

Аномальная изменчивость вызванных тайфуном Лайнрок инерционных колебаний шельфовых вод залива Петра Великого в августе – сентябре 2016 года

В. В. Новотрясов ✉, А. А. Сергеев, Е. П. Павлова

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, Россия
✉ vadimnov@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 20.07.2022; одобрена после рецензирования 28.11.2022;
принята к публикации 16.01.2023.

Аннотация

Цель. Проанализированы характеристики инерционных колебаний, возбужденных экстремальным атмосферным воздействием на фоне течения со сдвигом, на примере инерционных колебаний, возбужденных тайфуном Лайнрок в шельфовых водах юго-западного района залива Петра Великого на фоне присклонового Приморского течения.

Методы и результаты. Используется частотно-временной спектральный анализ мезомасштабной изменчивости реализаций вращательных компонент вектора скорости течений, вызванной тайфуном Лайнрок. Реализации скорости течений получены с помощью океанографической системы *Seawatch*, заякоренной на юго-западном шельфе залива Петра Великого. Установлен значительный рост спектральной плотности кинетической энергии течений с вращением по часовой стрелке на частоте ω_i , близкой к параметру Кориолиса $f \approx 2\pi/18$ (рад/ч) на широте постановки системы *Seawatch* на начальном этапе воздействия тайфуна. Аналогичный рост спектральной плотности кинетической энергии на этой же частоте ω_i , но с вращением против часовой стрелки зафиксирован на заключительном этапе воздействия тайфуна. Зарегистрированные инерционные колебания вектора скорости с противоположными направлениями его вращения на частоте ω_i демонстрируют существенное отличие их годографов от канонического годографа скорости с круговым вращением по часовой стрелке.

Выводы. На фоне присклонового Приморского течения, существенно усиленного (до 0,9 м/с) тайфуном Лайнрок, инерционные колебания скорости этого течения, возбужденные тайфуном на шельфе залива Петра Великого, проявляют аномальную изменчивость. Модель этих колебаний в присутствии сдвигового течения, предложенная Г. К. Коротаевым и К. Д. Сабининым (2017 г.), дает качественную интерпретацию изменчивости инерционных колебаний шельфовых вод залива, возбужденных тайфуном Лайнрок в августе – сентябре 2016 г.

Ключевые слова: инерционные колебания, годограф скорости, сдвиговое течение, натурные данные, шельф, залив Петра Великого, тайфун Лайнрок, тайфун


Благодарности: авторы благодарят рецензента за замечания, которые привели к существенному улучшению статьи. Работа выполнена в рамках темы гос. задания ТОИ ДВО РАН «Математическое моделирование и анализ динамических процессов в океане» (№ темы 121021700341-2).

Для цитирования: Новотрясов В. В., Сергеев А. А., Павлова Е. П. Аномальная изменчивость вызванных тайфуном Лайнрок инерционных колебаний шельфовых вод залива Петра Великого в августе – сентябре 2016 года // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 2. С. 234–248. EDN DSONUJ. doi:10.29039/0233-7584-2023-2-234-248

Anomalous Variations of the Typhoon Lionrock Induced Inertial Oscillations of Shelf Waters in the Peter the Great Bay in August – September, 2016

V. V. Novotryasov , A. A. Sergeev, E. P. Pavlova

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

 vadimnov@poi.dvo.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the study is to analyze the characteristics of inertial oscillations induced by extreme atmospheric effects against the background of the shear current, using the example of inertial oscillations caused by the typhoon Lionrock in the shelf waters of the southwestern Peter the Great Bay against the background of the near-slope Primorskoe current.

Methods and Results. The frequency-temporal spectral analysis of the typhoon Lionrock induced mesoscale variability of the rotational components' realizations of the current velocity vector was applied. The current velocity realizations were obtained using the *Seawatch* oceanographic system moored on the southwestern shelf of the Peter the Great Bay. The specified analysis made it possible to establish that at the latitude at which the *Seawatch* system had been installed and at the initial stage of the typhoon impact, the spectral density of currents kinetic energy grew significantly at clockwise rotation at frequency ω_i close to the Coriolis parameter $f \approx 2\pi/18$ (rad/h). A similar growth of the kinetic energy spectral density was recorded at the same frequency ω_i , but at the counterclockwise rotation and at the final stage of typhoon impact. The recorded inertial oscillations of velocity vector at opposite directions of its rotation at frequency ω_i demonstrate a significant difference of their travel time curves from the canonical one at a circular clockwise rotation.

Conclusions. Against the background of the near-slope Primorskoe current significantly amplified (up to 0.9 m/s) by the typhoon Lionrock, the velocity inertial variations of this current induced by the typhoon on the shelf of the Peter the Great Bay, show anomalous variability. The model of these oscillations in the presence of a shear current proposed by G. K. Korotaev and K. D. Sabinin (2017) provides a qualitative interpretation of the inertial oscillations' variability in the bay shelf waters resulted from the typhoon Lionrock impact in August – September, 2016.

Keywords: inertial oscillations, velocity hodograph, shear current, field data, shelf, Peter the Great Bay, typhoon Lionrock, typhoon

Acknowledgements: The authors are grateful to the reviewer for the comments which favored a significant improvement of the article. The work was carried out within the framework of the theme of state assignment of POI FEB of RAS "Mathematical simulation and analysis of dynamic processes in the ocean" (theme No. 121021700341-2).

For citation: Novotryasov, V.V., Sergeev, A.A. and Pavlova, E.P., 2023. Anomalous Variations of the Typhoon Lionrock Induced Inertial Oscillations of Shelf Waters in the Peter the Great Bay in August – September, 2016. *Physical Oceanography*, 30(2), pp. 215-228. doi:10.29039/1573-160X-2023-2-215-228

Введение

Среди мезомасштабных колебаний с многочасовыми периодами особое место занимают инерционные колебания скорости течений, имеющие на фиксированной широте периоды, близкие к $2\pi/f$ ($f = 2\Omega|\sin\varphi|$ – параметр Кориолиса на этой широте) [1]. Колебания с инерционным периодом представляют собой круговое вращение морской воды и проявляются в измерениях скорости течений в заданной точке, вектор которой вращается по часовой стрелке с частотой, равной значению параметра Кориолиса f на широте наблюдений.

Вызванные ветром инерционные колебания (ИК) являются предметом активного изучения, поскольку это движение играет важную роль в переносе импульса от атмосферы к океанам [2]. Возбуждение ИК под действием ветрового напряжения в верхнем перемешанном слое океана широко изучалось с помощью наблюдений, аналитических и численных моделей. Заметные результаты наблюдений были получены в 1980-х гг., например в [3, 4], а затем в новаторской работе [5]. Эти исследования показали, что в колебаниях скорости течений под слоем перемешивания доминируют колебания квазиинерционной частоты, которые качественно согласуются с кинематикой внутренних волн.

В центре возобновившегося в последнее десятилетие интереса к квазиинерционным внутренним волнам находится энергия, которую эти волны переносят во внутренние слои океана. Предполагается, что большая часть этой энергии рассеивается в поверхностном слое океана и используется там для его перемешивания. В связи с этим доля потока излучения в поверхностном потоке энергии представляет особый интерес для специалистов по моделированию океана [6].

Исследования ИК важны не только для выяснения их особенностей в акваториях, в том числе и в прибрежных, но также для анализа условий распространения загрязнений естественного и антропогенного происхождения [7]. Кроме того, исследование механизмов и условий генерации и распространения ИК в шельфовой зоне океанов важно для интерпретации результатов наземно-космического мониторинга морских акваторий [8, 9].

На основе продолжительных наблюдений на гавайском шельфе и последующего анализа свойств ИК, опубликованного в работах [10, 11], был выявлен ряд аномальных особенностей этих колебаний. Среди них форма годографа скорости, направление его вращения, периоды вращения вектора скорости и ряд других. Было высказано предположение о том, что вблизи крутых склонов и под влиянием сильных и неоднородных в пространстве течений характеристики ИК могут испытывать значительные изменения, а наблюдаемые искажения годографов инерционных течений являются следствием суперпозиции ИК и фонового течения со сдвигом.

В недавней работе К. Д. Сабина и Г. К. Коротаева [12] сформулирована аналитическая модель ИК в присутствии фонового течения со сдвигом, основанная на точном решении уравнений мелкой воды. В рамках этой модели получило обоснование предположение о том, что характеристики ИК могут испытывать значительные изменения под влиянием сильных и неоднородных в пространстве течений. С использованием этой модели была дана интерпретация изменчивости ИК, зафиксированная в упомянутых выше работах.

Основной причиной ИК считается действие ветра [13]. В связи с этим в данной работе выполнено исследование специфических особенностей ИК шельфовых вод, вызванных экстремальным атмосферным воздействием, таким как тайфун. В работе анализируются особенности ИК на шельфе залива Петра Великого, сформировавшиеся под воздействием тайфуна Лайнрок в августе – сентябре 2016 г.

Исследование выполнено с использованием данных измерений скорости течений в юго-западном районе залива с помощью автономной заякоренной

океанографической измерительной системы *Seawatch*. Предварительный анализ данных измерений, выполненный в работе [14], показал, что под действием тайфуна в районе исследования интенсифицировались не только течения с пульсациями скорости на частотах, близких к инерционной частоте, но и низкочастотная синоптическая составляющая присклонового струйного Приморского течения.

Цель данной работы – проанализировать мезомасштабную изменчивость скорости течений, вызванную тайфуном Лайнрок над шельфом юго-западного района залива Петра Великого, охарактеризовать ИК, вызванные этим тайфуном, а также дать качественную интерпретацию аномальным изменениям зарегистрированных ИК, воспользовавшись моделью этого движения на течении со сдвигом скорости [12].

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи. По данным измерений определены и выполнены оценки специфических особенностей ИК в заливе до начала, во время и после окончания воздействия тайфуна на шельфовые воды залива. Анализ инерционных течений проводился с использованием нестандартного частотно-временного спектрального анализа, учитывающего вращательный характер этих течений, основанного на методе вращательных компонент [15], а также нестационарный характер ИК. Указанным методом определены спектральная плотность кинетической энергии вращения на частоте, близкой к параметру Кориолиса, направление вращения ИК, форма и эксцентриситет годографа этих течений. Выполнено сравнение перечисленных характеристик ИК, полученных на начальном этапе максимального развития и заключительном этапе воздействия тайфуна на шельфовые воды залива.

Описание района исследования, используемых данных и методик их обработки

Залив Петра Великого является самым большим заливом в северо-западном районе Японского моря. Длина залива с севера на юг составляет около 80 км, наибольшая ширина с запада на восток ~ 200 км, средняя глубина шельфа ~ 100 м. Залив является зоной смещения вод северного Приморского и южного Северо-Корейского струйных присклоновых течений [16].

В последнюю неделю августа 2016 г. воды залива находились под влиянием тайфуна Лайнрок, который достиг наибольшего развития в период с 16 ч (здесь и далее время местное) 28 августа до 10 ч 29 августа [17]. Несколькими днями ранее над Японским морем сформировался циклон, вызвавший усиление ветра южного направления над акваторией залива¹. В дальнейшем тайфун перемещался непосредственно в район залива Петра Великого. В 4 ч 31 августа тайфун достиг побережья Приморского края. Скорость ветра в восточном направлении достигла своего максимума. В 10 ч 31 августа тайфун Лайнрок и циклон, возникший над Японским морем, объединились в область низкого приземного атмосферного давления, которая затем переместилась на материк и стала быстро заполняться.

¹ URL: http://ferhri.org/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2016.08_ch5_typhoon.pdf (дата обращения: 20.07.2022).

Как известно, главной причиной инерционных колебаний морских вод является ветер. На рис. 1 представлены реализации зональной V и меридиональной U проекций вектора скорости ветра с 00:00 20.08.2016, зарегистрированные метеостанцией гидрографического буя, до, во время и после окончания воздействия тайфуна на шельфовые воды залива.

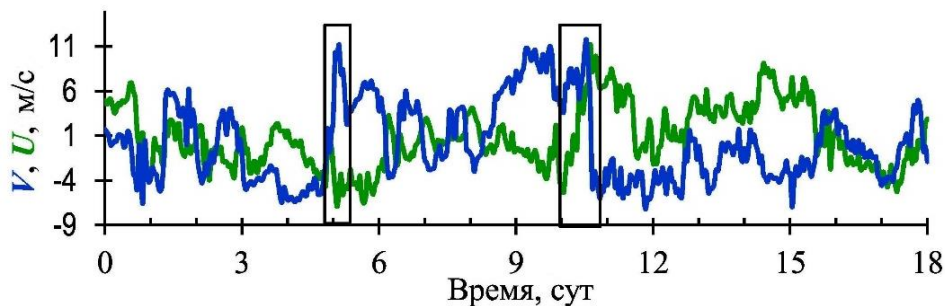
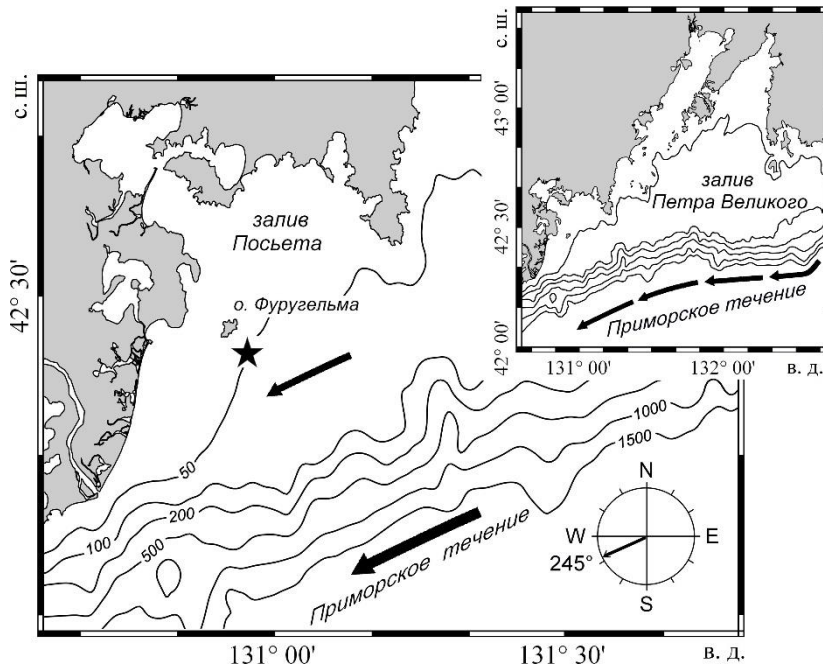


Рис. 1. Зональная V и меридиональная U проекции вектора скорости ветра в период эволюции тайфуна с 20 августа по 06 сентября 2016 г.

Fig. 1. Zonal V and meridional U projections of the wind speed vector during the typhoon evolution from August 20 to September 06, 2016

На представленных реализациях U и V обращают на себя внимание две характерные особенности, выделенные прямоугольниками, важные для дальнейшего изложения. Первая из них приходится на полночь 25 августа и связана с интенсивным ростом, «порывом» меридиональной составляющей скорости ветра U . За 6 ч эта проекция скорости получила приращение ~ 20 м/с. Вторая особенность приходится на полдень 30 августа и связана с изменением как U -, так и V -проекции. Как и в случае с первой особенностью, меридиональная проекция скачкообразно получает отрицательное приращение ~ 18 м/с. В это же время зональная проекция скорости ветра получает такое же приращение скорости, но за более длительный интервал ~ 12 ч. Таким образом, в полдень 30 августа происходит смена направления ветра от южного к западному румбу, то есть вектор скорости ветра приобрел циклональное направление вращения.

Для исследования инерционных колебаний в заливе Петра Великого в работе использованы данные измерений, выполненных доплеровским измерителем течений (*ADCP*) *Aquadopp Profiler* 400 кГц за период с 00:00 21 августа до 00:00 7 сентября 2016 г. *ADCP* размещался в нижней части поверхностного буя, заякоренного на глубине 56 м в юго-западном районе залива в точке с координатами $42^{\circ} 25' 30''$ с. ш. и $130^{\circ} 55' 04''$ в. д., в которой параметр Кориолиса равен $f \sim 5,62 \cdot 10^{-2} \text{ ч}^{-1}$. *ADCP*, направленный вниз, регистрировал профиль течения в слоях толщиной 4 м в диапазоне глубин от 2 до 45 м с дискретностью 30 мин и точностью 0,5 см/с в диапазоне скоростей 3–250 см/с. На рис. 2 показана карта-схема района исследования. Знаком (★) отмечено местоположение системы *Seawatch*. Стрелками выделено присклоновое струйное Приморское течение. Стрелкой на компасе отмечен азимут этого течения в районе буя во время воздействия тайфуна Лайнрок на шельфовые воды залива.



Р и с. 2. Карта-схема района постановки гидрографического буя с измерительной системой *Seawatch*. Звездочкой отмечено ее местоположение, стрелками обозначено Приморское течение. На врезке показан залив Петра Великого Японского моря [14, с. 94]

F i g. 2. Map of the region where the hydrographic buoy with the *Seawatch* measuring system was installed. Star denotes its location, and arrows – the Primorsky current. The inset shows the Peter the Great Bay in the Sea of Japan [14, p. 94]

Для текущего момента времени на фиксированных горизонтах по данным измерений *ADCP* рассчитывались меридиональная v (на меридиан) и зональная u (на параллель) проекции вектора скорости течения. Затем реализации проекций сглаживались низкочастотным фильтром Тьюки с окном длительностью 36 ч. Полученные после сглаживания реализации $\langle v \rangle$, $\langle u \rangle$ низкочастотных пульсаций с периодами от 36 ч и ниже служили фоном для определения пульсаций с изменчивостью в диапазоне 1,0–0,027 цикл/ч. Последние рассчитывались как разность между фоновыми и исходными реализациями. Полученные ряды пульсаций с мезомасштабной изменчивостью проекций скорости течений $v_1 = v - \langle v \rangle$ и $u_1 = u - \langle u \rangle$ анализировались с помощью частотно-временного спектрального анализа.

В работе [14] представлены результаты расчетов коэффициентов корреляции ($r_{i, i+1}$) скорости Приморского течения (u_1) на соседних горизонтах: z_i, z_{i+1} . Было установлено, что с увеличением расстояния между горизонтами $r_{i, i+1}$ уменьшается, достигнув минимума $r_{1, 5} \sim 0,7$ между $z_1 = -4$ м, $z_5 = -24$ м, что указывает на сильную положительную связь между значениями скорости на горизонтах измерения в поверхностном двадцатиметровом слое. Аналогичные расчеты $r_{i, i+1}$, были выполнены для скорости u_1 на горизонте $z_3 = -12$ м и соседних с ним горизонтах. Установлено, что $r_{i, i+1}$ между u_1 на горизонте z_3 и соседних с ним горизонтах $z = -8$ м, $z = -16$ м составляет $\sim 0,9$, а между z_3 и z_6 ,

равным -24 м, $r_{3,6} \sim 0,8$. Таким образом, в поверхностном двадцатиметровом слое скорость u_1 характеризуется сильной положительной взаимосвязью между горизонтами. На этом основании мы полагаем, что Приморское течение на горизонте $z_3 = -12$ м и соседних с ним горизонтах достаточно полно характеризует течение в деятельном слое залива, и в дальнейшем в работе анализируются характеристики течения на этом горизонте.

Рассмотрим характерные особенности течения в районе наблюдений и временную изменчивость его скорости, вызванную тайфуном. Как известно, азимут стрежня Приморского течения направлен параллельно материковому склону и составляет в районе наблюдений угол $\sim 245^\circ$ [18]. Расчет скорости этого течения выполнялся по формуле $u_{pc} = u \cos \theta - v \sin \theta$, где u и v – зональная и меридиональная проекции вектора скорости течения; угол $\theta = -25^\circ$. На рис. 3 показана синоптическая составляющая (пунктирная кривая) скорости Приморского течения с началом на 00:00 20.08.2016, на фоне которой развиваются его мезомасштабные колебания (сплошная кривая).

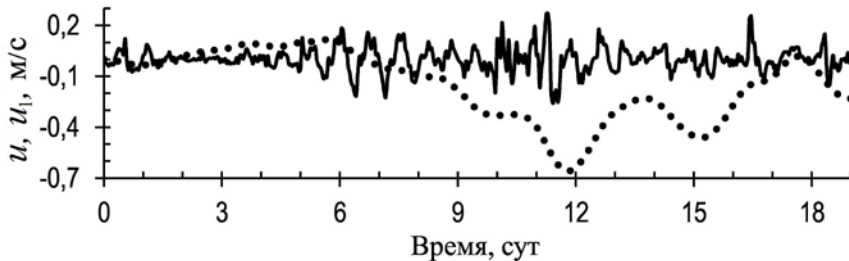


Рис. 3. Реализации синоптических пульсаций u (пунктирная кривая) и мезомасштабных колебаний u_1 (сплошная кривая) скорости Приморского течения в деятельном слое залива Петра Великого с 20 августа по 6 сентября 2016 г.

Fig. 3. Realizations of synoptic pulsations u (dotted curve) and mesoscale oscillations u_1 (solid curve) of the Primorskoie current velocity in the active layer of the Peter the Great Bay from August 20 to September 6, 2016

Из рисунка следует, что с 22 по 27 августа под воздействием циклона,шедшего на акваторию Японского моря, произошло незначительное усиление скорости потока Северо-Корейского течения с небольшой антициклональной завихренностью. Следует также отметить интенсивный рост мезомасштабных колебаний скорости u_{pc} на этом временном интервале, вызванных порывом ветра в полночь 25 августа. В фазе максимального развития амплитуда этих колебаний достигла значения $0,5$ м/с, то есть превысила амплитуду синоптических пульсаций, обозначенных на рисунке пунктирной кривой.

В дальнейшем с 27 августа под влиянием тайфуна Лайнрок начинает усиливаться Приморское течение, и в период его максимального развития скорость этого течения u_{pc} достигла своего максимального значения $u_{max} \sim 0,86$ м/с. Следует также отметить повторный рост интенсивности мезомасштабных колебаний скорости u_{pc} на этом интервале. На фазе максимального развития амплитуда этих колебаний вновь достигла значений, близких $0,5$ м/с, то есть

превысила амплитуду синоптических пульсаций, обозначенных на рисунке пунктирной кривой. Следует также отметить, что сутками ранее 31 августа между 13:00 и 14:00 вновь был зарегистрирован порыв ветра значительной интенсивности, который, вероятно, и вызвал указанные колебания.

Таким образом, в период максимального развития тайфуна Лайнрок в районе исследования, согласно работам [11, 12], сложились благоприятные условия для проявления аномальной изменчивости ИК и, в том числе, возбуждения ИК с нестандартным вращением против часовой стрелки, т. е. с циклональным направлением вращения вектора скорости.

ИК значительно отличаются, например, от приливов своей существенной нерегулярностью, то есть являются образцом нестационарного процесса. С учетом этой особенности анализ ИК проводился с использованием частотно-временного спектра $Sp(\omega; t)^2$. Для его построения месячные реализации u , v проекций скорости разбивались на отрезки равной длительности со сдвигом начала отчета каждого отрезка на половину длительности от начала предыдущего отрезка. При этом длительность начального отрезка выбиралась равной семи суткам – примерному синоптическому масштабу атмосферной изменчивости на побережье залива. Таким образом, временной интервал эволюции тайфуна разбивался на три периода: начальный период с 21 по 28 августа, период максимального развития с 24 по 31 августа и заключительный период с 29 августа по 4 сентября 2016 г.

Далее для каждого периода эволюции тайфуна стандартными методами спектрального анализа рассчитывалась спектральная плотность кинетической энергии зональной (S_{uu}) и меридиональной (S_{vv}) проекций вектора скорости, а также их взаимный спектр Q_{uv} . При этом главное внимание уделялось вариациям скорости течения на частотах из инерционного диапазона: 1/12–1/24 цикл/ч.

С использованием S_{uu} , S_{vv} и Q_{uv} рассчитывались спектральные плотности кинетической энергии вращения (КЭВ): антициклональной компоненты вектора скорости Sp^- и циклональной компоненты вектора скорости Sp^+ . Спектральные плотности Sp^- и Sp^+ являются функциями автоспектров S_{uu} , S_{vv} и квадратичного спектра Q_{uv} . На частотах из инерционного диапазона указанные спектральные плотности определялись по формулам из работы [15]: $Sp^+ = (S_{uu} + S_{vv} + 2Q_{uv}) / 2$; $Sp^- = (S_{uu} + S_{vv} - 2Q_{uv}) / 2$.

Неотъемлемым свойством инерционного течения является вращение его вектора скорости, направление которого задается с помощью коэффициента $\sigma = (Sp^+ - Sp^-) / (Sp^+ + Sp^-)$. При $Sp^- > Sp^+$ спектральная плотность КЭВ компоненты с вращением по часовой стрелке превышает КЭВ компоненты с вращением против часовой стрелки, то есть выполняется условие $\sigma < 0$, соответствующее антициклональному вращению вектора скорости. В противоположном случае $Sp^- < Sp^+$, коэффициент $\sigma > 0$, следовательно, вращение скорости этого течения происходит против часовой стрелки.

Важной характеристикой инерционных течений является годограф скорости этих течений, его форма и ориентация. В общем случае годограф имеет

² Драган Я. П., Рожков В. А., Яворский И. Н. Методы вероятностного анализа ритмики океанологических процессов. Ленинград : Гидрометеиздат, 1987. 319 с.
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 39 № 2 2023

эллиптическую форму с большой и малой осями L_M, L_m соответственно. Большая и малая оси рассчитываются по формуле как $\sqrt{Sp^+} \pm \sqrt{Sp^-}$. При этом эллипс имеет среднюю ориентацию, азимут которой по отношению к зональному направлению рассчитывается по формуле $2\psi = \arctg[2S_{uv} / (S_{uu} - S_{vv})]$, где ψ задается против часовой стрелки от восточного направления.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Характеристики инерционных течений с антициклональным направлением вращения шельфовых вод деятельного слоя залива на различных этапах эволюции тайфуна Лайнрок
Characteristics of inertial currents at the anticyclonic rotation direction of shelf waters of the bay active layer at different stages of the typhoon Lionrock evolution

Этап / Stage	$Sp_m^-, \text{cm}^2 \cdot \text{c}^{-2} \cdot \text{ч} /$ $Sp_m^-, \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{h}$	$T, \text{ч} /$ T, h	$L_M, \text{cm/c} /$ $L_M, \text{cm/s}$	$L_m, \text{cm/c} /$ $L_m, \text{cm/s}$	ε	$\psi, \text{град} /$ ψ, degree
1	1800	18	57	28	0,48	33
2	640	18	45	6	0,12	-36
3	300	20	35	0,6	0,02	8

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Характеристики инерционных течений с циклональным направлением вращения шельфовых вод деятельного слоя залива на различных этапах эволюции тайфуна Лайнрок
Characteristics of inertial currents at the cyclonic rotation direction of shelf waters of the bay active layer at different stages of the typhoon Lionrock evolution

Этап / Stage	$Sp_m^+, \text{cm}^2 \cdot \text{c}^{-2} \cdot \text{ч} /$ $Sp_m^+, \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{h}$	$T, \text{ч} / T, \text{h}$	$L_M, \text{cm/c} /$ $L_M, \text{cm/s}$	$L_m, \text{cm/c} /$ $L_m, \text{cm/s}$	ε	$\psi, \text{град} /$ ψ, degree
1	300	16	53	19	0,36	23
2	640	16	44	6	0,15	24
3	431	18	37	5	0,13	27

Результаты расчетов перечисленных характеристик инерционных колебаний представлены в табл. 1 и 2. В таблицах строки 1, 2, 3 соответствуют трем этапам воздействия тайфуна на шельфовые воды: начальному этапу с 20 по 28 августа (строка 1), этапу максимального влияния с 28 августа по 3 сентября (строка 2) и заключительному этапу с 3 по 9 сентября (строка 3). В таблицах Sp_m^- ($\text{cm}^2 \cdot \text{c}^{-2} \cdot \text{ч}$), Sp_m^+ ($\text{cm}^2 \cdot \text{c}^{-2} \cdot \text{ч}$) соответствуют максимальным значениям спектральных плотностей энергии ИК вектора скорости на периодах T (ч) с антициклональным и циклональным направлением вращения соответственно. В таблицах представлены значения большой L_M (см/с)

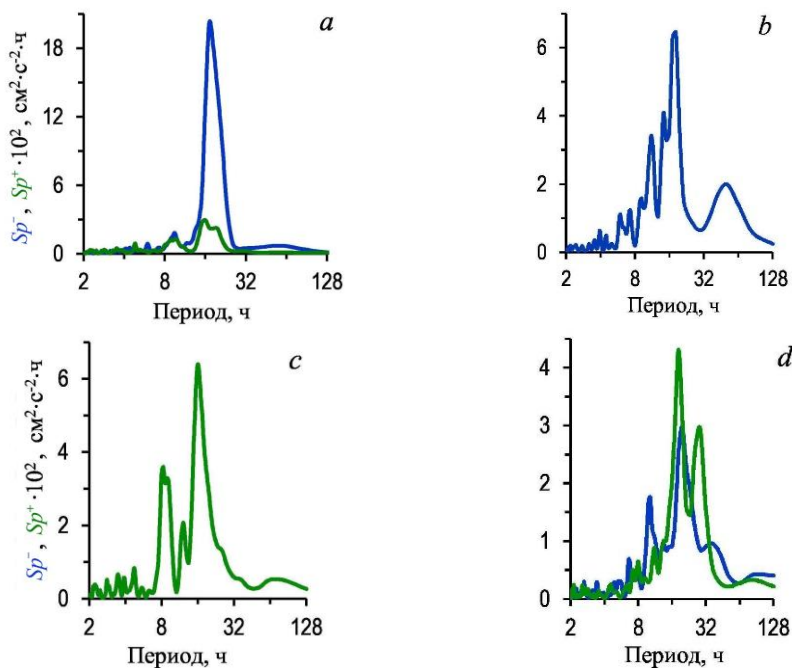
и малой L_m (см/с) осей эллипса, а также его эксцентриситет ϵ и направление его главной полуоси ψ , град, по отношению к меридиональному направлению на трех этапах эволюции тайфуна.

Рассмотрим особенности ИК в верхнем квазиоднородном слое юго-западного района залива Петра Великого, а также изменчивость характеристик этих ИК на различных этапах эволюции тайфуна Лайнрок.

Обсуждение

На рис. 4 представлены спектральные плотности КЭВ компонент с циклональным Sp^+ ($\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{ч}$) и антициклональным Sp^- ($\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{ч}$) направлением вращения мезомасштабных колебаний скорости течения на трех этапах эволюции тайфуна.

На первом, начальном этапе, продолжавшемся с 20 по 28 августа, были зафиксированы усиление синоптической составляющей скорости потока Корейского течения (рис. 3) и порыв скорости ветра южного направления, вызвавший аномальную мезомасштабную изменчивость зональной и меридиональной проекций вектора скорости течений.



Р и с. 4. Спектральные плотности кинетической энергии компонент с вращением по часовой стрелке Sp^- ($\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{ч}$) (синие линии) и против нее Sp^+ ($\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{ч}$) (зеленые линии) на этапах развития тайфуна: начальном (*a*), максимального развития (*b, c*) и заключительном (*d*)

F i g. 4. Spectral densities of kinetic energy of the components at the clockwise Sp^- ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{h}$) (blue lines) and counterclockwise Sp^+ ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{h}$) (green lines) rotations at the following stages of the typhoon evolution: the initial (*a*), maximum (*b, c*) and final (*d*) ones

На рис. 4, *a* показаны спектральные плотности КЭВ компоненты вектора скорости с антициклональным направлением вращения S_p^- и компоненты с циклональным вращением S_p^+ на первом этапе эволюции тайфуна. Согласно рисунку, S_p^- имеет одновершинную форму с максимумом на периоде $T_i \approx 18$ ч/цикл, близким к периоду, обратному параметру Кориолиса $1/f \approx 17,8$ ч/цикл. Не трудно заметить также, что спектральная плотность КЭВ антициклональной компоненты инерционного течения почти на порядок превышает аналогичную энергию циклональной компоненты вектора скорости этого течения. Отсюда следует, что коэффициент вращения вектора скорости на частоте $1/18$ цикл/ч меньше нуля, следовательно, направление вращения этого течения антициклональное. Расчет отношения большой L_m к малой L_M оси годографа скорости этого течения составил $L_m/L_M \approx 0,5$. Таким образом, годограф скорости этого течения имеет эллиптическую форму с эксцентриситетом $\varepsilon \approx 0,5$ и большой полуосью, повернутой против часовой стрелки на угол $\sim 33^\circ$ относительно зонального направления.

Рассмотрим характеристики ИК на этапе максимального развития тайфуна, продолжавшегося с 28 августа по 3 сентября. На этом этапе значительно усилилась до $0,9 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ скорость потока Приморского течения, произошел рост антициклональной завихренности его скорости, а также значительно возросла интенсивность циклональной компоненты скорости ветра, вызвавшей дальнейший рост мезомасштабной изменчивости скорости Приморского течения.

На рис. 4, *b* и *c* представлены спектральные плотности S_p^- и S_p^+ с максимумами на частотах $\omega_i^- \approx 2\pi/18$ (рад/ч) и $\omega_i^+ \approx 2\pi/16$ (рад/ч) и близкими значениями КЭВ с противоположными направлениями вращения соответственно. Обращает на себя внимание существенное изменение в распределении КЭВ между двумя вращательными компонентами скорости течения. Если S_p^- уменьшилась примерно в два раза, то аналогичная энергия циклональной компоненты S_p^+ возросла примерно на порядок. При этом спектральные плотности S_p^- и S_p^+ приобрели двухвершинную форму с дополнительными максимумами на частотах $\omega_1^- \approx 2\pi/10$ (рад/ч) и $\omega_1^+ \approx 2\pi/8$ (рад/ч), близких к частотам первых субгармоник каждой из вращательных компонент.

Значительные изменения произошли и с годографами скоростей рассматриваемых течений на частотах ω_1^- и ω_1^+ . Установлено, что большая полуось годографа инерционного течения с антициклональным направлением вращения с частотой ω_1^- повернута на угол $\psi \approx 36^\circ$ по часовой стрелке относительно зонального направления, то есть приблизительно по нормали к стрежню Приморского течения. При этом большая полуось годографа ИК с частотой ω_1^+ повернута на угол 24° , то есть располагается почти параллельно стрежню Приморского течения.

На заключительном этапе (рис. 4, *d*), который продолжался с 1 по 7 сентября, было зафиксировано снижение интенсивности инерционных колебаний скорости течений с противоположным направлением вращения на фоне ослабления скорости потока Приморского течения. Прежде всего, это относится

к инерционным течениям с антициклональным направлением вращения. Максимум спектральной плотности КЭВ с этим направлением вращения Sp_m^- с 21 августа по 7 сентября уменьшился примерно в шесть раз. За это же время максимум спектральной плотности Sp_m^+ вырос почти в три раза, то есть спектральные плотности КЭВ как циклональной, так и антициклональной компоненты инерционного течения, возбужденного тайфуном Лайнрок, продемонстрировали противофазный характер изменчивости.

На рис. 4, *d* показаны спектральные плотности КЭВ с вращением по часовой стрелке (Sp^+) и против нее (Sp^-). Из рисунка следует, что Sp^- и Sp^+ на этом этапе сохранили двухвершинную форму, однако изменилось положение их максимумов. Прежде всего, следует отметить, что если на предыдущих этапах вращение вектора скорости с периодом ≈ 18 ч/цикл является антициклональным, то на заключительном этапе вектор скорости вращается с этим периодом против часовой стрелки, то есть направление его вращения изменилось на противоположное, циклональное.

Таким образом, на заключительном этапе максимум спектральной плотности КЭВ, как и прежде, располагается на частоте, близкой к f , однако направление вращения скорости течения изменилось на противоположное циклональное. Следует также отметить, что годограф скорости этого течения сохранил квазиэллиптическую форму, большая полуось которого превышает малую на порядок, а направление этой оси к зональному направлению составило угол $\psi \approx 27^\circ$, то есть вновь, как и на предыдущих двух этапах, близко к параллели стрежня Приморского течения.

Воспользуемся предложенной в [12] моделью ИК на фоне течения с постоянным сдвигом скорости для качественной интерпретации некоторых особенностей этих течений, зарегистрированных над шельфом залива Петра Великого, возбужденных тайфуном Лайнрок, имея в виду, что в качестве фонового течения со сдвигом скорости выступает присклоновое струйное Приморское течение, интенсифицированное этим же тайфуном.

Согласно модели, u , v – меридиональная и зональная проекции вектора скорости течений удовлетворяют соотношениям

$$u = -\alpha \left(y + \frac{q_x}{f} \right) + \frac{\alpha + f}{f} q_x \cos(ft) + \frac{\alpha + f}{f} q_y \sin(ft), \quad (1)$$

$$v = q_y \cos(ft) - q_x \sin(ft). \quad (2)$$

При выводе соотношений (1), (2) предполагалось, что при $t < 0$ жидкость движется таким образом, что $u = -\alpha y$, $v = 0$, а при $t = 0$ к жидкости прикладывается однородное по пространству и глубине импульсное воздействие $q = (q_x, q_y)$, вызывающее движение жидкости.

Из соотношений (1), (2) следует, что при отсутствии сдвигового течения, то есть при $\alpha = 0$, вектор скорости в каждой точке вращается в направлении по часовой стрелке с частотой, равной параметру f . Представленное решение (1), (2) показывает также, что течение со сдвигом скорости, в отличие от результатов работ [19–21], не влияет на частоту ИК его вектора скорости.

В соответствии с данными из табл. 1, 2 мы пришли к аналогичному выводу о том, что на всех этапах воздействия тайфуна на присклоновое Приморское течение частота мезомасштабных колебаний вектора скорости этого течения в инерционном диапазоне на его фоне остается стабильной и близкой к параметру Кориолиса.

Годограф скорости является одной из важнейших характеристик инерционных течений. В соответствии с выражениями (1), (2) годограф скорости этого течения задается соотношением

$$\frac{u'^2}{(1 + \alpha f^{-1})} + v^2 = q_x^2 + q_y^2, \quad (3)$$

где $u' = u + \alpha u$ – проекция вектора скорости инерционного течения на ось абсцисс.

Согласно формуле (3) годограф инерционных течений в присутствии течения со сдвигом скорости является эллипсом, форма которого существенно зависит от этого сдвига. Другими словами, если фоновое течение имеет циклональную завихренность, которая равна или превышает по абсолютному значению параметр Кориолиса f , то антициклональное вращение вектора скорости ИК сменяется на противоположное циклональное вращение. Именно таким образом в работах [10, 12] объясняется наблюдаемое в отдельных случаях вращение вектора скорости ИК в направлении против часовой стрелки.

Завихренность Приморского течения по данным измерений под действием тайфуна приобретает циклональный характер, изменяется и достигает значения, которое, по-видимому, превышает параметр Кориолиса f . На этом фоне под воздействием порыва ветра происходит возбуждение инерционных колебаний с циклональным направлением вращением вектора скорости течения, что и было зарегистрировано системой *Seawatch*.

Заключение

Сформулируем основные результаты работы. По данным измерений системой *Seawatch* было установлено, что колебания вектора скорости течения с частотой, близкой к параметру Кориолиса, возбужденные тайфуном Лайнрок в юго-западном районе залива Петра Великого, развиваются на фоне присклонового Приморского течения, значительно усиленного этим же тайфуном. Спектральный анализ вращательных компонент этих колебаний скорости течений выявил:

- стабильность частоты, на которую приходится максимум спектральной плотности кинетической энергии течений с вращением на частоте, близкой к параметру Кориолиса, на всех этапах эволюции тайфуна;
- присутствие инерционных течений с вращением их вектора скорости против часовой стрелки, с большой полуосью годографа скорости этих течений, параллельной стрелке Приморского течения на всех этапах развития тайфуна;
- наличие субгармоник у частоты инерционных колебаний скорости течения как с циклональным, так и антициклональным направлением вращения на этапах максимального и заключительного развития тайфуна.

Отмеченные аномальные явления в инерционных течениях в районе постановки системы *Seawatch*: стабильность частоты ИК, аномальные значения эксцентриситета годографа скорости ИК и смена антициклонального направления вращения вектора скорости ИК на циклональное – получили качественное объяснение в рамках модели инерционных колебаний в присутствии сдвигового течения. Для интерпретации нестационарного характера ИК, вызванного амплитудной модуляцией, а также субгармоник у частоты этих колебаний потребуется, по-видимому, использование нелинейной модели интенсивных ИК на сдвиговом потоке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика океана. Гидродинамика океана / Отв. ред. В. М. Каменкович, А. С. Монин. Москва : Наука, 1978. Т. 2. 435 с.
2. *Alford M.* Internal swell generation: the spatial distribution of energy flux from the wind to mixed layer near-inertial motions // *Journal of Physical Oceanography*. 2001. Vol. 31, iss. 8. P. 2359–2368. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<2359:ISGTSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<2359:ISGTSO>2.0.CO;2)
3. *Fu L.-L.* Observations and models of inertial waves in the deep ocean // *Reviews of Geophysics*. 1981. Vol. 19, iss. 1. P. 141–170. <https://doi.org/10.1029/RG019i001p00141>
4. *Price J. F.* Internal wave wake of a moving storm. Part I. Scales, energy budget and observations // *Journal of Physical Oceanography*. 1983. Vol. 13, iss. 6. P. 949–965. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1983\)013<0949:IWWOAM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1983)013<0949:IWWOAM>2.0.CO;2)
5. Upper-ocean inertial currents forced by a strong storm. Part I: Data and comparisons with linear theory / E. A. D'Asaro [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 1995. Vol. 25, iss. 11. P. 2909–2936. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1995\)025<2909:UOICFB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1995)025<2909:UOICFB>2.0.CO;2)
6. *Olbers D., Jurgenowski P., Eden C.* A wind-driven model of the ocean surface layer with wave radiation physics // *Ocean Dynamics*. 2020. Vol. 70, iss. 8. P. 1067–1088. <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01376-2>
7. Исследования полей течений и загрязнений прибрежных вод на Геленджикском шельфе Черного моря с использованием космических данных / В. Г. Бондур [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2012. № 4. С. 3–11. EDN PANLDH.
8. Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий с использованием многоспектральных космических изображений высокого разрешения / В. Г. Бондур [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2006. № 6. С. 42–49. EDN НУКJVX.
9. *Keeler R., Bondur V., Vithanage D.* Sea Truth measurements for remote sensing of littoral water // *Sea Technology*. 2004. Vol. 45, iss. 4. P. 53–58. URL: http://www.aerocosmos.info/pdf/1/2004_Keeler_Bondur_Vithanage_SeaTech.pdf (дата обращения: 02.04.2023).
10. *Бондур В. Г., Сабинин К. Д., Гребенюк Ю. В.* Аномальная изменчивость инерционных колебаний океанских вод на гавайском шельфе // Доклады Академии наук. 2013. Т. 450, № 1. С. 100–104. doi:10.7868/S0869565213130173
11. *Бондур В. Г., Сабинин К. Д., Гребенюк Ю. В.* Генерация инерционно-гравитационных волн на островном шельфе // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 2. С. 235–241. doi:10.7868/S0002351515020030
12. *Сабинин К. Д., Коротаев Г. К.* Инерционные колебания в присутствии сдвигового течения в океане // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 3. С. 399–405. doi:10.7868/S0002351517030117
13. *Гилл А. Е.* Динамика атмосферы и океана. Москва : Мир, 1986. Т. 1. 388 с.
14. *Новотрясов В. В., Лобанов В. Б., Сергеев А. Ф.* Особенности инерционных колебаний скорости течений в заливе Петра Великого, возбужденных экстремальным атмосферным воздействием (на примере тайфуна Лайнрок) // Океанологические исследования. 2019. Т. 47, № 3. С. 92–103. doi:10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).8

15. *Emery W. J., Thomson R. E.* Data analysis methods in physical oceanography. Pergamon, 1998. 634 p. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66362-0>
16. Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря / Отв. ред. А. С. Астахов, В. Б. Лобанов. Москва : ГЕОС, 2008. 460 с. EDN OTRITN.
17. *Любицкий Ю. В.* Штормовой нагон в заливе Петра Великого (Японское море), вызванный тайфуном Лайонрок (29 августа – 02 сентября 2016 г.) // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2018. № 1. С. 31–39. EDN VMXKZI.
18. *Юрасов Г. И., Яричин В. Г.* Течения Японского моря. Владивосток : ДВО АН СССР, 1991. 172 с.
19. *Фомин Л. М.* Об инерционных колебаниях в горизонтально неоднородном поле скорости течений в океане // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1973. Т. 9, № 1. С. 75–83.
20. *Moore S. N. K.* Several effects of a baroclinic current on the cross-stream propagation of inertial-internal waves // Geophysics Fluid Dynamics. 1973. Vol. 6, iss. 3. P. 245–275. <https://doi.org/10.1080/03091927509365797>
21. *Whitt D. B., Thomas L. N.* Near-Inertial waves in Strongly Baroclinic Currents // Journal of Physical Oceanography. 2012. Vol. 43, iss. 4. P. 706–725. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-0132.1>

Сведения об авторах:

Новотрясов Вадим Васильевич, ведущий научный сотрудник, отдел физики океана и атмосферы, ФГБУН ТОИ ДВО РАН (690041, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), доктор физико-математических наук, доцент, **ORCID ID: 0000-0003-2607-9290**, vadimnov@poi.dvo.ru

Сергеев Александр Фёдорович, старший научный сотрудник, отдел физической океанографии, ФГБУН ТОИ ДВО РАН (690041, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), sergeev@poi.dvo.ru

Павлова Елена Петровна, ведущий инженер, ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (690041, Приморский край, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат географических наук, evpravlova@poi.dvo.ru