

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ДРЕЙФ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЛАГРАНЖЕВЫХ БУЕВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ В ОКТЯБРЕ–НОЯБРЕ 2011 г.

© 2021 г. О. О. Трусенкова^а *, В. Б. Лобанов^а, С. Ю. Ладыченко^а, Д. Д. Каплуненко^а

^аТихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, Россия

*E-mail: troliia@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 18.08.2020 г.

В работе выполнен анализ дрейфа двух поверхностных лагранжевых буюв, выпущенных 4 октября 2011 г. в районе залива Петра Великого в Японском море, пересекших за полтора месяца море и выброшенных 22 и 24 ноября 2011 г. на побережье о. Хонсю. По данным буюв (за 4–11 октября) зарегистрировано восточное течение со средней скоростью 19.3 см/с в районе к югу от залива Петра Великого, где ожидается направленное на юго-запад Приморское течение. С 12 октября дрейф происходил в основном под воздействием ветра, отклоняясь от него вправо на 5°–20°. На основе регрессионных соотношений между скоростями ветра и дрейфа установлено, что в этот период ветровое воздействие учитывало более половины дисперсии низкочастотной (после удаления инерционных колебаний) скорости дрейфа, а ветровой дрейф составлял 23–24 см/с при ветре 10 м/с. Инерционные колебания, оцененные на основе ротари вейвлет-спектров векторов скорости дрейфа, были статистически значимы большую часть периода дрейфа, а мощность спектров увеличивалась на 2 порядка величины через несколько часов после усиления ветра до 17–18 м/с. На дрейф буюв значительное влияние оказывали синоптические вихри, особенно в южной части района.

Ключевые слова: Японское море, поверхностный буй, дрейф, спутниковая альтиметрия, инфракрасные спутниковые изображения поверхности моря, ветер, синоптические вихри, инерционные колебания, вейвлет-преобразование, ротари-спектр

DOI: 10.31857/S0205961421010097

ВВЕДЕНИЕ

В середине XX в. акватория Японского моря к северу от 40° с.ш. считалась областью циклонической циркуляции (Юрасов, Яричин, 1991), по северной и западной периферии которой следуют на юго-запад Приморское и Северо-Корейское течения, а теплые воды переносятся с юга на север в южной и восточной частях моря Восточно-Корейским и Цусимским течениями (рис. 1). С развитием спутниковой океанологии было установлено, что в этом районе часто формируются антициклонические синоптические вихри. В частности, наличие теплых вихрей в районе к югу от побережья Приморья и к востоку от КНДР в начале периода зимнего муссона (с середины октября до середины или конца декабря) является регулярным феноменом (Danchenkov et al., 2003; Лобанов и др., 2007; Никитин, Юрасов, 2008). Эти изменения объяснены воздействием северо-западного (СЗ) ветра с антициклонической завихренностью в этом районе в период развития зимнего муссона (Yoon, Kim, 2009).

Залив Петра Великого и прилегающий район открытого моря (рис. 2) характеризуются слож-

ной синоптической динамикой вод, определяемой неустойчивостью Приморского течения и формированием склоновых вихрей, что было показано по спутниковым данным и по результатам гидродинамического моделирования (Дубина и др., 2013). Сюда поступают не только холодные воды Приморского течения с северо-востока, но также теплые вихри и струи с юго-запада, юга и востока, что было выявлено по спутниковым изображениям поверхности моря в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра (Ладыченко, Лобанов, 2013). Как отмечалось во многих работах, Японское море в целом характеризуется плотной упаковкой вихрей синоптического масштаба (Toba et al., 1984; Ichiye, Takano, 1988; Takematsu et al., 1999; Morimoto et al., 2000; Никитин и др., 2002; Prants et al., 2015; Lee et al., 2019). В октябре–ноябре 2011 г. цепочка теплых вихрей протянулась поперек почти всего моря, с северо-запада на юго-восток от побережья Приморья к Японским островам, что демонстрируется средними за период течениями по альтиметрическим данным (рис. 2) и спутниковыми ИК изображениям (рис. 3).

Для исследования циркуляции вод уже несколько десятилетий применяются поверхност-

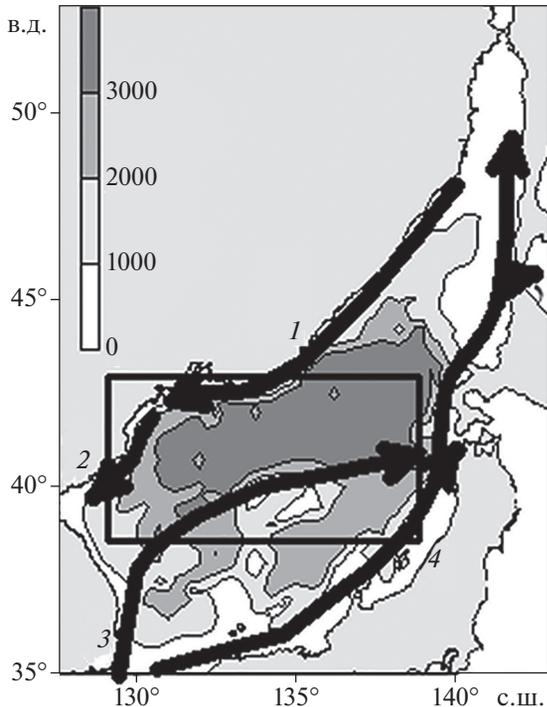


Рис. 1. Схема течений Японского моря; прямоугольником показан район, представленный на схеме дрейфа на рис. 2; цифрами обозначены Приморское (1), Северо-Корейское (2), Восточно-Корейское (3) и Цусимское (4) течения; показана батиметрия (м).

ные лагранжевы буи (дрифтеры), слежение за которыми осуществляется с помощью ИСЗ. По данным многолетнего массива таких буев была выполнена оценка средних течений и средней вихревой кинетической энергии в Японском море (Lee, Niiler, 2005), а также исследовалась межгодовая изменчивость течений в юго-западной (ЮЗ) части моря (Lee, Niiler, 2010). Данные дрейфа буев привлекались для анализа вихревых структур Японского моря в мае и в сентябре (Гинзбург и др., 1998) и описания смены течений вдоль побережья КНДР, происходящего от сентября к октябрю (Danchenkov et al., 2003).

Для исследования циркуляции вод в районе залива Петра Великого два поверхностных буя типа SVP (Surface Velocity Program), произведенных на научно-производственном предприятии «Марлин-Юг», г. Севастополь, были выпущены 4 октября 2011 г. с борта НИС «Профессор Гагаринский» (рейс № 54) в антициклоническом вихре. Подобные буи разрабатывались в течение многих лет в Морском гидрофизическом институте, где был накоплен значительный опыт их использования для исследования и мониторинга различных районов Мирового океана (см. обзор в работе: Мотыжев, 2016), однако для Японского моря они до сих пор не применялись.

Выпущенные в районе залива Петра Великого буи сначала действительно дрейфовали в области вихря, но вскоре ушли из него, за полтора месяца пересекли море и были выброшены на берег северной части о. Хонсю. У найденных буев отсутствовали подводные паруса, что ставит вопрос о том, когда они были потеряны. Подобие траекторий дрейфа обоих буев предполагает наличие общих действующих факторов, среди которых в первую очередь следует отметить ветер. С другой стороны, можно предположить, что вихревая динамика вод также существенно влияла на их дрейф. Целью данной работы является анализ факторов, определивших дрейф буев, и связь дрейфа с ветровыми условиями в начальный период зимнего муссона.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Конструкция использованных буев подробно обсуждается в работе (Лунев и др., 2010). Здесь следует отметить, что буи, дрейфующие на поверхности моря, были снабжены подводными парусами mini Tristar, расположенными на глубине около 1 м. Соотношение площади паруса к сумме площадей поперечного сечения остальных подводных элементов составляло около 40, что должно было ослабить снос по ветру. Определение местоположения буев производилось через систему GPS, передача данных – через международную спутниковую систему «Argos», в которой они получили идентификаторы P172 и P174. Буи были выпущены 4 октября 2011 г. в точках с координатами (42.366° с.ш., 132.27° в.д.) и (42.39° с.ш., 131.87° в.д.) соответственно (рис. 2, 3). Они пересекли Японское море и 24 и 22 ноября были выброшены на берег в северной части о. Хонсю в пунктах (39.3° с.ш., 140.0° в.д.) и (40.9° с.ш., 140.3° в.д.) (рис. 4, слева).

Скорость дрейфа рассчитывалась по изменению координат места, передававшихся через спутник каждый час. Данные в цифре по последнему периоду дрейфа (с 20 ноября) недоступны, для сведения приведена схема из системы Argos (рис. 4, слева). Для анализа на масштабах больше инерционного короткопериодные колебания компонент скорости дрейфа (с периодами менее 1.2 сут) были удалены из данных с помощью низкочастотной фильтрации на основе вейвлет-преобразования (см. ниже). (Далее для краткости используется название – низкочастотная скорость.) Число степеней свободы низкочастотной скорости дрейфа составляет 16 сут для P172 и 19 сут для P174.

Для анализа дрейфа буев использованы временные ряды зональной и меридиональной компонент скорости ветра по данным реанализа NCEP-CSFR с горизонтальным разрешением 0.2 градуса и временным разрешением 1 ч, взятые в узлах сетки, ближайших к положению буев в

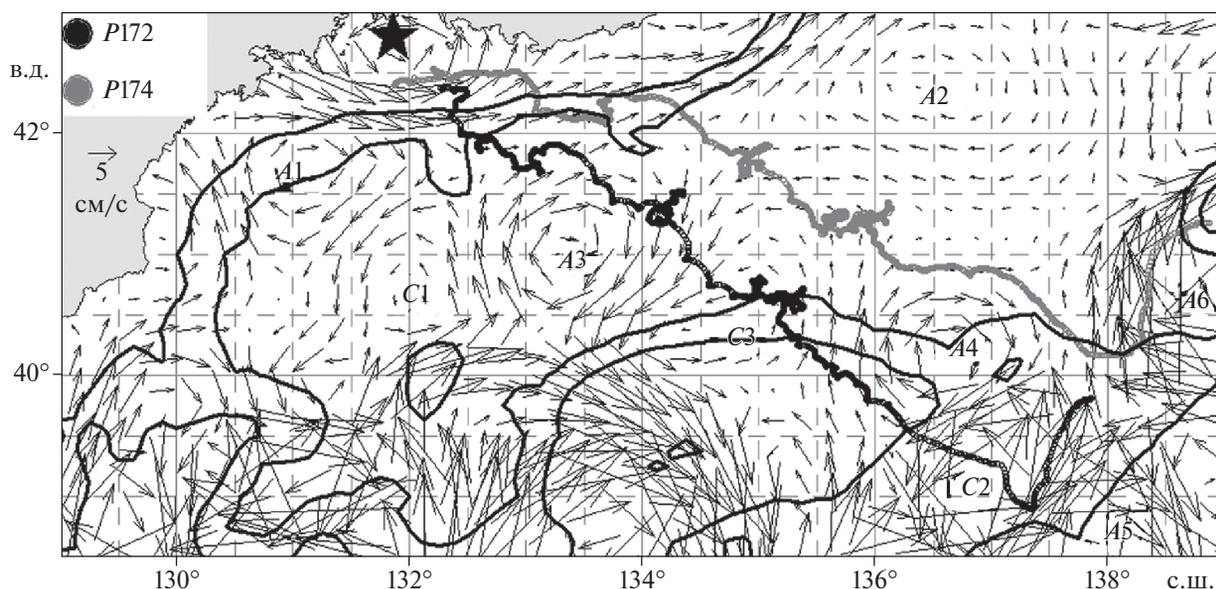


Рис. 2. Траектории дрейфа буев *P172* (черные кружки) и *P174* (серые кружки) в Японском море в октябре–ноябре 2011 г. На карте показаны средние за период дрейфа течения по альтиметрическим данным и изобаты 2000 и 3000 м, звездочкой помечен залив Петра Великого, символами *A1–A6* и *C1–C3* помечены антициклонические и циклонические вихри синоптического масштаба.

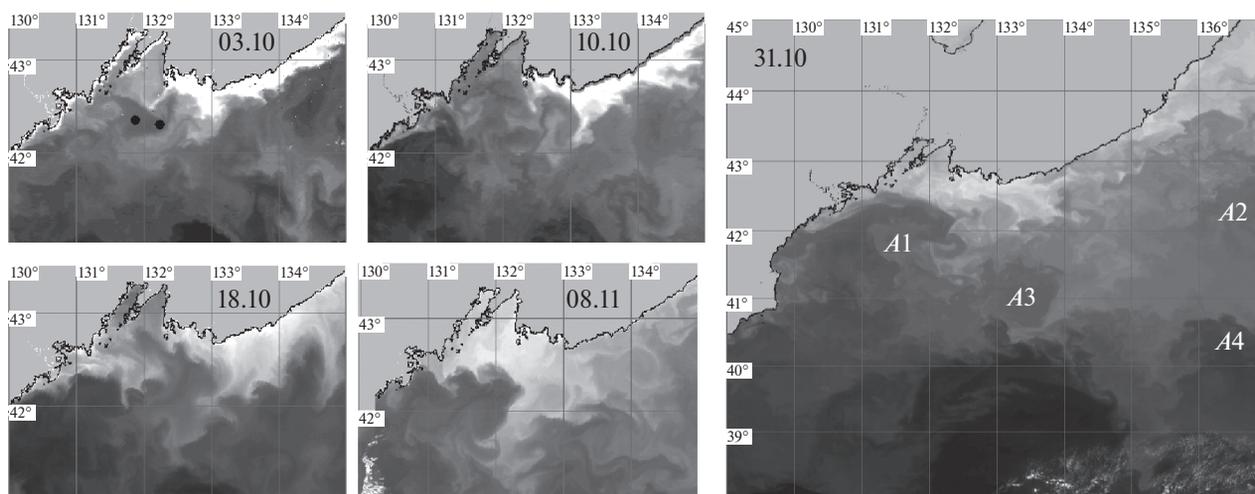


Рис. 3. Инфракрасные изображения поверхности северо-западной части Японского моря с ИСЗ NOAA в октябре и ноябре 2011 г. Темный тон соответствует теплым водам, светлый – холодным, белый – облачности; места выпуска буев показаны черными кружками на изображении от 3 октября, на изображении от 31 октября помечены антициклонические вихри *A1–A4*.

каждый час. Расстояние между положением буя и узлом сетки составляло в среднем 8.3 км. Расстояние между положением *P172* и *P174* в каждый момент времени не превышало 120 км, потому величины скорости ветра по данным реанализа в зонах дрейфа обоих буев весьма близки (коэффициент корреляции превышает 0.9), но направления ветра в некоторые периоды времени различаются, что обсуждается ниже. Для сопоставимости

временные ряды компонент скорости ветра были, подобно скорости дрейфа, подвергнуты низкочастотной фильтрации на основе вейвлет-преобразования с устранением колебаний на периодах меньше 1.2 сут. Фильтрованные данные оказались близки к исходным, а соответствующие коэффициенты корреляции составили 0.94–0.95, что объясняется гладкостью модельных полей реанализа. Число степеней свободы низкочастот-

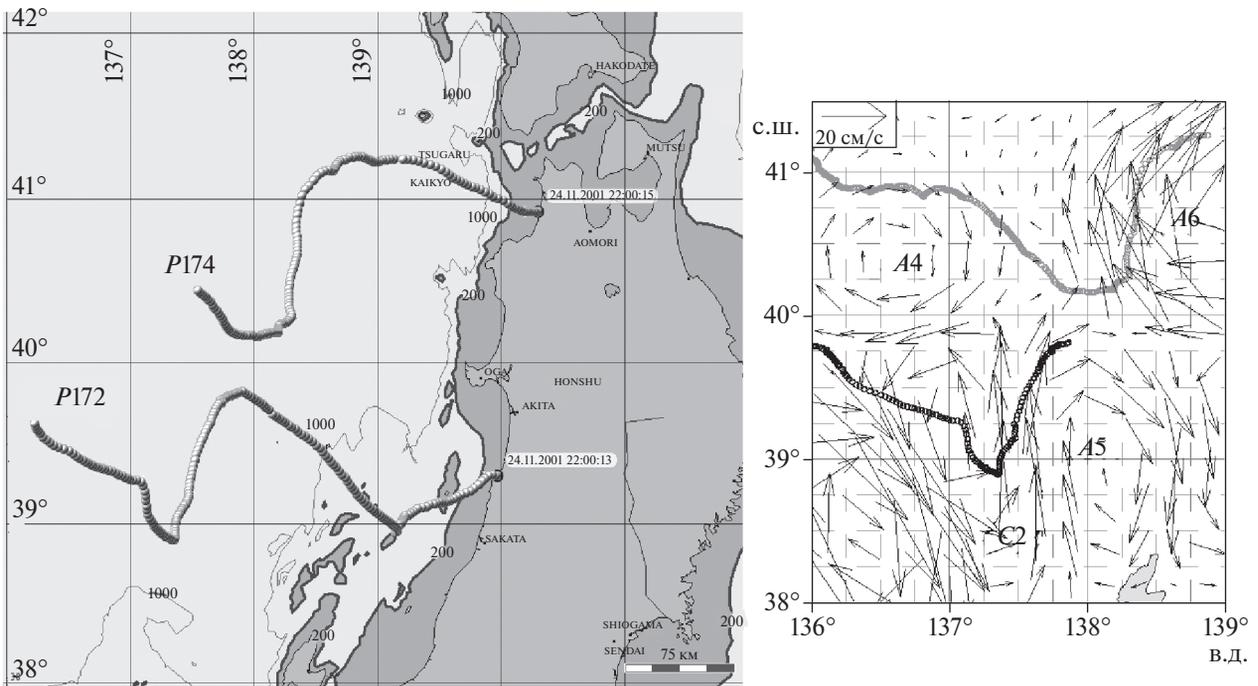


Рис. 4. Последний участок дрейфа буев после 15 ноября (схема дрейфа из системы Argos; слева) и фрагмент траектории дрейфа с рис. 1 к востоку от 136° в.д.; показаны течения по альтиметрическим данным за 17 ноября 2011 г., помечены вихри А4–А6 и С2 (справа).

ной скорости ветра составляет 20 сут. Для анализа значимости коэффициентов корреляции принимается 16 степеней свободы, при этом 95%-й уровень значимости составляет 0.51.

К анализу привлекались спутниковые данные. Это ежедневные поля скорости течений Японского моря с пространственным разрешением 0.25° по данным архива SSALTO/DUACS, версия 4.0 2014 г. (Ssalto/Duacs..., 2014), которые были осреднены за период дрейфа (рис. 2). При интерпретации следует иметь в виду, что в рассматриваемом контексте пространственное разрешение даже интерполированных в сетку данных является довольно грубым, а реальное временное разрешение составляет не менее 10 сут. Тем не менее, эти данные оказались полезными для оценки фоновых течений в период дрейфа. Использовались также спутниковые ИК изображения СЗ части моря, полученные с радиометра AVHRR ИСЗ NOAA с разрешением 1 км (из архива Центра регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН; <http://satellite.dvo.ru/>) (рис. 3).

Для анализа нестационарной скорости дрейфа использовалось вейвлет-преобразование, позволяющее оценивать локальные по времени спектры. Применялись как комплексный материнский вейвлет Морле 6-го порядка, обладающий хорошим разрешением по шкале периодов, так и вещественный материнский вейвлет “производ-

ная гауссиана” 9-го порядка (DOG 9), дающий хорошее разрешение по шкале времени и неплохое по шкале периодов (Torrence, Compo, 1998). Выполнена оценка статистической значимости по отношению к теоретическому спектру красного шума на 90%-м уровне; на спектрах показаны конусы (области) влияния краевых эффектов, которые могут исказить результаты. Низкочастотная фильтрация данных выполнялась путем восстановления временных рядов с помощью обратного вейвлет-преобразования с использованием периодов, превышающих 1.2 сут. Расчеты производились с помощью модифицированной процедуры Торренса и Компо (Torrence, Compo, 1998).

Хорошо известным методом выявления инерционных колебаний являются ротари-спектры векторов скорости течения, основанные на преобразовании Фурье. Эти спектры рассчитываются для вращательных, антициклонической и циклонической компонент вектора скорости течения, т.е. описывают круговые движения с противоположным направлением вращения (Gonella, 1972); при этом антициклонический спектр описывает инерционные колебания, которым свойственно вращение по часовой стрелке (в северном полушарии). Спектры Фурье предполагают стационарность временных рядов, тогда как инерционные колебания могут усиливаться под воздействием различных факторов, в первую очередь ветра, и ослабляться с течением времени.

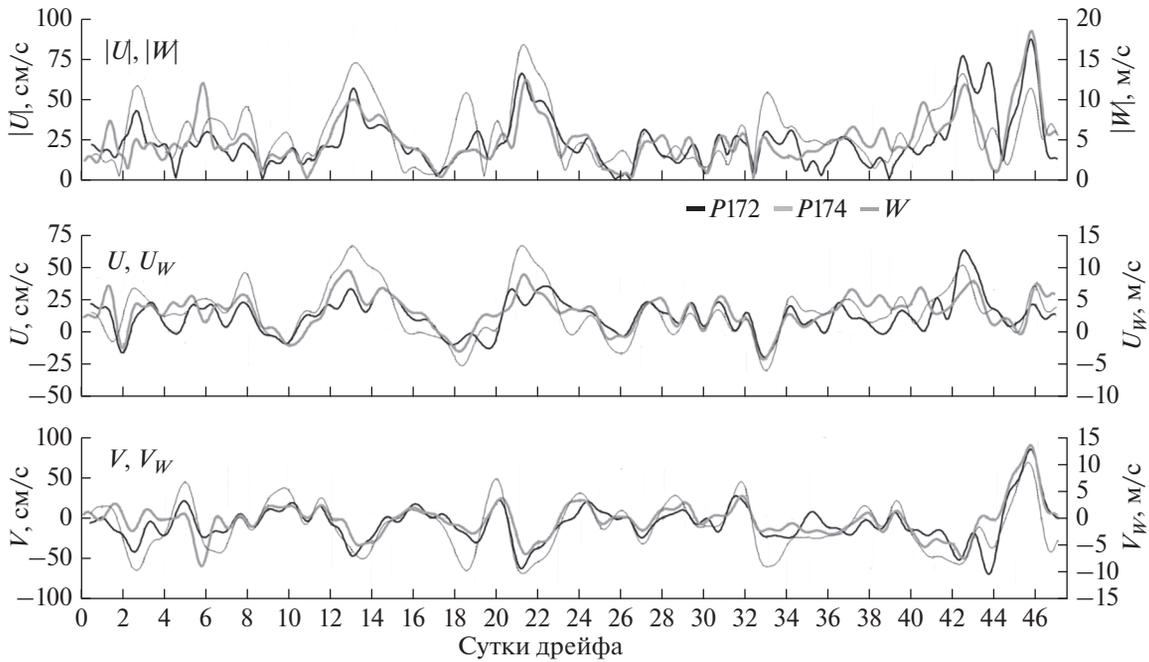


Рис. 5. Низкочастотные скорости дрейфа буев (см/с; левая ось ординат, жирные черные линии для P172, жирные серые линии для P174) и ветра вблизи траектории дрейфа P172 (м/с; правая ось ординат, тонкие линии): величины скорости — сверху, зональные компоненты — в центре, меридиональные — внизу. $|U|$, U , V обозначают величину и компоненты скорости дрейфа, $|W|$, U_W , V_W — величину и компоненты скорости ветра, по оси абсцисс показаны сутки дрейфа, начиная от 4 октября; вертикальные линии и метки на оси абсцисс соответствуют концу суток.

Вейвлет ротари-спектры векторных временных рядов, основанные на комплексном вейвлете Морле, являются обобщением ротари-спектров Фурье на случай нестационарных рядов (Liu, Miller, 1996). Антициклонический и циклонический ротари-спектры рассчитывались с использованием вейвлет-преобразований декартовых компонент векторов скорости по формулам из работы (Liu, Miller, 1996). На широтах дрейфа инерционными колебаниям отвечает максимум в антициклоническом спектре на масштабе 17.8–18.7 ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Дрейф под воздействием течений

Выпуск буев у побережья южного Приморья (на континентальном склоне к югу от залива Петра Великого; рис. 2) 4 октября 2011 г. был привязан к антициклоническому вихрю, хорошо заметному на спутниковых ИК изображениях как область теплых вод. Буй P172 был выпущен на восточной периферии вихря, а P174 — в его центральной части (рис. 3). Предполагалось, что буи, снабженные подводными парусами, будут дрейфовать с поверхностными течениями. Действительно, в начальный период дрейфа траектории (рис. 2) и зональные, и меридиональные компоненты скоростей буев (рис. 5) существенно различались, и

это означает, что буи дрейфовали под воздействием разных факторов.

С 4 до 11 октября буй P174 дрейфовал преимущественно на восток с весьма значительной для субарктической части моря средней скоростью 19.3 см/с (рис. 2, 5, табл. 1), что противоположно Приморскому течению, обычно следующему на юго-запад вдоль изобаты 100 м (Юрасов, Яричин, 1991). Восточное течение со скоростью 10–15 см/с (132° – 132.5° в.д.) также зарегистрировано по данным спутниковой альтиметрии, хотя эта оценка не вполне надежна из-за возможных ошибок в этом районе вблизи побережья. К востоку от 132.5° в.д. скорость восточного течения (по альтиметрическим данным) уменьшилась до 5–7 см/с, но оно продолжалось до 43° с.ш., поворачивая на северо-восток и формируя западную периферию антициклонического вихря A2 (рис. 2).

Эта картина подтверждается ИК изображениями района. На рис. 3 видно, что холодные воды Приморского течения и прибрежного апвеллинга (Звалинский и др., 2006; Жабин, Дмитриева, 2014) блокировались теплыми водами в районе к востоку от 132.5° в.д., а между 42° и 42.5° с.ш. видна вытянутая на восток зона теплых вод. Перенос теплых вод на северо-восток осуществлялся через цепочку теплых вихрей и струй, которые сливаются в непрерывное течение на альтиметрических картах с четвертьградусным разрешением.

Таблица 1. Особенности дрейфа буев *P172* и *P174* в центральной части Японского моря

Период	Сутки дрейфа	Событие	Буй	Район
4–11 октября	1–8	Дрейф в вихре <i>A1</i>	<i>P172</i>	132.3°–132.6° в.д.
4–11 октября	1–8	Дрейф в восточном течении	<i>P174</i>	131.9°–133.5° в.д.
12 октября–16 ноября	9–33	Дрейф под воздействием ветра	<i>P172</i>	132.6°–137.3° в.д.
			<i>P174</i>	133.5°–138.2° в.д.
12–14 октября	9–11	Петлеобразные траектории	<i>P172</i>	133.1° в.д.
			<i>P174</i>	133.7° в.д.
19–24 октября	16–21		<i>P172</i>	134.0°–134.3° в.д.
			<i>P174</i>	134.8°–135.1° в.д.
25–26 октября	22–23	Циклоиды инерционных колебаний	<i>P172</i>	134.3°–134.8° в.д.
			<i>P174</i>	135°–135.5° в.д.
28–31 октября	25–28	Петлеобразные траектории	<i>P172</i>	135.0° в.д.
			<i>P174</i>	135.5°–135.7° в.д.
3–6 ноября	31–34		<i>P172</i>	135.2°–135.4° в.д.
			<i>P174</i>	135.7°–136.2° в.д.
10–14 ноября	38–42	Дрейф в зоне вихря <i>A4</i>	<i>P172</i>	135.8°–136.2° в.д.
			<i>P174</i>	136.3°–137.4° в.д.
16 ноября	44	Дрейф в вихре <i>C2</i>	<i>P172</i>	136.3°–136.7° в.д.
17–18 ноября	45–46	Дрейф в зоне вихря <i>A5</i>	<i>P172</i>	137.3°–137.8° в.д.
17–19 ноября	45–47	Дрейф в зоне вихря <i>A6</i>	<i>P174</i>	138.2°–138.8° в.д.

Восточное течение между 131° и 134° в.д. к югу от залива Петра Великого в октябре–ноябре было получено при численном гидродинамическом моделировании и объяснено воздействием антициклонической завихренности ветра, которая свойственна этому району в начальный период зимнего муссона (Трусенкова, 2012).

Смена направления течений в начальный период зимнего муссона является хорошо известным фактом для более южного района (к югу от 42° с.ш.), где Северо-Корейское течение, направленное летом на юго-запад, в октябре–декабре заменяется северным потоком по западной периферии антициклонических вихрей (Danchenkov et al., 2003; Никитин и др., 2002; Никитин, Юрасов, 2008), которые развиваются под воздействием антициклонической завихренности напряжения ветра (Yoon, Kim, 2009). Вихрь *A1* хорошо виден на рис. 2, однако максимальные скорости в нем едва достигают 7 см/с, что заметно ниже, чем в восточном течении к югу от залива Петра Великого, возможно за счет сглаживания при расчете сеточных полей. К юго-востоку от вихря *A1* находится циклонический вихрь *C1*, остаточный от циклонического круговорота в этом районе, существовавшего в июле–сентябре.

В начальный период буй *P172* также дрейфовал на восток (до полудня 5 октября) со средней скоростью 18.7 см/с, а затем повернул на юг (до 23 ч 6 октября), причем скорость увеличилась до

29.8 см/с (рис. 2, 5), что соответствует потоку вдоль восточной периферии антициклонического вихря, идентифицированного на ИК-изображении (рис. 3). Средние альтиметрические течения в зоне дрейфа *P172* направлены на восток, однако в первой декаде октября это течение еще не полностью сформировалось и, по-видимому, альтиметрические данные отражали течения неточно в силу невысокого пространственного разрешения.

Дрейф под воздействием ветра

В последующий период времени, с 12 октября до 5 ноября (рис. 2, табл. 1), скорости дрейфа обоих буев были весьма близки (рис. 5); коэффициент корреляции составил 0.88. 11 октября существенно усилился ветер (от 5–7 м/с в начале до 12.5 м/с к концу суток), т.е. можно предположить, что именно тогда паруса были потеряны или повреждены так, что уже не могли противостоять прямому воздействию даже слабого ветра. В это время дрейф обоих буев ускорялся при усилении ветра и замедлялся при его ослаблении (рис. 5), что подтверждается значительными коэффициентами корреляции между скоростями дрейфа и ветра (табл. 2).

Для периода 12 октября–5 ноября рассчитаны регрессионные зависимости между скоростями ветра и дрейфа (рис. 6). В результате получены

следующие соотношения: $|U| = 2.417|W| + 6.953$ для *P172* и $|U| = 2.357|W| + 6.769$ для *P174*, где $|U|$ и $|W|$ – абсолютные величины скорости дрейфа и ветра, взятые в см/с и м/с соответственно. Коэффициенты детерминации R^2 , соответствующие доле учитываемой дисперсии и равные 0.56 для *P172* и 0.63 для *P174*, являются статистически значимыми на 95%-м уровне. Отсюда следует, что ветровой дрейф *P172* и *P174* составляет 24.2 и 23.6 см/с при ветре 10 м/с. В среднем по Мировому океану ветровой дрейф был оценен как 8–9 см/с при ветре 10 м/с (Lumpkin, Razos, 2007), однако буи того же типа, что использовались в данной работе, могут дрейфовать гораздо быстрее (Лунев и др., 2010; Мотыжев, 2016). При низкой скорости ветра имеет место значительное рассеяние относительно тренда, поскольку тогда усиливалось влияние на дрейф буев фоновых течений и, возможно, зыби, обусловленной сильным СЗ ветром (рис. 6).

В период дрейфа под воздействием ветра поступательное движение буев чередовалось с петлеобразными траекториями (рис. 2). Первый эпизод произошел еще до того, как установился ЮВ дрейф. 12–14 октября в зоне дрейфа дул относительно слабый (3–7 м/с), неустойчивый по направлению ветер южных румбов, свойственный передней части проходящего над морем циклона; в это время оба буя описали по “петле” (табл. 1, рис. 2). 15 октября ветер переменялся, 16–17 октября дул сильный (до 15 м/с и более) западный и СЗ ветер, характерный для тыловой части циклона, а дрейф обоих буев снова стал поступательным со скоростью 40–50 см/с, более чем вдвое выше средней (рис. 2, 5). Вихрь А3, по северо-восточной периферии которого прошел *P172*, заметного влияния на дрейф не оказал, возможно потому, что ветер был сильный, а орбитальная скорость вихря в зоне дрейфа составляла всего 5–7 см/с (по альтиметрическим данным). Петлеобразные участки траекторий также отмечались 19–

Таблица 2. Коэффициенты корреляции R между абсолютными величинами (R_1), зональными (R_2) и меридиональными (R_3) компонентами низкочастотных скоростей дрейфа и ветра в период с 12 октября по 5 ноября 2011 г.

Буй	R_1	R_2	R_3
<i>P172</i>	0.81	0.80	0.87
<i>P174</i>	0.84	0.81	0.88

24 октября, когда ветер был весьма изменчив: 19 и 20 октября дул слабый (до 2 м/с) ветер южных румбов, 21 октября – слабый северных румбов, 22 октября ветер, сохраняя направление, усилился до 12 м/с, 23 и 24 октября ветер снова был весьма изменчив, а 25 октября задул сильный (до 17–18 м/с) СЗ ветер. В результате, в период с 19 по 24 октября буи описали по “петле” (табл. 1, рис. 2), а 25 октября возобновили дрейф на юго-восток со скоростью больше 60 см/с. 27 октября–6 ноября ветер был умеренный (менее 10 м/с), но весьма изменчивый по направлению: южных румбов 27–28 октября, 1 и 4 ноября, северных румбов 29–31 октября, 2, 3, 5 и 6 ноября. В этот период оба буя описали по две “петли” (табл. 1, рис. 2).

Для анализа взаимосвязей направления дрейфа и ветра построены гистограммы за весь период дрейфа. Для удобства направления дрейфа и ветра взяты в математической нотации в диапазоне (-180° , 180°), т.е. 0° соответствует западному направлению (дрейф на запад, ветер с запада), 90° – южному, -90° – северному, 180° и -180° – восточному (рис. 7). Для обоих буев интенсивные максимумы повторяемости приходятся на юго-восточный (ЮВ) дрейф и СЗ ветер, чему для *P172* соответствуют углы -5° и -40° (рис. 7, слева), а для *P174* – углы -45° и -30° ; последнее ближе к зональным (западным) направлениям (рис. 7, в центре). Для определения отклонения дрейфа от

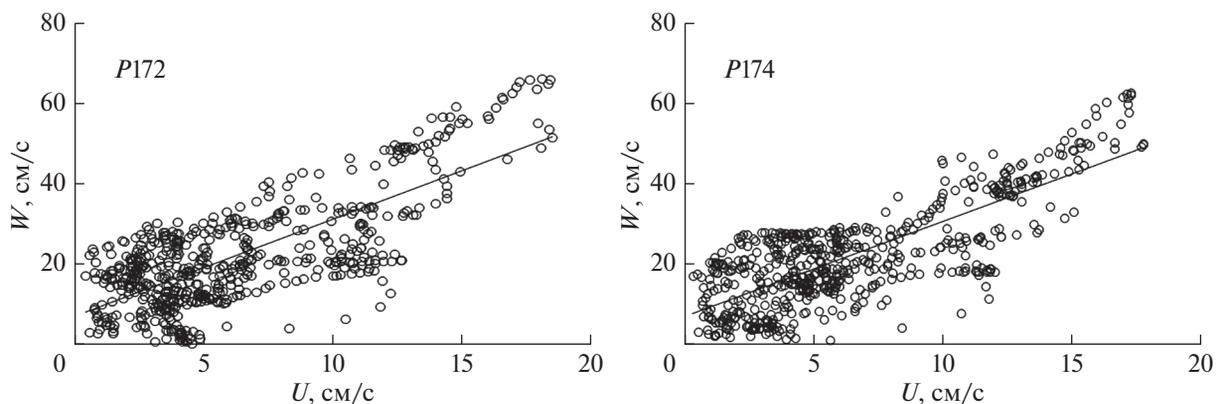


Рис. 6. Диаграммы рассеяния между скоростями ветра (м/с) и дрейфа (см/с) буев *P172* (слева) и *P174* (справа) в период с 12 октября по 5 ноября; показаны линейные тренды; U и W обозначают скорости дрейфа и ветра.

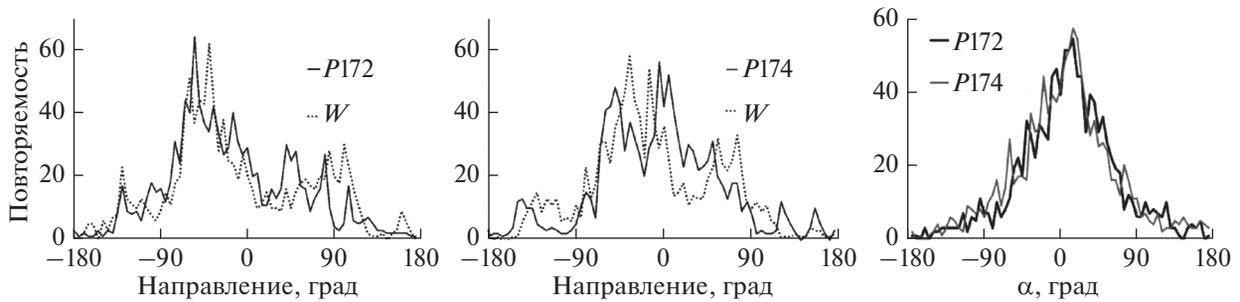


Рис. 7. Повторяемость направлений дрейфа буев (сплошные линии) и ветра в зоне дрейфа (пунктирные линии) для буев *P172* (слева) и *P174* (в центре), а также повторяемость угла (α) между направлениями ветра и дрейфа (черной линией для *P172*, серой – для *P174*; положительные значения соответствуют отклонению дрейфа направо от ветра; справа) на основе гистограмм по 5-градусным градациям (за весь период дрейфа); используется математическая нотация.

ветра построены гистограммы разности направлений ветра и дрейфа, положительной при отклонении вправо и отрицательной при отклонении влево. Наиболее повторяемые отклонения дрейфа буев *P172* и *P174* составляют $5^\circ\text{--}15^\circ$ и $10^\circ\text{--}20^\circ$ соответственно (рис. 7, справа). Экмановский дрейф приводит к отклонению буев от ветра на $60^\circ\text{--}100^\circ$ (Lumpkin, Pazos, 2007), а в нашем случае преобладает снос с небольшим отклонением вправо, определяемый как ветром, так и волнением; большие углы означают, что на дрейф в большей степени влияют другие факторы, а не ветер. Отметим, что ветер по данным реанализа относится к узлам сетки, расстояние между которыми и местом нахождения буя составляло в среднем 8.3 км, что объясняет малые по абсолютной величине отклонения влево.

Локальный максимум повторяемости ветра в зоне дрейфа *P174*, почти столь же интенсивный, как максимум СЗ ветра, приходится на -15° , т.е. близок к западному ветру, но ему не соответствует максимум направлений дрейфа, который должен был бы приходиться на -30° (рис. 7, в центре). Дрейф *P174* в восточном направлении, которому отвечает двойной максимум на -5° и 5° , связан с течениями, в первую очередь с восточным течением 4–17 октября, что обсуждалось выше, и с дрейфом по северной периферии вихря А4, что обсуждается ниже. Локальные максимумы южных румбов на гистограммах повторяемости (85° и 100° для ветра в зоне *P172* и 55° и 75° для ветра в зоне *P174*; рис. 7, слева и в центре) отвечают изменениям ветра при прохождении над морем циклонов и других атмосферных возмущений синоптического масштаба, с чем связаны петлеобразные участки на траекториях дрейфа, как обсуждалось выше.

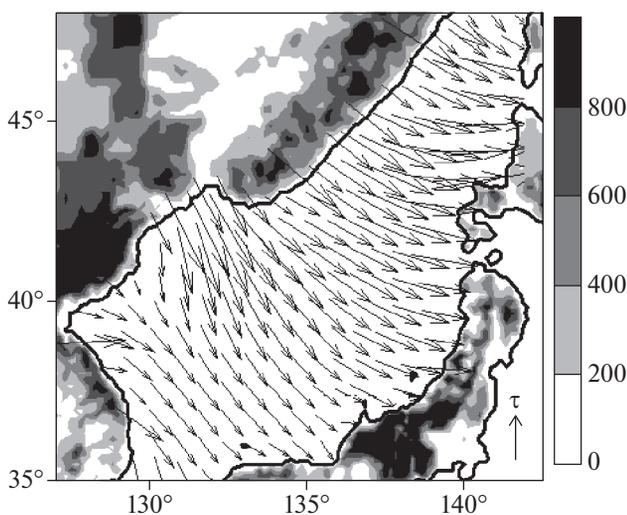


Рис. 8. Среднегодовое напряжение ветра (τ , дин/см²) в октябре–ноябре по данным реанализа NCEP-CSFR и рельеф суши (м) (стрелкой показано $\tau = 1$ дин/см²).

В период зимнего муссона над Японским морем доминирует СЗ ветер, как это известно по судовым измерениям (Дашко, Варламов, 2003) и подтверждено статистическим анализом данных спутниковой скатерометрии (Трусенкова, 2011). Октябрь и первая половина ноября относятся к начальному периоду зимнего муссона, когда над морем часто проходят циклоны, а направление ветра существенно изменяется (Дашко, Варламов, 2003; Трусенкова, 2011). Тем не менее, в среднемноголетнем поле напряжения ветра в октябре–ноябре доминирует СЗ ветер как наиболее повторяющийся и сильный (рис. 8), что и объясняет результирующее поступательное движение буев на юго-восток. Буй *P174* дрейфовал северовосточнее *P172*, и в этой зоне, как видно из среднего поля, ветер, пересекая море, поворачивал против часовой стрелки, что и приводило к увеличению его западной (зональной) составляющей, появлению максимума повторяемости на -15° , увеличению восточной (зональной) составляющей дрейфа и расхождению буев (рис. 2).

Влияние синоптических вихрей на дрейф

Дрейф на юго-восток возобновился с 7 ноября, причем 10–14 ноября буи огибали антициклонический вихрь А4: *P172* – с юго-запада, *P174* – с севера (рис. 2, табл. 1). Ветер был слабым, особенно 7–12 ноября (не более 5 м/с), поэтому вихрь оказал заметное влияние на дрейф буев. В это время *P172* тормозился встречным течением на ЮЗ периферии вихря и двигался заметно медленнее, чем *P174*, который дрейфовал почти зонально, ускоряясь попутным течением на северной периферии, причем разница скоростей доходила до 20–25 см/с, в основном за счет зональной компоненты (рис. 5). В частности, 14 ноября около 22–23 ч скорость *P172* была меньше 2 см/с, а скорость *P174* в это время составляла 20.1 см/с. В среднем за период 10–14 ноября разница скоростей дрейфа двух буев составляла 14 см/с, что дает 7 см/с как оценку средней в зоне дрейфа орбитальной скорости вихря. Орбитальная скорость по альтиметрическим данным в это время составляет 10–15 см/с на ЮЗ периферии и 5–8 см/с на северной периферии вихря А4, что дает среднюю скорость 9.5 см/с, т.е. довольно близкую оценку. 16 ноября *P172* пересек циклонический вихрь С2, что несколько притормозило дрейф (рис. 2, 5, табл. 1).

Утром 17 ноября буи *P172* и *P174* подошли к западной периферии антициклонических вихрей А5 и А6 (табл. 1), что неочевидно в средних за период дрейфа фоновых течениях, но ясно видно в полях за 17 ноября (рис. 4, справа). Вихри А5 и А6 относятся к системе Цусимского течения и характеризуются высокими орбитальными скоростями: 20–30 и до 40 см/с на границе между вихрями С2 и А5 (по альтиметрическим данным). Оба буя были захвачены вихрями и повернули на юго-восток, причем скорость дрейфа *P172* возросла от 12 см/с в точке поворота до 45 см/с к полуночи 17 ноября, а скорость дрейфа *P174* за это время возросла от 5 до 60 см/с, в основном за счет меридиональной компоненты (рис. 5). 17 ноября ветер был слабый (не более 5 м/с), а 18 ноября сменился на сильный южных румбов (до 13–14 м/с), скорость дрейфа увеличилась и достигла максимума за все время наблюдений (87 и 92 см/с для *P172* и *P174* соответственно; рис. 5). 19 ноября буи достигли северной периферии вихрей А5 и А6, повернули на восток, ветер ослаб и сменился на северный, а скорость дрейфа уменьшилась до 15–20 см/с. К сожалению, данные в цифре недоступны за последний период дрейфа (20–24 ноября), но, судя по схеме дрейфа из системы Argos, буи продолжали дрейфовать по периферии вихрей, а затем, видимо, под воздействием ветра, пересекли зону Цусимского течения и были выброшены на берег (рис. 4, слева).

Вейвлет-спектры скорости дрейфа

Для оценки инерционных колебаний были рассчитаны вейвлет ротари-спектры векторов скорости дрейфа. В антициклонической компоненте спектра имеются максимумы на масштабах меньше суток (в среднем 17.9 ч), которые являются статистически значимыми большую часть времени и соответствуют инерционным колебаниям, тогда как в циклонической компоненте на инерционном периоде мощность низкая (рис. 9).

Наиболее интенсивные инерционные колебания (с энергией, превышающей $10^5 \text{ см}^2/\text{с}^2$, т.е. на два порядка выше медианного значения, равного $4 \times 10^3 \text{ см}^2/\text{с}^2$) происходили 17–19 и 23–26 октября (14–16 и 20–23 сут дрейфа), через несколько часов после усиления ветра (и зональной, и меридиональной компонент) до 17–18 м/с (рис. 5). 25–26 октября в траектории дрейфа *P172* отчетливо видны три циклоиды, а в траектории дрейфа *P174* – две (рис. 2, табл. 1). В период с 28 октября по 7 ноября (25–35 сут дрейфа) мощность инерционных колебаний *P174* оставалась высокой, тогда как у *P172* она существенно уменьшилась, зачастую не достигая статистически значимого уровня (рис. 9). В это время скорости и направления дрейфа и ветра были, в целом, близки для обоих буев, которые описывали петли под воздействием изменяющегося ветра, что обсуждалось выше. Возможной причиной различия может быть то, что в это время буи *P172* двигался по северной периферии циклонического вихря С3, т.е. фоновое течение было противоположно дрейфу, тогда как *P174* дрейфовал северо-восточнее в зоне направленного на север течения на восточной периферии вихря С3, т.е. фоновое течение было перпендикулярно дрейфу (рис. 2).

В обоих компонентах ротари-спектров имеются значимые максимумы на масштабах 7–11 сут, что говорит о поступательных, а не вращательных движениях и побуждает оценить вейвлет-спектры величин скоростей дрейфа. Для лучшего разрешения по шкале времени использован вещественный вейвлет DOG-9, у которого конус влияния краевых эффектов уже, чем у вейвлета Морле (рис. 10).

Наиболее долгопериодные колебания на масштабах более 20 сут, которые присутствуют в спектре *P172* и, в короткий временной промежуток, в спектре *P174*, почти полностью находятся в конусе влияния, что делает их анализ ненадежным. На масштабах меньше 7 сут оба спектра бедны, и лишь в периоды интенсивных инерционных колебаний имеются соответствующие значимые максимумы. В обоих спектрах имеются колебания на масштабах 7–9 сут, которые являются значимыми в период от 10 октября до 7 ноября для *P172* (к концу периода масштаб увеличивается до 10–11 сут) и от 8 до 25 октября для *P174*

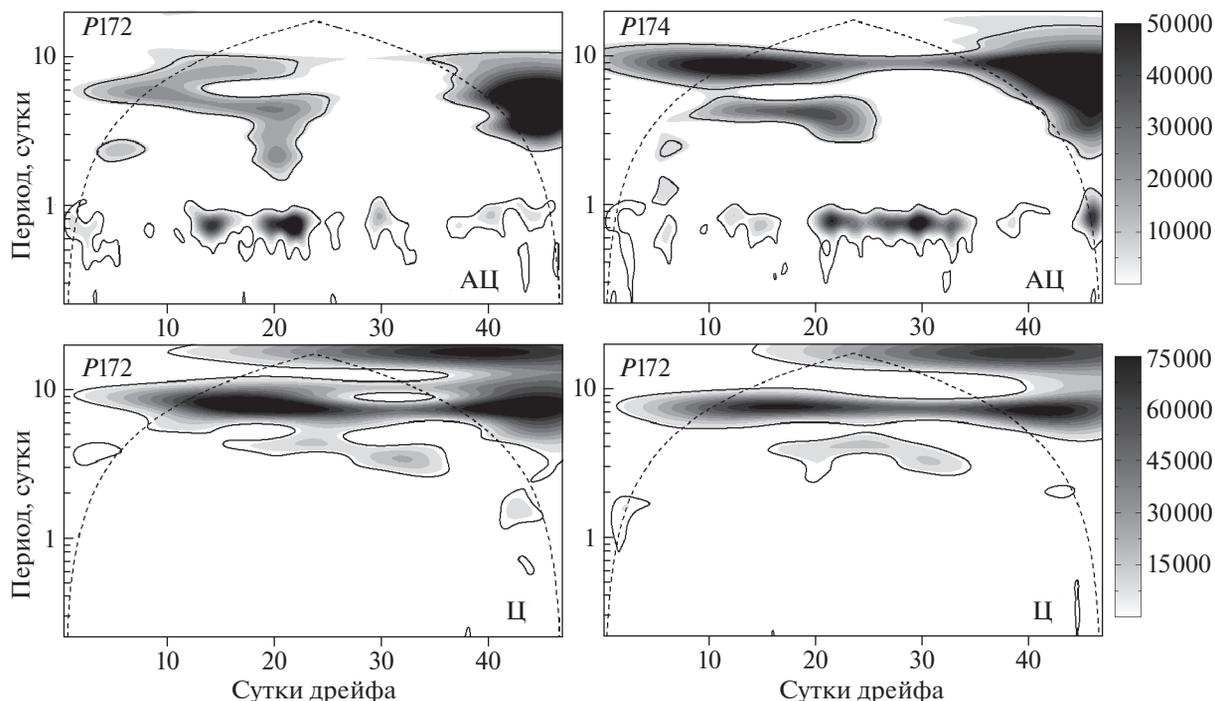


Рис. 9. Антициклоническая (вверху) и циклоническая (внизу) компоненты вейвлет ротари-спектров ($\text{см}^2/\text{с}^2$) векторов скорости дрейфа буев *P172* (слева) и *P174* (справа). Здесь и на рис. 10 показаны конус влияния краевых эффектов и 90%-й уровень статистической значимости по отношению к красному шуму.

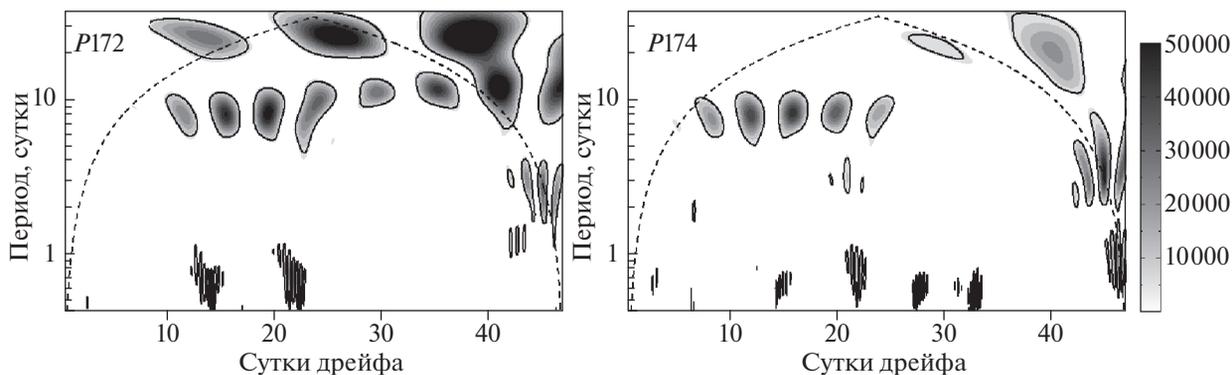


Рис. 10. Вейвлет спектры ($\text{см}^2/\text{с}^2$) величины скорости дрейфа буев *P172* (слева) и *P174* (справа) на основе материнского вейвлета DOG-9.

(рис. 10). Подобные максимумы имеются также в спектрах скорости ветра, что неудивительно при тесной статистической взаимосвязи скоростей дрейфа и ветра.

Были рассчитаны совместные вейвлет-спектры скоростей ветра и дрейфа (на основе комплексного вейвлета Морле, позволяющего оценить фазовый сдвиг и когерентность). Для них также характерна изменчивость на масштабах 7–9 сут: статистически значимые на 95%-м уровне максимумы совместных спектров находятся на 7.5–7.7 сут в обоих случаях, на этом масштабе

средняя когерентность составляет 0.75 для *P172* и 0.66 для *P174*, средний фазовый сдвиг – 16 и 9 ч соответственно. Эти максимумы можно объяснить синоптической изменчивостью ветра в период смены муссона: сильные ветры северных румбов сменялись слабыми ветрами южных румбов, что приводило к колебаниям скорости дрейфа буев. Как обсуждалось выше, подобные изменения ветра, сопровождаемые “петлями” траекторий и уменьшением скорости дрейфа, происходили 12–14, 19–24 и 29–31 октября, а также 3–6 ноября, т.е. через 7–9 сут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнен анализ дрейфа двух поверхностных лагранжевых буюв, выпущенных 4 октября 2011 г. в районе залива Петра Великого в Японском море и отслеживаемых через спутниковую систему Argos. Буи были снабжены подводными парусами, что должно было уменьшить их дрейф под прямым воздействием ветра, но были выброшены 22 и 24 ноября 2011 г. на побережье о. Хонсю и найдены без парусов. По данным о скорости дрейфа буюв, пересекших за полтора месяца Японское море, сделаны следующие выводы.

1. В начальный период дрейфа (с 4 до 11 октября) один из буюв дрейфовал, со средней скоростью 19.3 см/с, в восточном направлении в районе залива Петра Великого, где ожидается направленное на юго-запад Приморское течение (Юрасов, Яричин, 1991). Восточное течение со скоростью 10–15 см/с также зарегистрировано по данным спутниковой альтиметрии, хотя эта оценка не вполне надежна из-за возможных ошибок в этом районе вблизи побережья. Тем не менее, перенос теплых вод на восток подтверждается спутниковыми ИК изображениями. Такое течение было ранее получено с помощью численной гидродинамической модели и объяснено воздействием региональной антициклонической завихренности ветра в начальный период зимнего муссона (Трусенкова, 2012).

2. С 12 октября (в районе 133.5°–136° в.д.) дрейф происходил, в основном, под воздействием ветра, отклоняясь от него вправо на 5°–20°, что, вероятно, связано с потерей парусов после резкого усиления ветра 11 октября. Основанием для такого вывода является тесная статистическая взаимосвязь между низкочастотными (после удаления инерционных колебаний) скоростями дрейфа обоих буюв и между низкочастотными скоростями дрейфа и ветра, а также характер гистограмм повторяемости угла между ветром и дрейфом. На основе регрессионных соотношений между скоростями ветра и дрейфа установлено, что в этот период ветровой дрейф учитывает более половины дисперсии низкочастотной скорости дрейфа и соответствует 23–24 см/с при ветре 10 м/с.

3. Результирующий дрейф буюв на юго-восток обусловлен преобладанием в этот сезон северо-западного ветра, что соответствует средним многолетним данным о сезонной изменчивости поля ветра над Японским морем.

4. На траекториях дрейфа выделяются петлеобразные участки, практически синхронные для обоих буюв. Они связаны с изменениями ветра с северных румбов на южные и обратно при прохождении над морем циклонов и других атмосферных возмущений синоптического масштаба. Всего произошло три таких эпизода: 12–14 октяб-

ря, 19–24 октября и 27 октября–6 ноября; с ними связаны значительные изменения скорости дрейфа, что объясняется различием скоростей ветров северных и южных румбов в этот период года.

5. Заметное влияние на дрейф оказали синоптические вихри, особенно в южной части района. 10–14 ноября буй огибал антициклонический вихрь А4, причем один буй тормозился встречным течением на ЮЗ периферии вихря, а другой ускорился попутным течением на северной периферии. По разности скоростей буюв средняя орбитальная скорость вихря оценена как 7 см/с, что довольно близко к средней оценке орбитальной скорости по альтиметрическим данным (9.5 см/с). Наибольшие скорости дрейфа (до 90 см/с) были достигнуты 18 ноября на западной периферии интенсивных вихрей Цусимского течения (А5 и А6) под воздействием сильного попутного (южного) ветра.

6. На основе ротари вейвлет-спектров векторов скорости дрейфа показано, что инерционные колебания буюв были статистически значимы большую часть периода дрейфа, а мощность спектров увеличивалась на 2 порядка величины 17–19 и 23–26 октября через несколько часов после усиления ветра до 17–18 м/с.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Г.А. Кантакова (ОАО ДЭКО) и А.Ф. Сергеева (ТОИ ДВО РАН) за помощь в организации эксперимента, а также Ю. Ишида (Японское агентство по рыболовству) и С. Ито (Токийский университет) за успешный поиск буюв, выброшенных на побережье Японии.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках госзадания ТОИ ДВО РАН, тема № 121021700346-7, и гранта программы “Дальний Восток” № 18-1-010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дашко Н.А., Варламов С.М. Метеорология и климат // Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 8. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Ред. А.С. Васильев, Ф.С. Терзиев, А.Н. Косарев. СПб: Гидрометеоздат, 2003. С. 19–103.
- Дубина В.А., Файман П.А., Пономарев В.И. Вихревая структура течений в заливе Петра Великого // Изв. ТИНРО. 2013. Т. 173. С. 247–258.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Островский А.Г. Поверхностная циркуляция Японского моря (спутниковая информация и данные дрейфующих буюв) // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 1. С. 66–83.
- Звалинский В.И., Лобанов В.Б., Захарков С.П., Тищенко П.Я. Хлорофилл, замедленная флуоресценция и первичная продукция в северо-западной части Япон-

- ского моря осенью 2000 г. // *Океанология*. 2006. Т. 46. № 1. С. 27–37.
- 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.
- 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.
- Лобанов В.Б., Пономарев В.И., Салюк А.Н., Тищенко П.Я., Тэлли Л.Д.* Структура и динамика синоптических вихрей северной части Японского моря // *Дальневосточные моря России*. Кн. 1: Океанологические исследования / Ред. В.А. Акуличев. М.: Наука, 2007. С. 450–473.
- Лунев Е.Г., Иванов В.А., Кириченко А.Г., Лемешко Е.М., Мотыжев С.В.* Дрифтерная измерительно-информационная система для мониторинга течений в прибрежной зоне моря // *Мор. гидрофиз. журн.* 2010. № 5. С. 52–64.
- Мотыжев С.В.* Создание дрифтерной технологии для контроля океана и атмосферы // *Мор. гидрофиз. журн.* 2016. № 6. С. 74–88.
- Никитин А.А., Лобанов В.Б., Данченков М.А.* Возможные пути переноса теплых субтропических вод в район Дальневосточного морского заповедника // *Изв. ТИНРО*. 2002. Т. 131. С. 41–53.
- Никитин А.А., Юрасов Г.И.* Синоптические вихри Японского моря по спутниковым данным // *Исслед. Земли из космоса*. 2008. № 5. С. 2–57.
- Трусенкова О.О.* Многомерный статистический анализ спутниковых полей напряжения и завихренности ветра в районе Японского моря // *Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса*. 2011. Т. 8. № 2. С. 111–120.
- Трусенкова О.О.* Моделирование региональных особенностей циркуляции Японского моря под различным внешним воздействием // *Изв. ТИНРО*. 2012. Т. 169. С. 118–133.
- Юрасов Г.И., Яричин В.Г.* Течения Японского моря. Владивосток: ДВО РАН, 1991. 176 с.
- Danchenkov M.A., Aubrey D.G., Feldman K.L.* Oceanography of area close to the Tumannaya River mouth (the Sea of Japan) // *Pacific Oceanography*. 2003. V. 1. № 1. P. 61–69.
- Gonella A.* A rotary-component method for analyzing meteorological and oceanographic vector time series // *Deep-Sea Res.* 1972. V. 19. № 12. P. 833–846.
- Ichiye T., Takano K.* Mesoscale eddies in the Japan Sea // *La mer*. 1988. V. 26. № 2. P. 69–75.
- Lee K.J., Nam S.H., Kim Y.G.* Statistical characteristics of East Sea mesoscale eddies detected, tracked, and grouped using satellite altimeter data from 1993 to 2017 // *J. Korean Soc. Oceanogr.* 2019. V. 24. № 2. P. 267–281.
- Liu P.C., Miller G.S.* Wavelet transforms and ocean current data analysis // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1996. V. 13. № 5. P. 1090–1099.
- Lumpkin R., Pazos M.* Measuring surface currents with Surface Velocity Program drifters: The instrument, its data, and some recent results // *Lagrangian Analysis and Prediction of Coastal and Ocean Dynamics* / Eds. A. Griffa, A.D. Kirwan, A.J. Mariano, T. Özgökmen, H.T. Rossby. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. P. 39–67.
- Morimoto A., Yanagi T., Kaneko A.* Eddy field in the Japan Sea derived from satellite altimetric data // *J. Oceanogr. Soc. Japan*. 2000. V. 56. № 4. P. 449–462.
- Prants S.V., Ponomarev V.I., Budyansky M.V., Uleysky M.Y., Fayman P.A.* Lagrangian analysis of the vertical structure of eddies simulated in the Japan Basin of the Japan/East Sea // *Ocean Model*. 2015. V. 86. P. 128–140.
- Ssalto/Duacs User Handbook: (M)SLA and (M)ADT Near-Real Time and Delayed Time Products. SALP-MU-PEA-21065-CLS, Issue: 4.0.* Ramonville-St.-Agne, France: AVISO Project, 2014. 56 p.
- Takematsu M., Ostrovski A.G., Nagano Z.* Observations of eddies in the Japan Basin interior // *J. Oceanogr. Soc. Japan*. 1999. V. 55. № 2. P. 237–246.
- Toba Y., Kawamura H., Yamashita F., Hanawa K.* Structure of horizontal turbulence in the Japan Sea // *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas*. Elsevier, 1984. V. 39. P. 317–332.
- Torrence C., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analysis // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1998. V. 79. № 1. P. 61–78.
- Yoon J.-H., Kim, Y.-J.* Review on the seasonal variation of the surface circulation in the Japan/East Sea // *J. Mar. Sys.* 2009. V. 78. № 2. P. 226–236.

Drift of Surface Lagrangian Buoys in the Central Japan Sea in October–November 2011

O. O. Trusenкова¹, V. B. Lobanov¹, S. Yu. Ladychenko¹, and D. D. Kaplunenko¹

¹*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

Two surface drifters were deployed off Peter the Great Bay in the Japan Sea on October 4, 2011; they crossed the sea in a month and a half and were recovered at the coast of the Honshu Island on November 24, 2011. Using drift, satellite altimetry data and satellite infrared imagery, an eastern current was detected, with the speed of 10–19 cm/s, on October 4–11 off Peter the Great Bay where the southwestward flowing Primorye (Liman) Current should be expected. From October 12 onwards the drift was mostly controlled by the wind, with the 5°–20° shift to the right-hand side of the wind. Based on the linear regression model it is revealed that the wind accounts for more than half of variance of the low-pass filtered, with inertial oscillations removed, drift speed and an average slip is equal to 23–24 cm/s per 10 m/s wind. Inertial oscillations estimated from wavelet rotary spectra of the drift velocity vectors were statistically significant most of the time and their energy increased by two orders of magnitude in several hours after the wind strengthening to 17–18 m/c. Mesoscale eddies had a substantial impact on the drift, especially in the southern area.

Keywords: the Japan Sea, surface Lagrangian drifter, drift, satellite altimetry, infrared satellite imagery, wind, mesoscale eddies, inertial oscillations, wavelet transform, rotary spectrum

REFERENCES

- Danchenkov M.A., Aubrey D.G., Feldman K.L.* Oceanography of area close to the Tumannaya River mouth (the Sea of Japan) // *Pacific Oceanography*. 2003. V. 1. № 1. P. 61–69.
- Dashko N.A., Varlamov S.M.* Meteorologiya i klimat [Meteorology and climate] // *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei*. T. 8. Yaponskoe more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya / A.S. Vasil'ev, F.S. Terziev, A.N. Kosarev, (eds.). SPb: Gidrometeoizdat, 2003. P. 19–103 (In Russian).
- Dubina V.A., Fayman P., Ponomarev V.I.* Vihrevaya struktura techenij v zalive Petra Velikogo [Eddy structure of currents in Peter the Great Bay] // *Izv. TINRO*. 2013. V. 173. P. 247–258 (In Russian).
- Ginzburg A.I., Kostyanoi A.G., Ostrovskii A.G.* Poverkhnostnaya tsirkulyatsiya Yaponskogo morya (sputnikovaya informatsiya i dannye dreifuyushchikh buev) [Surface circulation of the Japan Sea (satellite information and drifters data)] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. № 1. P. 66–83 (In Russian).
- Gonella A.* A rotary-component method for analyzing meteorological and oceanographic vector time series // *Deep-Sea Res.* 1972. V. 19. № 12. P. 833–846.
- Ichiye T., Takano K.* Mesoscale eddies in the Japan Sea // *La mer*. 1988. V. 26. № 2. P. 69–75.
- Ladychenko S.Yu., Lobanov V.B.* Mesoscale Eddies in the Area of Peter the Great Bay on Satellite Data // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2013. V. 49. № 9. P. 939–951.
- Lee K.J., Nam S.H., Kim Y.G.* Statistical characteristics of East Sea mesoscale eddies detected, tracked, and grouped using satellite altimeter data from 1993 to 2017 // *J. Korean Soc. Oceanogr.* 2019. V. 24. № 2. P. 267–281.
- Liu P.C., Miller G.S.* Wavelet transforms and ocean current data analysis // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1996. V. 13. № 5. P. 1090–1099.
- Lobanov V.B., Ponomarev V.I., Salyuk A.N., Tishchenko P.Ya., Talley L.D.* Struktura i dinamika snopticheskikh vikhrei severnoi chasti Yaponskogo morya [Structure and dynamics of mesoscale eddies in the northwestern Japan Sea] // *Dal'nevostochnye morya Rossii*, kn. 1, Okeanologicheskie issledovaniya. Moscow: Nauka, 2007. P. 450–473 (In Russian).
- Lumpkin R., Pazos M.* Measuring surface currents with Surface Velocity Program drifters: The instrument, its data, and some recent results // *Lagrangian Analysis and Prediction of Coastal and Ocean Dynamics* / Eds. A. Griffa, A.D. Kirwan, A.J. Mariano, T. Özgökmen, H.T. Rossby. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. P. 39–67.
- Lunev E.G., Ivanov V.A., Kirichenko A.G., Lemeshko E.M., Motyzhev S.V.* Drifternaya izmeritel'no-informatsionnaya sistema dlya monitoringa techenii v pribrezhnoi zone moray [Drifter measurement and information system for current monitoring in the coastal seas] // *Mor. Gidrofiz. Zhurn.* 2010. № 5. P. 52–64 (In Russian).
- Morimoto A., Yanagi T., Kaneko A.* Eddy field in the Japan Sea derived from satellite altimetric data // *J. Oceanogr. Soc. Japan*. 2000. V. 56. № 4. P. 449–462.
- Motyzhev S.V.* Creation of Drifter Technology for the Ocean and the Atmosphere Monitoring // *Physical Oceanography*. 2016. № 6. P. 67–81.
- Nikitin A.A., Lobanov V.B., Danchenkov M.A.* Vozmozhnye puti perenosa teplykh subtropicheskikh vod v raion Dal'nevostochnogo morskogo zapovednika [Possible pathways of warm subtropical water transport to the Far-Eastern Marine Reserve] // *Izv. TINRO*. 2002. V. 131. P. 41–53 (In Russian).
- Nikitin A.A., Yurasov G.I.* Sinopticheskie vikhri Yaponskogo morya po sputnikovym dannym [Mesoscale eddies in the Japan Sea by satellite data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2008. № 5. P. 2–57 (In Russian).
- Prants S.V., Ponomarev V.I., Budyansky M.V., Uleysky M.Y., Fayman P.A.* Lagrangian analysis of the vertical structure of eddies simulated in the Japan Basin of the Japan/East Sea // *Ocean Model.* 2015. V. 86. P. 128–140.
- Ssalto/Duacs User Handbook: (M)SLA and (M)ADT Near-Real Time and Delayed Time Products. SALP-MU-P-EA-21065-CLS, Issue: 4.0. Ramonville-St.-Agne, France: AVISO Project, 2014. 56 p.
- Takematsu M., Ostrovski A.G., Nagano Z.* Observations of eddies in the Japan Basin interior // *J. Oceanogr. Soc. Japan*. 1999. V. 55. № 2. P. 237–246.
- Toba Y., Kawamura H., Yamashita F., Hanawa K.* Structure of horizontal turbulence in the Japan Sea // *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas*. Elsevier, 1984. V. 39. P. 317–332.
- Torrence C., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analysis // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1998. V. 79. № 1. P. 61–78.
- Trusenkova O.O.* Mnogomernyi statisticheskii analiz sputnikovyx polei napryazheniya i zavikhrennosti vetra v raione Yaponskogo moray [Multivariate analysis of wind stress and curl around the Japan Sea] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2011. V. 8. № 2. P. 111–120 (In Russian).
- Trusenkova O.O.* Modelirovanie regional'nykh osobennostei tsirkulyatsii Yaponskogo morya pod razlichnym vneshnim vozdeistviem [Modeling of regional circulation patterns in the Japan Sea under various forcing scenarios] // *Izv. TINRO*. 2012. V. 169. P. 118–133 (In Russian).
- Yoon J.-H., Kim Y.-J.* Review on the seasonal variation of the surface circulation in the Japan/East Sea // *J. Mar. Sys.* 2009. V. 78. № 2. P. 226–236.
- Yurasov G.I., Yarichin V.G.* Teheniya Yaponskogo moray [Currents in the Japan Sea]. Vladivostok: DVO RAN, 1991. 176 p. (In Russian).
- Zhabin I.A., Dmitrieva E.V.* Sezonnaya i sinopticheskaya izmenchivost' vetrovogo apvellinga u poberezh'ya yuzhnogo Primor'ya (Yaponskoe more) [Seasonal and mesoscale variability of wind upwelling off the southern Primorye coast (the Japan Sea)] // *Vestnik DVO RAN*. 2014. № 5. P. 25–31 (In Russian).
- Zvalinskii V.I., Lobanov V.B., Zakharkov S.P., Tishchenko P.Ya.* Chlorophyll, delayed fluorescence, and primary production in the northwestern part of the Sea of Japan // *Oceanology*. 2006. V. 46. № 1. P. 23–32.