# Оценка сдвигов частоты инерционных колебаний в центральной части Японского моря по данным поверхностных буёв

## О.О. Трусенкова, В.Б. Лобанов, С.Ю. Ладыченко

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

На основе вейвлетных ротари-спектров проанализированы инерционные колебания двух поверхностных буёв, дрейфовавших в центральной части Японского моря в октябре – ноябре 2011 г., и выявлены значимые отклонения частот (периодов) этих колебаний от инерционных. Во время дрейфа под воздействием ветра наиболее повторяемыми были сдвиги периодов 0,5-1 ч как в большую, так и в меньшую сторону. Явных взаимосвязей с интенсивностью инерционных колебаний или с изменениями ветра не наблюдалось. В период дрейфа под воздействием течений (в районе зал. Петра Великого и в зоне тёплых вихрей Цусимского течения) выделены пять событий, когда эти сдвиги достигали 1,5-5,7 ч, что связано с относительной завихренностью скорости течения (Kunze, 1985). Для этих событий выполнены оценки относительной завихренности вдоль траекторий дрейфа по формуле Кунце (Kunze, 1985); средние для событий числа Россби составили 0,15–0,5. Для крупных синоптических вихрей размерами от 100 км имеет место качественное соответствие с оценками завихренности по данным спутниковой альтиметрии, но оценка по данным буёв в несколько раз выше. Для динамических структур размером менее 50 км возможно расхождение двух оценок завихренности и по знакам, но оценка по буям подтверждается качественным сходством с инфракрасными изображениями поверхности моря.

**Ключевые слова:** Японское море, поверхностный буй, дрейф, спутниковая альтиметрия, инфракрасные спутниковые изображения морской поверхности, вейвлет-преобразование, ротари-спектр, инерционные колебания, относительная завихренность, число Россби

Одобрена к печати: 22.12.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-205-218

### Введение

Японское море, ограниченное территориями России, Кореи и Японии, выступает объектом интенсивных международных исследований (Осеапоgraphy..., 2016). Отечественные учёные уделяли значительное внимание синоптическим и мезомасштабным процессам в субарктической части моря (к северу от зоны субарктического фронта на 40–41° с. ш.). Было установлено, что синоптические вихри — неотъемлемая часть динамики субарктических вод (Лобанов и др., 2007; Никитин, Юрасов, 2008; Пономарев и др., 2011; Prants et al., 2015), в частности в районе зал. Петра Великого (Дубина, Катин, 2018; Ладыченко, Лобанов, 2013). Вихреобразование особенно интенсивно в октябре – ноябре, при смене муссона и в начальный период зимнего муссона, когда следующие на юго-запад Приморское и Северо-Корейское течения сменяются переносом вод в противоположном направлении (Дубина, Катин, 2018; Ладыченко, Лобанов, 2013; Лобанов и др., 2007, 2022; Никитин, Юрасов, 2008; Пономарев и др., 2013; Файман, Пономарев, 2018; Danchenkov et al., 2003; Fayman et al., 2019). На основе численного моделирования было установлено, что реверс Приморского течения в это время обусловлен воздействием завихренности касательного напряжения ветра (Трусенкова, 2012).

Исследования синоптических процессов в Японском море опирались как на спутниковые изображения морской поверхности в инфракрасном (ИК) и видимом диапазонах, так и на контактные измерения, прежде всего судовые. Использовались также данные спутниковой альтиметрии, например в юго-западной части моря (Lee, Niiler, 2010) или в зоне субарктического фронта (Prants et al., 2017). Однако их успешному применению в субарктических районах препятствует недостаточное пространственное разрешение, поскольку размеры вихрей здесь невелики и обычно не превышают 50–100 км (Ладыченко, Лобанов, 2013; Лобанов и др., 2007; Никитин, Юрасов, 2008).

Важным инструментом исследования циркуляции вод представляются поверхностные плавучие буи (дрифтеры). В период с 1988 по 2001 г. в Японском море были выпущены 226 дрифтеров, по данным которых проведён анализ течений и оценена их энергетика (Lee, Niiler, 2005), хотя количество буёв, дрейфовавших в северо-западной части моря, было невелико. Можно отметить анализ течений в северо-западной части Японского моря весной и осенью, который был выполнен по данным одного-двух буёв в каждый сезон (Гинзбург и др., 1998; Danchenkov et al., 2003).

Осенью 2011 г. был проведён ещё один дрифтерный эксперимент: два поверхностных буя, оснащённые подводными парусами, были выпущены 4 октября 2011 г. в районе к югу от зал. Петра Великого; их дрейф проанализирован в работе (Трусенкова и др., 2021). В частности, было подтверждено наличие в это время восточного течения вместо обычно наблюдаемого Приморского течения, следующего на запад вдоль континентального берега. Через неделю дрейфа, после сильного шторма и, вероятно, потери парусов, буи стали двигаться преимущественно под воздействием ветра на юго-восток по почти параллельным траекториям, пересекли море и были выброшены на берег в северной части о. Хонсю. Несмотря на то, что результирующее юго-восточное направление дрейфа буёв, по-видимому, объясняется преобладающим в это время года северо-западным ветром, оказывавшим значительное влияние на их дрейф после потери парусов, существенным фактором также послужили синоптические вихри, особенно в зоне Цусимского течения в восточной части моря. Кроме того, были зарегистрированы инерционные колебания буёв, большую часть периода дрейфа статистически значимые (в смысле мощности спектра в соответствующем диапазоне), и их интенсификация при усилении ветра (Трусенкова и др., 2021). Как показано в этой работе, дрейф буёв стал суперпозицией движений под воздействием ветра, течений, в том числе синоптического масштаба, и инерционных колебаний. Но далеко не все аспекты, связанные с инерционными колебаниями, были рассмотрены.

Интерес к инерционным колебаниям объясняется связанной с ними генерацией внутренних волн с частотами, близкими к инерционной, которые распространяются от поверхности в толщу вод и служат важным механизмом вертикального обмена в стратифицированном океане (см. обзор в статье (Alford et al., 2016)). Подобные исследования проводились и в Японском море (см. монографию (Oceanography..., 2016)). Значительное внимание уделяется исследованию инерционных колебаний по данным о дрейфе поверхностных плавучих буёв, в том числе по многолетним массивам для Мирового океана в целом (Chaigneau et al., 2008; Park et al., 2005); обзор отечественных работ на эту тему представлен в статье (Лаврова, Сабинин, 2016). Заслуживает внимание то обстоятельство, что частота инерционных колебаний может изменяться под воздействием относительной завихренности течений. При этом циклоническая завихренность увеличивает её (голубой сдвиг), а антициклоническая уменьшает (красный сдвиг) (Kunze, 1985), что до сих пор применительно к Японскому морю не рассматривалось.

В этой связи представляется актуальным анализ сдвигов частоты (периода) инерционных колебаний поверхностных буёв, дрейфовавших в Японском море в октябре – ноябре 2011 г., что и представлено в настоящей работе. Рассматриваются сдвиги относительно локальной инерционной частоты, изменявшейся с изменением широты дрейфа, которые могут быть связаны с относительной завихренностью течений. Крупномасштабных течений в зоне дрейфа нет (Гидрометеорология..., 2003), поэтому изменения завихренности могут обусловливать-ся динамическими структурами синоптического и меньших масштабов. Для участков дрейфа, где буи движутся с течениями, выполнена оценка относительной завихренности. Для обоснования связи с течениями выполнено сравнение с оценками завихренности по альтиметрическим данным и качественное сопоставление с динамическими структурами на спутниковых ИК-изображениях. Часть времени буи дрейфовали под воздействием ветра; сдвиги частоты в это время рассмотрены отдельно.

#### Данные и методы

Два поверхностных дрейфующих лагранжевых буя типа SVP/30T (англ. Surface Velocity Program) производства компании «Марлин-Юг» (Мотыжев, 2016) были выпущены в 54-м рейсе научно-исследовательского судна (НИС) «Профессор Гагаринский» 4 октября 2011 г. над кромкой шельфа зал. Петра Великого в пунктах с координатами 42,37° с. ш., 132,27° в.д. и 42,39° с. ш., 131,87° в.д. (*рис. 1*). Буи отслеживались с помощью спутниковой системы Argos, в которой они получили идентификаторы P172 и P174. За полтора месяца буи пересекли море и оказались на берегу о. Хонсю 22 и 24 ноября. Для расчёта зональной и меридиональной компонент скорости дрейфа были использованы координаты буёв за каждый час в период с 4 октября по 19 ноября. Конструкция буёв описана на сайте компании (https://marlin-yug. com); обработка и анализ данных дрейфа обсуждались в работе (Трусенкова и др., 2021).



*Рис. 1.* Схема дрейфа буёв Р172 и Р174; цифры обозначают номера событий по *таблице.* Здесь и на *рис. 6* синим и красным цветами показаны связанные с этими событиями участки траекторий дрейфа, где Ro больше и меньше нуля соответственно. Наложены скорость течения (стрелки; см/с) и распределение Ro (цветом) по альтиметрическим данным, осреднённым за период с 4 октября по 19 ноября 2011 г. Здесь и на *рис. 6* области с |Ro| < 0,01 показаны белым

Скорости геострофических течений в период с 4 октября по 19 ноября 2011 г. были взяты из интернета по данным спутниковой альтиметрии, для чего использовались ежедневные сеточные поля CMEMS (*англ.* Copernicus Marine Environment Monitoring Service, https://marine. copernicus.eu/; продукт SEALEVEL\_GLO\_PHY\_L4\_MY\_008\_047) с пространственным разрешением 1/4°. Поля четвертыградусного разрешения лишь грубо описывают реальную циркуляцию в субарктической части Японского моря, но совместно со спутниковыми снимками в ИК-диапазоне (см. ниже) всё же могут использоваться для оценки течений.

Относительная завихренность течений рассчитывалась как  $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ , где *u* и *v* — зональная и меридиональная компоненты вектора скорости; *x* и *y* — декартовы координаты. Число Россби со знаком было определено как Ro =  $\zeta/f_i$ , где  $f_i$  — локальная инерционная частота (параметр Кориолиса), причём Ro положительно для циклонической завихренности и отрицательно для антициклонической. Осреднённые за период дрейфа векторы течений и Ro представлены на *puc. 1.* 

К анализу привлекались спутниковые изображения поверхности Японского моря в ИК-диапазоне с разрешением 1 км, полученные из Центра регионального спутникового мониторинга окружающей среды Дальневосточного отделения РАН (http://satellite.dvo.ru).

Для оценки инерционных колебаний использовались вейвлетные ротари-спектры (иначе называемые спектрами вращательных компонент) векторной скорости дрейфа (Liu, Miller, 1996), которые являются обобщением ротари-спектров Фурье (Gonella, 1972) и применимы к нестационарным временным рядам, что позволяет оценивать колебания с изменяющимися в течение наблюдений частотами. Спектры циклонического и антициклонического вращения (далее для краткости — циклонический и антициклонический спектры) рассчитывались по формулам из работы (Liu, Miller, 1996) с использованием вейвлетных спектров зональной и меридиональной компонент вектора скорости, которые оценивались на основе комплексного вейвлета Морле 6-го порядка. Инерционные колебания обусловливают высокую мощность в соответствующем диапазоне антициклонического спектра. В качестве частоты инерционных колебаний принималась та, на которой мощность спектра в этом диапазоне была максимальна. При вейвлетном преобразовании используется дискретный набор скейлов (периодов), что привносит неопределённость в оценку частоты инерционных колебаний; интервал неопределённости определяется расстоянием между периодами, которое в инерционном диапазоне составляет 0,5 ч.

Расчёты и визуализация спектров выполнены с помощью модифицированной нами процедуры Торренса и Компо; оценён также 90%-й уровень значимости по отношению к теоретическому спектру красного шума и конусы (зоны) влияния краевых эффектов в начале и конце временного ряда (Torrence, Compo, 1998). Для оценки скорости в инерционном диапазоне (далее для краткости — инерционной скорости) выполнялась высокочастотная фильтрация данных на основе обратного вейвлетного преобразования (Torrence, Compo, 1998) с периодом отсечения 1,2 сут.

Оценка относительной завихренности течений основана на соотношении  $f_{eff} = f_i + \zeta/2$ , где  $f_{eff}$  — эффективная частота инерционных колебаний (Кипze, 1985). Отсюда можно рассчитать Ro =  $\zeta/f_i = 2(f_{eff}/f_i - 1) = 2(T_i/T_{eff} - 1)$ , где  $T_i = 2\pi/f_i$  — локальный инерционный период,  $T_{eff} = 2\pi/f_{eff}$  — эффективный период инерционных колебаний. Инерционный период  $T_i$  на широтах дрейфа составляет 0,74—0,79 сут, или 17,7—19,1 ч. Таким образом, при циклонической завихренности течений Ro > 0 и  $T_{eff} < T_i$ , (голубой сдвиг инерционной частоты), а при антициклонической завихренности Ro < 0 и  $T_{eff} > T_i$  (красный сдвиг). Подобная оценка относительной завихренности уже применялась при анализе течений по данным доплеровского измерителя, установленного на стационарном буе SEAWATCH WaveScan в юго-западной части зал. Петра Великого Японского моря (Трусенкова и др., 2022). Отметим, что неопределённость в оценке периодов инерционных колебаний приводит к неопределённости оценки Ro; интервал неопределённости Ro задаётся как (Ro<sub>1</sub>, Ro<sub>2</sub>) при Ro > 0 и (-Ro<sub>2</sub>, -Ro<sub>1</sub>) при Ro < 0, где Ro<sub>1</sub> =  $|2(T_i/(T_{eff} + \Delta T) - 1)|$ , Ro  $2 = |2(T_i/(T_{eff} - \Delta T) - 1)|$ ,  $\Delta T = 0,5$  ч.

В первую неделю, 4—11 октября, буи дрейфовали под воздействием течений динамических структур синоптического масштаба: в восточном течении вдоль 42,5° с.ш. (Р174) и на перифериях антициклонических вихрей (Р172 и Р174) (Трусенкова и др., 2021), что соответствует положениям модели (Kunze, 1985). Затем 12 октября – 9 ноября дрейф происходил под воздействием ветра; 10–14 ноября кроме ветра значительное влияние на дрейф оказывал антициклонический вихрь на 136–137,5° в.д., а позже, 17–19 ноября, буи дрейфовали на западных перифериях крупных антициклонических вихрей, связанных с Цусимским течением в восточной части моря (Трусенкова и др., 2021). Можно полагать, что оценки завихренности правомерны в периоды 4–11 октября и 17–19 ноября.

Оценки  $T_{eff}$  выполнены при условии, что мощность антициклонического вейвлетного ротари-спектра статистически значима (на 90%-м уровне) по отношению к теоретическому спектру красного шума. В каждый момент времени, не попадающий в конус влияния краевых эффектов, за  $T_{eff}$  принимается период, на котором мощность спектра в диапазоне периодов 0,19–1,2 сут максимальна. События, для которых выполнены оценки Ro, дополнительно удовлетворяют следующим условиям:

- 1. Событие происходит во временные периоды, когда буи дрейфуют с течениями.
- 2. Длительность события не меньше инерционного периода.

3. |Ro| > 0,1, а в пределах интервала неопределённости знак Ro не изменяется.

События смещения инерционного периода, их длительность и средние (медианы) за событие оценки смещения периода инерционных колебаний ( $T_{eff} - T_i$ ) (ч UTC, *англ*. Coordinated Universal Time, всемирное координированное время), доли этого смещения (в скобках, %) и Ro (в скобках показаны интервалы неопределённости Ro)

N⁰	Сутки дрейфа	Дата (2011) и время	Длительность, ч	Координаты	$T_{\rm eff} - T_i, y(\%)$	Ro
P174						
1	1,0-4,0	5 октября, 00:00— 8 октября, 00:00	72	131,8—132,6° в.д.	5,7 (32,2)	-0,49 (-0,52/-0,45)
2	5,4-6,6	9 октября, 11:00- 10 октября, 14:00	27	42,5–42,2° с.ш.	-2,5 (14,7)	0,35 (0,27/0,43)
3	45,4-46,3	18 ноября, 10:00— 19 ноября, 08:00	18	138,3—138,8° в.д.	1,5 (8,4)	-0,15 (-0,20/-0,11)
P172						
4	1,6–2,9	5 октября, 14:00- 6 октября, 22:00	33	42,4–42,0° с. ш.	-1,7 (9,7)	0,21 (0,15/0,29)
5	44,7-45,7	17 ноября, 17:00— 18 ноября, 17:00	26	137,3—137,7° в.д.	4,0 (18,6)	-0,31 (-0,35/-0,27)

В *таблице* сведены события, удовлетворяющие сформулированным критериям; показаны осреднённые за событие (медианы)  $T_{eff} - T_i$  и их доли  $(T_{eff} - T_i)/T_i \times 100$ , а также Ro и интервалы неопределённости. Отметим, что изменения интервалов неопределённости при изменении Ro связаны с нелинейной зависимостью от  $T_{eff}$  и с изменением широты и  $T_i$  в течение дрейфа.

### Результаты и их обсуждение

Схема дрейфа буёв приведена на *рис. 1*, где нанесены скорости течения и Ro по альтиметрическим данным, осреднённым за период дрейфа. Хорошо видны многочисленные антициклонические вихри, занимающие центральную часть моря от побережья КНДР и Корейского п-ова на западе до берега о. Хонсю на востоке, а между ними — несколько циклонических вихрей с соответствующим распределением относительной завихренности. Величина Ro невелика даже внутри крупных вихрей (размером около 100 км и более) и почти нигде не превышает 0,1 по абсолютной величине (см. *рис. 1*), поскольку альтиметрические данные с относительно невысоким пространственным разрешением дают приповерхностную скорость, основанную только на градиентах уровня моря.

Инерционные колебания наблюдались непосредственно на траекториях дрейфа в тот период, когда буи двигались преимущественно под воздействием ветра, в виде циклоид, наложенных на поступательное движение (*puc. 2*, см. с. 210). Особенно ярко циклоиды проявляются 17–18 и 25–26 октября, а также 9–14 ноября на траектории Р172 и 25–26 октября и 9–12 ноября на траектории Р174.

На *рис. За* и *4a* (см. с. 210, 211) показаны временные ряды величины (модуля) инерционной скорости дрейфа, которые были получены с помощью высокочастотной фильтрации, как обсуждалось выше, для P172 и P174 соответственно. На *рис. 36* и *46* приведены антициклонические вейвлетные спектры векторов скорости дрейфа для периодов менее полутора суток для P172 и P174 соответственно. Имеет место соответствие во времени усиления колебаний модуля скорости и увеличения мощности спектра. В циклоническом спектре каких-либо колебаний в этом диапазоне нет, как показано в работе (Трусенкова и др., 2021), где эти спектры были приведены полностью. Следует также отметить отсутствие в данных дрейфа приливных колебаний, которые в Японском море весьма слабые, за исключением прибрежных зон и шельфа Корейского пролива (Гидрометеорология..., 2003; Oceanography..., 2016).



Рис. 2. Участки дрейфа буёв под воздействием ветра; цифры показывают числа месяца



Рис. 3. Величина (модуль, |U|) скорости (см/с) дрейфа Р172 в инерционном диапазоне (*a*). Антициклонический вейвлетный ротари-спектр (см<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>) векторов скорости в диапазоне периодов 0,19–1,2 сут (*б*); красным пунктиром показан конус влияния краевых эффектов, красными сплошными линиями — 90%-й уровень статистической значимости, жёлтым пунктиром — инерционный период на широте дрейфа (*T<sub>i</sub>*), голубыми отрезками — эффективный инерционный период (*T<sub>eff</sub>*). Повторяемость (%; градации 0,5 ч) *T<sub>eff</sub>* — *T<sub>i</sub>* для всего периода дрейфа (1) и в период от 12 октября по 9 ноября (2) при условии статистической значимости спектра в инерционном диапазоне (*в*)



Рис. 4. То же, что и на рис. 3, но для P174

На спектрах показаны инерционные периоды на широте дрейфа и эффективные периоды инерционных колебаний; последние — в те временные интервалы, когда спектры достигали 90%-го уровня статистической значимости. Имеют место значимые (в смысле неопределённости оценки) сдвиги  $T_{eff}$  относительно  $T_i$  на широтах дрейфа (см. *рис. 36* и 46). Как показывают гистограммы (для градаций 0,5 ч), пик повторяемости приходится на превышение  $T_{eff}$  на 0,5–1 ч (*рис. 36, 46*). Для Р172 ещё один высокий пик повторяемости приходится на интервал периодов от -1 до -0,5 ч, что означает уменьшение  $T_{eff}$  в сравнении с  $T_i$ . Для Р174 подобный пик повторяемости сдвинут на градацию от -0,5 до 0 ч, т.е. попадает в интервал неопределённости оценок  $T_{eff}$  (0,5 ч), что препятствует его уверенной интерпретации. Причина некоторого расхождения отрицательных пиков для Р172 и Р174 при близких условиях дрейфа не вполне понятна.

Структура гистограмм одинакова при оценке как по всему периоду дрейфа, так и по периоду 12 октября – 9 ноября, когда дрейф проходил под воздействием ветра, с той лишь разницей, что в первом случае несколько увеличена повторяемость значительных сдвигов (больше 3 ч по абсолютной величине). В период дрейфа под воздействием ветра имели место достаточно продолжительные (3–5 сут) события со сдвигами  $T_{eff}$  вне пиков повторяемости (более 1 ч), например на 39–43-и сут (12–16 ноября) дрейфа Р172 (см. *рис. 36*) или 10–13-е сут (14–16 октября) и 39–41-е сут (12–14 ноября) дрейфа Р174 (см. *рис. 46*). Однозначной взаимосвязи величины сдвига с интенсивностью инерционных колебаний или со скоростью ветра не наблюдалось, а судя по альтиметрическим данным, эти события не связаны напрямую и с динамическими структурами. По-видимому, эти сдвиги обусловлены другими причинами, возможно высокочастотным атмосферным воздействием.

Для периодов времени, когда буи дрейфовали под воздействием течений, выделено пять событий значительного сдвига  $T_{eff}$ , которые можно связать с относительной завихренностью

потока; для них сделаны оценки Ro: два таких события произошло в дрейфе P172 и три события — в дрейфе P174 (см. *таблицу*). Эти оценки существенно превышают величины Ro по альтиметрическим данным в ближайших узлах сетки (по абсолютной величине; см. *puc. 1*). Соответствующие сдвиги  $T_{eff}$  превышают 1,5 ч, т.е. находятся вне пиков гистограмм, характерных для периода дрейфа под воздействием ветра. Соответствующие участки на траекториях буёв выделены красным (для антициклонической завихренности) и синим (для циклонической) цветами на *puc. 1*. Зоны антициклонической завихренности находятся внутри тёплых синоптических вихрей (см. *puc. 1*), видимых и на ИК-изображениях (*puc. 5*). Известно, что на периферии синоптических вихрей существуют мезомасштабные (малые) вихри и струи, а с ними связаны изменения завихренности и её знака (McWilliams, 2016). Циклоническая завихренность может также развиваться внутри зон холодной воды. В частности, языки холодных вод вклинивались с северо-запада в область тёплых вод на юге, что видно на спутниковом ИК-изображении за 17 ноября (см *puc. 5*). Со струйными течениями могут быть связаны вихревые диполи с антициклонической завихренностью справа от струи (если смотреть по течению) и циклонической — слева.



*Рис. 5.* Изображения поверхности Японского моря в ИК-диапазоне со спутника NOAA (*анел.* National Oceanic and Atmospheric Administration). Тёмный тон соответствует тёплым водам, светлый — холодным, белый — облачности. Нанесены траектории дрейфа P172 (зелёным цветом) и P174 (жёлтым цветом); звёздочками показаны положения буёв в соответствующий день

В первую неделю после выпуска (4–11 октября) дрейф буёв на участке до 133–133,5° в.д. определялся течениями (см. *рис. 1, 6a*). При этом Р174 двигался на восток, что соответствовало альтиметрическим течениям. В это время (5–8 октября) произошёл сильнейший за весь период дрейфа красный сдвиг инерционной частоты с отклонением более чем на 30 %, чему соответствует антициклоническая завихренность с Ro, близким к –0,5 (событие 1; см. *таблицу*). Вихревой диполь виден и в альтиметрических данных, но завихренность мала по абсолютной величине (|Ro| < 0,1), а стрежень течения и зона антициклонической завихренности расположены несколько южнее траектории дрейфа (см. *рис. 6a*, см. с. 213). На спутниковом ИК-изображении за 4 октября видно, что Р174 дрейфует в зоне тёплых вод антициклонического вихря, а затем (см. ИК-изображение за 8 октября на *рис. 5*) огибает его периферию, находясь в зоне циклонической завихренности 9–10 октября (событие 2; см. *таблицу*). Дрейф

Р172 в этот период вообще не соответствует альтиметрическим течениям, но хорошо согласуется со структурами на спутниковых ИК-изображениях. Снимки за 4 и 8 октября (см. *puc. 5*) показывают, что Р172 в это время огибал восточную периферию тёплого ядра антициклонического вихря, где могла развиваться циклоническая завихренность, зарегистрированная как событие 4 (см. *maблицу*). Несоответствие альтиметрических течений данным дрейфа объясняется недостаточным пространственным разрешением.



*Рис. 6.* Участки траекторий дрейфа Р172 и Р174; наложены течения (стрелки; см/с) и Ro (цветом), рассчитанные по альтиметрическим данным за 12 октября (*a*) и 17 ноября (*б*); обозначения те же, что и на *рис. 1* 

К востоку от  $137,5-138^{\circ}$  в.д. траектории дрейфа проходили по западным перифериям Цусимских вихрей (*puc. 66*). Соответственно, оценка Ro по дрейфу дала антициклоническую относительную завихренность (события 3 и 5, см. *таблицу*), и эти оценки на порядок величины выше альтиметрических (по абсолютной величине). Оценка Ro для события 5 выше (по абсолютной величине) оценки для события 3 (-0,31 и -0,15 соответственно), хотя визуально очевидно, что кривизна траектории дрейфа P174 больше, чем у P172. К сожалению, этот район закрыт облачностью на спутниковом ИК-изображении от 17 ноября (см. *puc. 5*), однако

по альтиметрическим данным вихрь, огибаемый буем P174, мощнее вихря, с которым связан P172 (см. *рис. бб*). Поэтому, вероятно, оценка Ro для события 3 по дрейфу P172 завышена.

Были ситуации, когда буи дрейфовали под совместным воздействием ветра и течений. В частности, в районе 136–137,5° в.д. находился крупный антициклонический вихрь, разделивший буи: P174 его огибал с севера, причём траектория дрейфа заметно изменялась, становясь почти зональной, а P172 — с юга. Но воздействие ветра всё же было значительным, особенно на P172, траектория дрейфа которого почти не изменилась в окрестности вихря. Поэтому оценка Ro на этом участке дрейфа не выполнялась.

В период 12–16 ноября Р172 дрейфовал на юго-восток по почти прямолинейной траектории в районе, где по альтиметрическим данным находился крупный циклонический вихрь (136–137,5° в.д.; см. *рис. бб*). На спутниковом ИК-изображении за 17 ноября в этом районе располагались чередующиеся зоны холодных и тёплых вод, связанные с мезомасштабными структурами, которые не воспроизводятся в данных спутниковой альтиметрии, причём траектория дрейфа Р172 проходила в основном через зону тёплых вод (ср. *рис. 5 и бб*). Этот пример ещё раз показывает, что вихревую динамику по альтиметрическим данным следует интерпретировать с осторожностью и, по возможности, проверять с использованием ИК-изображений.

#### Заключение

На основе вейвлетных ротари-спектров проанализированы инерционные колебания двух поверхностных буёв, дрейфовавших в центральной части Японского моря в октябре – ноябре 2011 г., и выявлены значимые отклонения частот (периодов) этих колебаний от инерционных (на широтах дрейфа). Установлено, что при дрейфе под преимущественным воздействием ветра (12 октября – 9 ноября) наиболее повторяемыми были сдвиги периодов 0,5–1 ч как в большую, так и в меньшую сторону. Явных взаимосвязей с интенсивностью инерционных колебаний или с изменениями ветра не наблюдалось.

При дрейфе под воздействием течений (в районе зал. Петра Великого 4–11 октября и в зоне тёплых вихрей Цусимского течения 17–19 ноября) сдвиги периодов инерционных колебаний достигали заметно больших значений. Было выявлено пять событий, удовлетворяющих выбранным критериям, средние сдвиги во время которых составили 1,5–5,7 ч. Для этих событий выполнены оценки относительной завихренности скорости течения по формуле, предложенной в работе (Кипze, 1985), согласно которой красный и голубой сдвиги частоты инерционных колебаний существуют при антициклонической и циклонической завихренности соответственно. Средние числа Россби для этих событий составили 0,15–0,35, а в одном случае — почти 0,5. С использованием данных спутниковой альтиметрии и ИК-изображений поверхности моря установлено, что во время этих событий буи дрейфовали в зонах синоптических вихрей, а наиболее сильная завихренность связана с зоной справа от стрежня восточного течения, которое в октябре – ноябре сменяет в районе к югу от зал. Петра Великого направленное на юго-запад Приморское течение (Лобанов и др., 2022).

Оценки относительной завихренности были также выполнены по альтиметрическим данным. Для крупных вихрей размерами от 100 км в целом имело место качественное соответствие обеих оценок завихренности, но оценка по дрейфу буёв оказалась в несколько раз выше альтиметрической. Это объясняется недостаточным пространственным разрешением альтиметрических данных, что приводит к занижению градиентов уровня моря, скорости течения и относительной завихренности. В динамических структурах размером менее 50 км возможно расхождение двух оценок завихренности и по знакам, но оценка по буям подтверждается качественным сходством с ИК-изображениями.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы Тихоокеанского океанологического института им. В.И.Ильичёва Дальневосточного отделения РАН (ТОИ ДВО РАН) № 121021700346-7. Авторы благодарны Г.А. Кантакову (ООО «ДЭКО») за предоставление дрифтеров, сотрудникам ТОИ ДВО РАН Д.Д. Каплуненко и А.Ф. Сергееву за их запуск с борта НИС «Профессор Гагаринский», анонимному рецензенту за доброжелательность и исключительно полезные замечания. Использована спутниковая информация Центра регионального спутникового мониторинга окружающей среды Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН.

## Литература

- 1. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 8. Японское море. Т. 1. Гидрометеорологические условия / ред. Васильев А. С., Косарев А. Н., Терзиев Ф. С. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. 394 с.
- 2. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Островский А. Г. Поверхностная циркуляция Японского моря (спутниковая информация и данные дрейфующих буев) // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 1. С. 66-83.
- 3. Дубина В.А., Катин И.О. Особенности трансграничного переноса поверхностных вод в северо-западной части Японского моря по многолетним спутниковым наблюдениям // Вестн. Дальневосточного отд-ния Российской акад. наук. 2018. № 6. С. 13–19.
- 4. Лаврова О. Ю., Сабинин К. Д. Проявления инерционных колебаний на спутниковых изображениях морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 60–73. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-60-73.
- 5. *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. DOI: 10.7868/S0205961413030032.
- 6. 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.
- 7. Лобанов В. Б., Сергеев А. Ф., Трусенкова О. О., Ладыченко С. Ю., Марьина Е. Н., Щербинин П. Е. Инструментальные наблюдения и статистический анализ течений у побережья юго-восточного Приморья в осенне-зимний период // Подводные исслед. и робототехника. 2022. № 3. С. 54–66. DOI: 10.37102/1992-4429\_2022\_41\_03\_05.
- 8. *Мотыжев С. В.* Создание дрифтерной технологии для контроля океана и атмосферы // Морской гидрофиз. журн. 2016. № 6. С. 74–88.
- 9. *Никитин А.А., Юрасов Г.И.* Синоптические вихри Японского моря по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 5. С. 2–57.
- 10. Пономарев В. И., Файман П. А., Дубина В. А., Ладыченко С. Ю., Лобанов В. Б. Синоптическая вихревая динамика над северо-западным материковым склоном и шельфом Японского моря (моделирование и результаты дистанционных наблюдений) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли их космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 100–104.
- 11. 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.
- 12. Трусенкова О.О. Моделирование региональных особенностей циркуляции Японского моря под различным внешним воздействием // Изв. ТИНРО. 2012. Т. 169. С. 118–133.
- 13. *Трусенкова О. О., Лобанов В. Б., Ладыченко С. Ю., Каплуненко Д. Д.* Дрейф поверхностных лагранжевых буев в центральной части Японского моря в октябре ноябре 2011 г. // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 1. С. 12–24. DOI: 10.31857/S0205961421010097.
- 14. *Трусенкова О. О., Лобанов В. Б., Лазарюк А. Ю.* Течения в юго-западной части залива Петра Великого, Японское море (по данным стационарного буя WAVESCAN, 2016 г.) // Океанология. 2022. Т. 62. № 3. С. 365–379. DOI: 10.31857/S0030157422030145.
- 15. *Файман П.А., Пономарев В.И.* Диагностические расчеты циркуляции вод залива Петра Великого по данным океанографических экспедиций ДВНИГМИ 2007–2010 гг. // Вестн. Дальневосточного отд-ния Российской акад. наук. 2018. № 1(197). С. 60–70.
- 16. *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. V. 8. P. 95–123. DOI: 10.1146/ annurev-marine-010814-015746.
- Chaigneau A., Pizarro O., Rojas W. Global climatology of near-inertial current characteristics from Lagrangian observations // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. Art. No. L13603. DOI: 10.1029/2008GL034060.
- 18. *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. No. 1. P. 61–69.

- Fayman P.A., Prants S. V., Budyansky M. V., Uleysky M. Yu. Coastal summer eddies in the Peter the Great Bay of the Japan Sea: in situ data, numerical modeling and Lagrangian analysis // Continental Shelf Research. 2019. V. 181. P. 143–155. DOI: 10.1016/j.csr.2019.05.002.
- 20. *Gonella A*. A rotary-component method for analyzing meteorological and oceanographic vector time series // Deep-Sea Research. 1972. V. 19. No. 12. P. 833–846.
- 21. *Kunze E.* Near-Inertial Wave Propagation in Geostrophic Shear // J. Physical Oceanography. 1985. V. 15. No. 5. P. 544–565.
- 22. *Lee D.-K.*, *Niiler P.* The energetic surface circulation patterns of the Japan/East Sea // Deep-Sea Research II. 2005. V. 52. No. 11–13. P. 1547–1563. DOI: 10.1016/j.dsr2.2003.08.008.
- 23. *Lee D.-K.*, *Niiler P.* Eddies in the southwestern Japan/East Sea // Deep-Sea Research. Pt. I. Oceanographic Research Papers. 2010. V. 57. No. 10. P. 1233–1242. DOI: 10.1016/j.dsr.2010.06.002.
- 24. *Liu P.C., Miller G.S.* Wavelet transforms and ocean current data analysis // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 1996. V. 13. No. 5. P. 1090–1099.
- 25. *McWilliams G*. S. Submesoscale currents in the ocean // Proc. Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences. 2016. V. 472. Art. No. 20160117. DOI: 10.1098/rspa.2016.0117.
- 26. Oceanography of the East Sea (Japan Sea). Switzerland: Springer Intern. Publ., 2016. 460 p.
- 27. *Park J. J., Kim K., King B.A.* Global statistics of inertial motions // Geophysical Research Letters. 2005. V. 32. Art. No. L14612. DOI: 10.1029/2005GL023258.
- 28. *Prants S. V., Ponomarev V.I., Budyansky M. V., Uleysky M. Y., Fayman P.A.* Lagrangian analysis of vertical structure of eddies simulated in the Japan Basin of the Japan/East Sea // Ocean Modeling. 2015. V. 86. P. 128–140. DOI: 10.1016/j.ocemod.2014.12.010.
- Prants S. V., Budyansky M. V., Uleysky M. Y. Statistical analysis of Lagrangian transport of subtropical waters in the Japan Sea based on AVISO altimetry data // Nonlinear Processes in Geophysics. 2017. V. 24. No. 1. P. 89–99. DOI: 10.5194/npg-24-89-2017.
- 30. *Torrence C., Compo G. P.* A practical guide to wavelet analysis // Bull. American Meteorological Society. 1998. V. 79. No. 1. P. 61–78.

### Estimation of inertial frequency shifts in the central Japan Sea from surface drifter data

#### O. O. Trusenkova, V. B. Lobanov, S. Yu. Ladychenko

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

Using wavelet rotary spectra, inertial oscillations of two surface drifters in the central Japan Sea in October and November 2011 were analyzed and significant frequency (period) shifts from the local inertial frequencies (periods) were found. When the buoys drifted under the wind forcing, the 0.5-1 hour shifts were the most frequent, with the period either increased or decreased. When the buoys drifted with currents, the shifts reached 1.5-5.7 hours, which can be related to the background relative vorticity (Kunze, 1985). Using Kunze's formula, the corresponding Rossby numbers along the drift trajectory were estimated as 0.15-0.5. There is a qualitative agreement with vorticity estimated from satellite altimetry for large mesoscale eddies, with the sizes of 100 km and more, although vorticity estimated from the buoys and altimetry vorticity estimates can have different signs but the buoy-based estimates are confirmed by infrared satellite imagery.

**Keywords:** Japan Sea, surface buoy, drift, satellite altimetry, infrared imagery, wavelet transform, rotary spectrum, inertial oscillations, relative vorticity, Rossby number

Accepted: 22.12.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-205-218

### References

- 1. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. T. 8. Yaponskoe more. T. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya* (Hydrometeorology and hydrochemistry of the Russian seas. Vol. 8. The Japan Sea. Issue 1. Hydrometeorological conditions), Vasil'ev A. S., Kosarev A. N., Terziev F. S. (eds), Saint Peterburg: Gidrometeoizdat, 2003, 394 p. (in Russian).
- 2. Ginzburg A. I., Kostyanoi A. G., Ostrovskii A. G., Sufrace circulation of the Japan Sea (satellite information and drifters data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1998, No. 1, pp. 66–83 (in Russian).
- 3. Dubina V.A., Katin I.O., Transboundary transfer features in the northwestern part of the Japan Sea based on the multiyear satellite imagery, *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk*, 2018, No. 6, pp. 13–19 (in Russian).
- 4. Lavrova O. Yu., Sabinin K. D., Manifestations of inertial oscillations in satellite images of the sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 60–73 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-60-73.
- 5. Ladychenko S. Yu., Lobanov V.B., Mesoscale Eddies in the Area of Peter the Great Bay on Satellite Data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2013, Vol. 49, No. 9, pp. 939–951, DOI: 10.1134/S0001433813090193.
- 6. Lobanov V. B., Ponomarev V. I., Salyuk A. N., Tishchenko P. Ya., Talley L. D., Structure and dynamics of mesoscale eddies in the northwestern Japan Sea, In: *Dal'nevostochnye morya Rossii, Kn. 1, Okeanologiches-kie issledovaniya*, Moscow: Nauka, 2007, pp. 450–473 (in Russian).
- Lobanov V. B., Sergeev A. F., Trusenkova O. O., Ladychenko S. Yu., Mar'ina E. N., Shcherbinin P. E., Instrumental observations and statistical analysis of currents off the southeastern Primorye, the Japan Sea, in the autumn-to-winter transition period, *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2022, No. 3, pp. 54–66 (in Russian), DOI: 10.37102/1992-4429\_2022\_41\_03\_05.
- 8. Motyzhev S.V., Creation of Drifter Technology for the Ocean and the Atmosphere Monitoring, *Physical Oceanography*, 2016, No. 6, pp. 67–81 (in Russian).
- 9. Nikitin A.A., Yurasov G.I., Mesoscale eddies in the Japan Sea by satellite data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2008, No. 5, pp. 2–57 (in Russian).
- 10. Ponomarev V. I., Faiman P. A., Dubina V. A., Ladychenko S. Yu., Lobanov V. B., Mesoscale eddy dynamics over the continental slope and shelf in the northwestern Japan Sea (simulation and remote sensing results), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 100–104 (in Russian).
- 11. Ponomarev V. I., Faiman P. A., Dubina V. A., Mashkina I. V., Features of the mesoscale and submesoscale dynamics at the continental slope of the Japan Basin and Primorye shelf, the Japan Sea, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 155–165 (in Russian).
- 12. Trusenkova O.O., Modeling of the regional circulation features in the Japan Sea under the various kinds of forcing, *Izv. TINRO*, 2012, Vol. 169, pp. 118–133 (in Russian).
- 13. Trusenkova O.O., Lobanov V.B., Ladychenko S.Yu., Kaplunenko D.D., Drift of Surface Lagrangian Buoys in the Central Japan Sea in October–November 2011, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, Vol. 57, No. 9, pp. 969–979, DOI: 10.1134/S0001433821090644.
- 14. Trusenkova 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, pp. 365–379, DOI: 10.1134/S0001437022030146.
- 15. Faiman P.A., Ponomarev V.I., Diagnostic simulation of the circulation in Peter the Great Bay, the Japan Sea, based on data of the FERHRI research cruises in 2007–2010, *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk*, 2018, No. 1, pp. 60–70 (in Russian).
- 16. 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, pp. 95–123, DOI: 10.1146/ annurev-marine-010814-015746.
- 17. Chaigneau A., Pizarro O., Rojas W., Global climatology of near-inertial current characteristics from Lagrangian observations, *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35, Art. No. L13603, DOI: 10.1029/2008GL034060.
- 18. 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, Vol. 1, No. 1, pp. 61–69.
- Fayman P. A., Prants S. V., Budyansky M. V., Uleysky M. Yu., Coastal summer eddies in the Peter the Great Bay of the Japan Sea: in situ data, numerical modeling and Lagrangian analysis, *Continental Shelf Research*, 2019, Vol. 18, pp. 143–155, DOI: 10.1016/j.csr.2019.05.002.
- 20. Gonella A., A rotary-component method for analyzing meteorological and oceanographic vector time series, *Deep-Sea Research*, 1972, Vol. 19, No. 12, pp. 833–846.
- 21. Kunze E., Near-Inertial Wave Propagation in Geostrophic Shear, *J. Physical Oceanography*, 1985, Vol. 15, No. 5, pp. 544–565.

- 22. Lee D.-K., Niiler P.P., The energetic surface circulation patterns of the Japan/East Sea, *Deep-Sea Research II*, 2005, Vol. 52, No. 11-1, pp. 1547–1563, DOI: 10.1016/j.dsr2.2003.08.008.
- 23. Lee D.-K., Niiler P.P., Eddies in the southwestern Japan/East Sea, *Deep-Sea Research*, *Part I*, *Oceanographic Research Papers*, 2010, Vol. 57, No. 10, pp. 1233–1242, DOI: 10.1016/j.dsr.2010.06.002.
- 24. Liu P.C., Miller G.S., Wavelet transforms and ocean current data analysis, J. Atmospheric and Oceanic Technology, 1996, Vol. 13, No. 5, pp. 1090–1099.
- 25. McWilliams G.S., Submesoscale currents in the ocean, *Proc. Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2016, Vol. 472, Art. No. 20160117, DOI: 10.1098/rspa.2016.0117.
- 26. Oceanography of the East Sea (Japan Sea), Switzerland: Springer Intern. Publ., 2016, 460 p.
- 27. Park J. J., Kim K., King B.A., Global statistics of inertial motions, *Geophysical Research Letters*, 2005, Vol. 32, No. 14, Art. No. L14612, DOI: 10.1029/2005GL023258.
- 28. Prants S. V., Ponomarev V. I., Budyansky M. V., Uleysky M. Y., Fayman P. A., Lagrangian analysis of vertical structure of eddies simulated in the Japan Basin of the Japan/East Sea, *Ocean Modeling*, 2015, Vol. 86, pp. 128–140, DOI: 10.1016/j.ocemod.2014.12.010.
- 29. Prants S. V., Budyansky M. V., Uleysky M. Y., Statistical analysis of Lagrangian transport of subtropical waters in the Japan Sea based on AVISO altimetry data, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2017, Vol. 24, No. 1, pp. 89–99, DOI: 10.5194/npg-24-89-2017.
- 30. Torrence C., Compo G. P., A practical guide to wavelet analysis, *Bull. American Meteorological Society*, 1998, Vol. 79, No. 1, pp. 61–78.