

Влияние циркуляций Ленгмюра на вертикальный турбулентный обмен в волновом слое моря

М. И. Павлов , А. М. Чухарев, Д. В. Казаков, А. Г. Зубов,
О. И. Павленко, С. А. Шутов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
 mixail.pavlov.1993@mail.ru

Поступила в редакцию 03.03.2026; одобрена после рецензирования 31.03.2026;
принята к публикации 20.05.2026.

Аннотация

Цель. Цель работы – по экспериментальным исследованиям на стационарной океанографической платформе параметризовать циркуляции Ленгмюра, установить связь их характеристик с поверхностным волнением и оценить их влияние на вертикальный турбулентный обмен в волновом слое моря.

Методы и результаты. В 2021–2024 гг. на стационарной океанографической платформе в пгт Качивели проведены комплексные измерения гидрофизических полей вблизи поверхности моря, включая их пульсационные характеристики. Использовались акустические доплеровские профилографы (ADCP) DVS-6000 и Workhorse Monitor 1200, турбулиметр «Сигма-1» и метеоконкомплекс. Вертикальная компонента скорости течения W в зонах конвергенции идентифицирована по данным ADCP на глубинах 3–4 м. По измеренным значениям W определены зависимости параметров циркуляций Ленгмюра от скорости ветра на высоте 10 м (V_{10}). Для разделения режимов применен метод кластеризации *Gaussian Mixture Model* с выбором числа кластеров по байесовскому информационному критерию. Скорость диссипации турбулентной энергии ϵ рассчитана по спектрам пульсаций скорости. Выделено два режима: энергозависимый ($La_i > 0,98$) и насыщенный ($La_i \leq 0,98$). Для них получены регрессионные зависимости $W_1 = 0,57V_{10} + 1,15$ ($R^2 = 0,52$) и $W_2 = 0,29V_{10} + 7,3$ ($R^2 = 0,51$). Медианные значения числа Ленгмюра La_i составили 1,2 ($IQR = 0,53$) и 0,8 ($IQR = 0,34$) для энергозависимого и насыщенного режимов соответственно. Установлено, что медианные значения ϵ в обоих режимах близки ($2,87 \cdot 10^{-6}$ и $2,62 \cdot 10^{-6}$ м²/с³), однако межквартильный размах $\log_{10}(\epsilon)$ в энергозависимом режиме (0,75) в 1,9 раза больше, чем в насыщенном (0,40), что указывает на существенное различие в вариабельности турбулентности.

Выводы. Влияние циркуляций Ленгмюра на вертикальный турбулентный обмен проявляется не столько в изменении средней интенсивности диссипации, сколько в модуляции режима изменчивости – от хаотичного и неоднородного к организованному и статистически однородному. Предложенные параметризации $W(V_{10})$ и количественные оценки ϵ могут быть использованы для совершенствования моделей турбулентности верхнего слоя моря.

Ключевые слова: вертикальный турбулентный обмен, волновой слой моря, скорость диссипации, стоков дрейф, экспериментальные исследования, циркуляции Ленгмюра, турбулентное число Ленгмюра, Черноморский гидрофизический подспутниковый полигон, стационарная океанографическая платформа

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN -2024-0001.

© Павлов М. И., Чухарев А. М., Казаков Д. В., Зубов А. Г., Павленко О. И., Шутов С. А., 2026

Для цитирования: Влияние циркуляций Ленгмюра на вертикальный турбулентный обмен в волновом слое моря / М. И. Павлов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 4. С. 536–555. EDN AELDYJ.

Original article

Impact of the Langmuir Circulations on Vertical Turbulent Exchange in the Sea Wave Layer

M. I. Pavlov , A. M. Chukharev, D. V. Kazakov, A. G. Zubov,
O. I. Pavlenko, S. A. Shutov

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

 mixail.pavlov.1993@mail.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the study is to parameterize the Langmuir circulations based on the experimental data on main hydrophysical values, as well as to determine the relationship between their characteristics and surface waves, and to assess the impact of coherent structures on vertical turbulent exchange in the sea wave layer.

Methods and Results. During the period 2021–2024, hydrophysical fields near the sea surface, including their pulsation characteristics, were comprehensively measured at the stationary oceanographic platform (settl. Katsiveli) using the acoustic Doppler profilers (ADCP) DVS-6000 and Workhorse Monitor 1200, as well as a “Sigma-1” turbulence-meter and a meteorological complex. Vertical velocity component W in the convergence zones was identified at the 3–4 m depth based on the ADCP data. The measured values of W permitted to define the dependences of the Langmuir circulation parameters on wind speed at the 10 m height (V_{10}). To divide the modes, the *Gaussian Mixture Model* clustering method was applied; it included selection of the number of clusters based on the Bayesian information criterion. The rate of turbulent energy dissipation ε was calculated from the velocity pulsation spectra. Two modes – the energy-dependent ($La_t > 0.98$) and saturated ($La_t \leq 0.98$) ones – were distinguished. The regression dependencies $W_1 = 0.57V_{10} + 1.15$ ($R^2 = 0.52$) and $W_2 = 0.29V_{10} + 7.3$ ($R^2 = 0.51$) were obtained for them. The median values of the Langmuir number La_t were 1.2 ($IQR = 0.53$) and 0.8 ($IQR = 0.34$) for the energy-dependent and saturated modes, respectively. It was found that the median values of ε in both modes were close ($2.87 \cdot 10^{-6}$ and $2.62 \cdot 10^{-6}$ m²/s³), but the inter-quartile range of $\log_{10}(\varepsilon)$ in the energy-dependent mode (0.75) exceeded the one in the saturated mode (0.40) by 1.9 times. This fact testified to a significant difference in the turbulence variability.

Conclusions. The impact of Langmuir circulations on vertical turbulent exchange is manifested not so much in the changes in average dissipation intensity, but rather in the modulation of variability mode, namely from the chaotic and inhomogeneous mode to the organized and statistically homogeneous one. The proposed parameterizations of $W(V_{10})$ and quantitative estimates of ε can be applied to improving the models of the sea surface layer turbulence.

Keywords: vertical turbulent exchange, sea wave layer, dissipation rate, Stokes drift, experimental studies, Langmuir circulation, turbulent Langmuir number, Black Sea hydrophysical subsatellite polygon, stationary oceanographic platform

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of theme of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0001.

For citation: Pavlov, M.I., Chukharev, A.M., Kazakov, D.V., Zubov, A.G., Pavlenko, O.I. and Shutov, S.A., 2026. Impact of the Langmuir Circulations on Vertical Turbulent Exchange in the Sea Wave Layer. *Physical Oceanography*, 33(4), pp. 565–583.

Введение

Приводный слой атмосферы и приповерхностный слой океана представляют собой части пограничных слоев, непосредственно прилегающие к поверхности раздела сред. Их динамика критически важна для формирования турбулентного перемешивания. Развивающаяся в верхнем слое океана турбулентность определяет интенсивность вертикального турбулентного обмена и, как следствие, оказывает ключевое влияние на передачу тепла, импульса и газов через границу океан – атмосфера.

Турбулентное перемешивание зависит от фоновых физических условий и от движений различных масштабов, поэтому изучение этого явления и его основных закономерностей связано с исследованием других процессов, определяющих его интенсивность и изменчивость.

Основными факторами, модулирующими турбулентность в приповерхностном слое моря, считаются: сдвиг скорости дрейфового течения, неустойчивость движений, индуцированных поверхностными волнами, и обрушения поверхностных волн¹. Интенсивность турбулентности в приповерхностном слое моря достаточно точно прогнозируется широко известными моделями [1–3] при скорости ветра на высоте 10 м над поверхностью моря (V_{10}) в диапазоне от 5 до 9 м/с. При более сильных ветрах и в штормовых условиях наилучшее совпадение результатов расчета и данных эксперимента демонстрирует разработанная в отделе турбулентности Морского гидрофизического института стационарная многомасштабная модель А. М. Чухарева [3]. Модельные расчеты при слабом ветре и незначительном волнении оказываются существенно ниже экспериментальных: расхождения могут достигать 2–3 порядков. По мнению ряда исследователей [4–9], это может быть связано с влиянием циркуляций Ленгмюра (ЦЛ), которые в упомянутых моделях не учитываются. Ленгмюровские циркуляции представляют собой пары чередующихся цилиндрических вихрей, вращающихся в противоположные стороны вокруг параллельных горизонтальных осей, ориентированных примерно по нормали к фронту ветровых волн. Признаком существования ЦЛ в водоеме считаются полосы из пены или дорожки из плавающих предметов на водной поверхности. Характерные признаки ленгмюровских полос – появление при определенных скоростях ветра, совпадение с его направлением, относительная пространственная периодичность и широкая распространенность на акватории, способность быстро перестраиваться при изменении направления ветра. На поверхности водоема ЦЛ идентифицируются в масштабах от 2 м до 1 км.

В прогностических моделях их описывают в основном с помощью LES-моделирования (*large-eddy simulation*) [10–12], где важным параметром служит стоков дрейф, по которому рассчитывается турбулентное число Ленгмюра La_i . В модельных расчетах рассматриваются пространственные масштабы от 1 м до 10 км (так называемые субмезомасштабы). При этом изучаются разные вопросы, такие как влияние зыби на формирование ЦЛ, структуру циркуляций после прохождения циклона и на скорость размывания пик-

¹ Монин А. С., Озмидов Р. В. Океанская турбулентность. Ленинград : Гидрометеиздат, 1981. 320 с.

ноклина. В исследовании [5] проведены масштабные эксперименты, по результатам которых описаны основные характеристики ЦЛ, выявленных разными способами. Предложена формула для расчета интенсивности ЦЛ по динамической скорости в воде и стоксову дрейфу. Впоследствии большинство исследователей стали использовать эти же параметры как для качественного, так и количественного анализа особенностей ЦЛ.

Модели *LES* успешно воспроизводят многие наблюдаемые особенности ЦЛ, в частности неустойчивость, неравномерное распределение ячеек по размеру, их слияние с *Y*-образными переходами, ориентированными вниз по ветру, и выстраивание плавающих частиц в линейные полосы [13]. ЦЛ усиливают турбулентное перемешивание вблизи поверхности, однако существующие модели *LES* не учитывают их связь с поверхностными волнами и обрушением. При сравнении с натурными данными при малых скоростях ветра *LES*-моделирование завышает скорость диссипации турбулентной энергии.

В экспериментальных исследованиях [14, 15] приводится много результатов, описывающих влияние ЦЛ на вертикальный турбулентный обмен. Один из основных выводов состоит в том, что ЦЛ не только генерируют турбулентность, но и переносят объемы жидкости с пузырьками воздуха, образующимися при обрушении волн, тем самым заглубляя перемешанный слой. Натурные измерения в Чесапикском заливе [16] подтвердили важную роль ЦЛ в динамике поверхностного слоя воды в целом. Однако связать параметры ЦЛ с физическими величинами, характеризующими приповерхностную турбулентность, – задача нетривиальная. В работах [17, 18] представлены приближенные параметризации вертикальной компоненты скорости в зонах конвергенции в зависимости от скорости ветра. Однако чувствительность и погрешность использовавшихся измерителей были недостаточны для получения качественных результатов, поэтому продемонстрированное облако точек сложно описать предложенными зависимостями.

В работе [19] для учета влияния ЦЛ на турбулентный обмен в многомасштабной модели турбулентности [3] были опробованы следующие параметризации:

$$P^L = \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial z} \frac{\partial U_s}{\partial z} + \frac{\partial V}{\partial z} \frac{\partial V_s}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где U , V , U_s , V_s – компоненты средней скорости течения и дрейфа Стокса вдоль горизонтальных осей x и y соответственно; ν_t – коэффициент турбулентной вязкости [20];

$$\frac{\langle w'^2 \rangle}{u_*^2} = \begin{cases} 0,398 + 0,48 La_{SL}^{-4/3}, & La_{SL} \leq 1, \\ 0,64 + 3,50 \exp(-2,69 La_{SL}), & La_{SL} > 1, \end{cases} \quad (2)$$

где $\langle w'^2 \rangle$ – среднеквадратичные вертикальные пульсации скорости течения; u_* – скорость трения в воде; La_{SL} – турбулентное число Ленгмюра, рассчитанное по стоксову дрейфу, осредненному по верхней 1/5 части перемешанного слоя [21].

Расчеты по модели показали, что при параметризации (1) влияние ЦЛ на интенсивность турбулентности почти незаметно (менее 1 %). Зависимость (2) дает незначительный вклад при $La_i > 1$, но при $La_i < 1$ влияние заметно возрастает (до 15 % при $La_i = 0,63$). Представленные результаты, к сожалению, не дают однозначной картины влияния ЦЛ на турбулентный обмен в приповерхностном слое.

Цель настоящей работы – на основе экспериментальных данных, полученных на стационарной океанографической платформе (СОП) Черноморского гидрофизического подспутникового полигона (ЧГПП) в пгт Кацевели в 2019–2024 гг., разработать параметризацию ЦЛ, установить связь их характеристик с поверхностным волнением и количественно оценить влияние этих когерентных структур на вертикальный турбулентный обмен в волновом слое моря.

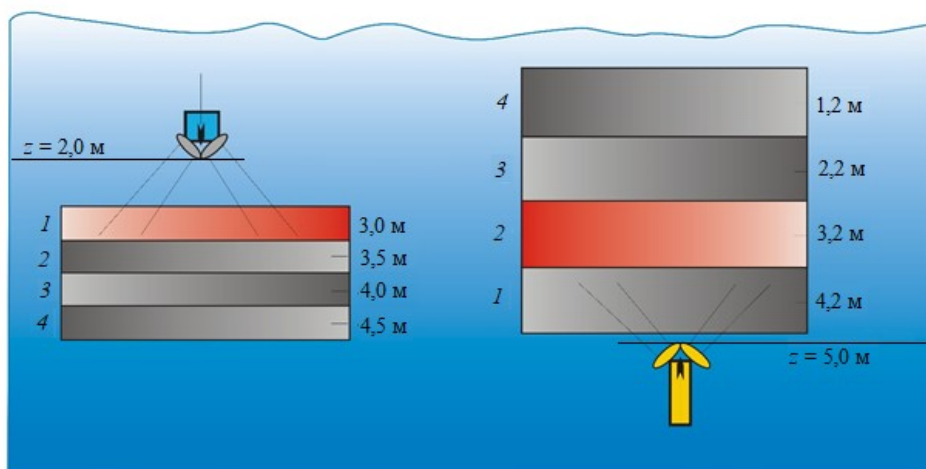
В исследованиях мы опирались на теорию Крейка – Лейбовича [4] о возникновении ЦЛ в результате взаимодействия дрейфа Стокса, индуцированного поверхностными волнами, с вертикальным сдвигом скорости в турбулентной жидкости, что порождает вихревую силу. Настоящая работа продолжает цикл наших предыдущих исследований турбулентности в верхнем пограничном слое моря (2021–2024) и развивает теоретические и модельные представления на основе более достоверной параметризации важного источника турбулентности.

Материалы и методы

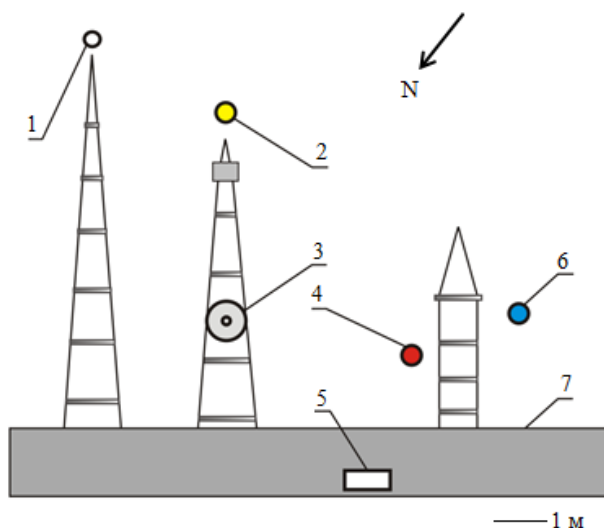
В 2021–2024 гг. были проведены экспериментальные исследования ЦЛ на СОП в пгт Кацевели. Цель работ – определить связь параметров ЦЛ с параметрами ветра и поверхностного волнения, а также оценить влияние ЦЛ на вертикальный турбулентный обмен. На основе работ [14–23] в качестве основного параметра, характеризующего динамику ЦЛ, была выбрана вертикальная компонента скорости течения W в зонах конвергенции и дивергенции. С опорой на исследования [14, 23] разработана методика определения W в когерентных структурах Ленгмюра с помощью акустических измерителей скорости течения (*ADCP*).

Применялись комплексы *DVS-6000* и *Workhorse Monitor 1200*, которые располагались на глубинах 5 и 2 м ниже поверхности моря (рис. 1). При этом излучатели *DVS-6000* были направлены вверх; измерения проводились в диапазоне глубин 0,4–4,5 м в пяти слоях (бинах) толщиной по 0,8 м; значения скорости отнесены к середине каждого слоя. Прибор был настроен на 50 импульсов в минуту, точность измерения скорости течения – 0,24 см/с. Измеритель был помещен в специальную раму и утяжелен грузом, чтобы минимизировать собственные колебания и повысить точность измерений.

Workhorse Monitor 1200 был установлен на штанге, жестко прикрепленной к конструкции СОП. Излучатели этого прибора направлены вниз. Измерения проводились в диапазоне глубин 3–8 м в пяти слоях (бинах) толщиной по 1 м; значения скорости отнесены к середине каждого слоя. Прибор также был настроен на 50 импульсов в минуту. Точность измерения скорости течения – 0,3 см/с.



Р и с. 1. Схема установки измерительных комплексов *ADCP Workhorse 1200* (слева) и *DVS-6000* (справа). Красным цветом выделен основной горизонт измерения параметров ЦЛ. Цифрами 1–4 обозначены порядковые номера слоев; z – глубина установки приборов
F i g. 1. Diagram of installation of the *ADCP Workhorse 1200* (left) and *DVS-6000* (right) measuring systems. Main horizon for measuring the LC parameters is highlighted in red. Numerals 1–4 indicate the ordinal numbers of layers; z is the depth of instrument installations



Р и с. 2. Схема расположения приборов в экспедиции на океанографической платформе ЧГПП МГИ в пгт Кацивели, май – июнь, 2021 г.: 1 – шестиструнный волнограф; 2 – акустический доплеровский профилограф *DVS-6000*; 3 – измерительный комплекс «Сигма-1»; 4 – комплекс «Восток-М» № 002; 5 – метеокomплекс МПВ 702.1007; 6 – акустический доплеровский профилограф *Workhorse Monitor*; 7 – стационарная океанографическая платформа
F i g. 2. Diagram of instrument arrangements during the expedition on the oceanographic platform at the BSHSP MHI, settl. Katsiveli, May – June, 2021: 1 – six-string wave recorder; 2 – acoustic Doppler profiler *DVS-6000*; 3 – measuring complex “Sigma-1”; 4 – complex “Vostok-M” No. 002; 5 – meteorological complex MPV 702.1007; 6 – acoustic Doppler profiler *Workhorse Monitor*; 7 – stationary oceanographic platform

На горизонте 3 м располагался измерительный комплекс «Восток-М», регистрировавший средние значения скорости течения, электропроводности и температуры. Для оценки интенсивности турбулентных процессов и влияния ЦЛ на вертикальное перемешивание измерялись пульсационные составляющие трех компонент вектора скорости течения (u' , v' , w') на глубинах 2–4 м с помощью комплекса «Сигма-1», созданного в Морском гидрофизическом институте [24]. Для регистрации скорости ветра V_{10} и других метеорологических характеристик использовался метеокomплекс МПВ 702.10007. Более подробно схема расположения приборов описана в работе [25]. Постановку измерительных комплексов *ADCP*, схему расположения измерителей в рабочей зоне океанографической платформы со стороны моря и описание схемы см. на рис. 1, 2.

Методика исследования заключалась в следующем: для оценки влияния ЦЛ на вертикальный турбулентный обмен в волновом слое моря (в качестве референсного горизонта измерений выбрана глубина ≈ 3 м) выполнялись записи продолжительностью 3–10 ч следующих параметров: W , u' , v' , w' , V_{10} , а также осредненных величин скорости течения, электропроводности и температуры. Параметры поверхностного волнения определялись сотрудниками отдела дистанционных методов исследования МГИ и были любезно предоставлены для анализа.

Комплекс «Сигма-1» последовательно устанавливался на нужном горизонте на глубинах от 1 до 7 м с шагом 0,5–1 м для записи продолжительностью по 15–20 мин. Это позволило получить распределение скорости диссипации турбулентной энергии в верхнем перемешанном слое.

Таким образом, по нисходящим (W^-) и восходящим (W^+) скоростям в зонах конвергенции и дивергенции определялись моменты прохождения ячеек Ленгмюра через установленную систему измерителей, оценивалась скорость диссипации турбулентной энергии и полученные величины соотносились со скоростью ветра и характеристиками поверхностного волнения через турбулентное число Ленгмюра La_t [5]. Этот параметр рассчитывался по соотношению

$$La_t = \sqrt{\frac{u_*}{U_{s0}}},$$

где u_* – динамическая скорость в воде; U_{s0} – стоков дрейф на поверхности. Фактически число Ленгмюра характеризует относительное влияние вызванного ветром сдвига скорости и сдвига стокова дрейфа на турбулентность пограничного слоя. Стоков дрейф определяется по формуле

$$U_s = A^2 k \omega \exp(-2kz),$$

где A – амплитуда волн; k – волновое число; ω – частота волн; z – глубина.

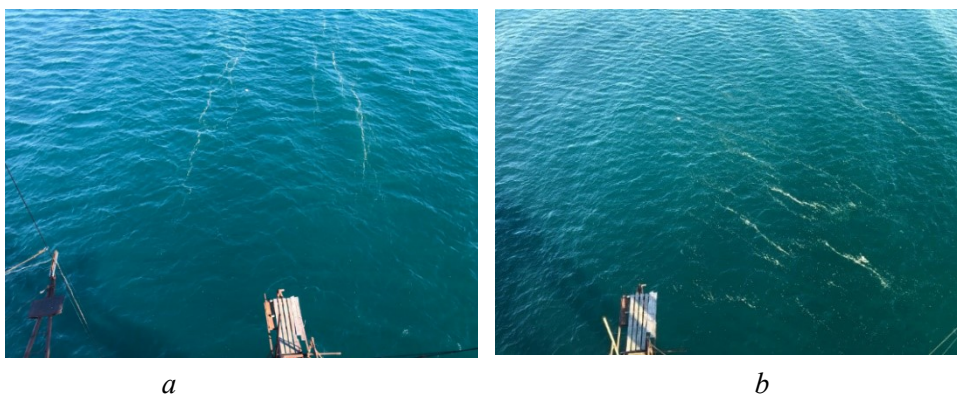
За время экспедиций 2021–2024 гг. было идентифицировано более 300 ячеек ЦЛ по вертикальной компоненте скорости течения W ; собраны фото- и видеоматериалы состояния поверхности моря; определены зависимости вертикальной компоненты скорости в зонах конвергенции от скорости

ветра $W(V_{10})$ и режимы развития W при разных La_t . Интенсивность вертикального турбулентного обмена оценена через скорость диссипации турбулентной энергии ϵ , которая рассчитывалась по спектрам пульсаций скорости согласно методу, предложенному в работах [26, 27].

Результаты и обсуждение

Визуальные наблюдения

В работах [14, 17] описан метод наблюдения за ЦЛ путем визуализации зон конвергенции с помощью маркеров – бумажных листов, покрытых люминесцентной краской. В наших экспериментах использовались различные виды маркеров, наилучшими для этой задачи в исследуемых масштабах оказались древесные опилки и стружка, поскольку они дольше удерживаются на поверхности моря и быстрее выстраиваются в видимые полосы. На рис. 3 приведен пример наблюдавшихся полос Ленгмюра при скорости ветра 10 м/с и направлении 320°, расстояние между полосами составляло 5–8 м. По нашим наблюдениям, изменение скорости и направления ветра существенно влияет на масштаб вихрей в ЦЛ. При уменьшении скорости в два раза и повороте ветра на 30° к северу расстояние между полосами сокращалось до 2–3 м, а их ориентация менялась (рис. 3, *b*).



Р и с. 3. Полосы Ленгмюра на СОП, визуализированные с применением деревянной стружки и опилок: *a* – в 17:53 20.08.2024 при $V_{10} = 10$ м/с; *b* – в 18:57 20.08.2024 при $V_{10} = 5$ м/с

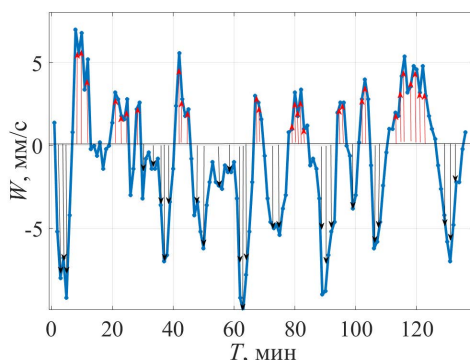
F i g. 3. Langmuir bands on SOP visualized using wood shavings and sawdust: *a* – at 17:53 on 20.08.2024 at $V_{10} = 10$ m/s; *b* – at 18:57 on 20.08.2024 at $V_{10} = 5$ m/s

Из-за большого разнообразия гидрометеорологических условий наш массив данных пока не позволяет установить достоверные статистические зависимости размеров вихрей ЦЛ от внешних факторов и оценить влияние масштабов вихрей на вертикальный турбулентный обмен. Однако качественно эта связь хорошо прослеживается: выполненные эксперименты показывают, что масштабы ЦЛ и развитие их неустойчивости тесно связаны с изменениями скорости и направления ветра.

Анализ экспериментальных данных. Параметризация ЦЛ

Согласно нашим исследованиям, проведенным в 2021–2022 гг. [25], ЦЛ способны турбулизировать приповерхностный слой, причем важнейшим параметром является вертикальная скорость в зонах конвергенции W^- . Известно, что параметр W^- связан со скоростью ветра. Полученные ранее другими исследователями зависимости $W^-(V_{10})$ основывались на менее точных измерениях [17, 18] и были ограничены количеством данных наблюдений.

В наших исследованиях сделана попытка уточнить зависимость $W^-(V_{10})$, проанализировав данные экспедиций за 2021, 2023 и 2024 гг. Для автоматизации обработки и анализа данных в пакете *MATLAB* разработаны специализированные программы, которые позволяют идентифицировать зоны конвергенции и дивергенции в ЦЛ по измеренным значениям W . Из проанализированного массива данных выделено более 300 ячеек Ленгмюра на горизонтах 3–4 м. Пример таких записей с четко выделенными зонами конвергенции и дивергенции и характерными значениями W приведен на рис. 4.



Р и с. 4. Зоны конвергенции (синие стрелки) и дивергенции (красные стрелки) в ячейках Ленгмюра, регистрируемые по вертикальной компоненте скорости течения W , измеренной *Workhorse Monitor 1200* на глубине 3 м

F i g. 4. Convergence (blue arrows) and divergence (red arrows) zones in the Langmuir cells recorded from the current velocity vertical component W measured by the *Workhorse Monitor 1200* at the 3 m depth

Поскольку система ЦЛ не статична, а смещается вправо относительно направления ветра, в область измерений каждого прибора в течение некоторого времени попадают как нисходящие, так и восходящие потоки.

Ячейки для анализа отбирались по следующим критериям:

- для зоны конвергенции: скорость W^- от 3 до 60 мм/с, время прохождения зоны через измеритель – от 3 до 20 мин;
- для зоны дивергенции: скорость W^+ от 2 до 20 мм/с, время прохождения зоны через измеритель – от 4 до 40 мин.

Для определения устойчивой постоянной составляющей W^- в зоне конвергенции вычислялось среднее арифметическое всех значений за период прохождения этой зоны через измеритель. Аналогичная обработка выполнена для W^+ в зонах дивергенции.

При анализе данных были выявлены следующие особенности:

1. Средние значения $\bar{W}$ в зависимости от скорости ветра изменяются в диапазоне 3–48 мм/с.

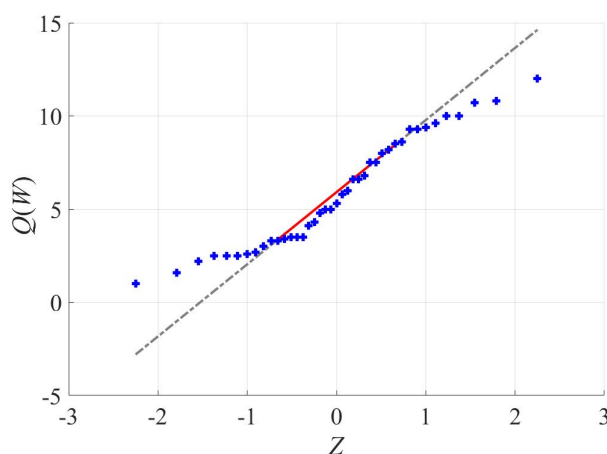
2. Ячейки обычно проходили через измеритель группами по 2–4 шт. в течение 20–40 мин; часто наблюдались «вложенные» ячейки – малые внутри более крупных.

Для построения зависимости $W(V_{10})$ использовались только осредненные значения $\bar{W}$ в зонах конвергенции как более стабильный параметр. В дальнейшем для упрощения записи $\bar{W}$ обозначается как W . Для анализа отбирались наиболее качественные записи с достоверными признаками ЦЛ.

Визуальный анализ зависимости $W(V_{10})$ выявил две группы данных, демонстрирующих линейный характер. Для статистического обоснования этого наблюдения была проведена проверка распределения W ; рассчитаны основные статистические оценки распределения.

Тест Колмогорова – Смирнова (статистика 0,285) не позволяет отвергнуть гипотезу о нормальном распределении W при стандартном уровне значимости 0,05. Среднее значение $W_{\text{ср}}$ (5,87 мм/с) и медианное $W_{\text{мед}}$ (5,30 мм/с) близки, что указывает на относительную симметричность распределения и отсутствие сильных выбросов. Стандартное отклонение составляет 3,02 мм/с, то есть значения W в основном лежат в диапазоне примерно от 2,85 до 8,89 мм/с. Значения за его пределами встречаются реже. Асимметрия (0,28) положительна, но близка к нулю, что говорит о небольшом «хвосте» вправо (в сторону более высоких значений). Эксцесс (1,83) меньше 3 (эксцесс нормального распределения), что свидетельствует о более плосковершинном распределении W по сравнению с нормальным.

Сравнение квантилей теоретического нормального распределения с квантилями из входной выборки для W приведено на рис. 5.



Р и с. 5. Сравнение квантилей эмпирического распределения W ($Q(W)$) с квантилями стандартного нормального распределения (Z). Штрих-пунктирная прямая $y = x$ соответствует теоретическому нормальному распределению; символ «плюс» – эмпирическим данным, красный отрезок – центральная часть распределения

F i g. 5. Comparison of the quantiles of empirical distribution W ($Q(W)$) with the quantiles of standard normal distribution (Z). Dashed line $y = x$ corresponds to theoretical normal distribution; symbol “plus” – to empirical data; and red segment is the central part of distribution

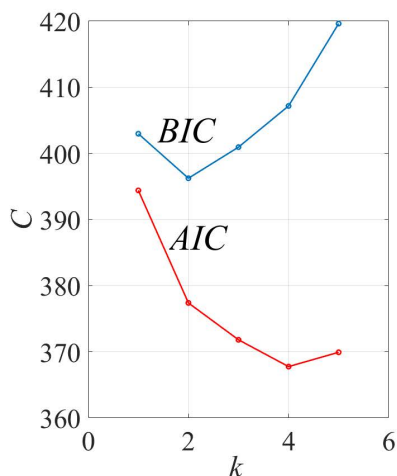
Точки в левой части графика выше линии главного тренда означают, что в данных меньше экстремально малых значений, чем в истинном нормальном распределении, а точки в правой части ниже этой линии – в данных меньше экстремально больших значений. Таким образом, распределение W имеет короткие хвосты с обеих сторон.

На основе вышеописанных результатов можно сделать следующие выводы о переменной W :

- распределение W незначительно отличается от нормального и является более плосковершинным;
- значения вертикальной скорости разбросаны преимущественно в диапазоне от 2,85 до 8,89 мм/с, но могут встречаться и более высокие/низкие значения;
- распределение вертикальных скоростей относительно симметрично, с небольшим хвостом в сторону более высоких значений.

Для оптимальной кластеризации облака точек $W(V_{10})$ использовался метод *Gaussian Mixture Model (GMM)* в пакете *MATLAB*. Количество кластеров определялось по информационному критерию Акаике *AIC (Akaike Information Criterion)* и Байесовскому информационному критерию *BIC (Bayesian Information Criterion)*, которые позволяют выбрать оптимальное количество кластеров, балансируя между точностью и сложностью модели. Алгоритм кластеризации выглядит следующим образом:

1. Оцениваются параметры нормальных распределений для W и V_{10} (средние, ковариации) и вероятности принадлежности каждой точки к каждому кластеру.
2. По значениям *AIC/BIC* выбираются модели с наименьшими значениями критериев (минимум по оси ординат). На рис. 6 видно, что предлагается два оптимальных варианта модели: с четырьмя кластерами по критерию *AIC* и с двумя кластерами по критерию *BIC*.



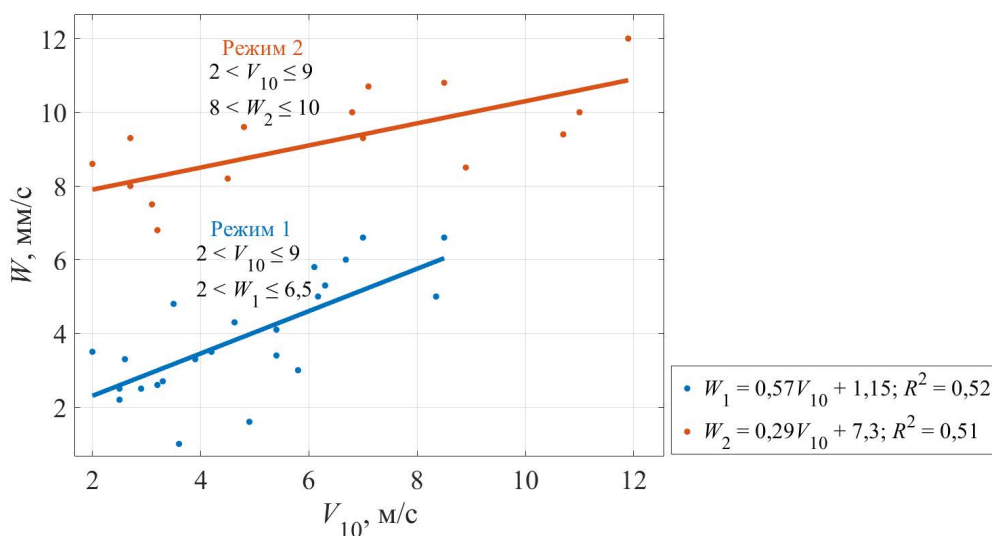
Р и с. 6. Зависимость значений информационных критериев (*AIC* и *BIC*) C от количества параметров (кластеров) k

F i g. 6. Dependence of the values of information criteria (*AIC* and *BIC*) C on the number of parameters (clusters) k

В данном случае метод оценки *BIC* предлагает более надежную и интерпретируемую модель, так как:

- критерий *BIC* обеспечивает защиту от переобучения модели за счет более строгого штрафа за сложность модели;
- модель с четырьмя кластерами (по *AIC*) демонстрирует наилучшее соответствие на уровне подгонки, однако является избыточной и отражает не физические режимы, а случайные вариации внутри них, что затрудняет ее содержательную интерпретацию;
- на модель, предложенную *AIC*, влияют не только общие закономерности двух режимов, но и случайный шум, особенности конкретного набора данных;
- предложенная *BIC* модель с двумя кластерами хорошо физически интерпретируется и соответствует первоначальным визуальным наблюдениям о наличии двух режимов в данных.

3. После определения количества кластеров исходные данные V_{10} и W разделяются на группы, и для каждой группы строится своя линейная модель (рис. 7).



Р и с. 7. Кластеризация данных методом *GMM*. Зависимость вертикальной компоненты скорости (W_1 для первого режима и W_2 для второго) в зонах конвергенции от средней скорости ветра V_{10}

F i g. 7. Data clustering using the *GMM* method. Dependence of the velocity vertical component (W_1 – for the first mode and W_2 – for the second one) in convergence zones on the average wind speed V_{10}

Вертикальная компонента W в зонах конвергенции для двух режимов аппроксимируется линейной зависимостью от ветра следующим образом:

$$W(V_{10}) = aV_{10} + b,$$

где $a_1 = 0,57 \pm 0,1$; $b_1 = 1,15 \pm 0,1$ для первого режима; $a_2 = 0,29 \pm 0,1$; $b_2 = 7,3 \pm 0,1$ для второго. Коэффициенты детерминации R^2 составляют 0,52

и 0,51 соответственно. Средние коэффициенты детерминации, предположительно, обусловлены большим разбросом измеряемых параметров из-за неустойчивого характера гидрометеорологических условий во время экспериментов.

Первый режим является энергозависимым: энергия ветра почти полностью переходит в формирование когерентных структур. Большой угловой коэффициент (0,57) показывает, что с ростом ветра вертикальная компонента скорости увеличивается: идет интенсивная генерация циркуляций. Представленный режим соответствует фазе активного развития ЦЛ.

Полученный результат согласуется с теорией Крейка – Лейбовича [28] и результатами численного моделирования, предсказывающими линейный рост интенсивности циркуляций при увеличении ветрового воздействия [29], а также с полевыми измерениями, демонстрирующими усиление нисходящих потоков с ростом скорости ветра [30, 31].

Второй режим – насыщенный: система достигает состояния, при котором дальнейший рост V_{10} слабо влияет на W_2 (малый угловой коэффициент 0,30). Поступающая энергия ветра тратится не на усиление вертикальной циркуляции, а на поддержание ее максимальной интенсивности и усиление турбулентности. Второй режим косвенно описан в следующих работах:

- в исследовании [28] показано, что существует баланс между генерацией ЦЛ, обусловленной поверхностным стоковым дрейфом U_{s0} , и их разрушением вследствие увеличения турбулентности, характеризуемой динамической скоростью u_* . «Насыщение» наступает при $La_i \approx 1$, когда дальнейший рост ветра не усиливает циркуляции, а увеличивает турбулентный обмен;

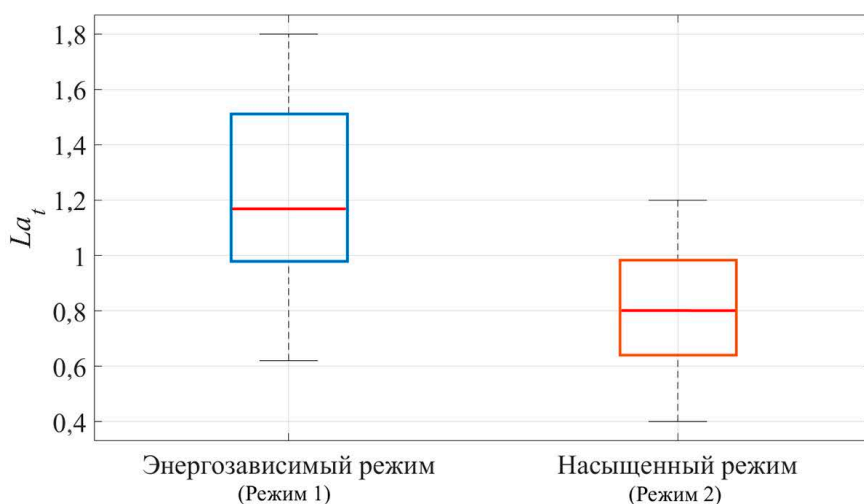
- численное моделирование [29] демонстрирует, что с ростом La_i кинетическая энергия циркуляций сначала растет, а затем выходит на асимптоту. Представленный на рис. 8 насыщенный режим со слабой зависимостью от ветра соответствует этому асимптотическому режиму;

- полевые исследования [30, 31] с помощью *ADCP* и дрейфтеров *показывают*, что измеренные компоненты скорости течения в зонах конвергенции и дивергенции в ЦЛ не растут бесконечно с ветром. Наблюдается значительный разброс и выход на максимальные значения, что объясняется взаимодействием с другими факторами (стратификацией, волновым полем) и приводит к эффекту насыщения.

Выявленный режим насыщения, характеризующийся высокими значениями W_2 даже при малых значениях V_{10} , позволяет предположить, что интенсивность ЦЛ определяется не только мгновенным ветровым воздействием, но и предысторией воздействия, а также стратификацией водной толщи. Высокие значения W_2 в условиях слабого ветра могут быть следствием инерционности системы, обусловленной энергией развитого волнового поля.

Для оценки влияния ЦЛ на вертикальный турбулентный обмен в энергозависимом и насыщенном режимах использовался параметр La_i . Расчет выполнялся непосредственно для моментов проведения измерений W на основе синхронных натурных данных о поверхностном волнении, которые регистрировались шестиструнным волнографом. На рис. 8 представлено распределение La_i для двух выделенных режимов. Неперекрывающиеся межквар-

тильные интервалы и разность медиан указывают на статистически значимое различие, что свидетельствует о качественном изменении турбулентной структуры между режимами.



Р и с. 8. Распределение La_t для энергозависимого и насыщенного режимов ЦЛ. Диаграммы размаха: красные линии – медианы, границы ящиков – межквартильные размахи, усы – диапазоны нормальных значений

F i g. 8. Distribution of La_t for the energy-dependent and saturated modes of LC. Box plots show medians (red lines), interquartile ranges (box boundaries), and normal value ranges (whiskers)

Влияние ЦЛ на вертикальный турбулентный обмен в волновом слое

Как показано на рис. 8, энергозависимый режим характеризуется более высокими значениями La_t (медиана 1,2; $IQR = 0,53$), тогда как в насыщенном режиме La_t ниже (медиана 0,8; $IQR = 0,34$). Это означает, что в энергозависимом режиме числитель отношения u_* (динамическая скорость в воде) больше по сравнению со знаменателем U_{s0} (стоксов дрейф на поверхности). Можно предположить, что ветер (касательное напряжение) достаточно сильно влияет на турбулентный обмен, а волновое поле (и связанный с ним дрейф Стокса) еще слабо развито.

В насыщенном режиме, где La_t достаточно низкое ($\approx 0,8$), напротив, стоксов дрейф U_{s0} стал больше относительно динамической скорости u_* . Вероятно, волновое поле уже достаточно развито, и большая часть энергии ветра идет на генерацию и поддержание волнения (U_{s0} растет быстрее).

Это позволяет говорить о «волновом доминировании», при котором волновые процессы начинают подавлять развитие ЦЛ, чем объясняется слабый рост W с увеличением ветра в этом режиме. Ширина межквартильного размаха в энергозависимом режиме (0,53) почти в 1,6 раза больше, чем в насыщенном (0,34). Это статистическое подтверждение большей изменчивости турбулентных характеристик в энергозависимом режиме. В режиме насыщения

меньший разброс. Система более стабильна и находится в относительно узком диапазоне параметров.

Для оценки интенсивности вертикального турбулентного обмена в волновом слое в момент прохождения ЦЛ через систему измерителей регистрировались пульсации скорости течения: u' , v' , w' . Измерители *ADCP* и турбулиметр разнесены на расстояние ≈ 7 м. Для каждого измерения W отобрано семь пятиминутных последовательных записей турбулентных пульсаций. Предполагается, что 35-минутный период позволяет определить интенсивность турбулентного перемешивания в зонах конвергенции, проходящих через область измерений приборов. Такой подход позволяет «сканировать» временную изменчивость поля турбулентности с целью определить момент, когда зона конвергенции, зарегистрированная *ADCP*, проходит через область измерений турбулиметра «Сигма-1».

Одной из основных характеристик интенсивности турбулентности является скорость диссипации турбулентной энергии ε . Измерения и различные оценки этой величины представляются достаточно объективной информацией, позволяющей судить об интенсивности и структуре турбулентности и, следовательно, о характере перемешивания. Расчет ε выполнялся по методу Стюарта и Гранта [26], который позволяет оценить диссипацию по спектру измеренных пульсаций скорости, при этом волнение и колебания самого прибора не оказывают существенного влияния на результат.

На каждую точку W в обоих режимах (25 точек W_1 , 16 точек W_2) приходится по семь значений ε . Таким образом, для первого режима определено 175 значений (ε_1), для второго – 112 (ε_2). Оценки средних значений и стандартных отклонений ε для описанных режимов составляют:

- 1) энергозависимый режим: $(7,04 \pm 14,40) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}^3$;
- 2) насыщенный режим: $(4,04 \pm 4,98) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}^3$.

Полученные средние значения ε характерны для приповерхностного слоя моря при умеренном ветре и попадают в диапазон активного ветрового перемешивания ($\varepsilon \sim 10^{-7} - 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}^3$), что подтверждает их достоверность.

Отношение средней скорости диссипации турбулентной кинетической энергии между энергозависимым и насыщенным режимами ЦЛ составляет $\varepsilon_1 \approx 1,7 \cdot \varepsilon_2$, что указывает на качественно различный характер турбулентности.

При этом стандартное отклонение σ в энергозависимом режиме ($\pm 14,49 \cdot 10^{-6}$) значительно больше, чем в насыщенном, что статистически подтверждает неустойчивый, высокоизменчивый характер первого режима. Вероятно, области (периоды) активной турбулентности чередуются с периодами относительного затишья. Это согласуется с большим межквартильным размахом La_{t1} в энергозависимом режиме (0,53 против 0,34). В насыщенном режиме $\sigma = \pm 4,985 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}^3$ характеризует меньший разброс и подтверждает относительно стабильный, установившийся характер режима, что согласуется также с меньшим межквартильным размахом 0,34 для La_{t2} . Турбулентное поле более однородно во времени и, по-видимому, в пространстве.

В исследованном диапазоне значимая линейная зависимость между ε и W для обоих режимов ЦЛ отсутствует ($R < 0,05$). Аналогичный вывод был сделан и для степенной зависимости ($R < 0,09$). Анализ межквартального

размаха ε в волновом слое для двух выделенных режимов подтвердил ранее выявленные различия в организации поля турбулентности (рис. 9).

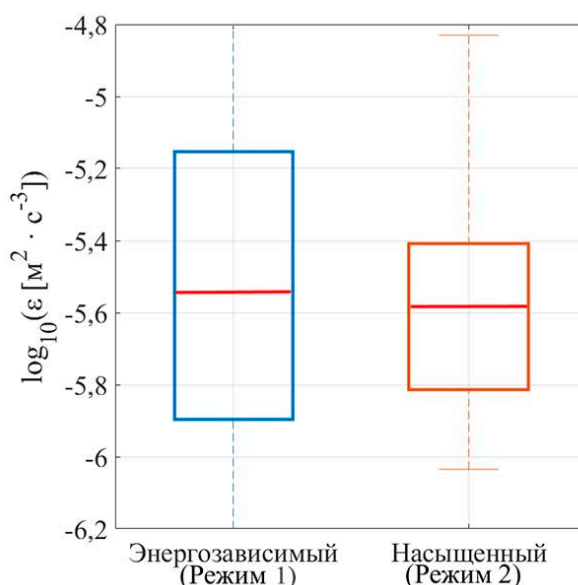


Рис. 9. Распределение ε для энергозависимого и насыщенного режимов ЦЛ
Fig. 9. Distribution of ε for the energy-dependent and saturated modes of LC

Медианные значения ε_1 и ε_2 близки: $2,87 \cdot 10^{-6}$ и $2,62 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}^3$ соответственно (разница $\sim 10\%$). То есть наиболее вероятный уровень диссипации на горизонте 3 м в обоих режимах примерно одинаков. При этом сохраняется качественное различие в вариабельности турбулентности (разбросе значений ε_1 и ε_2). В энергозависимом режиме межквартильный размах ε составляет $5,76 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}^3$, что в логарифмических единицах соответствует 0,75 (по оси $\log_{10}(\varepsilon)$). Это означает, что типичные значения ε_1 могут различаться в $10^{0,75} \approx 5,6$ раза. Такая изменчивость свидетельствует о крайней неоднородности турбулентного поля с чередованием периодов слабой диссипации и мощных локальных всплесков.

В насыщенном режиме межквартильный размах равен $2,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}^3$ ($\log_{10}(\varepsilon)$ $IQR = 0,40$), что соответствует разбросу значений ε_2 в $10^{0,40} \approx 2,5$ раза – в 2,4 раза меньше, чем в энергозависимом.

В насыщенном режиме установившиеся когерентные структуры упорядочивают турбулентность, формируя более стабильное и предсказуемое поле диссипации. Таким образом, влияние ЦЛ на вертикальный турбулентный обмен в волновом слое моря (1–3 м) заключается не столько в изменении средней интенсивности турбулентности в верхнем слое, сколько в кардинальной трансформации ее режима изменчивости – от хаотичного и неоднородного к более организованному и статистически однородному.

Заключение

Характеристики ЦЛ и их влияние на вертикальный турбулентный обмен зависят не только от скорости ветра, но и от сложного взаимодействия ветровых напряжений и поверхностного дрейфа Стокса. В двух выделенных режимах ЦЛ развиваются по-разному, имеют разную предысторию формирования, различаются степенью развития, что, в свою очередь, оказывает неодинаковое воздействие на пространственное и временное распределение турбулентного поля в волновом слое моря.

Наличие двух режимов, выявленных в экспериментальных исследованиях на СОП в 2021–2024 гг. по прямым измерениям вертикальной компоненты скорости течения в зонах конвергенции, качественно согласуется с результатами полевых экспериментов, в которых интенсивность ЦЛ оценивалась по косвенным признакам – горизонтальной дивергенции течения и амплитуде поперечных течений. В отличие от предыдущих исследований, ограничивавшихся анализом общей связи ветра с турбулентностью или косвенными проявлениями ЦЛ, в настоящем исследовании получено статистически обоснованное разделение двух режимов в диапазоне скоростей ветра V_{10} 2–9 м/с:

- энергозависимый режим ($La_t > 0,98$): $W_1(V_{10}) = 0,57 \cdot V_{10} + 1,15$, медиана $La_{t1} \approx 1,2$ [1,1; 1,5];
- насыщенный режим ($La_t \leq 0,98$): $W_2(V_{10}) = 0,29 \cdot V_{10} + 7,3$, медиана $La_{t2} \approx 0,8$ [0,64; 0,98].

Эти зависимости дают количественную параметризацию режимов, непосредственно связывая их с турбулентным числом Ленгмюра.

Проведенный анализ, основанный на прямых измерениях скорости диссипации турбулентной кинетической энергии ϵ на горизонте 3 м, позволил количественно оценить влияние ЦЛ на турбулентный обмен в волновом слое моря. Установлено, что выделенные два режима (энергозависимый и насыщенный) не различаются статистически значимо по медианному уровню диссипации: медианные значения $\log_{10}(\epsilon_1)$ и $\log_{10}(\epsilon_2)$ составляют $-5,541$ и $-5,582$, что соответствует $\epsilon \approx 2,87 \cdot 10^{-6}$ и $2,62 \cdot 10^{-6}$ м²/с³ (разница ~ 10 %). Принципиальное различие между режимами проявляется в характере пространственно-временной изменчивости скорости диссипации турбулентной энергии. В энергозависимом режиме, соответствующем фазе активной генерации ЦЛ, турбулентность характеризуется экстремально высокой неоднородностью: межквартильный размах $\log_{10}(\epsilon_1)$ равен 0,75, то есть типичные значения ϵ_1 могут различаться в $10^{0,75} \approx 5,6$ раза во всем диапазоне. Для насыщенного режима межквартильный размах $\log_{10}(\epsilon_2)$ составляет 0,40, что соответствует разбросу в $10^{0,4} \approx 2,5$ раза во всем диапазоне. Таким образом, разброс ϵ в энергозависимом режиме в 2,4 раза больше, чем в насыщенном. Это свидетельствует о хаотичном, неустановившемся характере турбулентности при формировании когерентных структур в энергозависимом режиме. В насыщенном режиме, напротив, установившиеся ЦЛ организуют и стабилизируют турбулентные характеристики, существенно снижая их пространственно-временную вариабельность при сохранении примерно того же уровня диссипации. Эти результаты хорошо согласуются с характером распределения La_t для

обоих режимов и подтверждают принципиально различную пространственную структуру турбулентности.

Впервые показано, что влияние ЦЛ на турбулентный обмен в волновом слое проявляется не через простую линейную связь $\varepsilon(W)$, а через изменение статистических свойств поля. Вклад когерентных структур в турбулентный обмен в волновом слое проявляется преимущественно в модуляции пространственно-временной структуры поля турбулентности, в качественном изменении режима изменчивости – от хаотичного и неоднородного к организованному и пространственно однородному, а не в изменении средней интенсивности. Можно предположить, что скорость диссипации ε определяется комплексом факторов, включая стратификацию, масштаб ячеек ЦЛ, предысторию ветрового воздействия и характеристики волнового поля, а не только текущей интенсивностью ЦЛ. Полученные результаты дают новую полезную информацию о взаимосвязи циркуляций Ленгмюра с генерацией приповерхностной турбулентности и процессами вертикального обмена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Craig P. D., Banner M. L.* Modeling wave-enhanced turbulence in the ocean surface layer // *Journal of Physical Oceanography*. 1994. Vol. 24, iss. 12. P. 2546–2559. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1994\)024<2546:MWETIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1994)024<2546:MWETIT>2.0.CO;2)
2. On the vertical structure of wind-driven sea currents / V. Kudryavtsev [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2008. Vol. 38, iss. 10. P. 2121–2144. EDN LLKHMХ. <https://doi.org/10.1175/2008JPO3883.1>
3. *Чухарев А. М.* Модель турбулентности со многими временными масштабами для приповерхностного слоя моря // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49, № 4. С. 477–488. EDN QIWCFV. <https://doi.org/10.7868/s0002351513040020>
4. *Craik A. D. D., Leibovich S.* A rational model for Langmuir circulations // *Journal of Fluid Mechanics*. 1976. Vol. 73, iss. 3. P. 401–426. <https://doi.org/10.1017/S0022112076001420>
5. Structure and variability of Langmuir circulation during the Surface Waves Processes Program / A. J. Plueddemann [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1996. Vol. 101, iss. C2. P. 3525–3543. <https://doi.org/10.1029/95JC03282>
6. *Tsai W., Hung L.* Three-dimensional modeling of small-scale processes in the upper boundary layer bounded by a dynamic ocean surface // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2007. Vol. 112, iss. C2. C02019. <https://doi.org/10.1029/2006JC003686>
7. *Kukulka T., Plueddemann A. J., Sullivan P. P.* Nonlocal transport due to Langmuir circulation in a coastal ocean // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2012. Vol. 117, iss. C12. C12007. <https://doi.org/10.1029/2012JC008340>
8. Langmuir circulation: an agent for vertical restratification / K. Li [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2012. Vol. 42, iss. 11. P. 1945–1958. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-11-0225.1>
9. Roles of breaking waves and Langmuir circulation in the surface boundary layer of a coastal ocean / S. Li [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013. Vol. 118, iss. 10. P. 5173–5187. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20387>
10. The wavy Ekman layer: Langmuir circulations, breaking waves, and Reynolds stress / J. C. McWilliams [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2012. Vol. 42, iss. 11. P. 1793–1816. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-07.1>
11. Langmuir turbulence in swell / J. C. McWilliams [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2014. Vol. 44, iss. 3. P. 870–890. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-13-0122.1>

12. Transient evolution of Langmuir turbulence in ocean boundary layers driven by hurricane winds and waves / P. P. Sullivan [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2012. Vol. 42, iss. 11. P. 1959–1980. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-025.1>
13. *Skyllingstad E. D., Denbo D. W.* An ocean large-eddy simulation of Langmuir circulations and convection in the surface mixed layer // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1995. Vol. 100, iss. C5. P. 8501–8522. <https://doi.org/10.1029/94JC03202>
14. *Thorpe S. A.* Langmuir circulation // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2004. Vol. 36. P. 55–79. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.052203.071431>
15. Measurements of turbulence in the upper-ocean mixing layer using Autosub / S. A. Thorpe [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2003. Vol. 33, iss. 1. P. 122–145. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<0122:MOTITU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<0122:MOTITU>2.0.CO;2)
16. Characterization and modulation of Langmuir circulation in Chesapeake Bay / M. E. Scully [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2015. Vol. 45, iss. 10. P. 2621–2639. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0239.1>
17. *Weller R. A., Price J. F.* Langmuir circulation within the oceanic mixed layer // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. 1988. Vol. 35, iss. 5. P. 711–747. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(88\)90027-1](https://doi.org/10.1016/0198-0149(88)90027-1)
18. *Filatov N. N., Rjanzhin S. V., Zaycev L. V.* Investigation of turbulence and Langmuir circulation in Lake Ladoga // *Journal of Great Lakes Research*. 1981. Vol. 7, iss. 1. P. 1–6. [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(81\)72016-1](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(81)72016-1)
19. *Чухарев А. М., Павлов М. И.* Модельные и экспериментальные оценки интенсивности вертикального перемешивания в верхнем однородном слое моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 3. С. 333–349. EDN MBTZJF. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-3-333-349>
20. *Wu L., Rutgersson A., Sahlée E.* Upper-ocean mixing due to surface gravity waves // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2015. Vol. 120, iss. 12. P. 8210–8228. <https://doi.org/10.1002/2015JC011329>
21. *Harcourt R. R., D'Asaro E. A.* Large-eddy simulation of Langmuir turbulence in pure wind seas // *Journal of Physical Oceanography*. 2008. Vol. 38, iss. 7. P. 1542–1562. <https://doi.org/10.1175/2007JPO3842.1>
22. *Zedel L., Farmer D.* Organized structures in subsurface bubble clouds: Langmuir circulation in the open ocean // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. Vol. 96, iss. C5. P. 8889–8900. <https://doi.org/10.1029/91JC00189>
23. Quantifying upper ocean turbulence driven by surface waves / E. A. D'Asaro [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2014. Vol. 41, iss. 1. P. 102–107. <https://doi.org/10.1002/2013GL058193>
24. Измерительный комплекс «Сигма-1» для исследования мелкомасштабных характеристик гидрофизических полей в верхнем слое моря / А. С. Самодуров [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. № 5. С. 60–71.
25. *Pavlov M. I., Chukharev A. M.* Influence of Langmuir circulations on the intensity of turbulent mixing in the near-surface layer of the sea // *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes–2022. PMMEEP 2022*. Cham : Springer, 2023. P. 395–411. (Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences). EDN VQZBCI. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25962-3_39
26. *Stewart R. W., Grant H. L.* Determination of the rate of dissipation of turbulent energy near the sea surface in the presence of waves // *Journal of Geophysical Research*. 1962. Vol. 67, iss. 8. P. 3177–3180. <https://doi.org/10.1029/JZ067i008p03177>
27. Near-surface microstructure sensor system used during TOGA COARE. Part II: Turbulence measurements / A. Soloviev [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1999. Vol. 16, iss. 11. P. 1598–1618. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1999\)016<1598:ANSMSS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1999)016<1598:ANSMSS>2.0.CO;2)
28. *Leibovich S.* The form and dynamics of Langmuir circulations // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1983. Vol. 15. P. 391–427. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.15.010183.002135>

29. *McWilliams J. C., Sullivan P. P., Moeng C.-H.* Langmuir turbulence in the ocean // *Journal of Fluid Mechanics*. 1997. Vol. 334. P. 1–30. <https://doi.org/10.1017/S0022112096004375>
30. *Smith J. A.* Observed growth of Langmuir circulation // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1992. Vol. 97, iss. C4. P. 5651–5664. <https://doi.org/10.1029/91JC03118>
31. *Gargett A. E., Wells J. R.* Langmuir turbulence in shallow water. Part 1. Observations // *Journal of Fluid Mechanics*. 2007. Vol. 576. P. 27–61. <https://doi.org/10.1017/S0022112006004575>

Об авторах:

Павлов Михаил Игоревич, младший научный сотрудник, отдел турбулентности, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 4194-0706, Scopus Author ID: 57226157217, WoS ResearcherID: ABB-6151-2021, ORCID ID: 0000-0001-9998-2080**, mixail.pavlov.1993@mail.ru

Чухарев Александр Михайлович, главный научный сотрудник, отдел турбулентности, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 1729-5565, Scopus Author ID: 6603038462, WoS ResearcherID: G-3180-2013, ORCID ID: 0000-0003-1078-6425**, alexchukh@mail.ru

Казаков Дмитрий Анатольевич, младший научный сотрудник, отдел турбулентности, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 6351-9222, Scopus Author ID: 57250141300, WoS ResearcherID: ABB-9621-2021, ORCID ID: 0000-0001-5083-4968**, dk@mhi-ras.ru

Зубов Анатолий Георгиевич, младший научный сотрудник, отдел турбулентности, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **Scopus Author ID: 57215362329**, sl4612@mail.ru

Павленко Ольга Ивановна, ведущий инженер-программист, отдел турбулентности, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **Scopus Author ID: 57215363083**, olpav@list.ru

Шутов Сергей Аркадьевич, ведущий инженер, служба экспедиционного обеспечения, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), sergeo808@gmail.com