

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ГЛУБОКОВОДНОЙ АВТОНОМНОЙ БУЙКОВОЙ СТАНЦИИ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

О.О. Трусенкова, В.Б. Лобанов, С.Ю. Ладыченко, Д.Д. Каплуненко, К.-И. Чанг

Выполнен статистический анализ уникальных данных, полученных на глубоководной автономной буйковой станции (АБС), установленной в центральной части Японского моря к северо-востоку от поднятия Ямато на глубине 3375 м в период с 22 апреля 2014 г. по 13 апреля 2015 г. Выводы о динамике вод сделаны по косвенным данным – глубине и наклону приборов, жестко укрепленных на тросе, отклонявшемся от вертикали под воздействием течений. Пространственная картина течений рассматривалась по данным спутниковой альтиметрии и спутниковым изображениям в инфракрасном диапазоне. Масштабы временной изменчивости в термоклине оценены по вейвлет-спектру температуры, а для всей толщи вод – по совместному вейвлет-спектру глубины и температуры. Поведение АБС претерпело резкое изменение через три месяца после постановки. Если в начальный период были характерны слабо выраженные колебания глубины приборов, то 28 июля 2014 г. произошел переход к значительным вертикальным смещениям, по-видимому, связанным с интенсификацией воздействия течений при уменьшении плавучести АБС в придонном слое. Переход сопровождался скачками глубины приборов до 80 м за несколько часов. В дальнейшем происходили согласованные колебания глубины приборов с размахом до 50–100 м, а в конце марта – начале апреля 2015 г. – до 150–250 м. Процессы на масштабах 8–13 сут протекали в верхнем и глубинном слоях, в основном независимо, а в апреле 2015 г. согласованно, причем 4–7 апреля через точку АБС прошел крупный антициклонический вихрь, затронувший всю толщу вод. В январе 2015 г. наблюдались квазиинерционные колебания вплоть до глубинного слоя, что объясняется сильным ветром в этот период, интенсивным конвективным перемешиванием и воздействием динамических структур синоптического масштаба. Выявлен положительный тренд придонной температуры воды, который за годовой период наблюдений составил 0,002 °C.

Ключевые слова: Японское море, автономная буйковая станция, глубина, температура, спутниковая альтиметрия, спутниковые изображения в инфракрасном диапазоне, вейвлет-анализ, масштабы изменчивости, синоптические вихри, инерционные колебания

Введение

Поверхностная циркуляция Японского моря изучена довольно хорошо [1–7]. Она определяется потоком вод Цусимского течения, поступающим в море с юга (рис. 1, а), разделяющимся на три основные ветви: прибрежную и морскую ветви Цусимского течения, следующие на восток и северо-восток вдоль берегов Японии, а также Восточно-Корейское течение, направленное на север вдоль Корейского полуострова и отворачивающее на восток в районе 37–38° с.ш., огибая подводную возвышенность Ямато в центре моря и соединяясь с Цусимским те-

чением вблизи о-ва Хонсю. Эту часть также называют Субполярным фронтальным течением, так как оно проходит вдоль субполярного (субарктического) фронта, разделяющего южную теплую субтропическую часть Японского моря, сформированную поступлением вод Цусимского течения, и северную холодную субарктическую зону, находящуюся под влиянием интенсивного зимнего конвективного перемешивания [3]. В северной части моря существует крупномасштабный циклонический круговорот, северо-западной периферией которого являются холодные Приморское и Северо-Корейское течения (рис. 1, а).

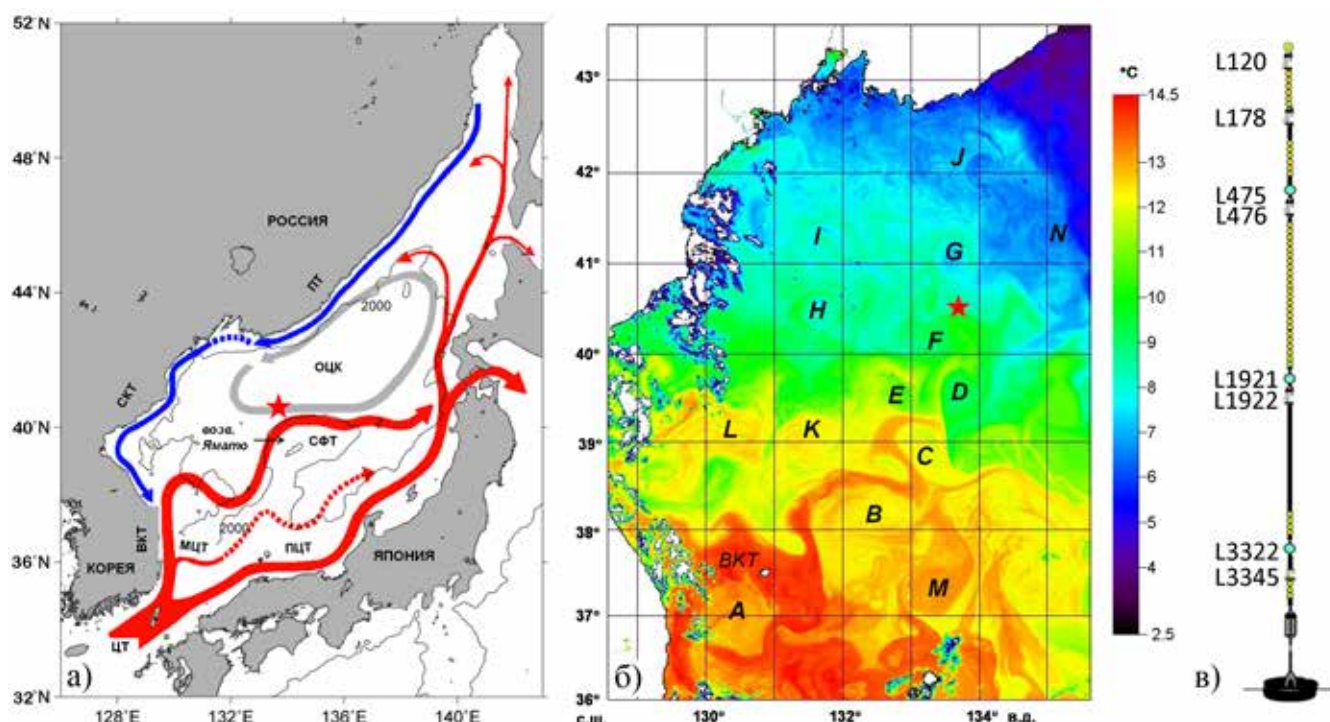


Рис. 1. Схема течений Японского моря (по [7]) (а); распределение температуры воды ($^{\circ}\text{C}$) на поверхности моря по спутниковому изображению с ИСЗ NOAA за 25.04.2014 г. (б); схема постановки АБС (в). Обозначения: ЦТ – Цусимское течение, ПЦТ – прибрежная ветвь Цусимского течения, МЦТ – морская ветвь Цусимского течения, ВКТ – Восточно-Корейское течение, СФТ – Субполярное фронтальное течение, СКТ – Северо-Корейское течение, ПТ – Приморское течение, ОЦК – основной циклонический круговорот; непостоянные течения показаны пунктиром, буквами А – Н обозначены антициклонические вихри синоптического масштаба. Показаны изобата 2000 м и положение АБС (красной звездочкой). На схеме АБС указаны уровни расположения измерительных приборов, желтые элементы соответствуют сферам плавучести; зеленые кружки – измерителям течений S4; обозначения приборов АБС даны в табл. 1

В ходе выполнения международных программ по изучению Японского моря в 1990-х гг. проводились интенсивные исследования глубинных течений, для чего были выполнены долгосрочные (на срок более года) постановки глубоководных автономных буйковых станций (АБС) [8, 9]. Было выявлено, что циркуляция глубинных вод Японского моря весьма интенсивна, и построена схема глубинных течений, следующих вдоль изобат, причем слева от течения глубина моря больше, а справа меньше [9].

Основными особенностями донной топографии моря являются глубоководные котловины: Центральная (Японская) в северной части моря, Ямато в юго-восточной и Цусимская в юго-западной с максимальными глубинами более 3600, 3000 и 2200 м соответственно; в центре моря находится подводная возвышенность Ямато с минимальной глубиной над вершиной ее северной части 383 м [10, 11]. Столь резкие перепады глубин, безусловно, оказывают влияние на картину течений.

В 1990-е гг. также уточнялись представления о течениях в верхнем и промежуточном слоях: традиционная схема В.Г. Яричина [1], согласно которой к северу от 40° с.ш. находится циклонический круго-

ворот, была дополнена представлениями о развитии интенсивных антициклонических вихрей, формирующихся в северо-западной части моря и перемещающихся на восток в направлении возвышенности Ямато [12, 13]. Присутствие вихрей синоптического масштаба отмечается в различных частях моря, обобщенная информация собрана в недавнем обзоре [14].

Типичную картину вихревой динамики вод демонстрирует спутниковое инфракрасное изображение на рис. 1, б. Крупные антициклонические вихри А, В, С, К, L и М расположены в южной части моря и переносят воды Восточно-Корейского и Цусимского течений на север и восток к возвышенности Ямато. Вихри D, E и F расположены непосредственно над возвышенностью. Отчетливо прослеживаются синоптические вихри и к северу от фронта – G, H, I, J и N. Такая плотная упаковка вихрей характерна для Японского моря и обеспечивает быстрый перенос вод через вихревые цепочки [5].

Для исследования влияния синоптической динамики на крупномасштабную циркуляцию вод, а также связи течений в верхнем и глубинном слоях была установлена АБС в центральной части моря, в южной

области Центральной котловины к северу от возвышенности Ямато (рис. 1), на которой производились длительные измерения океанологических параметров в толще вод от ~100 м до более чем 3300 м. Эти работы выполнялись совместно с Сеульским национальным университетом (ЧУ) Республики Корея в рамках Международной программы CREAMS-PICES Северотихоокеанской организации по морским наукам (<https://www.pices.int>). В ходе этого эксперимента были получены уникальные данные длительностью около года (с апреля 2014 г. по апрель 2015 г.), статистический анализ которых является целью данной статьи. При этом особое внимание уделяется анализу глубины расположения приборов, ее изменению на протяжении периода измерений, а также вариациям температуры вод.

■ Данные и методы

Глубоководная АБС была установлена в точке с координатами 40°30,244' с.ш., 133°37,124' в.д. (рис. 1) 22 апреля 2014 г. и поднята на поверхность 13 апреля 2015 г. в рейсах №№ 66 и 69 НИС «Академик Лаврентьев». Глубина места составляла 3375 м. Измерительные приборы жестко крепились на стальной трос в пластиковой оплетке (диаметром 8 мм), на дне был установлен донный якорь из железнодорожных колес весом 1200 кг, с которым трос соединялся с помощью акустического размыкателя, обеспечившего его отсоединение при подъеме.

Ниже анализируются данные приборов, установленных на 8 уровнях, далее обозначаемых как L120–L3345. Близкорасположенные пары приборов относятся к различным слоям толщи вод: L120 и L178 – к верхнему слою, L475 и L476 соответствуют промежуточному слою, L1921 и L1922 – глубинному, а

L3322 и L3345 – придонному (см. табл. 1). Плавучесть конструкции обеспечивалась 43 стеклянными вакуумными сферами диаметром 432 мм общей грузоподъемностью 1114,6 кг. Между тремя уровнями в верхней части АБС было установлено по 6 сфер, между L476 и L1921 – 24 сферы, над L3322 – 4 сферы и между L3322 и L3345 – 3 (рис. 1, в). Кроме перечисленных приборов на АБС были установлены измеритель течений и температуры воды Infinity (начальный горизонт около 875 м) и две седиментационные ловушки на горизонтах 975 м и 3320 м, результаты измерений которых в настоящей работе не анализируются.

При подъеме АБС в апреле 2015 г. было обнаружено, что 4 стеклянные сферы плавучести, установленные в 20 м над уровнем L3322, оказались разбиты (рис. 2, а). Кроме того, в 5 м над уровнем L1921 была зацеплена рыболовная дрейферная сеть (рис. 2, б). Чтобы оборвать сеть потребовалось значительное усилие использовавшейся для подъема АБС лебедки. Снижение плавучести за счет вышедших из строя сфер и влияние зацепившейся за АБС сети, вероятно, оказали заметное воздействие на поведение всей системы, что будет рассмотрено ниже.

Приборы SBE37SM и SBE39 являются измерителями температуры, электропроводности и давления (SBE37IM – только температуры вод), предоставленными ЧУ, приборы S4A и S4AD – измерителями скорости течения, принадлежащими ТОИ ДВО РАН и снабженными датчиками давления, температуры и наклона (отклонения оси прибора от вертикали). К сожалению, по техническим причинам не все измеренные данные оказались доступными для анализа; информация об используемых параметрах сведена в табл. 1. Данные по давлению пересчитывались в глубину на основе гидростатического приближения. Приборы не смещались по тросу, но трос мог изгибаться под воздействием течений, т.е. глубина приборов изменялась со временем, причем наименьшая зарегистрированная глубина соответствует положению прибора, наиболее близкому к вертикали. Прибор L3345 был установлен на 35 м выше якоря, но не имел датчика давления и поэтому данные об изменениях его глубины в период измерений отсутствуют.

Таблица 1. Приборы и используемые данные

Обозначение уровня измерений	Прибор	Глубина прибора, м		Дискретность измерений, ч	Анализируемые параметры
		Начальная	Наиболее повторяемая		
L120	SBE37SM	128	120	0,5	D, T
L178	SBE37SM	186	178	0,5	D, T
L475	S4A	483	475	1	D, Tlt
L476	SBE39	484	476	0,5	D, T
L1921	S4AD	1925	1921	1	D, Tlt
L1922	SBE39	1926	1922	0,5	D, T
L3322	S4AD	3324	3322	1	D, Tlt
L3345	SBE37IM	3345	–	0,5	T

Обозначения: D – глубина, T – температура, Tlt – отклонение прибора от вертикали.

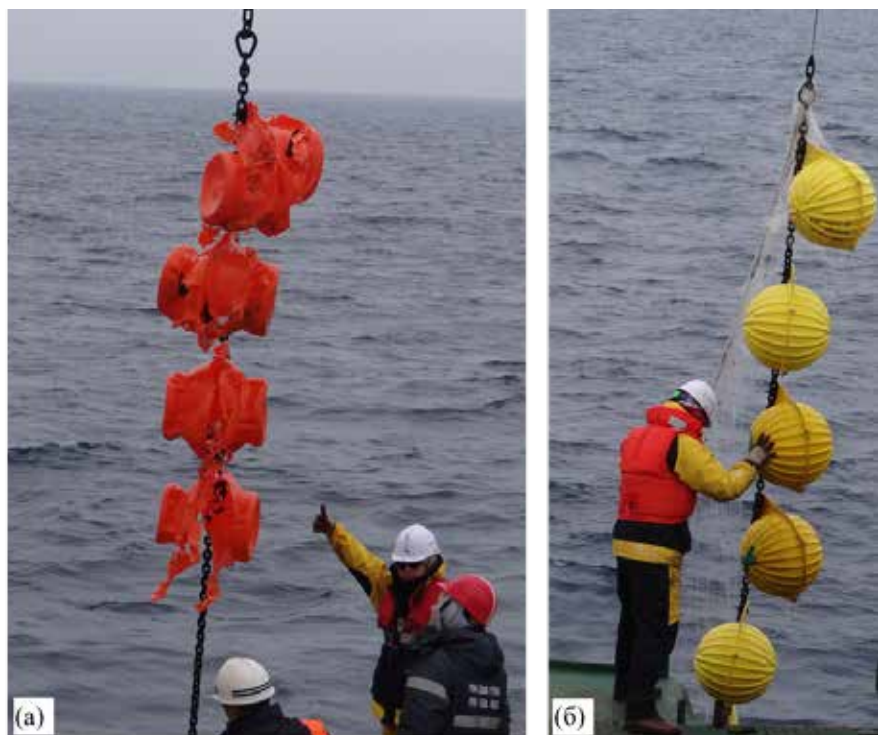


Рис. 2. Поврежденные сферы плавучести, установленные на глубине около 3320 м (а) и рыбацкая сеть, запутавшаяся за трос на глубине 1915 м (б). Фотографии сделаны при подъеме АБС 13 апреля 2015 г.

Характеристики приборов приведены в табл. 2 (по данным из [15, 16]). Разрешение температурных датчиков измерителей S4 значительно ниже, чем у SBE, поэтому для дальнейшего анализа изменений температуры воды использовались данные приборов SBE37 и SBE39 (уровни L120, L178, L476, L1922 и L3345; табл. 1, 2). Полезными для анализа поведения АБС оказались датчики наклона, установленные на приборах S4.

При постановке и подъеме АБС производилась съемка района исследований с борта НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в рейсе № 66 13 апреля – 1 мая 2014 г. и в рейсе № 69 4 апреля – 31 мая 2015 г., в том числе были выполнены СТД-зондирования вблизи АБС.

Таблица 2. Характеристики приборов

Прибор	Датчик	Диапазон	Разрешение	Точность	Стабильность
SBE37, SBE39	Температура	-5/+35 °C	0,0001°C	±0,002 °C	0,0002 °C в месяц
	Давление	0/6000 дбар	0,002%	±0,1%	0,05% в год
S4A, S4AD	Температура	-5/+45 °C	0,05°C	±0,05 °C	-
	Давление	0-1000/ 6000 дбар	6 дбар	±0,1–0,15%	-
	Наклон	-45/45 град	0,06 град	±0,25 град	-

Примечание. Разрешение и точность датчика давления даны в процентах глубины, т.е. 0,1–5,0 м.

Для анализа поля течений в верхнем слое используются ежедневные поля векторов скорости течения, основанные на данных спутниковой альтиметрии с четвертьградусным пространственным разрешением, которые были взяты с портала CMEMS (<https://www.copernicus.eu>). К анализу привлекались изображения поверхности Японского моря в инфракрасном (ИК) диапазоне с разрешением 1 км, полученные с искусственных спутников Земли серии NOAA в Центре регионального спутникового мониторинга окружающей среды ИАПУ ДВО РАН (<http://satellite.dvo.ru/>).

Поскольку распределение рассматриваемых параметров является далеко не гауссовым, для оценки средних использовалась медиана, для оценки изменчивости – среднее отклонение (среднее абсолютных величин отклонений

от среднего значения). Для оценки статистической взаимосвязи использовались непараметрические коэффициенты корреляции по Спирмену [17].

Периоды колебаний оценивались по спектрам, основанным на вейвлет-преобразовании, приспособленном к анализу нестационарных временных рядов. Для индивидуальных спектров использовался вещественный материнский вейвлет DOG-9 (производная гауссиана 9-го порядка), дающий хорошее разрешение по шкале времени и неплохое – по шкале скейлов (периодов), а для совместных спектров двух параметров – комплексный вейвлет Морле, дающий хорошее разрешение по шкале скейлов и позволяющий оценить когерентность и фазовый сдвиг. Статистическая значимость на 90%-м уровне оценивалась с помощью теоретического спектра красного шума; результаты интерпретировались вне зон возможного влияния краевых эффектов (т.н. конусов влияния) [18]. Периоды колебаний в каждый момент времени определялись по максимальным значениям мощности спектров внутри заданных диапазонов, соответствующих статистически значимым локальным максимумам.

мам спектра вне конусов влияния. Для расчетов использовалась модифицированная процедура Торренса и Компо [18].

■ Результаты исследования

Глубина расположения и наклоны приборов

Изменение глубины расположения приборов в характерных слоях на протяжении всего периода наблюдений показано на рис. 3. Обращает на себя внимание подобие характера изменчивости глубины приборов на всех уровнях. При этом в первые три месяца после начала измерений колебания глубины не превышали 1 м. Но на 97-е сутки, 28 июля 2014 г., произошло резкое опускание приборов (на 85 м за 8 часов), затем столь же быстрый подъем (на 40 м за 3 часа), за которым последовали колебания не столь стремительные, но с размахом до 50–100 м, а в конце марта – начале апреля 2015 г. (335–347-е сут измерений) амплитуда колебаний увеличилась до 150–250 м (рис. 3).

При детальном рассмотрении начального периода измерений (1–96 сут) заметна тенденция к подъему на ~8 м за 96 сут (рис. 4; примеры для L120 и L1921).

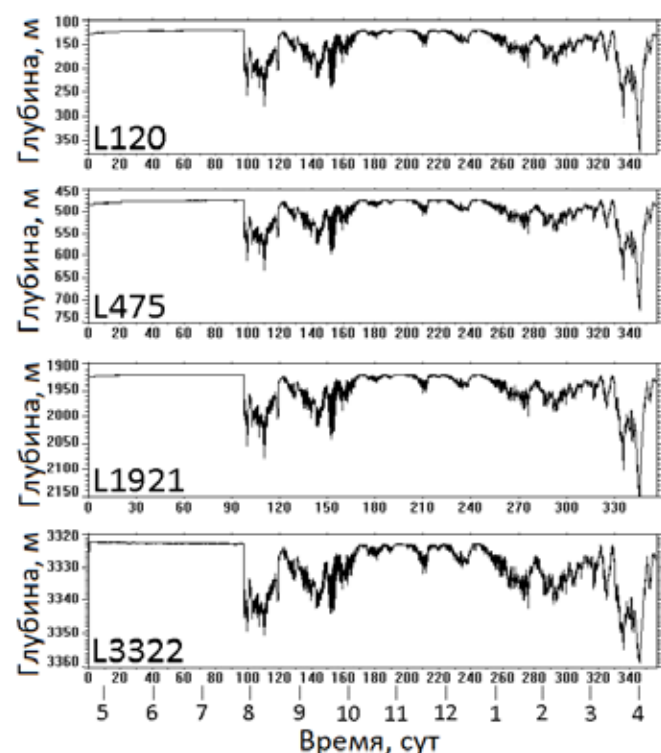


Рис. 3. Глубина (м) приборов на характерных уровнях; здесь и на следующих рисунках по оси абсцисс дано время (сут) от начала измерений, цифрами под осью показано начало календарных месяцев от мая 2014 г. до апреля 2015 г.

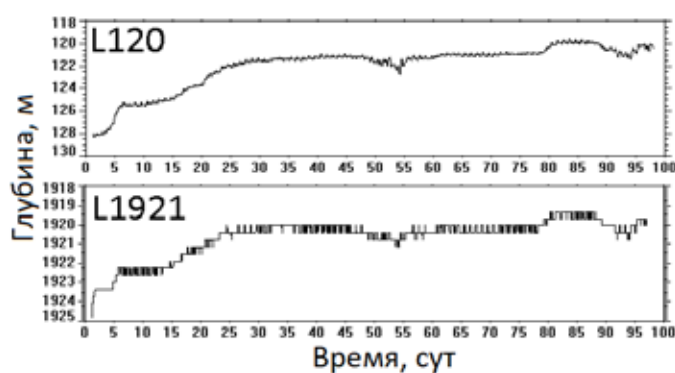


Рис. 4. Глубина (м) приборов на уровнях L120 и L1921 в начальный период измерений (22 апреля – 27 июля 2014 г.)

По-видимому, это связано с постепенным растяжением такелажа АБС или с дрейфом датчиков давления, отмеченным авторами [19]. В последующие месяцы этот дрейф был менее заметен из-за резко возросшей амплитуды колебаний.

Колебания глубины на всех уровнях высоко-согласованы: парные непараметрические коэффициенты корреляции равны 0,98–0,99 для соседних уровней, незначительно уменьшаясь с удалением уровней друг от друга и составляя 0,92 для наиболее удаленных уровней L120 и L3322. Изменения глубины приборов между измерениями на L120–L1922, как правило, различаются не более чем на 4–40 см, т.е. не превышают удвоенной ошибки измерений давления (0,1–0,25% глубины). Это демонстрируется графиком на рис. 5, где приведены изменения глубины приборов в верхнем (L120), промежуточном (L475) и глубинном (L1921) слоях, которые хорошо согласованы. Эти изменения в придонном слое (L3322) ниже и в 95% случаев не превышают 37 см (рис. 5). Вместе с тем в периоды резких колебаний

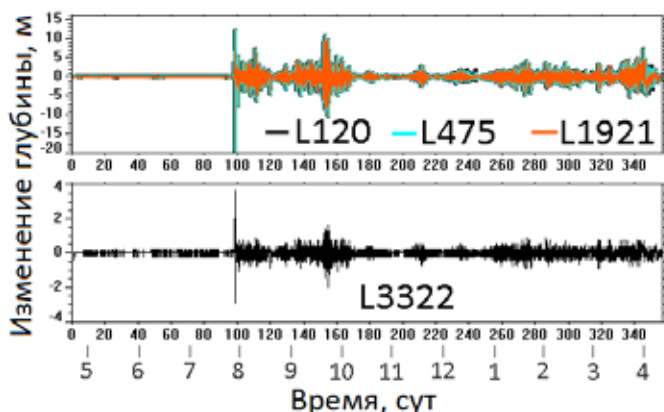


Рис. 5. Величина изменения глубины приборов за полчаса (м); кривые для уровней L120, L475 и L1921 (вверху) и L3322 (внизу); графики для L120, L475 и L1921 строились последовательно с уменьшением толщины линий

расхождение между уровнями значительно увеличивается (рис. 5), что, возможно, связано с ошибками в определении глубины.

Для оценки колебаний глубины приборов построены их гистограммы (рис. 6; из близкорасположенных уровней выбран один); градации глубины для уровней L120–L1921 выбраны как 5 м, т.е. 2% от диапазона изменений (около 250 м), для придонного уровня L3322 градации равны 2 м, поскольку диапазон изменений глубины этого уровня составляет всего 37 м. Распределение глубины существенно отличается от нормального: наибольшая повторяемость (30–39%) приходится на первую градацию, отвечающую за наименьшее отклонение троса от вертикали при слабых течениях; повторяемость резко падает (до 5–10%) уже для второй градации. Медианы глубины попадают во 2–3 градации, средние отклонения составляют около 22 м для уровней L120–L1921 и около 6 м для уровня L3322, а доля значительных глубин, превышающих сумму медианы и среднего отклонения (25 м для L120–L1921), составляет 25–30%.

При наклонах троса глубина приборов увеличивается, а разность этих глубин уменьшается, при этом расстояние между приборами вдоль троса не должно изменяться. Разность глубин между уровнями L120 и L178 в верхнем слое все время остается в пределах удвоенной ошибки измерений (20–40 см на глубинах 100–200 м), но увеличивается в конце марта – начале апреля 2015 г. (335–347-е сут измерений),

когда происходили интенсивные колебания самих глубин (рис. 3, 7). Разность глубин между уровнями L476 и L178 характеризуется линейным трендом, с уменьшением на 2,9 м за период измерений (рис. 7). Это могло бы быть связано с увеличением наклона троса, но ничего подобного не обнаружено для других уровней. Разность глубин близкорасположенных уровней L476 и L475 первоначально составляла 1 м. Однако за период измерений она возросла на 2,7 м по линейному тренду (рис. 7), т.е. это происходило со скоростью 0,3 мм/ч или 0,76 см/сут. Столь значительный рост сложно объяснить, даже предполагая возможность растяжения троса. В то же время, близость величины тренда разности глубин L476 и L475 к величине тренда разности L476 и L178, причем с противоположным знаком, а также отсутствие тренда разности L475 и L178 указывает на то, что выявленные тренды связаны, скорее всего, с погрешностями датчика давления прибора SBE, установленного на уровне L476. Подобный дрейф датчиков отмечался в работе [19].

Рассмотрим наклоны (отклонения от вертикали) приборов, которые доступны для уровней L475, L1921 и L3322 (табл. 1; рис. 8). Наклоны и глубины приборов на уровнях L1921 и L3322 соответствуют друг другу: непараметрические коэффициенты корреляции «глубина – наклон» составляют 0,89 и 0,98. Обращают на себя внимание одномоментное резкое опускание всех приборов и скачок наклона на этих

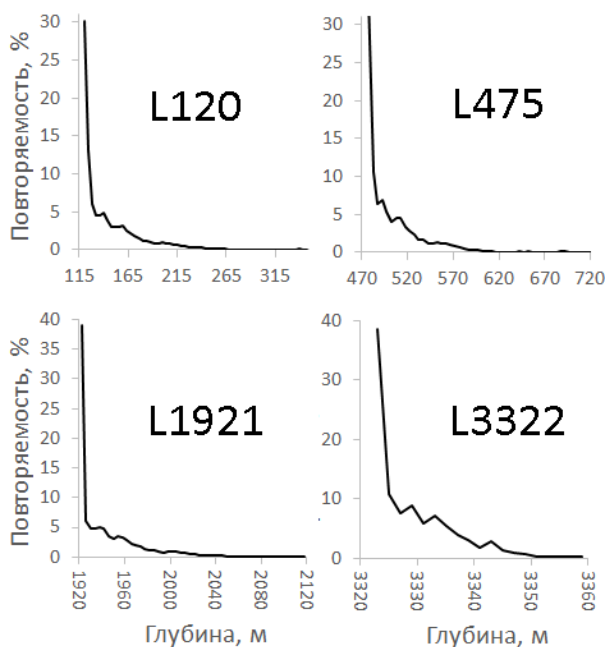


Рис. 6. Гистограммы (%) глубины (м) приборов на характерных уровнях; градации 5 м для L120, L475, L1921 и 2 м для L3322

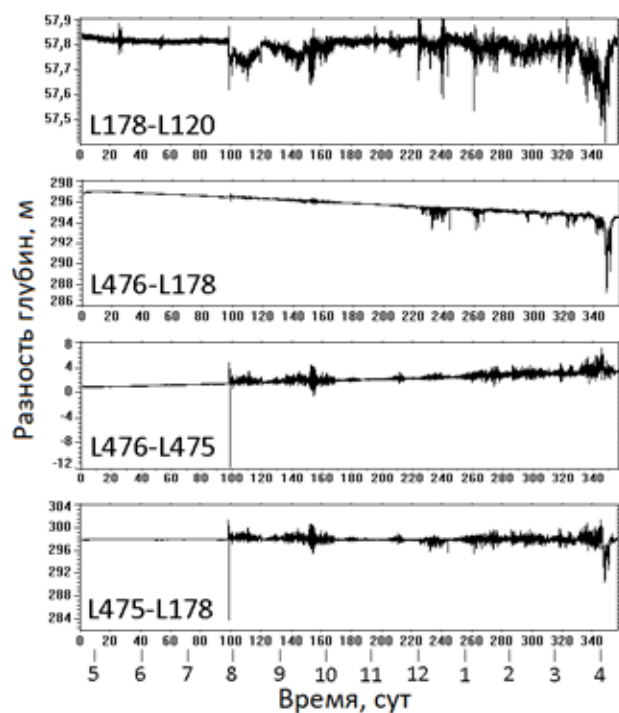


Рис. 7. Разность глубин (м) между характерными уровнями

уровнях на 97-е сутки измерений (28 июля 2014 г.; рис. 3 и 8). Следует отметить согласованность наклонов L1921 и L3322 (непараметрический коэффициент корреляции составляет 0,90), но значительно большие величины углов на L3322, зачастую превышающие 45 градусов. В отличие от глубинного и придонного слоев, наклоны прибора на уровне L475 большую часть времени незначительны, в том числе в период скачка на 97-е сут измерений, и усиливаются только в отдельные периоды: 8–18 декабря 2014 г., 13–18 марта и 28 марта – 12 апреля 2015 г. (230–240-, 325–330- и 340–355-е сут измерений соответственно), когда их изменения соответствуют изменениям наклона в нижележащих слоях (рис. 8).

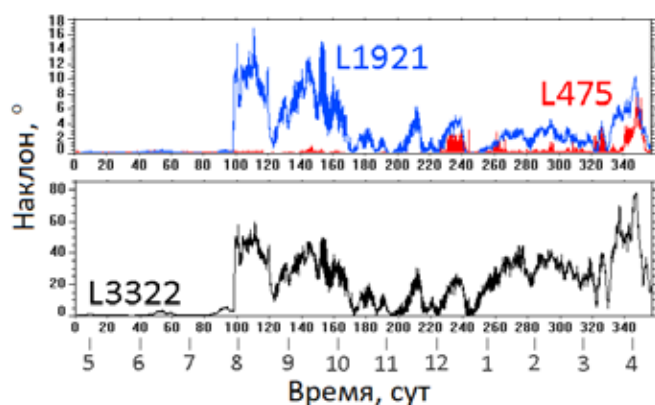


Рис. 8. Отклонение (град) приборов от вертикали на уровнях L475 (красная линия, вверх) и L1921 (синяя линия, вверх) и L3322 (внизу)

Изменение температуры воды

Рассмотрим результаты измерений температуры воды на уровнях L120, L178, L476, L1922 и L3345 (табл. 1, рис. 9). Ее изменения в верхнем (уровни L120 и L178) и в промежуточном слоях (уровень L476) хорошо согласованы: парные непараметрические коэффициенты корреляции составляют 0,84–0,95. Отметим, что резкие изменения глубины приборов на 97-е сутки измерений (28 июля 2014 г.) лишь слабо отразились в изменении температуры воды, колебания которой в эти сутки составляли 0,05–0,1 °C (рис. 9), что можно объяснить высокой однородностью толщи вод Японского моря (различия между средними значениями температуры на уровнях измерений составляют 0,26–0,46 °C), а также ошибками в определении глубины в это время. Тем не менее низкоамплитудные, но хорошо видимые колебания температуры воды, связанные со скачком глубины приборов, отмечаются на всех уровнях (рис. 9).

Наиболее значительные аномалии температуры верхнего и промежуточного слоев наблюдались в зимний период (28 ноября 2014 г. – 6 февраля 2015 г.,

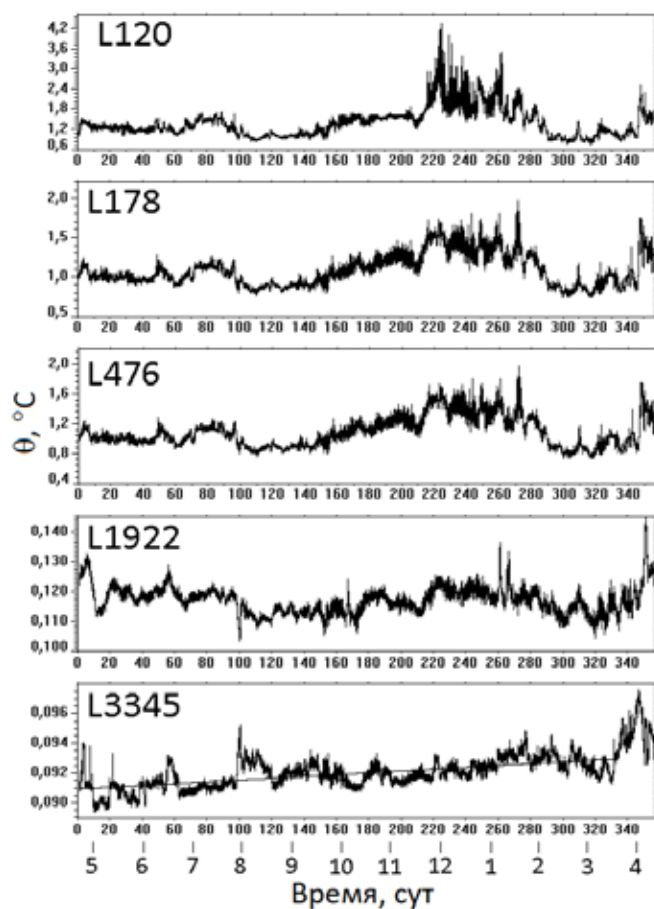


Рис. 9. Изменение потенциальной температуры воды (θ) на разных уровнях (°C); на графике L3345 показан линейный тренд

т.е. на 220–290-е сут; рис. 9). Что касается сезонных изменений температуры воды, то считается, что в этом районе они проникают до 300 м [3], за исключением случаев глубокой зимней конвекции, проникающей глубже 1000 м [20]. Анализ годового хода препятствуют резкие колебания глубины приборов, поскольку время наступления сезонных экстремумов существенно сдвигается с глубиной [3]. Вместе с тем, по нашим данным, в период со второй половины ноября до конца января изменения температуры на уровне L476 практически идентичны изменениям на уровне L120, нижней границе сезонного термоклина, и характеризуются положительной аномалией, на которую наложены короткопериодные колебания (рис 9). Это можно объяснить эффектом конвекции, приводящей к выхолаживанию в верхнем слое, вертикальному перемешиванию и потеплению в промежуточном слое.

Как общепринято, в глубинном и придонном слоях рассматривается потенциальная температура воды (θ), полученная устранением эффекта повышения температуры при сжатии за счет давления столба

воды. Изменчивость в глубинном (L1922) и придонном (L3345) слоях незначительна в сравнении с вышележащими: среднее отклонение составляет только 1,5% и 0,3% медианы, тогда как на уровнях L120, L178 и L476 – 25,5%, 16,1% и 6,6% соответственно. В целом эти изменения не согласованы с термоклином, за исключением периода 5–7 апреля 2015 г., когда положительные аномалии температуры развивались во всей толще вод, включая придонный слой, где они составляли 0,004 °C, превышая ошибки данных.

В придонном слое зарегистрирован положительный линейный тренд потенциальной температуры, причем из-за значительной положительной аномалии в конце периода наблюдений, оценка тренда выполнена по 19 марта 2015 г. (332 сут), что дает увеличение температуры на 0,002 °C (в пересчете на год). Эта величина существенно превышает шум (рис. 9), однако она равна точности измерений (0,002 °C) и близка к величине температурного дрейфа датчика за год (0,0024 °C) (табл. 2).

В промежуточном и глубинном слоях однопавленных тенденций температуры за время постановки не наблюдалось.

Вейвлет-анализ изменчивости температуры и глубины приборов

Для оценки масштабов изменчивости в термоклине рассчитан вейвлет-спектр температуры на уровне L120 (рис. 10). В период значительных аномалий 28 ноября 2014 г. – 6 февраля 2015 г. (220–290-е сут) и в конце периода наблюдений (26 марта – 7 апреля 2015 г.; 338–350-е сут) имеются максимумы спектра в диапазоне 5–20 сут. Наиболее повторяемыми в

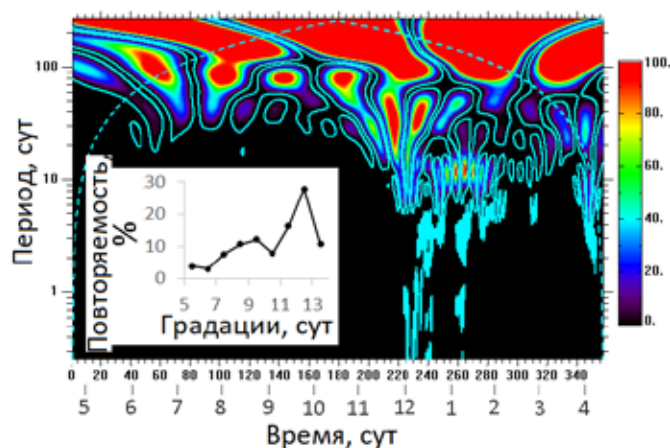


Рис. 10. Вейвлет-спектр температуры ($^{\circ}\text{C}^2$) на уровне L120, на врезке – повторяемость (%) периодов максимальной мощности в диапазоне 5–15 сут; здесь на и рис. 11 голубым пунктиром показаны конусы влияния краевых эффектов, тонкими голубыми линиями – уровни 90%-й статистической значимости

этом диапазоне являются периоды 12–13 и 8–10 сут (рис. 10, врезка), что позволяет связать их с адвекцией вод различной температуры за счет короткопериодных динамических процессов. Вследствие тесной статистической взаимосвязи температуры на уровнях L120, L178 и L476 найденные закономерности применимы ко всему промежуточному слою.

Индивидуальные спектры глубины приборов оказались малоинформативными, однако оценить масштабы колебаний во всей толще вод оказалось возможным на основе совместного вейвлет-спектра глубины прибора и температуры на уровне L120 (рис. 11). В табл. 3 сведены события, когда мощность спектра была статистически значима, максимумы находились вне зон влияния краевых эффектов, период не превышал длительности события, а когерентность совместных колебаний, как правило, превышала 0,5. Наиболее долгопериодные колебания были статистически значимы большую часть времени, а их период уменьшался с 42,6 до 27,8 сут в середине октября 2014 г. (события 1 и 2 в табл. 3); подобные же колебания зарегистрированы на индивидуальных спектрах температуры (рис. 10). Средние периоды событий 3–5 (7,6, 12,6 и 8,3 сут) соответствуют максимумам повторяемости для индивидуального спектра температуры (рис. 10, 11, табл. 3). Однако только события 4 и 5 (313–346-е сут) совпадают в двух спектрах по шкале времени, тогда как в период наиболее интенсивных аномалий температуры (220–290-е сут) когерентные колебания температуры и глубины не зарегистрированы, т.е. эти аномалии связаны с динамическими процессами, ограниченными верхним слоем. Следует отметить наличие во всей толще вод колебаний с периодами, близкими к инерционному (0,77 сут на широте АБС), которым соответствуют события 6–12 (табл. 3).

В совместном спектре колебания температуры и глубины на рассмотренных масштабах происходили

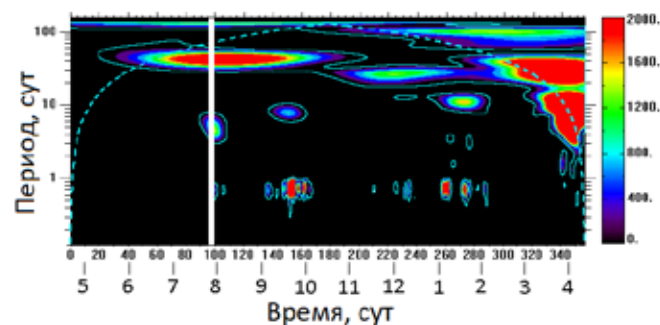


Рис. 11. Совместный вейвлет-спектр глубины прибора и температуры ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}$) на уровне L120; временной интервал с резким скачком глубины (96–100 сут) исключен из рассмотрения

Таблица 3. Временные масштабы совместных колебаний температуры и глубины прибора на уровне L1

Событие	Время, сут	Даты	Период, сут	Когерентность
1	59–186	20.06 – 25.10 2014 г.	42,6	0,75
2	244–277	22.12 2014 г. – 24.01 2015 г.	27,8	0,60
3	154–162	23.09 – 01.10 2014 г.	7,6	0,54
4	313–331	01–19.03 2015 г.	12,6	0,55
5	332–346	20.03 – 03.04 2015 г.	8,3	0,86
6	146–149	15–18.09 2014 г.	0,72	0,57
7	150	19.09 2014 г.	0,70	0,39
8	152–153	21–22.09 2014 г.	0,73	0,43
9	159–160	28–29.09 2014 г.	0,74	0,36
10	258–262	05–09.01 2015 г.	0,73	0,54
11	271–272	18.01 – 19.01 2015 г.	0,71	0,80
12	285	01.02 2015 г.	0,75	0,45

Примечание. Периоды и когерентности осреднены за указанное время.

в противофазе, т.е. при увеличении глубины (изгибах троса и опускании приборов) температура уменьшалась, а при уменьшении глубины температура увеличивалась, как и следовало ожидать. Отметим, что резкий скачок глубины, помеченный белой полосой на рис. 12, не искажает колебания с периодами больше нескольких суток.

■ Обсуждение результатов

Потеря плавучести АБС

Измерения на АБС, установленной в южной части Центральной котловины Японского моря, показали значительные изменения глубины расположения приборов и температуры воды. При этом в первые три месяца постановки (апрель – июль 2014 г.) колебания глубины приборов были незначительны, а в конце июля произошел переход к существенным вертикальным смещениям с размахом 50–100 м, который усилился в конце марта – начале апреля 2015 г. до 150–250 м. Таким образом, 28 июля 2014 г., почти через три месяца после постановки, изменился режим устойчивости АБС.

Очевидно, это связано с частичной потерей плавучести за счет выхода из строя четырех стеклянных сфер непосредственно над уровнем L3322. По расчетам вес приборов и такелажа АБС в воде составлял около 650 кг, выталкивающую силу всех плавучестей, с учетом положительной плавучести измерителей S4A, S4AD и буев верхней части системы, можно оценить в 1100 кг. Тогда положительная плавучесть

АБС была около 450 кг. После потери четырех сфер плавучесть снизилась на 104 кг. Это событие привело к резким вертикальным скачкам глубины расположения приборов в этот день (рис. 3) и последующему увеличению амплитуды колебаний, вероятно, связанному с воздействием течений.

При длине такелажа АБС около 3250 м, в приближении прямой линии, отклонение верхней части от вертикали на 10 градусов привело бы к заглублению на 49 м, а на 15 градусов – на 111 м. Но, очевидно, колебания линии АБС отличались от прямой за счет неравномерного распределения грузов и плавучестей по вертикали и неравномерного воздействия течений.

Вариации глубины на промежуточном уровне L475 в августе – сентябре 2014 г. достигали 50–70 м (рис. 3), хотя угол наклона прибора не превышал 1 градуса (рис. 8), и только в конце марта – начале апреля 2015 г. угол наклона увеличился до 5–10 градусов, а заглубление прибора достигло 100–200 м. Это значит, что линия АБС на этом уровне опускалась практически вертикально за счет отклонения в нижележащих слоях.

В то же время на глубинном и придонном уровнях значительные изменения угла наклона начали наблюдаться с момента потери 4 сфер плавучести в конце июля 2014 г. (рис. 8). Они хорошо совпадают с заглублением приборов. Но если на L1921 величины заглубления были почти такие же, как и на L475, то на L3322 они были в 2–3 раза меньше и составляли в августе – сентябре 20–25 м, а в конце марта – начале апреля 2015 г. – до 35 м (рис. 3). Учитывая, что расстояние от дна до уровня L3322 составляло около 50 м, а до уровня L3345 – около 30 м, можно предполагать, что прибор на L3345 практически ложился на дно, а линия АБС провисала в придонном слое. Этим можно объяснить столь большие углы наклона на расположенном чуть выше приборе L3322, которые превышали 45 градусов (рис. 8). Таким образом, если колебания глубины приборов происходили согласованно по всей длине троса от верхних горизонтов (120 м) до придонного слоя (3322 м), то отклонение троса от вертикали существенно различалось. Оно практически отсутствовало в промежуточном (и, вероятно, в верхнем) слое, но становилось значительным на горизонте 1921 м и ниже.

Следует также учитывать, что на уровнях 975 м и 3320 м были установлены две седиментационные ловушки, которые имели значительный вес (25–35 кг) и объем, т.е. увеличивали парусность системы. Сферы плавучести лопнули непосредственно над нижней ловушкой, в результате чего этот участок мог провиснуть и заглубляться почти до дна.

Сложно предположить, что в глубинных слоях, где скорости течений едва достигают 5–10 см/с, их воздействие на АБС было более сильным, чем в верхних, где они могут превышать 50 см/с [2–4,8,9]. Напомним, что при подъеме АБС над прибором L1921 была обнаружена рыболовная дрейферная сеть (рис. 2, б). Такие сети используют в поверхностном слое моря до глубин 100–150 м. Сеть, дрейфовавшая в верхнем слое, могла зацепиться за АБС при постановке или могла потонуть из-за каких-либо повреждений и зацепиться за приборы в глубинном слое. Дополнительная парусность, созданная сетью, могла вызвать чрезмерный наклон линии АБС и погружение сфер плавучести на глубину ниже критической, что привело к их повреждению. Последовавшая потеря плавучести и увеличение парусности за счет сети усилили воздействие течений на глубинном горизонте и привели к значительным наклонам в нижних слоях и опусканиям всей линии АБС.

Влияние синоптической динамики вод

Можно полагать, что обсуждаемые колебания связаны с динамическими процессами, приводящими к изгибам троса и заглублению приборов во всей толще вод. Усиление течений происходит, например, при прохождении вихрей синоптического масштаба. Вероятно, события согласованных изменений глубины и наклона приборов связаны с прохождением вихрей большой вертикальной мощности. Значительное углубление приборов происходило в 25–30% случаев, что можно соотносить с отклонениями троса при интенсивных течениях.

В конце периода наблюдений (347–350-е сут, 4–7 апреля 2015 г.) во всей толще вод наблюдались положительные аномалии температуры, достигавшие 1,2–1,4, 0,24–0,25 и 0,004–0,005 °C на уровнях L120, L1922 и L3345 соответственно, что превышало ошибки измерений. Эти аномалии сопровождалось опусканием приборов на значительные глубины: до 150–250 м на уровнях L120–L1922 и около 30–35 м на уровне L3322 (рис. 3). В это же время наблюдался наибольший наклон приборов в глубинном слое на уровне L1921 (до 10°), а прибор в промежуточном слое (L475) наклонился на 6–7°; последнее было редким событием в период измерений (рис. 8). Эта

синфазность говорит о прохождении динамических структур синоптического масштаба, затрагивающих как промежуточный, так и глубинный слой.

Действительно, как видно в поле поверхностных течений по данным спутниковой альтиметрии и особенно на более детальном (с разрешением 1 км) ИК-изображении поверхности моря за 7 апреля 2015 г., АБС находилась в зоне Субполярного фронтального течения, меандрирование которого сопровождалось прохождением интенсивных антициклонических вихрей (рис. 12, а, б; вихрь в районе АБС помечен буквой «А» на рис. 12, б).

Помимо синоптической динамики вод усиление течений и отклонение троса АБС от вертикали могут быть инициированы и сильными ветровыми воздействиями, вызывающими, в том числе, инерционные колебания течений (события 6–12, табл. 3; инерционный период составляет 0,77 сут на широте АБС). Рассмотрим подробнее события 10–12 в январе 2015 г. В это время над морем дул северо-западный ветер со скоростью 12–17 м/с, свойственный периоду зимнего муссона, однако муссонная циркуляция нарушалась прохождением циклонов с усилением ветра до 20 м/с и более [24]. В зоне Субполярного фронтального течения наблюдалась цепочка антициклонических вихрей, причем АБС находилась внутри мультипольной вихревой системы (см. поле течений за 20 января 2015 г. на рис. 12, в), а на спутниковом ИК-изображении видны, за счет его лучшего разрешения, мезомасштабные струи и вихри в районе АБС (рис. 12, г; показано изображение за 20 января 2015 г., когда район был свободен от облачности). Инерционные колебания в поверхностном слое моря усиливались под действием ветра, порождая квазиинерционные волны, которые имеют направленную вниз составляющую, особенно в зонах антициклонической циркуляции [23]. Распространение квазиинерционных волн вниз при их взаимодействии с синоптическими вихрями в юго-западной части Японского моря обсуждалось в работе [25], в зоне Цусимского течения в юго-восточной части моря – в работе [26], на шельфе залива Петра Великого – в работах [27, 28]. Полученные здесь результаты показывают, что при сильном ветре и активном вихреобразовании подобные процессы происходят и в центральной части моря, захватывая глубинные воды.

Сезонный ход температуры промежуточных вод и линейный тренд температуры придонных вод

Поскольку верхние приборы АБС располагались в нижней части термоклина, то сезонный ход темпе-

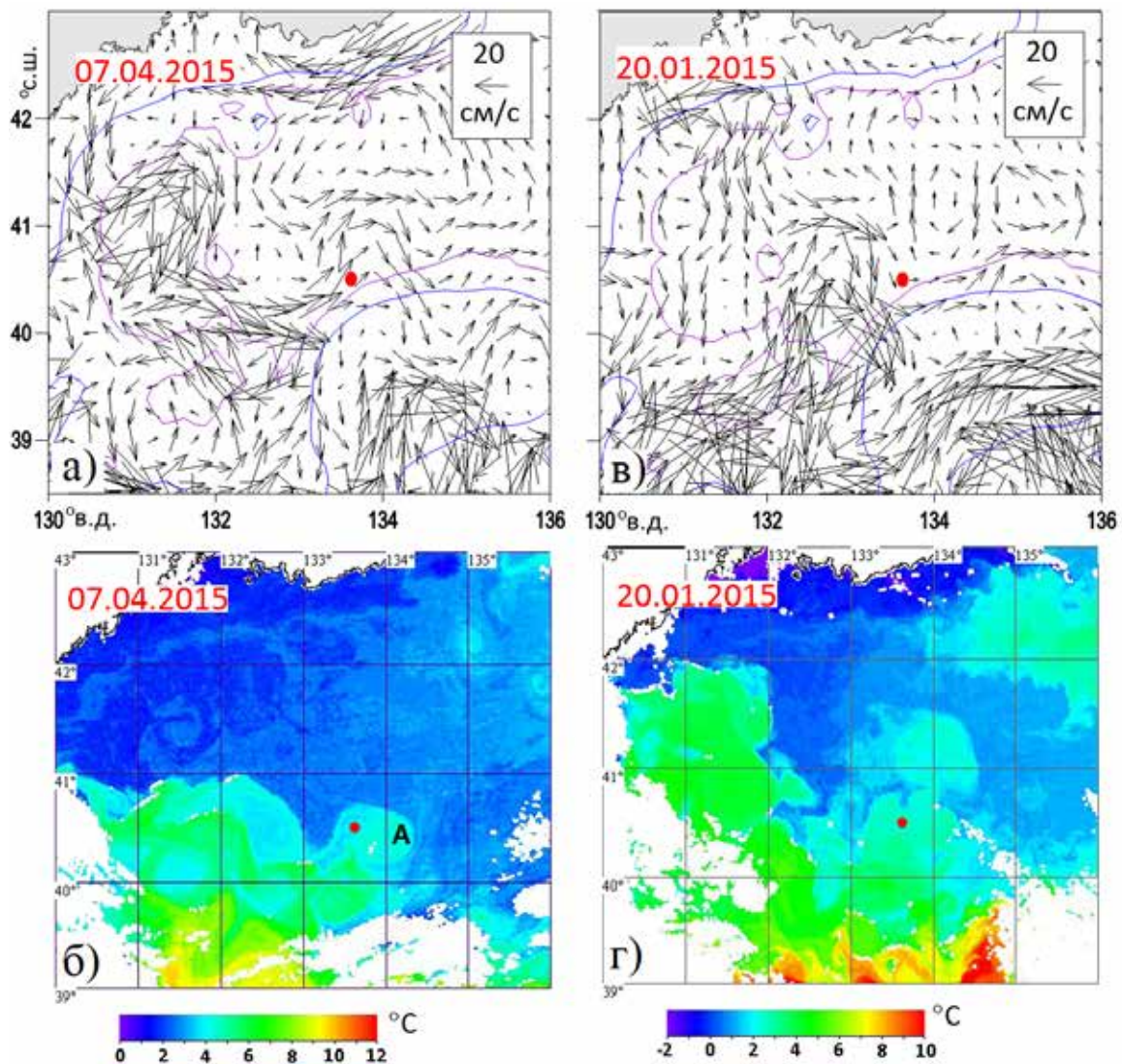


Рис. 12. Поверхностные течения (см/с) по данным спутниковой альтиметрии в районе АБС за 7 апреля (а) и 20 января (в) 2015 г.; температура (°C) поверхности моря по ИК-изображениям со спутника NOAA (б, г) за те же даты. АБС показана красной точкой, на карте течений изобаты 2000 и 3000 м показаны синей и фиолетовой линиями соответственно, на ИК-изображении (б) буквой «А» помечен антициклонический вихрь вблизи АБС, облачность и суша показаны белым

ратуры воды с характерным для поверхностного слоя этой части моря летним максимумом более 20°C и зимним минимумом ниже 5°C [3] не прослеживается. Однако важным элементом сезонного хода является увеличение амплитуды колебаний температуры воды зимой, хорошо заметное на рис. 9 как в верхнем (L120, L178), так и в промежуточном (L476) слоях. Амплитуда этих колебаний составляет $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$. При этом сначала происходит увеличение температуры воды, а затем ее понижение до фонового значения. Очевидно, что это отражает процесс зимнего конвективного перемешивания. Такие колебания хорошо отражаются и в вейвлет-спектре (рис. 10, табл. 3).

Два случая краткосрочных положительных аномалий температуры воды наблюдаются в январе и на

уровне L1922 (261- и 265-е сут измерений; рис. 9). Хотя их амплитуда составляла всего $0,010\text{--}0,015^{\circ}\text{C}$, они заметно выделяются на общем фоне. Это указывает на то, что конвективное перемешивание в Японском море и в настоящее время, когда отмечается ослабление зимних процессов [3, 4], может достигать его глубинных слоев, что соответствует инструментальным наблюдениям в аномально холодные зимние периоды 2000–2001 гг. [20].

Как известно, одной из важных особенностей реакции Японского моря на глобальное потепление и ослабление зимней конвекции является рост температуры придонных вод его Центральной котловины [4, 20, 21]. Результат наших измерений указывает на годовой положительный тренд потенциальной

температуры воды около $0,002\text{ }^{\circ}\text{C}$ (на уровне L3345) (рис. 9). Хотя эта величина близка к точности датчика ($0,002\text{ }^{\circ}\text{C}$) и величине его годового дрейфа ($0,0024\text{ }^{\circ}\text{C}$) (табл. 2), она подтверждает существующий тренд, оцененный ранее по многолетним СТД-измерениям как $0,0016\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ за последние 10 лет [22]. Причем последние оценки получены осреднением по нескольким (более 10) станциям, что уменьшает ошибку в $\sqrt{N}$, где N – число измерений, и исключает влияние глубинных вихрей.

Придонная температура, измеренная СТД-зондом с борта судна вблизи АБС (при постановке и при подъеме), составляет $0,091\text{ }^{\circ}\text{C}$ в апреле 2014 г. и $0,098\text{--}0,099\text{ }^{\circ}\text{C}$ в апреле 2015 г. По этим данным рост температуры воды за год составляет $0,007\text{--}0,008\text{ }^{\circ}\text{C}$, что превышает данные АБС и ранее сделанные оценки трендов. Однако следует учесть, что в апреле 2015 г. отмечалось повышение температуры во всей толще вод ниже 65 м (рис. 13), связанное с прохождением антициклонического вихря. Таким образом, полученный на уровне L3345 тренд близок к выявленному ранее тренду потепления придонных вод Японского моря [22], но, вероятно, дрейф датчика также вносит некоторую погрешность.

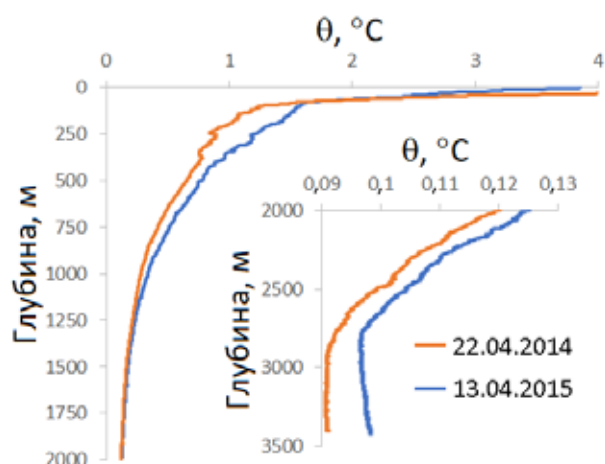


Рис. 13. Вертикальные профили потенциальной температуры воды (θ ; $^{\circ}\text{C}$) по данным СТД-зондирований в рейсах № 66 и 69 НИС «Академик М.А. Лаврентьев» 22 апреля 2014 г. (оранжевая линия) и 13 апреля 2015 г. (синяя линия); глубина в м; на врезке показан фрагмент для глубинного и придонного слоев

Заключение

В работе анализируются данные, полученные на глубоководной АБС, установленной в центральной части Японского моря к северо-востоку от поднятия Ямато. Измерения выполнялись в течение почти полного года – с 22 апреля 2014 г. по 13 апреля

2015 г., охватывая более чем 3000-метровую толщу вод: от нижней границы сезонного термоклина (120 м) до придонного слоя (3345 м), что является беспрецедентным экспериментом в этом районе. Выводы о динамике глубинных вод сделаны по косвенным данным – статистическим характеристикам глубины и наклона приборов, жестко укрепленных на тросе, изгибавшемся под воздействием течений. К анализу привлекались поля поверхностной скорости течения, основанные на данных спутниковой альтиметрии, а также ИК-изображения со спутников серии NOAA, поскольку температура является трассером течений синоптического и мезомасштабов. Масштабы временной изменчивости для верхнего слоя оценены по вейвлет-спектру температуры, а для всей толщи вод – по совместному вейвлет-спектру глубины и температуры. Были получены следующие результаты.

Поведение АБС претерпело резкое изменение через три месяца после постановки. Если вначале колебания глубины приборов были весьма слабыми, то 28 июля произошел переход к значительным вертикальным смещениям, которые продолжались весь дальнейший цикл измерений вплоть до подъема АБС в апреле 2015 г. Переход сопровождался скачками глубины приборов до 80 м за несколько часов. В дальнейшем происходили согласованные колебания глубины приборов с размахом до 50–100 м, а в конце марта – начале апреля 2015 г. – до 150–250 м. Причина такой смены поведения АБС связана с выходом из строя четырех стеклянных сфер на глубинах 3215–3220 м и потерей плавучести системы в придонном слое. Возможно, влияние также оказала рыболовная сеть, зацепившаяся за АБС на глубине 1915–1920 м и увеличившая парусность ее нижней части.

Благодаря усилившемуся качанию АБС за счет интенсификации воздействия течений при уменьшении плавучести удалось получить интересные результаты. Во всей толще вод имела место изменчивость на масштабах 27,8–42,6 сут; предполагается, что она связана с динамическими процессами, что требует проверки по данным о течениях. Процессы меньшего временного масштаба протекали в верхнем и глубинном слоях, в основном независимо. В частности, колебания на масштабе 8–13 сут происходили как в глубинном, так и в промежуточном слоях, однако когерентными во всей толще вод они были лишь в апреле 2015 г. Наиболее значительные аномалии температуры развивались на масштабе 8–13 сут в декабре 2014 г. – январе 2015 г., были ограничены промежуточным слоем и отражали процесс зимнего конвективного перемешивания.

В конце периода наблюдений, 4–7 апреля 2015 г., в районе АБС проходил крупный антициклонический вихрь, затронувший всю толщу вод и вызвавший значительные аномалии измеренных параметров. Синоптические вихри, проникавшие в глубинный слой, ранее уже наблюдались в районе к северу от АБС между приморским и северокорейским берегами [12, 22]. В отдельные периоды времени во всей толще вод наблюдались квазиинерционные колебания; в частности, в январе 2015 г. это объясняется сильным ветром и взаимодействием с антициклоническими структурами синоптического масштаба, которые обеспечивают перенос энергии вниз, в глубинный слой. Подобные явления ранее наблюдались в южной части Японского моря [25, 26] и на шельфе залива Петра Великого [27, 28], а полученные здесь результаты показывают, что их развитие возможно и в глубоководной центральной части моря.

Важным результатом является зарегистрированный положительный тренд температуры придонной воды, который за годовой период наблюдений составил 0,002 °С. Несмотря на то что эта величина близка к точности и стабильности датчика температуры воды, она соответствует полученным ранее многолетним трендам и подтверждает наблюдающийся в

последние десятилетия рост температуры придонных вод моря.

Гранты и программы

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы ТОИ ДВО РАН № 124022100079-4.

Благодарности

Авторы благодарны сотрудникам ТОИ ДВО РАН А.Ю. Лазарюку, И.И. Горину, В.А. Горячеву и профессору СЧУ С. Наму за полезное обсуждение результатов исследований, а также А.В. Артемовой за предоставленные фотографии. Наша благодарность – экипажу НИС «Академик М.А. Лаврентьев» и особенно его капитану В.Б. Птушкину за помощь в постановке и подъеме АБС. Конструкция АБС и руководство ее постановкой и подъемом выполнено инженером Корейского института морских наук и технологий (KIOST) С. Хваном. Средства на проведение экспедиционных работ были предоставлены Федеральным агентством научных организаций России, Фондом развития научных исследований и технологий СЧУ (R&DB Foundation, SNU), Республика Корея, и Президиумом ДВО РАН.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Яричин В.Г. Состояние изученности циркуляции вод Японского моря // Тр. ДВНИГМИ. 1980. Вып. 80. С. 46–61.
2. Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря. Владивосток: ДВО РАН, 1991. 176 с.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 8. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / ред. А.С. Васильев, А.Н. Косарев, Ф.С. Терзиев. Санкт-Петербург: Гидрометеониздат, 2003. 394 с.
4. Danchenkov M.A., Lobanov V.B., Riser S.C., et al. A history of physical oceanographic research in the Japan/East Sea // *Oceanography*. 2006. Vol. 19, No. 3. P. 18–31.
5. Никитин А.А., Данченков М.А., Лобанов В.Б., Юрасов Г.И. Новая схема поверхностной циркуляции Японского моря с учетом синоптических вихрей // Изв. ТИНРО. 2009. Т. 157. С. 158–167.
6. Yoon J.-H., Kim Y.-J. Review on the seasonal variation of the surface circulation in the Japan/East Sea // *Journal of Marine Systems*. 2009. Vol. 78, No. 2. P. 226–236.
7. Park K.-A., Park J.-E., Choi B.-J., et al. An oceanic current map of the East Sea for science textbooks based on scientific knowledge acquired from oceanic measurements // *Journal of the Korean Society of Oceanography*. 2013. Vol. 18, No. 4. P. 234–265.
8. Takematsu M., Nagano Z., Ostrovskii A.G., et al. Direct measurements of deep currents in the northern Japan Sea // *Journal of Oceanography*. 1999. Vol. 55, No. 2. P. 207–216.
9. Senjyu T., Shin H.-R., Yoon J.-H., et al. Deep flow fields in the Japan/East Sea as deduced from direct current measurements // *Deep Sea Research II*. 2005. Vol. 52, No. 11–13. P. 1726–1741.
10. Зенкевич Н.Л., Медведев В.С., Скорнякова Н.С. Основные черты геологии и гидрологии Японского моря / [отв. ред. В.Н. Степанов]; Акад. наук СССР. Ин-т океанологии. Москва: Изд-во Акад. наук СССР, 1961. 224 с.
11. Danchenkov M.A. Bottom topography for oceanographic research of the Japan Sea // *Asia-Pacific Journal of Marine Science and Education*. 2025. Vol. 15, No. 1. P. 14–32.
12. Лобанов В.Б., Пономарев В.И., Салюк А.Н. и др. Структура и динамика синоптических вихрей северной части Японского моря // *Дальневосточные моря России: в 4 кн.* / гл. ред. В.А. Акулиничев. Кн. 1: Океанологические исследования / отв. ред. В.Б. Лобанов, В.А. Лучин. М.: Наука, 2007. С. 450–473.
13. Budyansky M., Ladychenko S., Lobanov V. et al. Evolution and Structure of a Mesoscale Anticyclonic Eddy in the Northwestern Japan Sea and Its Exchange with Surrounding Waters: In Situ Observations and Lagrangian Analysis // *Ocean Dynamics*. 2024. Vol. 74, No. 11–12. P. 901–917. <https://doi.org/10.1007/s10236-024-01631-w>.
14. Жабин И.А., Дмитриева Е.В., Таранова С.Н., Лобанов В.Б. Циркуляция вод и мезомасштабные вихри в Японском море по данным спутниковой альтиметрии // *Исследование Земли из космоса*. 2023. № 6. С. 52–72.
15. SBE Scientific. CTDs: Moored. URL: <https://www.seabird.com/moored/>.
16. S4 Current Meter. User's manual. 4th edition. Aug. 1994. Revised March 1999. InterOcean systems, Inc. USA. P. E1–E4. URL: <http://www.interoceansystems.com/s4options.htm>.
17. Thomson R.E., Emery W.J. Data Analysis Methods in Physical Oceanography, 3rd ed. New York, USA: Elsevier Science, 2014. 728 p. DOI: 10.1016/C2010-0-66362-0.

18. Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1998. Vol. 79, No. 1. P. 61–78.
19. Polster A., Fabian M., Villinger H. Effective resolution and drift of Paroscientific pressure sensors derived from long-term seafloor measurements // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2009. Vol. 10, No. 8. Artno. Q08008. <https://doi.org/10.1029/2009GC002532>.
20. Talley L.D., Lobanov V.B., Ponomarev V.I., et al. Deep convection and brine rejection in the Japan Sea // *Geoph. Res. Lett.* 2003. Vol. 30, No. 4. P. 1159. DOI: 10.1029/2002GL016451.
21. Kim K.-R., Kim G., Kim K., et al. A sudden bottom-water formation during the severe winter 2000–2001: The case of the East/Japan Sea // *Geophys. Res. Lett.* 2002. Vol. 29, No. 8. Artno. L1234. <https://doi.org/10.1029/2001GL014498>.
22. Лобанов В.Б., Сергеев А.Ф., Марьина Е.Н. и др. Исследование состояния и изменчивости вод северо-западной части Японского моря в осенне-зимний период в 62-м рейсе НИС “Академик Опарин” // *Океанология*. 2021. Т. 61, № 5. С. 838–840.
23. Alford M.H., MacKinnon J.A., Simmons H.L., Nash J.D. Near-Inertial Internal Gravity Waves in the Ocean // *Annual Review of Marine Science*. 2016. Vol. 8. P. 95–123.
24. Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень ДВНИГМИ. Владивосток: ДВНИГМИ, 2015. 217 с. URL: <http://www.ferhri.ru/napravleniya-rabot/proekty/2017-07-28-00-41-16.html>.
25. Noh S., Nam S. Observations of enhanced internal waves in an area of strong mesoscale variability in the southwestern East Sea (Japan Sea) // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. P. 9068. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65751-1>.
26. Kawaguchi Y., Wagawa T., Igeta Y. Near-inertial internal waves and multiple-inertial oscillations trapped by negative vorticity anomaly in the central Sea of Japan // *Progress in Oceanography*. 2020. Vol. 181. Artno. 102240. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2019.102240>.
27. Трусенкова О.О., Лобанов В.Б., Лазарюк А.Ю. Течения в юго-западной части залива Петра Великого, Японское море (по данным стационарного буйа Wavescan, 2016 г.) // *Океанология*. 2022. Т. 62, № 3. С. 365–379. <https://doi.org/10.31857/S0030157422030145>.
28. Trusenкова O., Yaroshchuk I., Kosheleva A., et al. Near-Inertial Oscillations of Thermocline in the Shelf Area off Vladivostok, the Sea of Japan, from a Set of Thermostings // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 12. Artno. 2263. <https://doi.org/10.3390/jmse12122263>.

Справка об авторах

ТРУСЕНКОВА Ольга Олеговна, к.т.н., в.н.с.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041 г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: физическая океанология, климат, многомерный статистический анализ данных, гидродинамическое моделирование океана

Тел.: +7(423) 231-1400, факс: +7(423) 231-2573

E-mail: trolia@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0001-6756-5354

ЛОБАНОВ Вячеслав Борисович, к.г.н., зав. лабораторией

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041 г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: физическая океанология, инструментальные наблюдения в океане, дистанционное зондирование Земли из космоса

Тел.: +7(423) 231-1400, факс: +7(423) 231-2573

E-mail: lobanov@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0001-9104-5578



Для цитирования:

Трусенкова О.О., Лобанов В.Б., Ладыченко С.Ю., Каплуненко Д.Д., Чанг К.-И. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ГЛУБОКОВОДНОЙ АВТОНОМНОЙ БУЙКОВОЙ СТАНЦИИ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ // Подводные исследования и робототехника. 2025. № 3 (53). С. 15–30. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_53_03_02. EDN: UBRSTT.

ЛАДЫЧЕНКО Светлана Юрьевна, н.с.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041 г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43

Область научных интересов: океанология, дистанционное зондирование Земли из космоса

Тел.: (423) 231-1400

E-mail: svemos@poi.dvo.ru

ORCID: 0009-0007-0239-8285

КАПЛУНЕНКО Дмитрий Дмитриевич, к.т.н., с.н.с.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: климатические изменения, инструментальные наблюдения в океане, машинное обучение, гидродинамическое моделирование

Тел.: +7(4232)311-400

E-mail: dimkap@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-7791-6733

ЧАНГ Кюн-Иль, PhD, профессор, вице-президент

Геосистем рисёрч корпорейшн

Адрес: № 306, Ханлим Хьюман Тауэр, 172, ЛС-ро, Ганпо-си, Гёйонги-до, 15807, Республика Корея

Область научных интересов: физическая океанология, экспериментальная океанография, моделирование

Тел.: +082-031-5180-5700

STATISTICAL ANALYSIS OF MEASUREMENTS AT THE DEEP MOORING OFF THE NORTHWESTERN YAMATO RISE, THE SEA OF JAPAN

O.O. Trusenkova, V.B. Lobanov, S.Yu. Ladychenko, D.D. Kaplunenko, K.-I. Chang

Statistical analysis of unique data from deep mooring installed off the northwestern Yamato Rise, the Sea of Japan, from April 22, 2014, through April 13, 2015, is performed. Dynamic processes in the deep waters are studied from proxies, namely, depth and tilt of instruments rigidly fixed to the cable, as their variation was induced by currents. Dynamic processes in the thermocline are analyzed from satellite altimetry and infrared imagery. Timescales in the thermocline are estimated from temperature wavelet spectra and in the entire water column from the joint wavelet spectra of depth and temperature. The mooring behavior underwent a shift in late July 2014. At the beginning, fluctuations of the instrument depths were weak but they became intense afterwards, probably due to the intensified sensitivity to currents under the decrease of mooring buoyancy in the bottom layer. The shift evidently occurred on July 28, 2014 and was accompanied by abrupt depth jumps up to 80 m in few hours. After that, synchronized depth fluctuations of all instruments occurred within the range of 50 to 100 m and of 150 to 250 m in late March through early April 2015. Processes on 8-to-13 day's timescale evolved mostly independently in the thermocline and deep layer but they were coherent on April 4–7, 2015, when a large anticyclonic eddy moved near the mooring, affecting the entire water column. In January 2015 near-inertial oscillations were detected in the entire water column, probably forced by the strong wind and anticyclonic mesoscale features. An increasing trend of bottom temperature, equal to 0,002 °C per year, is revealed.

Keywords: deep mooring, depth, temperature, satellite altimetry, satellite infrared imagery, wavelet analysis, timescales, mesoscale eddies, near-inertial oscillations

References

1. Yarichin V.G. Sostojanie izuchennosti cirkuljaccii vod Japonskogo morja. *Trudy DVNIGMI*, 1980. Iss. 80. P. 46-61. [In Russ.]
2. Yurasov G.I., Yarichin V.G. *Techenija Japonskogo morja*. Vladivostok: DVO RAN, 1991. 176 p. [In Russ.]
3. *Gidrometeorologija i gidrohimija morej*. Vol. 8. Yaponskoe more. Iss. 1. *Gidrometeorologicheskie usloviya*. Proekt "Morya". SPb.: *Gidrometeoizdat*, 2003. 394 p. [In Russ.]
4. Danchenkov M.A., Lobanov V.B., Riser S.C., et al. A history of physical oceanographic research in the Japan/East Sea. *Oceanography*, 2006. Vol. 19, No. 3. P. 18-31.
5. Nikitin A.A., Danchenkov M.A., Lobanov V.B., Jurasov G.I. Novaja shema poverhnostnoj cirkuljaccii Japonskogo morja s uchetom sinopticheskikh vihrej. *Izvestija TINRO*, 2009. Vol. 157. P. 158-167. [in Russ.]
6. Yoon J.-H., Kim Y.-J. Review on the seasonal variation of the surface circulation in the Japan/East Sea. *Journal of Marine Systems*, 2009. Vol. 78, No. 2. P. 226-236.
7. Park K.-A., Park J.-E., Choi B.-J., et al. An oceanic current map of the East Sea for science textbooks based on scientific knowledge acquired from oceanic measurements. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 2013. Vol. 18, No. 4. P. 234-265.
8. Takematsu M., Nagano Z., Ostrovskii A.G., et al. Direct measurements of deep currents in the northern Japan Sea. *Journal of Oceanography*, 1999. Vol. 55, No. 2. P. 207-216.
9. Senjyu T., Shin H.-R., Yoon J.-H., et al. Deep flow fields in the Japan/East Sea as deduced from direct current measurements. *Deep Sea Research II*, 2005. Vol. 52, No. 11-13. P. 1726-1741.
10. Zenkevich N.L., Medvedev V.S., Skornjakova N.S. *Osnovnye cherty geologii i gidrologii Japonskogo morja*. Moskva: Izd-vo Akad. nauk SSSR, 1961. 224 p. [in Russ.]
11. Danchenkov M.A. Bottom topography for oceanographic research of the Japan Sea. *Asia-Pacific Journal of Marine Science and Education*, 2025. Vol. 15, No. 1. P. 14-32.
12. Lobanov V.B., Ponomarev V.I., Salyuk A.N., et al. *Struktura i dinamika sinopticheskikh vihrej severnoj chasti Japonskogo morja*. Dal'nevostochnye morja Rossii, Kn. 1: *Okeanologicheskie issledovaniya*. M.: Nauka, 2007. P. 450-473. [in Russ.]
13. Budyansky M., Ladychenko S., Lobanov V. et al. Evolution and Structure of a Mesoscale Anticyclonic Eddy in the Northwestern Japan Sea and Its Exchange with Surrounding Waters: In Situ Observations and Lagrangian Analysis. *Ocean Dynamics*, 2024. Vol. 74, No. 11-12. P. 901-917. <https://doi.org/10.1007/s10236-024-01631-w>.
14. Zhabin I.A., Dmitrieva E.V., Taranova S.N., Lobanov V.B. Circulation and Mesoscale Eddies in the Sea of Japan from Satellite Altimetry Data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023. Vol. 59, No. 10. P. 1409-1426. <https://doi.org/10.1134/S0001433823120253>.
15. SBE Scientific. CTDs: Moored. <https://www.seabird.com/moored/>.
16. S4Current Meter Options. San Diego: InterOcean systems, inc, 2011. 4 p. <http://www.interoceansystems.com/s4options.htm>.
17. Thomson R.E., Emery W.J. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*, 3rd ed. New York, USA: Elsevier Science, 2014. 728 p. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66362-0>.

18. Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998. Vol. 79, No. 1. P. 61-78.

19. Polster A., Fabian M., Villinger H. Effective resolution and drift of Paroscientific pressure sensors derived from long-term seafloor measurements. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2009. Vol. 10, No. 8. Artno. Q08008. <https://doi.org/10.1029/2009GC002532>.

20. Talley L.D., Lobanov V.B., Ponomarev V.I., *et al.* Deep convection and brine rejection in the Japan Sea. *Geoph. Res. Lett.*, 2003. V. 30, No. 4. 1159. <https://doi.org/10.1029/2002GL016451>.

21. Kim K.-R., Kim G., Kim K., *et al.* A sudden bottom-water formation during the severe winter 2000–2001: The case of the East/Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, 2002. Vol. 29, No. 8. L1234. <https://doi.org/10.1029/2001GL014498>.

22. Lobanov V.B., Sergeev A.F., Maryina E.N. *et al.* Study of the State and Variability of the Northwestern Japan Sea in the Autumn–Winter Period on Cruise 62 of the R/V Akademik Oparin. *Oceanology*, 2021. Vol. 61, No. 5. P. 742-744. <https://doi.org/10.1134/S0001437021050076>.

23. Alford M.H., MacKinnon J.A., Simmons H.L., Nash J.D. Near-Inertial Internal Gravity Waves in the Ocean. *Annual Review of Marine Science*, 2016. Vol. 8. P. 95-123. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010814-015746>.

24. Ezhesmesjachnyj gidrometeorologicheskij bjulleten' DVNIGMI, 2015. Vladivostok: DVNIGMI, 2015. 217 p. <http://www.ferhri.ru/napravleniya-rabot/proekty/2017-07-28-00-41-16.html>.

25. Noh S., Nam S. Observations of enhanced internal waves in an area of strong mesoscale variability in the southwestern East Sea (Japan Sea). *Scientific Reports*, 2020. Vol. 10. Artno. 9068. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65751-1>.

26. Kawaguchi Y., Wagawa T., Igeta Y. Near-inertial internal waves and multiple-inertial oscillations trapped by negative vorticity anomaly in the central Sea of Japan. *Progress in Oceanography*, 2020. Vol. 181. Artno. 102240. DOI <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2019.102240>.

27. Trusenkov O.O., Lobanov V.B., Lazaryuk A.Yu. Currents in the southwestern Peter the Great Bay, the Sea of Japan, from the stationary Wavescan buoy data in 2016. *Oceanology*, 2022. Vol. 62, No. 3. P. 365-379. <https://doi.org/10.1134/S0001437022030146>.

28. Trusenkov O., Yaroshchuk I., Kosheleva A., *et al.* Near-Inertial Oscillations of Thermocline in the Shelf Area off Vladivostok, the Sea of Japan, from a Set of Thermostrings. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024. Vol. 12, No. 12. Artno. 2263. <https://doi.org/10.3390/jmse12122263>.

Recommended citation:

Trusenkov O.O., Lobanov V.B., Ladychenko S.Yu., Kaplunenko D.D., Chang K.-I. STATISTICAL ANALYSIS OF MEASUREMENTS AT THE DEEP MOORING OFF THE NORTHWESTERN YAMATO RISE, THE SEA OF JAPAN. Underwater investigations and robotics. 2025. No. 3 (53). P. 15–30. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_53_03_02. EDN: UBRSTT.

Information about the authors

TRUSENKOVA Olga O., Ph.D., Leading researcher
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch,
Russian Academy of Sciences

Address: 43 Baltiyskaya Str., Vladivostok, Russia, 690041

Research interests: physical oceanography, climate, multivariate data analysis, hydrodynamic modeling of the ocean

Phone: +7(423) 231-1400. **Fax:** +7(423) 231-2573

E-mail: trolia@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0001-6756-5354

LOBANOV Vyacheslav Borisovich, head of laboratory
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch,
Russian Academy of Sciences

Address: 43 Baltiyskaya Str., Vladivostok, Russia, 690041

Research interests: physical oceanography, instrumental observations in the ocean, remote sensing

Phone: +7(423) 231-1400. **Fax:** +7(423) 231-2573

E-mail: lobanov@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0001-9104-5578

LADYCHENKO Svetlana Yurievna, researcher
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch,
Russian Academy of Sciences

Address: 43 Baltiyskaya Str., Vladivostok, Russia, 690041

Research interests: oceanography, remote sensing

Phone: +7(423) 231-1400. **Fax:** +7(423) 231-2573

E-mail: svemos@poi.dvo.ru

ORCID: 0009-0007-0239-8285

KAPLUNENKO Dmitrii Dmitrievich, Senior Researcher
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch,
Russian Academy of Sciences

Address: 690041, Vladivostok, Baltiyskaya str., 43

Scientific interests: climate change, instrumental measurements in the ocean, machine learning, hydrodynamic modeling

Phone: +7(4232)311-400

E-mail: dimkap@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-7791-6733

CHANG Kyung-Il, PhD, professor, Vice Chairman
Geosystem Research Corporation

Address: #306 Hanlim Human Tower, 172, LS-ro, Gunpo-si, Gyeonggi-do, 15807, Republic of Korea

Scientific interests: physical oceanography, ocean observations, modeling

Phone: +082-031-5180-5700

