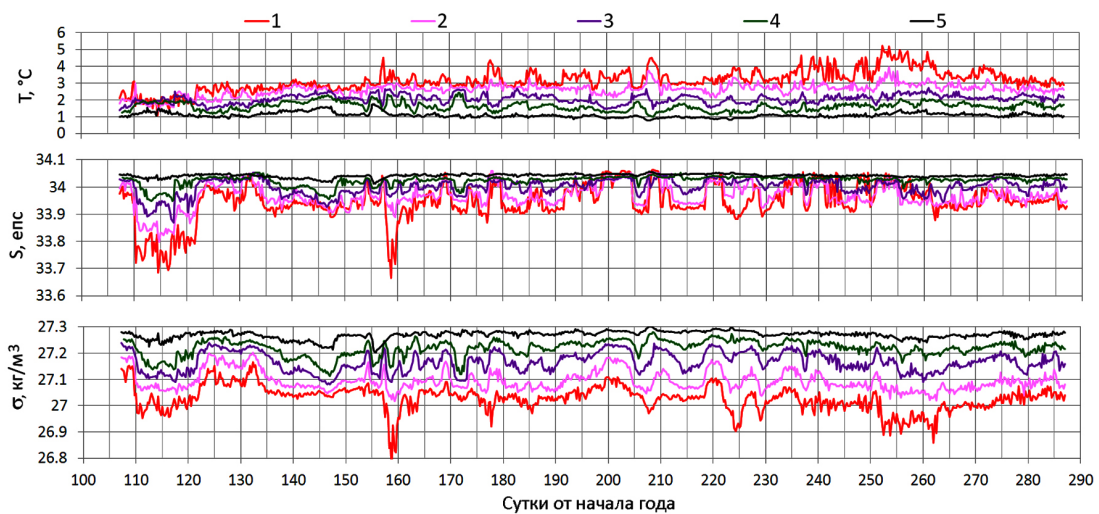


Рис. 3. T70, T100, T150, T200, T290 (°С; сверху), S70, S100, S150, S200, S290 (епс; в середине), σ70, σ100, σ150, σ200, σ290 (кг/м³; внизу) (кривые 1–5 соответственно); здесь и далее 100–290 сут от начала года соответствуют периоду 4 апреля – 17 октября 2015 г.

не показана, чтобы не загромождать рис. 3). Отличия измерений «Аквалога» от среднееголетнего годового хода связаны с влиянием прибрежного апвеллинга, что обсуждается ниже. Глубже 80 м сезонный прогрев не выражен.

В апреле S64–S150 была на 0.1–0.2 епс ниже, чем в нижележащем слое, что для промежуточных вод Японского моря является значительной разницей, а S64–S80 была понижена также в июне (рис. 4). Причины этих аномалий обсуждаются ниже. В слое сезонного прогрева (до 100 м) соленость была максимальна (до 34.05 епс) в июле–августе (182–243 сут от начала года), а также 11–12 мая (131–132 сут от начала года) (рис. 3, 4). Эти изменения связаны не с годовым ходом солености, который на этих глубинах субарктической части моря не прослеживается (Лучин и др., 2003), а с интрузиями инородных вод, что подробнее обсуждается ниже.

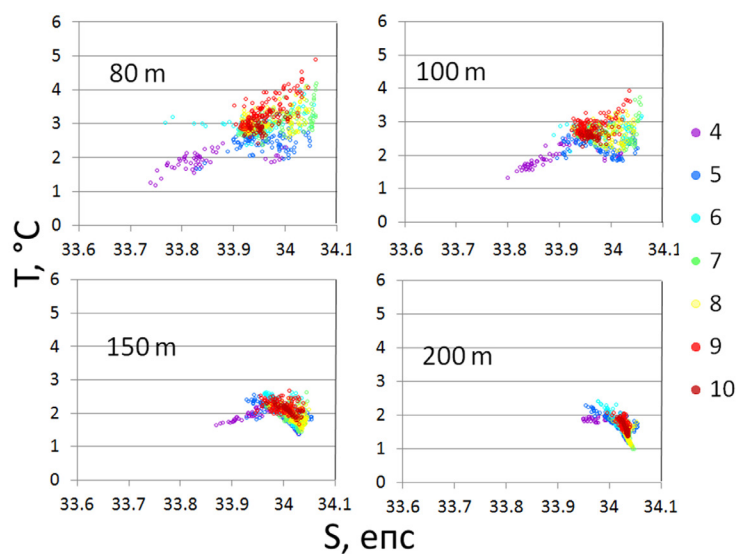


Рис. 4. Диаграммы рассеяния термохалинных индексов (°C, епс) для глубин 80, 100, 150 и 200 м; цифрами 4–10 обозначены месяцы от апреля до октября.

3.2. Изменчивость термохалинной структуры в верхнем слое профилируемых вод

Для анализа согласованности изменений температуры и солености оценивались статистические взаимосвязи между соответствующими временными рядами на каждом горизонте (с дискретностью 1 м) до глубины 300 м, так как ниже измерения проводились лишь каждые 6-е сутки. Коэффициент корреляции уменьшается от 0.64 на глубине 64 м до 0.46 (уровень 95%-й статистической значимости; см. раздел 2) на 90 м и до нуля на глубине 120 м (рис. 2). Таким образом, в поверхностном слое термохалинные аномалии развиваются чаще всего одновременно и имеют один знак (см. характерный пример на рис. 5). Совместный анализ данных «Аквалога» и спутниковых изображений района (в инфракрасном и видимом диапазонах электромагнитного спектра) позволил связать термохалинные аномалии в самом верхнем слое профилирования (64–70 м) с интрузиями вод различного про-

исхождения (Трусенкова и др., 2019). Ниже делается оценка глубины проникновения этих аномалий.

Значительные отрицательные аномалии температуры и солёности, зарегистрированные 21 апреля–1 мая (111–121 сутки от начала года), были соотнесены с поступлением в район станции вод Приморского течения, что хорошо видно на спутниковых изображениях от 21 и 24 апреля (Трусенкова и др., 2019). В этот период T_{64} – T_{100} не превышала 2°C , то есть была ниже, чем T_{150} – T_{200} (рис. 3, 4). Вертикальная плотностная стратификация была устойчивой за счет роста солёности с глубиной: $S_{70} = 33.7$ – 33.8 епс, $S_{100} = 33.8$ – 33.9 епс, $S_{150} = 33.9$ – 34.0 епс, причем пониженная солёность наблюдалась до глубины 250 м (рис. 3–5). За счет распреснения σ_{64} – σ_{100} была ниже, чем в начале мая (27 – 27.1 $\text{кг}/\text{м}^3$ и менее; рис. 3). Следует

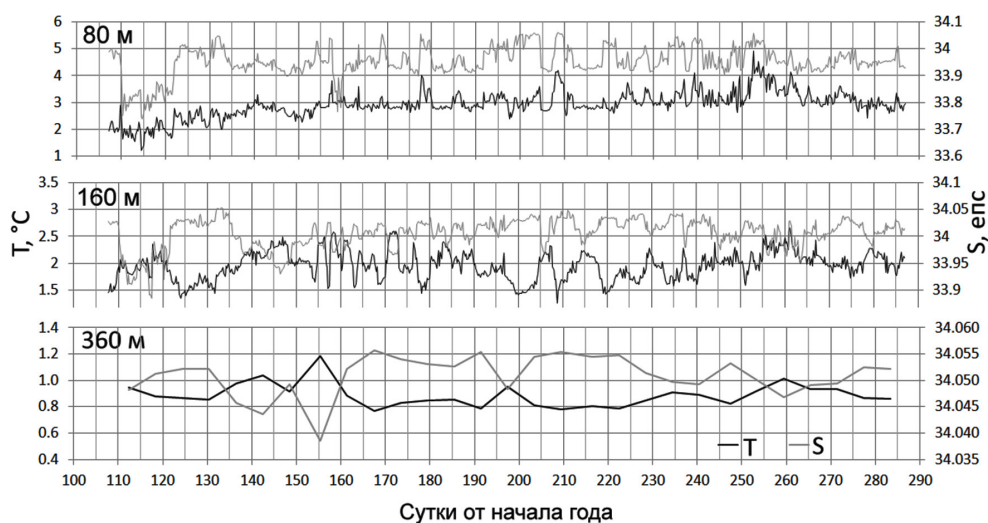


Рис. 5. T_{80} , T_{160} , T_{360} ($^{\circ}\text{C}$) и S_{80} , S_{160} , S_{360} (епс) в апреле–октябре 2015 г.

отметить, что 2 мая (122 сутки от начала года) T_{64} – T_{100} и S_{64} – S_{150} увеличились скачком на 0.7 – 1°C и 0.07 – 0.17 епс соответственно (рис. 3). Сезонные изменения происходят постепенно, а этот скачок связан с отходом вод Приморского течения (Трусенкова и др., 2019).

На регулярно выполняемом ТИНРО-Центром в марте разрезе «Сангарский», от м. Поворотный (42.7°с.ш. , 133.0°в.д.) к Сангарскому проливу у восточной границы моря был зарегистрирован фронт Приморского течения, который поднимается от глубины 120–150 м на ближайшей к берегу станции к поверхности на 134°в.д. (Никитин, Дьяков, 2016). Глубина проникновения зарегистрированных «Аквалогом» термохалинных аномалий хорошо соответствует этим данным, несмотря на то, что станции разреза в зоне Приморского течения находятся вблизи м. Поворотный – юго-западнее станции и ближе к берегу.

По спутниковым данным с 30 мая по 8 июня 2015 г. в районе станции «Аквалог» наблюдался крупный антициклонический вихрь, который смещался на юго-запад вдоль побережья Приморья (Лазарюк и др., 2017). В работе (Лазарюк и др., 2017) подробно обсуждалась вертикальная структура этого вихря (по дан-

ным «Аквалога» и судовому разрезу за 30 мая). Было показано наличие характерного прогиба изотерм, изохалин и изопикн в его теплом ядре (на глубине 150–250 м). Внутренняя область вихря прошла в районе «Аквалога» 26–27 мая (146–147 сут от начала года), а 7–8 июня (158–159 сут от начала года) на фоне повышенной $T_{64-T100}$ (3–4°C), соленость и плотность на этих глубинах значительно уменьшились (до 33.67–33.88 епс и 26.80–27.02 кг/м³ соответственно). На глубинах 64–70 м это были минимальные значения за весь период измерений, на глубине 100 м – за период с мая по октябрь (рис. 3, 5, 6). Эту редкую ситуацию с термохалинными аномалиями противоположных знаков (в подповерхностном слое) можно объяснить выносом в сторону открытого моря по тыловой (восточной) периферии вихря теплых и распресненных прибрежных вод (Трусенкова и др., 2019).

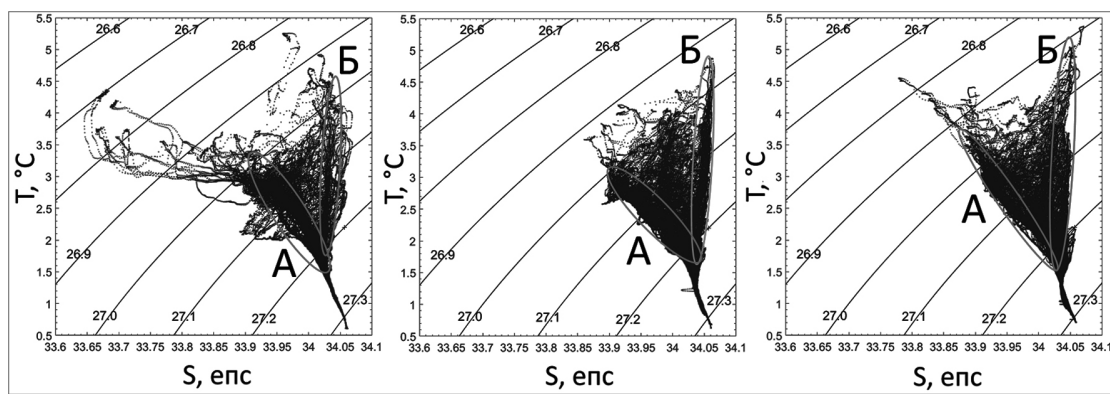


Рис. 6. T,S -кривые (°C, епс) для июня, июля и августа 2015 г. Кластеры А и Б соответствуют субарктическим и трансформированным субтропическим водам.

С середины июня по середину сентября в слое от 64 м до 100 м, иногда и до 150 м, наблюдались значительные термохалинные аномалии. Как правило, происходило резкое увеличение солености на 0.05–0.15 епс до 34.00 епс и выше, аномалии сохранялись в течение 2–3, иногда до 4 сут, а затем соленость резко уменьшалась. В эти периоды $S_{64-S100}$ была выше, чем $S_{200-S290}$ (рис. 3). Наибольшая за весь период наблюдений соленость была в июле на глубинах 64–100 м, где она превышала 34.05 епс (рис. 4). Одновременно с увеличением $S_{64-S100}$ происходило увеличение $T_{64-T140}$ на 0.5–2°C, за счет чего поддерживалась плотностная стратификация, причем плотность почти не изменялась, ввиду разнонаправленного вклада положительных аномалий температуры и солености.

В эти периоды вертикальные профили солености были немонотонны по глубине, в отличие от средних за весь период наблюдений (рис. 2), с локальными (или даже глобальными) максимумами в верхнем слое профилирования. Это также проявляется в T,S -кривых на рис. 6 (для июня–августа, когда эти аномалии были наиболее многочисленны), причем кластеры А и Б объединяют кривые с низкой и высокой соленостью в верхнем слое профилирования соответственно. Подповерхностный максимум солености свойственен субтропической (тихоокеанской) структуре вод Японского моря (Лучин и др., 2003). Известно, что воды из субтропической части моря поступают к побережью Приморья с синоптическими вихрями и

струями течений как с юга и юго-запада, так и с востока, из зоны Цусимского течения у Японских островов (Никитин и др., 2002; Danchenkov et al., 2006; Никитин, Дьяков, 2016), что иллюстрируется схемой, приведенной на рис. 1. Проникновение субтропических вод с вихревыми образованиями через субарктический фронт с юга на север было также выявлено по данным спутниковой альтиметрии с помощью лагранжевых методов анализа (Prants et al., 2018).

К сожалению, вследствие значительного облачного покрова, информативных спутниковых изображений в июле–сентябре 2015 г. оказалось немного. Тем не менее, подход теплых вод с юга был зарегистрирован на снимке за 27 июля, подход вод с востока – на снимках за 4, 6 и 7 сентября (Трусенкова и др., 2019). По данным «Аквалога», 27–28 июля (208–209 сут от начала года) были зарегистрированы значительные аномалии на глубинах 64–100 м: $T_{70} > 4^{\circ}\text{C}$, $S_{70} > 34$ епс, $T_{100} > 3^{\circ}\text{C}$, $S_{100} > 34$ епс (рис. 3). Слой теплых вод с повышенной соленостью был тоньше 4–6 сентября (247–249 сутки от начала года), аномалии наблюдались только на глубинах 64–70 м: $T_{70} > 4^{\circ}\text{C}$, $S_{70} > 34$ епс.

T,S -кривые, подобные приведенным на рис. 6, зарегистрированы на разрезе «Сангарский» (Никитин, Дьяков, 2016). В течение ряда лет разрез выполнялся в конце холодного периода года (в марте), то есть при отсутствии сезонного пикноклина, поэтому на станциях, отнесенных авторами к тихоокеанским (субтропическим) водам и водам смешения (трансформированным субтропическим водам), соленость была максимальна в верхнем слое (до 70–100 м). По измерениям «Аквалога», соленость в подповерхностном максимуме была на 0.1–0.2 епс ниже, чем на разрезах ТИНРО-Центра, но профилограф был установлен на континентальном склоне, а судовые станции, где регистрировались эти воды, были выполнены в районе открытого моря на 135° в.д. и восточнее (Никитин, Дьяков, 2016). По данным «Аквалога» T,S -кривые субарктических и трансформированных субтропических вод образуют кластеры А и Б соответственно (рис. 6).

По спутниковым данным 4–13 октября в районе станции «Аквалог» была обнаружена холодная вода с высоким содержанием хлорофилла-а, что можно связать с прибрежным апвеллингом, развившимся под воздействием сильного ветра с западной (сгонной) составляющей при прохождении над территорией Приморского края и Японским морем внетропического циклона (Трусенкова и др., 2019). По данным «Аквалога», с 29 сентября по 3 октября (272–276 сут от начала года) наблюдалось постепенное уменьшение $T_{64}–T_{90}$ на $0.5–1^{\circ}\text{C}$, которое можно связать с апвеллингом. На глубине 100 м подобных изменений уже не наблюдалось (рис. 3). Произошло уменьшение $S_{64}–S_{100}$ на 0.02–0.03 епс, что можно объяснить поступлением прибрежных вод в район станции (рис. 3). Именно развитием апвеллинга можно объяснить похолодание в верхнем слое профилирования от сентября к октябрю (рис. 4), хотя в среднемноголетнем плане в этом районе на глубинах 75–100 м сезонное потепление продолжается до октября–ноября (Лучин и др., 2003). Следует отметить, что это единственное проявление апвеллинга в данных «Аквалога», поскольку в теплый период 2015 г. сильный ветер в районе станции был с восточной (нагонной) составляющей (Трусенкова и др., 2018а).

Таким образом, аномалии температуры и солености воды преимущественно одинаковых знаков развивались на глубинах от 64 м до 100–150 м. Как показал анализ спутниковой информации (Трусенкова и др., 2019), эти аномалии можно связать с интрузиями вод различного происхождения, то есть с горизонтальной адвекцией.

3.3. Изменчивость термохалинной структуры в нижнем слое профилируемых вод

Коэффициент корреляции между временными рядами температуры и солености меняет знак с плюса на минус на глубине 120 м и становится статистически значимым на глубине 155 м, достигая -0.8 на глубине 200 м, -0.93 на глубине 270 м и почти не изменяясь до глубины 300 м (рис. 2). Столь тесная статистическая взаимосвязь в нижнем слое, по-видимому, объясняется слабой изменчивостью ниже 250 м. Таким образом, в слое между 120–150 и 300 м знаки аномалий температуры и солености противоположны. Эти аномалии также противоположны по знаку в слое ниже 300 м (рис. 5), а коэффициент корреляции равен -0.98 .

По данным «Аквалога» были зарегистрированы весьма интенсивные вертикальные колебания пикноклина, согласованные во всей профилируемой толще вод, которые можно связать с прохождением синоптических и мезомасштабных динамических структур (Трусенкова и др., 2018а, б) и проиллюстрировать изменениями D27.15 (рис. 7). С этими колебаниями согласованы изменения температуры и солености в нижнем слое профилируемых вод. Коэффициент корреляции между D27.15 и температурой становится статистически значимым на глубине 125 м, где он отрицателен, и достигает -0.85 в слое 170–200 м, где наблюдается наиболее тесная статистическая взаимосвязь (рис. 2). В этом районе Японского моря у более легких вод температура выше, а соленость ниже, чем у более тяжелых (рис. 2, 3). Поэтому противоположные знаки аномалий на горизонтах нижнего слоя профилируе-



Рис. 7. T180 (°C, левая ось y) и D27.15 (м; правая ось y) в апреле–октябре 2015 г.

мых вод можно объяснить вертикальными смещениями в толще вод: температура уменьшается, соленость увеличивается при поднятии изопикнических слоев, а при опускании происходят обратные изменения. Термохалинные аномалии составляют $0.5\text{--}1^\circ\text{C}$ и $0.02\text{--}0.05$ епс на глубинах 160–300 м, они могут существовать до 10–15 сут, а ниже 300 м аномалии составляют $0.1\text{--}0.2^\circ\text{C}$ и $0.02\text{--}0.005$ епс (рис. 5, 7).

Так, например, вторжение Приморского течения в район станции сопровождалось значительным прогибом изопикнических поверхностей (21 апреля–

1 мая) вследствие низкой плотности холодных вод течения (за счет низкой солёности), причем выше 100 м развивались отрицательные аномалии температуры, а от 100 до 300 м – положительные (рис. 3, 5, 7). Также 4 июня (155 сут от начала года) наблюдался мощный краткосрочный (около 2 сут) прогиб изопикнических поверхностей, причем $D27.15 = 380$ м, что на 100 м больше среднего (Трусенкова и др., 2018б). В этот же период наблюдались наиболее значительные аномалии T360 и S360, согласованные по знаку с аномалиями в слое 150–300 м и равные 0.2°C и 0.05 епс (рис. 5).

3.4. Характерные временные масштабы изменчивости

Как обсуждалось выше, в верхнем слое профилируемых вод (64–90 м) развиваются согласованные термохалинные аномалии продолжительностью 2–3 сут, иногда до 4 сут, связанные с интрузиями инородных вод. Однако вейвлет-спектр T70 довольно беден: колебания с периодами 5–7 сут присутствуют только в июле, колебания с периодами 15–25 сут – с мая до середины июня и в августе–сентябре, далеко не всегда достигая 95%-го уровня статистической значимости (рис. 8). При визуальном анализе наиболее заметны высокочастотные колебания (с периодами меньше 2 мес.), а низкочастотные колебания (с периодами больше 2 мес.) на их фоне теряются (рис. 3). Однако наиболее долгопериодные колебания (с периодами больше 2 мес.) оказываются весьма интенсивными, что ясно проявляется в вей-

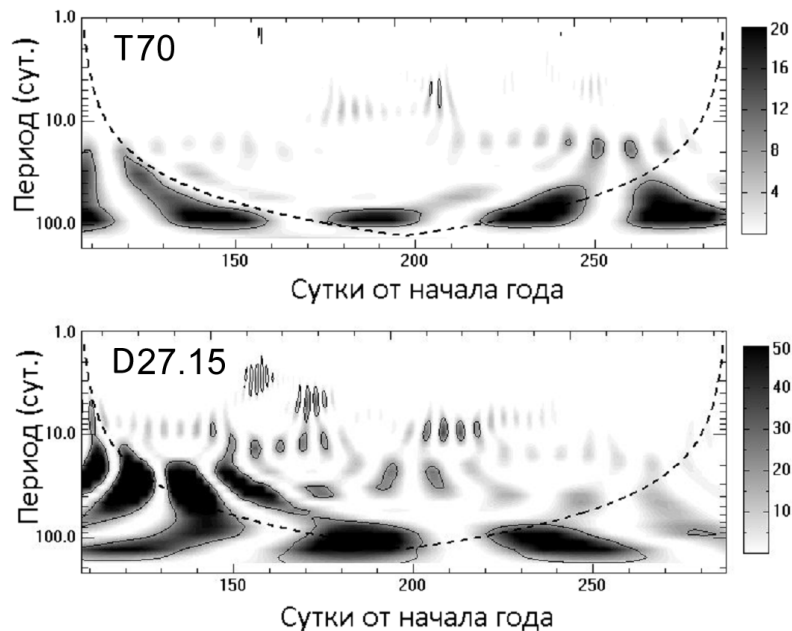


Рис. 8. Вейвлет-спектры T70 (вверху) и нормализованной аномалии D27.15 (внизу); показан конус влияния (пунктиром) и 95%-й уровень значимости по отношению к красному шуму.

лет-спектре (рис. 8). В начале и конце периода наблюдений колебания с периодами 60–110 сут попадают в так называемый конус влияния – зону возможного влияния краевых эффектов, но они находятся вне этого конуса с конца мая до начала сен-

тября. С середины августа спектр становится богаче, долгопериодные колебания интенсифицируются, колебания с периодами 18–20 сут статистически значимы в первой половине сентября. (Вейвлет-спектры солености подобны температурным, но менее информативны, поэтому здесь не обсуждаются.)

Выявлена тесная статистическая взаимосвязь T150 с D27.15, что проявляется в их взаимном вейвлет-спектре (T150 является репрезентативной для нижнего слоя; во избежание слишком больших значений мощности используются аномалии D27.15). Этот ко-спектр стационарен и поэтому хорошо характеризуется средним по времени (рис. 9, слева). Мощность среднего ко-спектра превышает уровень красного шума почти во всем диапазоне периодов (от 5 сут), а фазовый сдвиг равен нулю. Когерентность превышает 0.7 почти во всем диапазоне периодов (за исключением периодов 20–30 сут, когда она опускается до 0.65), 0.8 для периодов больше 55 сут и 0.9 для периодов больше 65 сут (рис. 9, слева). Таким образом, эти колебания являются синфазными, особенно для периодов больше двух месяцев, то есть при углублении пикноклина температура в нижнем слое профилируемых вод повышается, как этого и следовало ожидать.

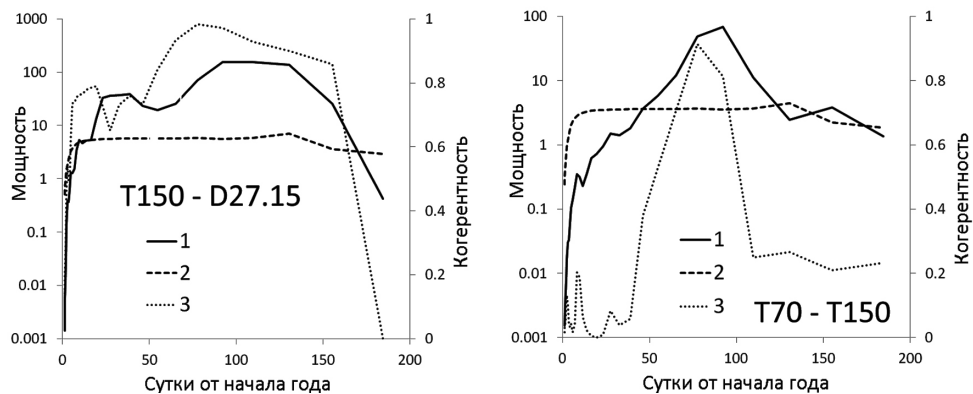


Рис. 9. Средний взаимный вейвлет-спектр (1), 95%-й уровень статистической значимости по отношению к красному шуму (2) и средняя когерентность (3) для T150 и нормализованных аномалий D27.15 (слева), а также для T70 и T150 (справа); кривые 1 и 2 отнесены к левой оси ординат, кривые 3 – к правой.

В области периодов меньше двух месяцев спектр D27.15 оказывается более информативным, чем температурный, что побуждает анализировать именно его (рис. 8, внизу). Применение вейвлет-преобразования позволило выявить периоды и события, когда колебания, ранее зарегистрированные с помощью преобразования Хуанга-Гильберта (Трусенкова и др., 2018а), были статистически значимыми. Наиболее короткопериодные колебания (2–4 и 3–6 сут) статистически значимы в июне, после прохождения в районе станции крупного антициклонического вихря (с северо-востока на юго-запад), они связаны с мезомасштабными динамическими структурами на его тыловой периферии. Более долгопериодные колебания (8–14 сут) присутствуют в спектре до конца августа, но достигают статистической значимости лишь с конца мая до конца июня и во второй половине июля. Колебания

с периодами 20–30 сут были чрезвычайно интенсивны в апреле–мае, как это уже отмечалось ранее (Трусенкова и др., 2018а), но, хотя и ослабились в июне, оставались статистически значимыми до конца июля. Во второй половине лета (с середины августа) изменчивость в нижнем слое ослабляется (мощность спектра уменьшается), а в верхнем слое, наоборот, усиливается (рис. 8).

С помощью вейвлет-преобразования оказалось возможным выявить колебания пикноклина (глубины изопикнических поверхностей на примере D27.15) с периодами 80–110 сут. С конца мая до середины июня (145–165 сутки от начала года) происходит перенос энергии вверх по масштабам от колебаний с периодами 20–30 сут к колебаниям с периодами 80–110 сут, что возможно при наличии нелинейности. Амплитуда колебаний D27.15 на периодах 20–30 сут составляет 80 м в апреле–мае и около 20 м с начала июня до середины августа, то есть сравнима с СКО, равным 31.3 м (Трусенкова и др., 2018а), что говорит о наличии нелинейных механизмов, приводящих к ослаблению колебаний с периодами 20–30 сут и усилению колебаний с периодами 80–110 сут. Характерно, что от первой ко второй половине июня периоды самых высокочастотных колебаний увеличиваются от 2–4 до 3–6 сут, хотя прямого свидетельства переноса энергии в этой части спектра не обнаружено. Таким образом, прохождение крупного вихря значительно изменяет динамику и структуру вод в этом районе.

Во взаимном вейвлет-спектре T70 и T150, представляющих изменчивость в верхнем и нижнем слоях профилирования, статистически значимыми являются долгопериодные колебания, как и в спектре для T70. Эти колебания стационарны, поэтому на рис. 9 (справа) представлен средний ко-спектр. Колебания с периодами 80–90 сут синфазны (фазовый сдвиг равен нулю), а когерентность равна 0.8–0.9. На других периодах когерентность незначительна. Между временными рядами T70 и T150, представленными на рис. 3 и включающими все масштабы изменчивости, статистическая взаимосвязь отсутствует (коэффициенты корреляции близки к нулю); примечательна взаимосвязь долгопериодных колебаний при рассогласовании колебаний на меньших масштабах. Следует отметить также и то, что со второй половины августа изменчивость в верхней части профилируемых вод усиливается, а в нижней ослабляется.

Заключение

На основе измерений автономного сканирующего профилографа «Аквалог», установленного в Японском море на континентальном склоне у юго-восточного побережья Приморья в период с 18 апреля по 14 октября 2015 г., получены следующие основные результаты.

1. Короткопериодная (с периодами менее 2 мес.) изменчивость термохалинных характеристик носит различный характер в верхнем и нижнем слоях профилируемой толщи вод, граница между которыми находится на глубине 100–150 м.

2. В верхнем слое профилирования (от 64 м до 100–150 м) кратковременные аномалии температуры и солености (2–4 сут) имеют, в основном, одинаковые зна-

ки. Выполненный ранее анализ спутниковой информации (Трусенкова и др., 2019) указывает на то, что они связаны с интрузиями вод различного происхождения, то есть с горизонтальной адвекцией. Это воды Приморского течения в последнюю декаду апреля, переносимые в сторону открытого моря прибрежные воды в начале июня, трансформированные субтропические воды с середины июня до середины сентября, холодные воды, связанные с прибрежным апвеллингом в конце сентября–начале октября.

3. В нижнем слое профилирования (от 100–150 м до 420 м) аномалии температуры и солености, в основном, противоположны по знаку и живут дольше (до 10–15 сут), что можно объяснить колебаниями пикноклина (смещениями изопикнических слоев по вертикали), вероятно, за счет прохождения динамических структур синоптического и мезо- масштабов.

4. В пикноклине происходили вертикальные колебания с периодами 20–30 сут, которые были чрезвычайно интенсивны от начала наблюдений до конца мая и оставались статистически значимыми до конца июля. Наиболее высокочастотные колебания (с периодами менее 10 сут) были зарегистрированы в июне, после прохождения в районе станции крупного антициклонического вихря, причем от начала к концу июня период этих колебаний увеличился от 2–4 до 3–6 сут. В июне также происходил перенос энергии вверх по масштабам от периодов 20–30 сут к 80–130 сут, что говорит о значительном влиянии этого вихря на структуру и динамику вод.

5. В течение всего периода наблюдений наиболее долгопериодные (80–110 сут) колебания температуры были весьма интенсивны и синфазны с колебаниями пикноклина (смещениями изопикнических поверхностей по вертикали). Для выявления их природы требуется получить и проанализировать данные наблюдений за более длительное время.

6. С середины августа изменчивость температуры в верхнем слое профилирования усилилась, а в нижнем слое ослабилась.

Работа выполнена в рамках госзадания по теме Минобрнауки № 0271-2019-0003 и при частичной поддержке поддержке РФФИ (проект № 16-05-00899) и программы приоритетных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» (проект № 18-1-010). Результаты работы были представлены на Международном симпозиуме «МСП-2018», посвященном 90-летию К.Н. Федорова.

Литература

- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Островский А.Г. Поверхностная циркуляция Японского моря (спутниковая информация и данные дрейфующих буев) // Исследование Земли из космоса. 1998. № 1. С. 66–83.
- 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. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2017.45(1).5.
- 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: Гидрометеиздат, 2003. С. 157–256.
- Никитин А.А., Дьяков Б.С.* Океанологические исследования северо-западной части Японского моря по спутниковой информации и по данным стандартного океанографического разреза в зимние сезоны 2000–2015 гг. // Труды ВНИРО. 2016. Т. 164. С. 86–99.
- Никитин А.А., Лобанов В.Б., Данченков М.А.* Возможные пути переноса теплых субтропических вод в район Дальневосточного морского заповедника // Изв. ТИНРО. 2002. Т. 131. С. 41–53.
- 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.
- 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.
- 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) // Вестник ДВО РАН. 2018а. № 1. С. 49–59.
- Трусенкова О.О., Лазарюк А.Ю., Островский А.Г., Ладыченко С.Ю., Лобанов В.Б.* Короткоживущие неоднородности гидрофизических характеристик в районе к востоку от зал. Петра Великого, Японское море (по данным профилографа «Аквалог») // Океанография залива Петра Великого: сборник научных статей по материалам докладов на региональной конференции, Владивосток, ДВНИГМИ, 15-16 мая 2018 г. / Ред. В.Б. Лобанов, М.А. Данченков. Владивосток: Дальнаука, 2018б. С. 126–134.
- Трусенкова О.О., Островский А.Г., Лазарюк А.Ю., Ладыченко С.Ю., Дубина В.А., Лобанов В.Б.* Водообмен у южного побережья Приморья в Японском море по спутниковым данным и долговременным контактными измерениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 196–206.
- 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 // Oceanogr. 2006. Vol. 19. No. 3. P. 18–31.
- Emery W.J., Thomson R.E.* Data Analysis Methods in Physical Oceanography. UK, USA, The Netherlands: Elsevier, 2014, 716 p.
- Prants S.V., Uleysky M.Yu., Budyansky M.V.* Lagrangian analysis of transport pathways of subtropical water to the Primorye coast // Doklady Earth Sciences. 2018. Vol. 481. No. 2. P. 1099–1103.
- 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 // Progr. Oceanogr. 2004. Vol. 61. No. 2–4. P. 277–348.
- Torrence C., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analysis // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1998. Vol. 79. No. 1. P. 61–78.

**VARIABILITY OF THE THERMOHALINE STRUCTURE AT THE
CONTINENTAL SLOPE OFF THE RUSSIAN COAST,
THE NORTHWESTERN JAPAN SEA**

Trusenkova O.O.¹, Ostrovskii A.G.², Lazaryuk A.A.¹, Lobanov V.B.¹

¹*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 43, Baltiiskaya Street, Vladivostok, Russia, 690041
e-mail: lazaryuk@poi.dvo.ru*

²*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia, e-mail: osasha@ocean.ru
Submitted 12.03.2019, accepted 26.08.2019*

The study is based on unique data from the autonomous Aqualog profiler installed in the northwestern Japan Sea at the continental slope off the southeastern Primorye coast from April 18 through October 14, 2015. Data set for the 64–300 m depths, with the depth step of 1 m and time step of 6 hours, and the time series averaged for the 320–420 m depths, with the time step of 6 days, are used. Variability in the upper and lower profiled layers is found to be of different nature. Above 100–150 m short-lived (2–4 days) temperature and salinity anomalies are mostly of the same sign. Based on our earlier analysis of satellite information it is possible to link these anomalies with water intrusions of different origins. Conversely, these anomalies are usually of the opposite signs and are longer-lived (up to 10–15 days) in the lower layer which can be explained by vertical displacements of isopycnals, probably due to passing mesoscale and submesoscale disturbances. Based on wavelet transform it is found that the longest-period fluctuations (with the periods of 80–110 days) were the most intense in the entire profiled layer throughout the entire record. Isopycnal displacements with the periods of 80–110 days were also found, being in-phase with the temperature fluctuations. The wavelet transform also revealed that variability strengthened in the upper layer and weakened in the lower layer from mid-August onwards.

Keywords: the Japan Sea, the continental slope, moored autonomous profiler, temperature, salinity

References

- Danchenkov M.A., Lobanov V.B., Riser S.C., Kim K., Takematsu M., and Yoon J.-H.* A history of physical oceanographic research in the Japan East Sea. *Oceanography*, 2006, Vol. 19, No. 3, pp. 18–31.
- Emery W.J. and Thomson R.E.* Data Analysis Methods in Physical Oceanography, UK, USA, The Netherlands: Elsevier, 2014, 716 p.
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., and Ostrovskii A.G.* Poverkhnostnaya tsirkulyatsiya Yaponskogo morya (sputnikovaya informatsiya i dannye dreifuyushchikh buev) (Surface circulation of the Japan Sea (satellite information and drifters data)). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1998, No. 1, pp. 66–83.
- Lazaryuk A.Yu., Kaplunenko D.D., Ostrovskii A.G., Lobanov V.B., Trusenkova O.O., and 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, doi:10.29006/1564-2291.JOR-2017.45(1).5.
- Luchin V.A., Rykov N.A., and Plotnikov V.V. *Gidrologiya vod* (Hydrophysics), *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei*, T. 8, Yaponskoe more, Vyp. 1 *Gidrometeorologicheskie usloviya* (Hydrometeorology and Hydrochemistry of the Seas, Is. 1, Hydrometeorological Conditions), Saint-Petersburg: *Gidrometeoizdat*, 2003, pp. 157–256.
- Nikitin A.A., Danchenkov M.A., and Lobanov V.B. *Vozmozhnye puti perenosa teplykh subtropicheskikh vod v raion Dal'nevostochnogo morskogo zapovednika* (Possible pathways of subtropical water transport towards the Far-Eastern Marine Resort). *Izv. TINRO*, 2002, Vol. 131, pp. 41–53.
- Nikitin A.A. and Dyakov B.S. *Okeanologicheskie issledovaniya severo-zapadnoi chasti Yaponskogo morya po sputnikovoi informatsii i po dannym standartnogo okeanograficheskogo razreza v zimnie sezony 2000–2015 gg.* (Oceanographic studies in the northwestern Japan Sea using satellite information and data from the standard transect in winters 2000–2015). *Trudy VNIRO*, 2016, Vol. 164, pp. 86–99.
- Ostrovskii A.G., Zatselin A.G., Soloviev V.A., Tsibulsky A.L., and 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.
- Ponomarev V.I., Faiman P.A., Dubina V.A., Ladychenko S.Yu., and Lobanov V.B. *Sinopticheskaya vikhrevaya dinamika nad severo-zapadnym materikovym sklonom i shel'fom Yaponskogo morya (modelirovanie i rezul'taty distantsionnykh nablyudenii)* (Mesoscale eddy dynamic over northwest Japan Sea continental slope and shelf (Simulation and remote sensing results)). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa (Current Problems in Remote sensing of the Earth from Space)*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 100–104.
- Prants S.V., Uleysky M.Yu., and Budyansky M.V. *Lagrangian analysis of transport pathways of subtropical water to the Primorye coast.* *Doklady Earth Sciences*, 2018, Vol. 481, No. 2, pp. 1099–1103.
- Talley L.D., Tischenko P., Luchin V., Nedashkovskiy A., Sagalaev S., Kang D.-J., Warner M., and Min D.-H. *Atlas of Japan (East) Sea hydrographic properties in summer, 1999.* *Progr. Oceanogr.*, 2004, Vol. 61, No. 2–4, pp. 277–348.
- Torrence C. and Compo G.P. *A practical guide to wavelet analysis.* *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1998, Vol. 79, No. 1, pp. 61–78.
- Trusenkova O.O., Lazaryuk A.Yu., Ostrovskii A.G., Lobanov V.B., and Kaplunenko 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 (Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences)*, 2018a, No. 1, pp. 49–59.
- Trusenkova O.O., Lazaryuk A.Yu., Ostrovskii A.G., Ladychenko S.Yu., and Lobanov V.B. *Korotkozhivushchie neodnorodnosti gidrofizicheskikh kharakteristik v raione k vostoku ot zal. Petra Velikogo, Yaponskoe more (po dannym profilografa «Akvalog»)* (Short-lived anomalies of hydrophysical characteristics in the area eastward of Peter the Great Bay, the northwestern Japan Sea). In: *Okeanografiya zaliva Petra Velikogo: sbornik nauchnykh statei po materialam dokladov na regional'noi konferentsii, Vladivostok, DVNIGMI, 15–16 maya 2018 g.* (Collection of papers presented at the Regional Conference, Vladivostok, FERHRI, May 15–16, 2018), Vladivostok: *Dal'nauka*, 2018b, pp. 126–134.

Trusenkova O.O., Ostrovskii A.G., Lazaryuk A.Yu., Ladychenko S.Yu., Dubina V.A., and Lobanov V.B.
Vodoobmen u yuzhnogo poberezh'ya Primor'ya v Yaponskom more po sputnikovym dannym i dolgovremennym kontaktnym izmereniyam (Water exchange off the southern Primorye coast in the Japan Sea from satellite imagery and long-term in situ measurements). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa (Current Problems in Remote sensing of the Earth from Space)*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 196–206.