

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЙ У ПОБЕРЕЖЬЯ ЮГО-ВОСТОЧНОГО ПРИМОРЬЯ В ОСЕННЕ-ЗИМНИЙ ПЕРИОД

**В.Б. Лобанов, А.Ф. Сергеев, О.О. Трусенкова,
С.Ю. Ладыченко, Е.Н. Марьина, П.Е. Щербинин**

В работе исследуется осенне-зимняя перестройка течений и характеристик вод на шельфе юго-восточного Приморья (северо-западная часть Японского моря). С этой целью используются данные наблюдений на автономной донной станции (АДС), оснащенной доплеровским профилографом течений и датчиками океанографических параметров, а также привлекаются спутниковая информация и результаты судовых СТД-измерений в период октябрь–декабрь 2021 г. Этот сезон характеризуется бимодальностью основного потока Приморского течения со сменой его направления с северо-восточного (реверсивная мода) в октябре на юго-западное (нормальная мода) в ноябре–декабре. Короткопериодные изменения течений, с наиболее повторяемыми периодами 6.5 и 12.5 сут, обусловлены формированием над кромкой шельфа вихрей синоптического масштаба, проходивших через точку постановки АДС и хорошо различимых на спутниковых изображениях. Перенос теплых вод с востока Северо-западной ветвью Цусимского течения и начало зимнего конвективного перемешивания обусловили изменение вертикальной структуры вод с хорошо выраженной бароклинной в октябре на баротропную к середине ноября, а также повышение температуры вод в прибрежной зоне Приморья.

Ключевые слова: автономная донная станция, доплеровский профилограф течений, спутниковые изображения в инфракрасном диапазоне, северо-западная часть Японского моря, континентальный шельф, синоптические вихри, вертикальная структура вод, бароклинность, баротропность.

Введение

По сложившимся представлениям циркуляция вод в северо-западной части Японского моря у побережья Приморского края определяется Приморским течением, направленным на запад-юго-запад над зоной шельфа и континентального склона [1, 2, 3]. Начиная с первых наблюдений с помощью бутылочной почты [4], последующих судовых съемок [5], инструментальных наблюдений и диагностических расчетов с помощью численных моделей подтверждается преобладание вдоль побережья Приморского края потока вод юго-западного направления [1, 2]. Однако наблюдения последних лет с использованием поверхностных дрейфтеров, спутниковой информации и данных автономных буйковых станций показывают отклонение течения от преобладающего западного направления, его меандрирование и формирование вихрей синоптического масштаба [6–9]. В осенний

период отмечено формирование реверсивного течения, направленного вдоль кромки шельфа в обратном направлении, на восток-северо-восток [10–12]. Также осенью у юго-восточного побережья Приморья развивается интенсивный апвеллинг [13, 14], изменяя при этом структуру Приморского течения. Кроме того, структура течения усложняется в конце осени – начале зимы, когда к побережью Приморья подходит Северо-западная ветвь Цусимского течения [10], приносящая относительно теплые воды повышенной солености с востока, из района о-ва Хоккайдо. Таким образом, новые наблюдения показывают, что характер Приморского течения довольно изменчив и отличается от сложившегося представления о нем как о стационарном, направленном на запад потоке вод.

Для исследования изменчивости течений и других океанографических параметров в осенне-зимний период на шельфе северо-западной части Японского моря в районе пос. Валентин была установлена ав-

тономная донная станция (АДС), результаты измерений на которой в октябре–ноябре 2021 г. обсуждаются в настоящей работе.

■ Данные и методы

АДС в районе пос. Валентин была установлена 6 октября 2021 г. в экспедиции на НИС «Профессор Гагаринский» (рейс № 77) и поднята 19 декабря 2021 г. на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (рейс № 97). Продолжительность измерений составила около 75 суток. Станция была установлена в точке с координатами $43^{\circ}01,6'$ с.ш. и $134^{\circ}20,0'$ в.д. на глубине 81 м (рис. 1, а) и состояла из расположенного в 3 м от дна направленного вверх доплеровского профилографа течений, а также закрепленных рядом с ним измерителя (логгера) температуры, электропроводности и давления и датчика содержания растворенного кислорода. Приборы поддерживались вертикально на синтетическом тросе тремя стеклянными сферами плавучести в пластиковых кожухах общей грузоподъемностью 75 кг. С донным якорем весом 75 кг

станция соединялась акустическим размыкателем, который обеспечивал ее отсоединение для всплытия при подъеме по команде с пульта управления на судне (рис. 1, б).

Доплеровский профилограф течений WHS-300-I-UG161 (Teledyne RD Instruments, США) обеспечивал измерение вертикального профиля скорости и направления течения от горизонта 72 м до поверхности моря с шагом 3 м. Рабочая частота прибора составляет 300 кГц, точность измерений скорости течений 0,5% от величины скорости, разрешение – 1 мм/с. Измерения проводились с дискретностью 15 мин. Дальность измерения прибора (толщина слоя морской воды) зависит от условий среды и обычно составляет 70–100 м. В нашем случае измерения проводились до поверхности моря, однако данные для верхнего слоя 0–12 м содержали большое количество ошибок и поэтому в настоящей работе не используются. Наиболее показательным с точки зрения внутрисезонной изменчивости течений был слой 15–24 м, который и использовался для дальнейшего анализа, при этом горизонты 15, 18, 21 и 24 м, к которым отнесены измеренные скорости, представляют собой центры

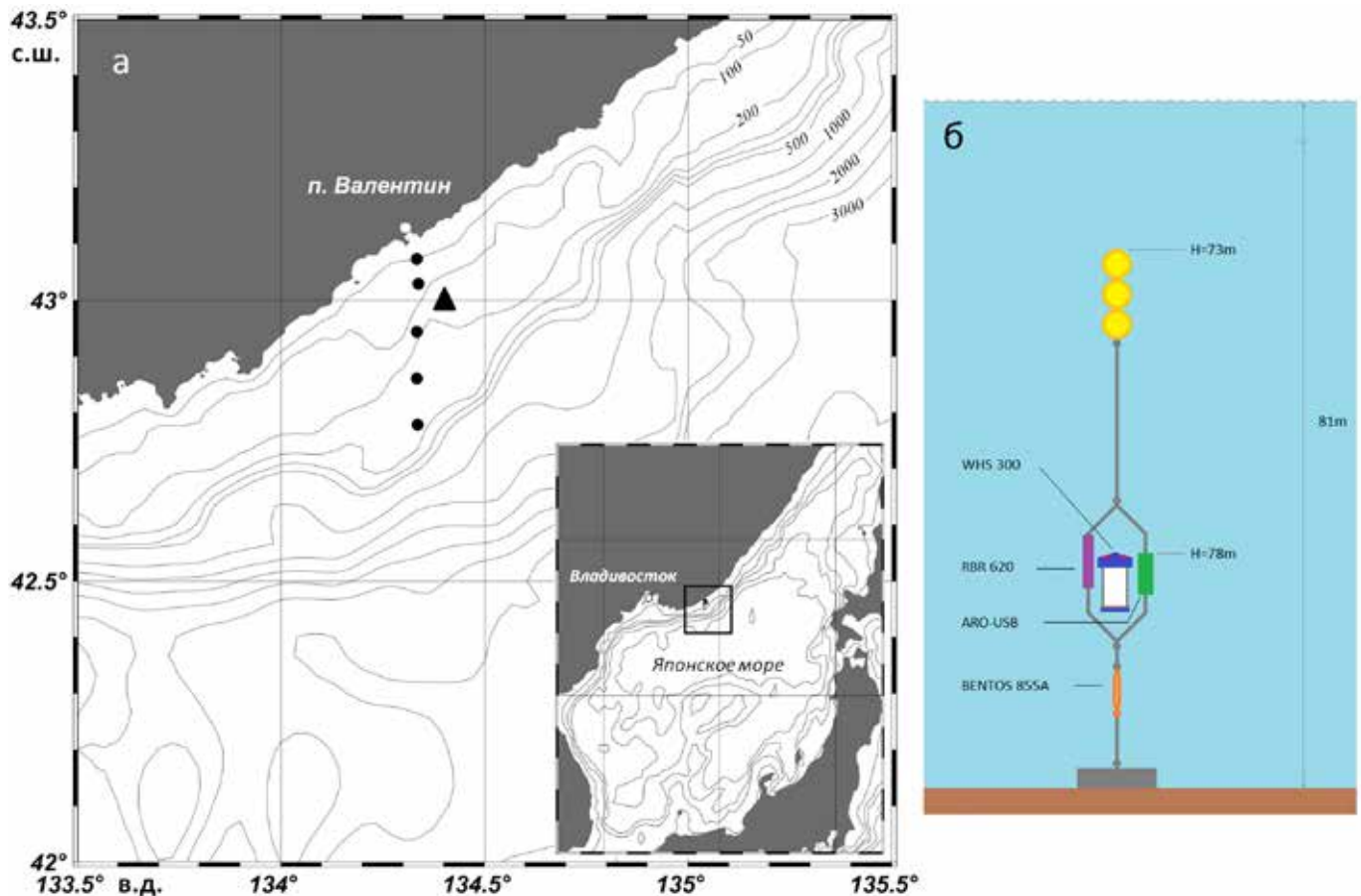


Рис. 1. Район исследования; треугольником отмечено место постановки АДС, кружками – станции разреза от 19 декабря (рейс № 97 НИС «Академик М.А. Лаврентьев»; см. рис. 8), показаны изобаты (м); на врезке показано положение района исследования в Японском море (а). Схема АДС (б). Н – глубина, остальные обозначения приведены в тексте

трехметровых слоев, в которых были получены значения скоростей течений.

Используемый в качестве логгера СТД-зонд RBR XR 620 (RBR Ltd., Канада) обеспечивал измерение температуры воды, электропроводности и давления на глубине расположения датчиков (78 м) с дискретность 15 мин. Точность измерения этих параметров составляет соответственно $\pm 0.002^\circ\text{C}$, $\pm 0.003\text{ См/м}$ и 0.05% от полной шкалы. Оптический измеритель содержания растворенного в воде кислорода ARO-USB (JFE Advantech Co., Ltd, Япония) также проводил измерения с дискретностью 15 мин. с точностью $\pm 2\%$ от полной шкалы. Акустический размыкатель Benthos 865A (Teledyne Benthos Inc., США) обеспечивал отсоединение АДС от донного якоря для всплытия при подъеме по команде с пульта управления на судне.

Для анализа вертикальной структуры вод в месте постановки АДС были проведены СТД-зондирования 6 октября и 5 ноября 2021 г. с борта НИС «Профессор Гагаринский», а также выполнен разрез поперек шельфа в день подъема АДС 19 декабря 2021 г. с НИС «Академик М.А. Лаврентьев». Зондирования выполнялись СТД-зондом SBE 911 plus (Sea-Bird Electronics, Inc., США), обеспечивавшим точность измерений температуры воды не хуже $\pm 0.001^\circ\text{C}$ и электропроводности $\pm 0.01\text{ См/м}$.

Для интерпретации полученных результатов использовались изображения морской поверхности в инфракрасном (ИК) диапазоне, измеренные радиометрами AVHRR с искусственных спутников Зем-

ли (ИСЗ) серии NOAA, которые были получены из Центра регионального спутникового мониторинга окружающей среды ИАПУ ДВО РАН (<http://satellite.dvo.ru/>).

К анализу привлекались данные о ветре в районе постановки АДС. Это ежечасные данные за октябрь–декабрь 2021 г. из реанализа ERA5 (Reanalysis, версия 5) Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF), которые были взяты в ближайшем к АДС узле (43.0° с.ш. , 134.25° в.д.) четвертыградушной сетки.

Для анализа течений по данным АДС были построены векторные диаграммы, в англоязычной литературе называемые spaghetti diagrams. На такой диаграмме последовательно откладываются векторные отрезки пути, которые могли быть пройдены за время между измерениями, начиная от момента постановки прибора 6 октября в 21:45 и до его подъема 19 декабря в 12:15. Их длина рассчитывается как произведение измеренной скорости и дискретности измерений (15 мин), а направление совпадает с направлением скорости (рис. 2).

Как показали построенные гистограммы, статистические распределения скорости течения на горизонтах унимодальны, но отличаются от нормального наличием асимметрии и уплощенности вершины. Поэтому в качестве средних скоростей принимались медианы, а разброс оценивался по первому и третьему квартилям. Статистические взаимосвязи между

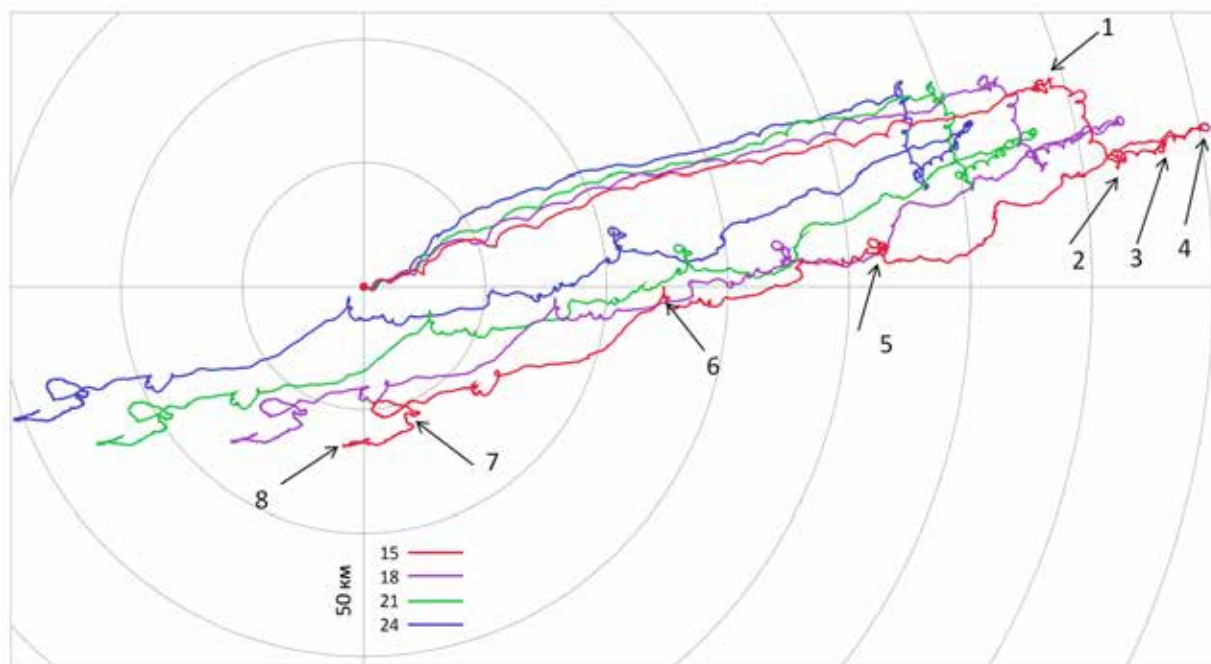


Рис. 2. Векторные диаграммы скорости течения в слоях со средней глубиной 15, 18, 21 и 24 м; расстояние между окружностями составляет 50 км; номерами помечены события, описанные в табл. 1

временными рядами скорости и направления течения на разных горизонтах оценивались на основе непараметрических ранговых коэффициентов корреляции по Спирмену. Наименьшее число степеней свободы для рассматриваемых временных рядов составляет 23, т.е. по критерию Фишера значимыми являются коэффициенты корреляции, превышающие 0.42.

Хорошо зарекомендовавшим себя методом определения масштабов временной изменчивости нестационарных временных рядов является вейвлет-преобразование, позволяющее оценивать спектры, локализованные во времени [15]. Локализация обеспечивается использованием финитных функций в качестве так называемых материнских вейвлетов, которые масштабируются для охвата заданных диапазонов частот (периодов или скейлов) и сдвигаются по шкале времени. Имеет место «соотношение неопределенности» между разрешением по шкале периодов и по времени, причем комплексные вейвлеты дают лучшее разрешение по периодам, вещественные – по времени, являясь более подходящими для временной локализации событий [15].

В данной работе используется вещественный материнский вейвлет «производная гауссиана» 9-го порядка (DOG-9), дающий хорошее разрешение по шкале времени и неплохое – по шкале периодов. Спектры вычисляются как квадрат вейвлет-преобразования, т.е. на один период приходится два спектральных максимума. Статистическая значимость на 90%-м уровне оценивается с помощью теоретического спектра красного шума. Следует учитывать возможные искажения спектров за счет краевых эффектов; эти зоны (так называемые конусы влияния краевых эффектов) соответствуют интервалу, за который значение вейвлета уменьшается в e^2 раз, т.е. они расширяются с ростом периода [15]. Периоды колебаний в каждый момент времени определяются по максимальным значениям мощности спектров внутри заданных диапазонов. Интерпретация спектров правомерна только вне конусов влияния. Расчеты производились с помощью модифицированной нами процедуры Торренса и Компо [15], которая доступна в Интернете.

■ Результаты наблюдений

Характеристика течений на АДС

Векторные диаграммы для горизонтов 15, 18, 21 и 24 м демонстрируют изменение течений от осени к зиме, в котором обращает на себя внимание бимодальность потока на протяжении периода измере-

ний (рис. 2). В октябре преобладало восточное-северо-восточное (ВСВ) течение, которое 20 октября сменилось на южное-юго-восточное (событие 1, рис. 2, табл. 1), но после 25 октября (событие 2, рис. 2, табл. 1) снова восстановилось. Однако 1 ноября произошел поворот течения на противоположное (событие 4, рис. 2 и табл. 1), и доминирование западного-юго-западного (ЗЮЗ) направления сохранялось до конца наблюдений.

Таблица 1. События на векторной диаграмме течений

№ события	Начало	Конец	Событие
1	19.10, 10:00	21.10, 09:00	Поворот течения на юг
2	25.10, 06:00	27.10, 03:15	Восстановление северо-восточного потока
3	28.10, 01:45	29.10, 20:15	Вихревое движение
4	31.10, 12:15	01.11, 20:45	Поворот течения на запад-юго-запад
5	13.11, 22:45	18.11, 22:45	Вихревое движение
6	26.11, 23:45	28.11, 00:15	Вихревое движение
7	09.12, 21:15	12.12, 14:15	Вихревое движение
8	16.12, 19:15	19.12, 12:15	Поворот течения на северо-восток

Бимодальность хорошо проявляется в гистограммах направлений скорости течения. В течение всего периода наблюдений зарегистрированы два максимума повторяемости на 165° и 15° (рис. 3, а), которые соответствуют ВСВ и ЗЮЗ течениям соответственно (с учетом того, что в математической нотации 0° соответствует вектору, направленному на восток, а при возрастании или убывании угла поворот вектора происходит против или по часовой стрелке соответственно). В октябре имеется единственный ВСВ максимум повторяемости, в ноябре и декабре главные максимумы соответствуют ЗЮЗ течениям (рис. 3, б для горизонта 15 м). Слабый широкий (от -15° до 25°) вторичный максимум в декабре соответствует течениям восточных румбов, в основном, во время события 8 (рис. 2, табл. 1).

Следует отметить довольно высокие значения скоростей течений в октябре и ноябре. При средних медианных значениях модуля скорости 17.6–22.8 см/с четверть измеренных величин (3-й квартиль) превышала 25.1–31.1, за исключением горизонта 24 м в октябре, когда 3-й квартиль равнялся 22.3 см/с (табл. 2). При этом в слое 15–21 м скорости были несколько выше в октябре, а на горизонте 24 м – в ноябре. После 1 декабря средняя скорость течений и ее разброс снизились вдвое (табл. 2, рис. 4, а для горизонта 15 м). Неоднократно наблюдалась экстремально высокая

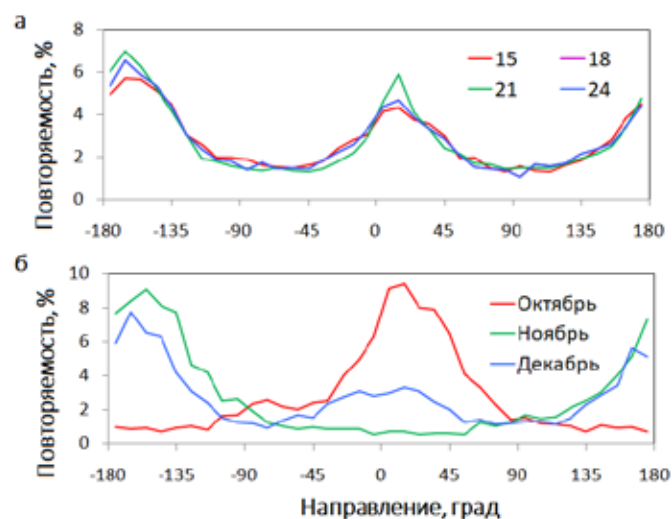


Рис. 3. Повторяемость (%) направлений течений (в математической нотации) в течение всего периода наблюдений на горизонтах 15, 18, 21 и 24 м (а) и в октябре, ноябре и декабре на горизонте 15 м (б); расчеты выполнены для 10-градусных градаций

скорость, в среднем по слою 15–24 м, превышавшая 35.1 см/с, что соответствует 95-му персентилу, т.е. течения были интенсивнее, чем в 95% случаев. Такие эпизоды, длительностью 3–8 ч, имели место 10 и 11 октября, а также 17, 29 и 30 ноября, причем в течение 1–2.5 ч скорости превышали даже 99-й персентиль (44.6 см/с), т.е. течения были интенсивнее, чем в 99% случаев. 10 и 11 октября (282 и 283 сут от начала года), а также 29 и 30 ноября (332 и 333 сут от начала года) были зарегистрированы статистически значимые внутрисуточные колебания скорости течения (см. вейвлет-спектр для горизонта 15 м на рис. 4, б), а эпизод 17 ноября произошел на петлевом участке векторной диаграммы, описывающем вихревое движение (событие 5, рис. 2, табл. 1). Таким образом, высокие скорости связаны с интенсивными синоптическими и короткопериодными движениями.

Важной особенностью зарегистрированных течений является однородность их направления по вертикали. Из-за сбоев в измерениях поверхностного слоя моря сложно говорить о течениях на верхних горизонтах, однако в слое от 15 до 72 м направление течения сохранялось, а все отмечаемые повороты потока, включая петлеобразные движения (см. ниже), происходили синхронно в этой толще вод (рис. 2). Однородность подтверждается наличием статистически значимой взаимосвязи между направлениями течений на разных горизонтах (табл. 2), а также сходством гистограмм направления, причем для горизонтов 18 и 24 гистограммы настолько близки, что почти неразличимы на графике (рис. 3, а). Сильная статистическая взаимосвязь между величинами скорости

Таблица 2. Статистические характеристики течений

Горизонт, м	15	18	21	24
Характеристики скорости течения (см/с)				
Весь период наблюдений				
Медиана	17.5	17.2	16.2	15.6
1-й квартиль	10.5	10.3	9.8	9.2
3-й квартиль	26.6	25.1	23.4	22.0
Октябрь				
Медиана	22.8	21.4	19.5	17.6
1-й квартиль	15.4	14.2	13.1	11.7
3-й квартиль	31.1	29.0	25.4	22.3
Ноябрь				
Медиана	19.8	19.5	18.9	18.6
1-й квартиль	13.6	13.8	13.4	12.6
3-й квартиль	27.9	26.9	25.6	25.1
Декабрь				
Медиана	9.3	9.0	8.8	8.8
1-й квартиль	5.9	5.8	5.6	5.4
3-й квартиль	13.2	12.7	12.3	12.0
Ранговые коэффициенты корреляции по Спирмену между величинами скорости течений на разных горизонтах				
Горизонт, м	18	21	24	
15	0.88	0.77	0.66	
18		0.87	0.75	
21			0.87	
Ранговые коэффициенты корреляции по Спирмену между направлениями течений на разных горизонтах				
Горизонт, м	18	21	24	
15	0.66	0.58	0.53	
18		0.72	0.62	
21			0.70	

течения на разных глубинах также говорит об однородности потока, хотя коэффициенты корреляции и уменьшаются с увеличением расстояния между горизонтами (табл. 2).

Скорости течения уменьшались с глубиной, что особенно заметно в октябре, когда от горизонта 15 м до 24 м уменьшение в среднем составило 5.2 см/с, тогда как в ноябре – 1.2 см/с, в декабре – лишь 0.5 см/с; от месяца к месяцу уменьшался и разброс (табл. 2). Этим обстоятельством объясняется расхождение векторных диаграмм для разных горизонтов (рис. 2). В октябре можно также отметить заметное снижение скорости течений в слоях глубже 30 м, однако в ноябре снижение скорости отмечалось ниже 40–50 м. В декабре поток был еще более однородным по вертикали и скорости течения уменьшались с глубиной незначительно. Таким образом, внутрисезонные изменения касались не только общего направления по-

тока, но и его вертикальной структуры: при переходе от осени к зиме происходила его баротропизация.

На векторных диаграммах заметны петлеобразные участки, когда течение в точке АДС изменяло направление на протяжении нескольких суток, а затем вновь принимало доминирующее направление. Эти события обозначены цифрами 1–3, 5–7 (рис. 2, табл. 1). Наиболее заметный разворот потока по часовой стрелке отмечался 7–10 декабря (событие 7). Ближе к концу периода наблюдений 17 декабря (событие 8) течение изменило направление на обратное. Обычно эти события длились 1–2.5 сут, за исключением события 5, которое продолжалось 6 сут (табл. 1). Такие относительно кратковременные повороты течения могут происходить при прохождении через место постановки динамических структур синоптического и мезомасштабов – вихрей, струй и т.п.

Вейвлет-анализ

Для оценки масштабов изменчивости был рассчитан вейвлет-спектр модуля скорости течения на горизонте 15 м. В течение всего времени наблюдений имели место статистически значимые максимумы в диапазоне периодов 3–20 сут, причем до середины ноября в этом диапазоне имелось по 2 максимума (рис. 4, б). Периоды этих колебаний были определены по максимальной мощности спектра (см. раздел «Данные и методы») и приведены на рис. 4, в. Была оценена повторяемость этих периодов, причем гистограмма оказалась бимодальной, с максимумами на 6.5 и 12.5 сут (рис. 4, г). Для контроля были рассчитаны гистограммы максимальных периодов в диапазонах 3–9 и 10–18 сут по отдельности, которые оказались унимодальными, с максимумами на соответствующих периодах. Характерной особенностью спектра является перенос энергии от масштабов 6–7 сут к масштабам 15–18 сут в период с середины до конца октября (290–303 сут от начала года), после чего к 6 ноября (310 сут года) произошел перенос энергии к еще большим масштабам (40–50 сут), колебания на которых присутствуют в течение всего времени наблюдений, но могут корректно интерпретироваться только в период вне конуса влияния краевых эффектов, т.е. 1–21 ноября (305–325 сут). Возможной причиной переноса энергии от меньших масштабов к большим может быть слияние динамических структур. Периоды колебаний скорости соответствуют временам прохождения динамических структур через место постановки АДС. Размеры вихрей в районе залива Петра Великого были ранее определены как 20–60 км [8], тогда скорости их перемещения можно оценить как

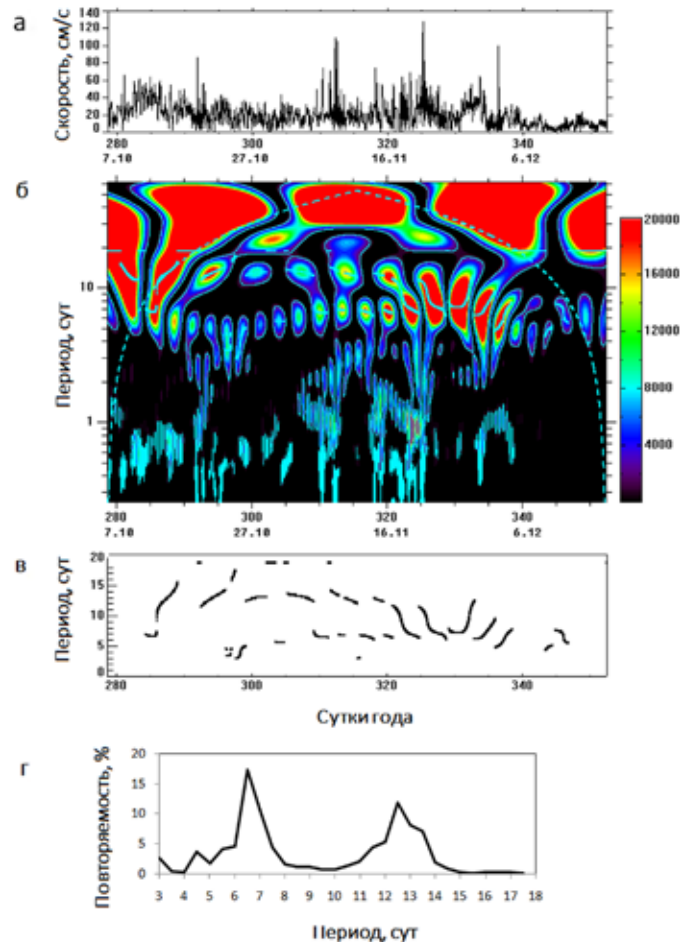


Рис. 4. Величина (модуль) скорости течения (см/с) на горизонте 15 м (а), ее вейвлет-спектр (см²/с²) (б), периоды (сут) максимальной, статистически значимой мощности в диапазоне 3–18 сут (вне конуса влияния) (в) и повторяемость (%) для градаций 0.5 сут периодов максимальной мощности (г); показаны конус влияния краевых эффектов (голубой пунктир), 90%-й уровень статистической значимости (голубые сплошные линии) и периоды максимальной мощности (голубые точки) (б); 280–350 сут от начала года соответствуют периоду времени от 8 октября до 17 декабря

3.6–10.7 и 1.9–5.6 см/с для характерных времен прохождения 6.5 и 12.5 сут соответственно.

В вейвлет-спектре присутствуют также короткопериодные колебания (с периодами менее 1 сут), которые статистически значимы до второй недели декабря (341 сут; рис. 5, б). На векторных диаграммах также наблюдаются короткопериодные волнообразные изгибы, которые особенно хорошо видны в октябре при ВСВ потоке (рис. 3). Эти колебания, вероятно, связаны с инерционными движениями или приливным воздействием.

Изменение характеристик вод в придонном слое

Изменение температуры и солености в придонном слое по данным АДС показано на рис. 5. В октябре температура воды изменялась в пределах 1.5–2.1 °С, а

соленость в пределах 34.05–34.07 епс. Небольшое повышение температуры воды до 2.6–2.8 °С и уменьшение солёности до 34.03–34.05 епс произошло в начале ноября. Это совпадает со сменой доминирующего направления течения. С 26 ноября намечился рост температуры до 4.6–5.0 °С, с дальнейшим повышением в начале декабря до 5.7–5.8 °С, при одновременном уменьшении солёности до 33.90–33.94 епс.

■ Обсуждение результатов

Наблюдения на АДС показали, что в переходный период от осени к зиме происходит перестройка структуры Приморского течения – формирование реверсивного северо-восточного потока в октябре (реверсивная мода) и его смена на обратный юго-западный поток в ноябре–декабре (нормальная мода). В 2021 г. смена направления произошла довольно резко 1 ноября, при этом как реверсивная, так и нормальная моды Приморского течения были доминирующими направлениями на протяжении указанных периодов. В ноябре–декабре отмечаются многократные короткопериодные отклонения течения от доминирующего направления (петлеобразные траектории), вероятно, обусловленные формированием синоптических вихрей.

Для анализа пространственной структуры течений рассмотрим спутниковые изображения в ИК диапазоне, характеризующие поле температуры поверхности моря (ТПМ), которая является трассером динамических структур. Несмотря на перерывы в наблюдениях, обусловленные облачностью, в период измерений на АДС получен довольно представительный ряд изображений, два из которых, за 8 октября и 8 декабря 2021 г., приведены на рис. 6.

Цепочка антициклонических вихрей (1–4 на рис. 6, а) формирует вдольбереговые струи теплых вод, подходящие к месту постановки АДС с юга и юго-запада, что и обуславливает реверсивный поток Приморского течения. Аналогичная картина была

зарегистрирована нами в октябре 2011 г. с помощью поверхностных дрейфтеров, которые переносились через систему вихрей на северо-восток вдоль побережья Приморья [12]. Цепочка вихрей сохранялась до конца октября, медленно перемещаясь вдоль склона на юго-запад. К 19 октября к месту постановки АДС подошла северо-восточная периферия вихря 3, что обусловило наблюдаемые юго-восточные течения (период времени между событиями 1 и 2 на рис. 2 и в табл. 1). Прохождение интенсивного атмосферного циклона не позволило наблюдать структуру поля ТПМ в этот период. С начала ноября и в декабре ИК изображения показывают полосу холодных вод вдоль побережья на шельфе Приморья и поток теплых вод с востока, известный как Северо-западная ветвь Цусимского течения [10], что особенно ярко выражено на спутниковом снимке за 8 декабря (рис. 6, б). На этом же снимке замечен антициклонический вихрь, подошедший к точке АДС с юга и обусловивший петлеобразную траекторию на диаграмме течений 9–12 декабря (событие 7 на рис. 2 и в табл. 1). Пропуски в рядах спутниковых изображений из-за облачности не позволяют проследить все случаи «петель» на диаграмме, но многие события подтверждаются прохождением в эти моменты антициклонических вихрей. Например, на изображениях за 16 ноября (не показано) видно, что к месту постановки подходит теплый вихрь, что произошло во время наиболее продолжительной «петли» на векторной диаграмме (событие 5, табл. 1).

Как обсуждалось выше, результаты наблюдений АДС показали изменение вертикальной структуры течений на протяжении октября–декабря: при переходе от осени к зиме происходила его баротропизация и заметное уменьшение скоростей течений в декабре. Для анализа вертикальной структуры вод в районе АДС рассмотрим профили температуры, солёности и плотности воды, полученные в ходе СТД-зондирований в момент постановки и подъема станции (6 октября и 19 декабря соответственно), а также 5 ноября (рис. 7).

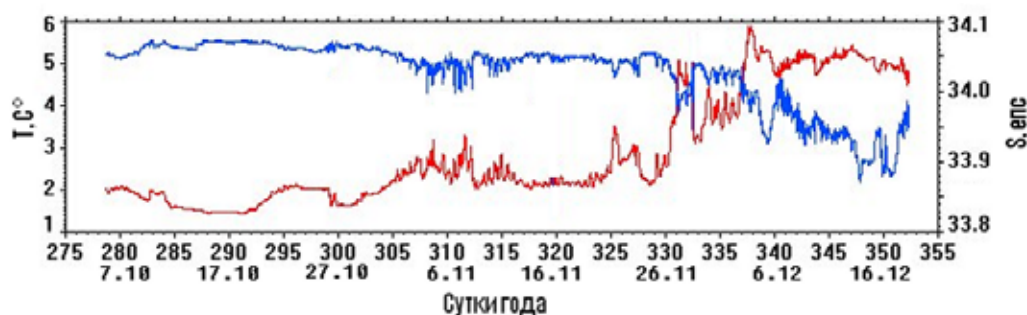


Рис. 5. Изменение температуры (T, °C, левая ось ординат) и солёности (S, епс, правая ось ординат) в придонном слое по данным АДС; 275–355 сут от начала года соответствуют периоду времени от 3 октября до 22 декабря

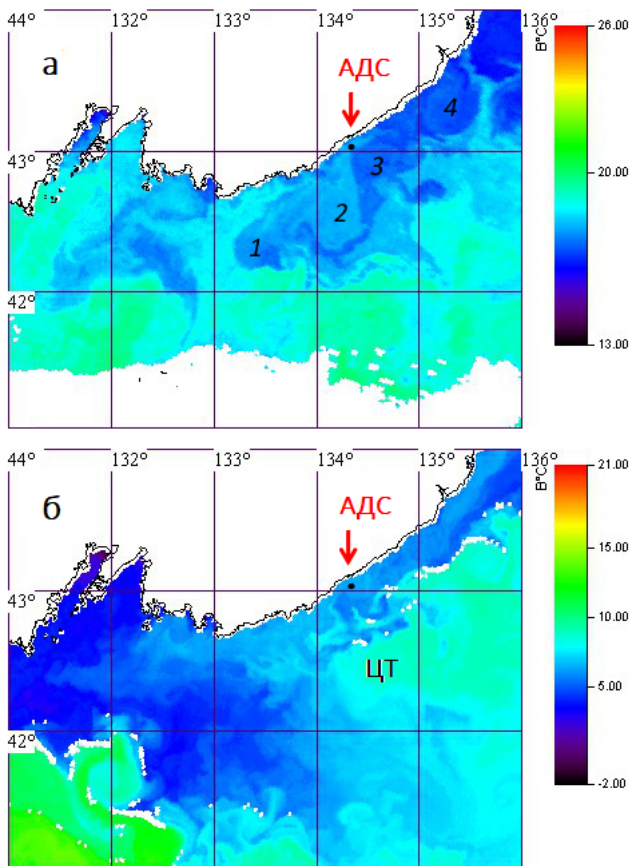


Рис. 6. Изображения поверхности Японского моря в ИК диапазоне с ИСЗ NOAA за 8 октября (а) и 8 декабря (б) 2021 г.; белый цвет соответствует участкам суши и облачности; точкой показано место постановки АДС. Обозначения: 1–4 – антициклонические вихри, ЦТ – Северо-западная ветвь Цусимского течения

По результатам первых зондирований хорошо видна двухслойная структура вод с прогретым верхним слоем 0–30 м, температура воды в котором достигала 17.6°C 6 октября и 12.5°C 5 ноября, а соленость – 33.25 и 33.70 е.п.с. соответственно, и холодным слоем ниже 40 м с температурой 2.1°C и

3.1°C и соленостью 34.03 и 34.00 епс соответственно. Значения температуры и солености в придонном слое соответствуют измерениям на АДС, рассмотренным выше. Понижение температуры воды и увеличение солености в верхнем слое можно объяснить началом осенне-зимней конвекции за счет теплообмена с атмосферой. Но рост температуры воды и уменьшение солености в нижнем слое, очевидно, является результатом адвекции. К моменту подъема АДС 19 декабря продолжающееся охлаждение вод и конвективное перемешивание практически разрушили стратификацию и сформировали однородный по вертикали слой от поверхности до глубины 70 м со значениями температуры 5.3°C и солености 33.92 епс. Лишь придонный 10-метровый слой отличался чуть более низкой температурой и повышенной соленостью (4.6°C и 33.95 епс). Таким образом, изменение термохалинных характеристик вод в придонном слое на АДС в значительной степени определялось горизонтальной адвекцией вод, в том числе связанной с синоптическими вихрями. Отдача тепла в атмосферу в начале зимы и интенсивное вертикальное перемешивание привели к однородности толщи вод и баротропизации вертикальной структуры потока.

Термохалинная структура вод в области шельфа и склона юго-восточного Приморья в декабре по данным СТД-зондирований с борта НИС «Академик М.А. Лаврентьев» показана на рис. 8. Заметно, что область Приморского течения отличается повышенными значениями температуры и солености воды. Обычно Приморское течение переносит холодные распресненные воды [3], однако в рассматриваемый период в этой области находятся воды Северо-западной ветви Цусимского течения, переносимой с востока к побережью Приморья относительно теплые воды повышенной солености. Ядро этого потока находится на станции 67, чуть мористее места поста-

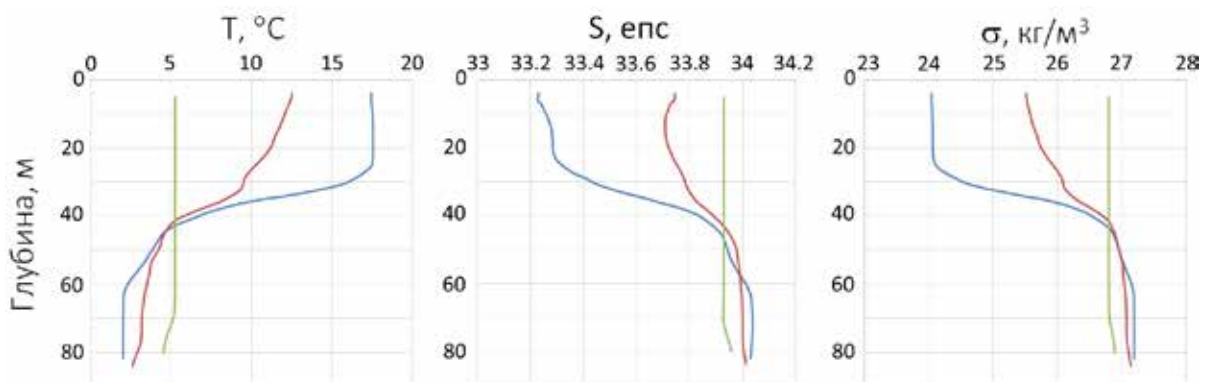


Рис. 7. Вертикальные профили температуры (T ; $^{\circ}\text{C}$), солености (S ; епс) и аномалии плотности (σ ; кг/м^3) по судовым измерениям в районе постановки АДС 6 октября (синий цвет), 5 ноября (красный цвет) и 19 декабря (зеленый цвет)

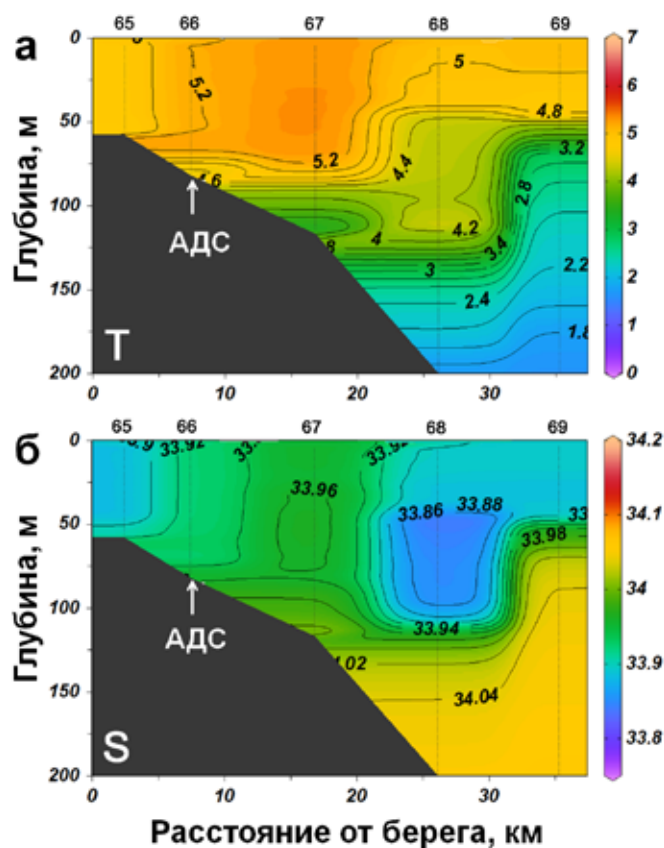


Рис. 8. Распределение температуры (Т; °С; а) и солёности (S; ‰; б) на меридиональном разрезе через место постановки АДС (показано белыми стрелками); разрез выполнен 19 декабря в рейсе № 97 НИС «Академик М.А. Лаврентьев»; станции СТД-зондирования обозначены цифрами сверху

новки АДС (ст. 66, рис. 8). Севернее и южнее наблюдаются менее солёные воды прибрежной зоны (ст. 65) и воды северного циклонического круговорота

моря (ст. 68–69). По вертикали воды Северо-западной ветви Цусимского течения с температурой более 5.0 °С и солёностью более 33.94 ‰ занимают слой от поверхности до 80–100 м. В результате конвективного перемешивания вертикальная структура толщи вод на шельфе стала практически однородной.

Таким образом, зарегистрированная с помощью АДС перестройка течений в осенне-зимний период является важным механизмом изменения термохалинной структуры вод на шельфе юго-восточного Приморья. Короткопериодные изменения связаны с развитием синоптических вихрей, более долгопериодные изменения определяются сменой реверсивного течения в октябре на устойчивый поток юго-западного направления в ноябре–декабре, переносящий более тёплые воды повышенной солёности.

Эти изменения течений было бы естественно связать с воздействием ветра. Чисто дрейфовые течения, вероятно, сосредоточены в верхнем слое (выше 15 м), проанализировать их не удалось из-за значительной зашумленности данных. Однако можно ожидать интенсификации циклонической циркуляции вод после установления зимнего муссона, когда над большей частью акватории Японского моря имеет место циклоническая завихренность напряжения ветра [16]. Как показывают данные реанализа ERA5, свойственный зимнему муссону северо-западный ветер дул в течение 10 дней (13–26 октября, 285–298 сут года, рис. 9, а), но течение при этом сохраняло ВСВ направление, как обсуждалось выше. В конце октября ветер был весьма изменчив по скорости и направлению, но 31 октября (303 сут года) усилился и изменил направление с юго-западного на северо-восточное, когда и

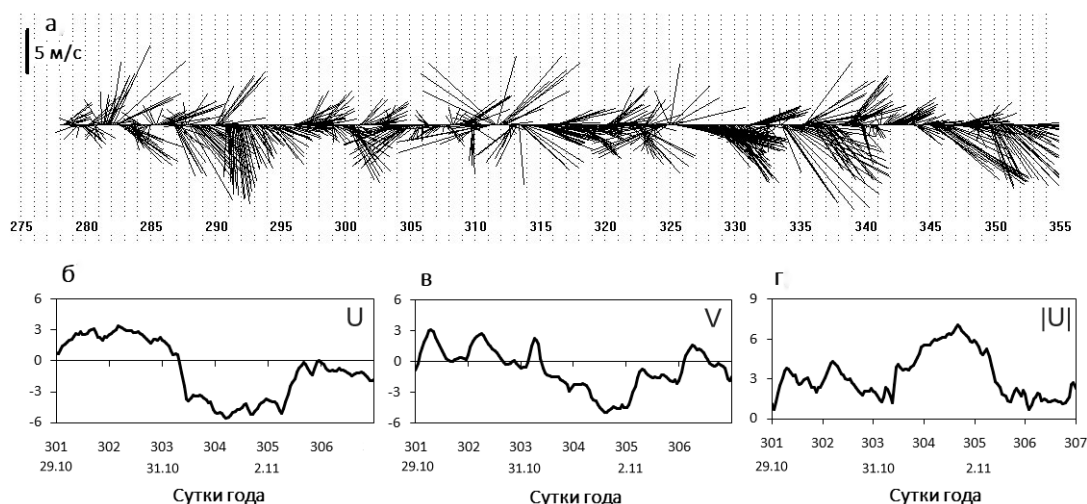


Рис. 9. Ветер (м/с) в районе АДС по данным реанализа: вектора за весь период наблюдений (а), зональная (U) (б) и меридиональная (V) (в) составляющие и модуль (|U|) (г) скорости ветра в период с 29 октября по 4 ноября 2021 г.; 275–355 сут от начала года соответствуют периоду времени от 3 октября до 22 декабря

зональная, и меридиональная составляющие стали отрицательны (рис. 9, б и 9, в). Именно после этого и произошел реверс течения. Ранее было показано, что ветры восточных румбов порождают сильную циклоническую завихренность над большей частью акватории моря [16]. Под этим воздействием интенсифицируется Северо-западная ветвь Цусимского течения, приносящая более теплые и соленые воды с востока от района Японских о-вов и следующая на юго-запад вблизи побережья юго-восточного Приморья [17], что и могло вызвать реверс течения в районе АДС. Для подтверждения этого предположения в будущем планируется проанализировать завихренность напряжения ветра над северной частью моря.

Заключение

По данным о течениях, полученных с помощью доплеровского профилографа, установленного на АДС на шельфе юго-восточного Приморья, рассмотрен характер перестройки циркуляции вод этого района северо-западной части Японского моря от осени к зиме (в октябре–декабре 2021 г.). Динамические структуры идентифицировались по ИК изображениям поверхности Японского моря с ИСЗ серии NOAA. К анализу привлекались данные о температуре, солености и плотности воды, полученные с

помощью датчиков океанографических параметров, установленных на АДС, и судовых STD-измерений.

Этот период года характеризуется бимодальностью основного потока Приморского течения со сменой его направления с северо-восточного (реверсивная мода) в октябре на юго-западное (нормальная мода) в ноябре–декабре. Короткопериодные изменения зарегистрированных течений, с наиболее повторяемыми периодами 6.5 и 12.5 сут, обусловлены формированием над кромкой шельфа вихрей синоптического масштаба, проходивших через точку постановки АДС, хорошо различимых на спутниковых изображениях. Перенос теплых вод повышенной солености с востока и начало зимнего конвективного перемешивания обусловили изменения структуры вод с хорошо выраженной бароклинной в октябре на баротропную к середине ноября, а также повышение температуры вод в прибрежной зоне Приморья.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы ТОИ ДВО РАН №121021700346-7. Авторы выражают благодарность А.А. Воронину и И.И. Горину за подготовку АДС, научным группам экспедиций, проводившим измерения в рейсах № 77 на борту НИС «Профессор Гагаринский» и № 97 на борту НИС «Академик М.А. Лаврентьев», Центру регионального спутникового мониторинга окружающей среды (ИАПУ ДВО РАН) за предоставление информации, Е.В. Кустовой за подготовку данных о ветре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яричин В.Г. Состояние изученности циркуляции вод Японского моря // Труды ДВНИГМИ. 1980. Вып. 80. С. 46–61.
2. Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря. Владивосток: Дальнаука, 1991. 176 с.
3. Японское море. Гидрометеорологические условия. Проект «Моря». Т. 8. Вып. 1. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. 398 с.
4. Шренк Л.И. О течениях Японского, Охотского и смежных с ними морей // Записки Императорской академии наук. 1874. Т. 23, № 2. Прил. 3. С. 1–112.
5. Uda M. The results of simultaneous oceanographic investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June 1932 // J. Imperial Fisheries Experimental Station. 1934. Vol. 5. P. 57–190.
6. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Островский А.Г. Поверхностная циркуляция Японского моря (спутниковая информация и данные дрейфующих буйев) // Исследование Земли из космоса. 1998. № 1. С. 66–83.
7. Пономарев В.И., Файман П.А., Дубина В.А. и др. Синоптическая вихревая динамика над северо-западным материковым склоном и шельфом Японского моря (моделирование и результаты дистанционных наблюдений) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 2. С. 100–104.
8. Ладыченко С.Ю., Лобанов В.Б. Синоптические вихри в районе залива Петра Великого по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 4. С. 3–15.
9. Пономарев В.И., Файман П.А., Дубина В.А., Машкина И.В. Особенности динамики вод синоптического и субсиноптического масштабов над континентальным склоном Японской котловины и шельфом Приморья // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 2. С. 155–165.
10. Данченков М.А., Обри Д.Г., Лобанов В.Б. Пространственная структура вод северо-западной части Японского моря зимой // Тематический вып. ДВНИГМИ № 3. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 92–105.
11. Lee D.-K., Niiler P.P. The energetic surface circulation patterns of the Japan/East Sea // Deep-Sea Research II. 2005. V. 52, No 11–13. P. 1547–1563.
12. Трусенкова О.О., Лобанов В.Б., Ладыченко С.Ю., Каплуненко Д.Д. Дрейф поверхностных лагранжевых буйев в центральной части Японского моря в октябре – ноябре 2011 г. // Исследование Земли из космоса. 2021. № 1. С. 12–24.
13. Жабин И.А., Грамм-Осипова О.Л., Юрасов Г.И. Ветровой апвеллинг у северо-западного побережья Японского моря // Метеорология и гидрология. 1993. № 10. С. 82–86.
14. Жабин И.А., Дмитриева Е.В. Сезонная и синоптическая изменчивость ветрового апвеллинга у побережья южного Приморья (Японское море) // Вестник ДВО РАН. 2014. № 5. С. 25–31.
15. Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1998. Vol. 79, No. 1. P. 61–78.
16. Трусенкова О.О. Многомерный статистический анализ спутниковых полей напряжения и завихренности ветра в районе Японского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 2. С. 111–120.
17. Трусенкова О.О. Моделирование региональных особенностей циркуляции Японского моря под различным внешним воздействием // Изв. ТИНРО. 2012. Т. 169. С. 118–133.

Об авторах

ЛОБАНОВ Вячеслав Борисович, к.т.н., Заведующий отделом
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, инстру-
ментальные наблюдения в океане, дистанционное зондирова-
ние Земли из космоса

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

E-mail: lobanov@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0001-9104-5578

СЕРГЕЕВ Александр Фёдорович, с.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, инстру-
ментальные наблюдения в океане

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

E-mail: sergeev@poi.dvo.ru

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, гидродинамиче-
ское моделирование океана

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

E-mail: troia@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0001-6756-5354

ЛАДЫЧЕНКО Светлана Юрьевна, научный сотрудник
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, дистан-
ционное зондирование Земли из космоса

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

E-mail: svemos@poi.dvo.ru

МАРЬИНА Евгения Николаевна, ведущий инженер

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, инстру-
ментальные наблюдения в океане

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

E-mail: maryina@poi.dvo.ru

ЩЕРБИНИН Павел Евгеньевич, ведущий инженер-програм-
мист

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: компьютерное программирова-
ние, инструментальные наблюдения в океане

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

E-mail: p_shch@poi.dvo.ru

