

УДК 551.466.8

ХАРАКТЕРИСТИКИ СДВИГОВЫХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ПОТОКОВ В УСЛОВИЯХ ШЕЛЬФА ЯПОНСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В 2022 г.

© 2025 г. О. Е. Куркина¹, И. О. Ярошук², А. В. Кошелева², академик РАН Г. И. Долгих²,
Е. Н. Пелиновский^{2,3}, А. А. Куркин^{1,2,*}

Поступило 12.08.2024 г.

После доработки 18.09.2024 г.

Принято к публикации 23.09.2024 г.

Представлены результаты анализа натурных данных измерений сдвиговых стратифицированных потоков на шельфе Японского моря. Определение критических зон и слоёв выполнено в терминах безразмерных параметров Фруда и Ричардсона. Показано, что при прохождении внутренних боров высокой интенсивности имеют место достаточно протяжённые (до нескольких часов) временные интервалы, для которых характерен сверхкритический по Фрудру режим, когда предсказывается и происходит активная генерация короткопериодных внутренних волн большой амплитуды. Статистика чисел Ричардсона показывает, что с нижней оценкой вероятности в слое измерения течений за время наблюдений возникновение сдвиговой неустойчивости возможно в 15% случаев, а её сохранение — в 44% случаев.

Ключевые слова: внутренние волны, число Фруда, число Ричардсона, резонансная генерация волн, сдвиговая неустойчивость

DOI: 10.31857/S2686739725010186 EDN: GVKFCW

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг и прогнозирование течений, особенно в шельфовой зоне, играет очень важную роль в планировании хозяйственной деятельности человека, инженерных изысканиях и предсказании потенциального воздействия на прибрежную экосистему. Оценки параметров сдвиговых стратифицированных потоков необходимы не только на начальных этапах проектирования различных гидротехнических систем (от нефтегазодобывающих платформ до преобразователей волновой энергии), но и для дальнейшей эксплуатации объектов морской

инфраструктуры, поскольку эти параметры являются входными данными для моделей, позволяющих прогнозировать нагрузки на конструкции, потенциальные размывы грунтов и распространение примесей и загрязнений.

Задачи, связанные с описанием энергетических каскадов, гидродинамической неустойчивости, ламинарно-турбулентных переходов и придонного турбулентного пограничного слоя в естественных сдвиговых стратифицированных потоках, составляют фундаментальные проблемы механики жидкости и гидрофизики океана, представляющие большой прикладной интерес. Сдвиговые течения на шельфе формируются под влиянием комплекса физических факторов окружающей среды, таких как атмосферные воздействия, топографические эффекты, локальные силы плавучести и приливные потоки. Важное значение при исследовании таких течений имеют временная изменчивость и пространственные особенности распределения поля скорости, а также поддерживающие их динамические механизмы. Первым этапом качественного понимания динамики происходящих процессов

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток, Россия

³ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской Академии наук, Нижний Новгород, Россия

* E-mail: aakurkin@nntu.ru

является использование простых общеизвестных физических критериев (не)устойчивости, в основе которых лежат модели и методы теории линейных и нелинейных колебаний и волн. Эти критерии построены на безразмерных параметрах Фруда и Ричардсона. Здесь мы используем их для предварительного анализа динамических процессов, наблюдавшихся осенью 2022 г. на шельфе Японского моря.

ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Исследования сдвиговых стратифицированных потоков применительно к условиям Японского моря (залив Петра Великого) выполнялись на гидрофизическом полигоне Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН, схема которого представлена на рис. 1. Подробное описание натурных экспериментов, выполненных на полигоне, представлено в работах [1–3].

Для расчётов использованы осреднённые по 1 мин. данные регистратора горизонтальных течений Infinity с трёх горизонтов и данные термогирлянд с дискретностью 10 с и CTD зондирования в период с 12:53 8 октября по 14:16 12 октября 2022 г, полученные ТОИ ДВО РАН. Течение измеряли в точке INF (см. рис. 1, 124 м от станции S06), глубина дна 41.5 м. Скорости (меридиональная и зональная компоненты) измерялись на трёх уровнях: 2, 8, 14 м от дна (соответственно 39.5 м, 33.5 м, 27.5 м глубины). Термогирлянда на станции S06 состояла из 35 датчиков, последний датчик располагался в 2 м от дна. Плотность была восстановлена по уравнению состояния морской воды TEOS-10 с использованием профиля солёности, измеренного CTD-зондом на станции S04.

Результаты измерений скорости течения в нижнем слое моря на станции INF показаны на рис. 2 (зональная (U) и меридиональная (V) компоненты). Видно, что скорость течения весьма значительна (в отдельные моменты времени превышает 0.4 м/с), имеет ярко выраженную вертикальную структуру, также характерна сильная изменчивость во времени, как по величине, так и по направлению. Фрагмент записи в период от 40 до 90 часов от начала записи характеризуется заметной квазипериодичностью с преобладанием длинноволновых компонент с периодом близким к инерционному периоду для широты места наблюдений (16–18 ч). В поле температуры и плотности в этот же период были выявлены три ярко выраженных внутренних волновых фронта с теми же спектральными свойствами.

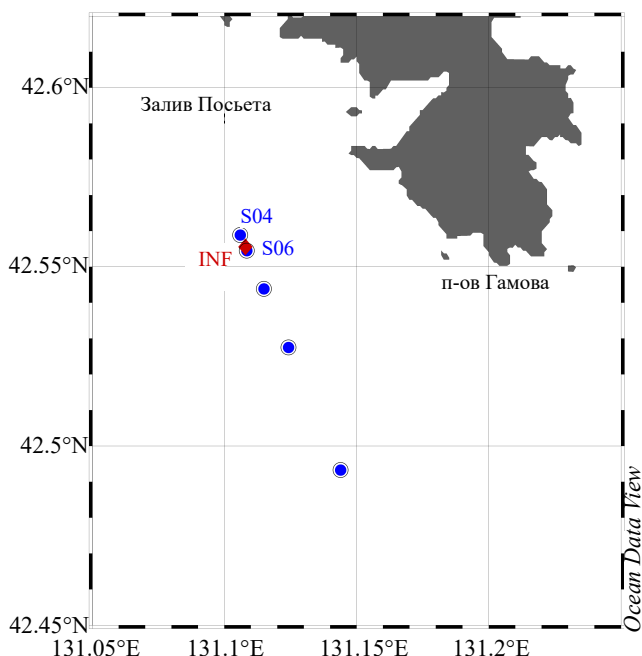


Рис. 1. Карта района измерений с указанием станций гидрофизического полигона ТОИ ДВО РАН

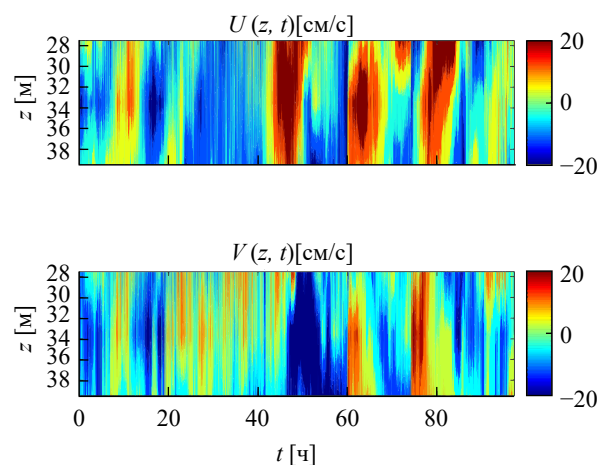


Рис. 2. Зональная и меридиональная компоненты скорости, измеренные на станции INF

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Выделение критических зон и слоёв в измеренных полях течений было выполнено с помощью классического подхода на основании расчётов чисел Фруда и Ричардсона [4–6]. В наиболее общепринятом понимании число Фруда Fr представляет собой отношение скоростей, с которыми два процесса, а именно, адвективный и волновой, переносят информацию о возмущении в среде. Локально число Фруда

также представляет собой соотношение кинетической и потенциальной энергии потока и определяет поток как докритический или сверхкритический. Для стратифицированных жидкостей существует множество формулировок этого критерия, в том числе в зависимости от типа волнового процесса (см., более подробно в работе [7]). Число Фруда для измеренного в точке стратифицированного потока в присутствии внутренних волн может быть рассчитано как:

$$Fr(t) = \frac{\max_z |\vec{u}(z, t)|}{c(t)},$$

где c — фазовая скорость длинных линейных внутренних волн первой моды, алгоритм расчета этой величины дан, например, в работах [8, 9]. Критерием линейной устойчивости в терминах чисел Фруда здесь являются значения $Fr < 1$. Режим $Fr > 1$ соответствует активной генерации интенсивных внутренних волн [10, 11].

Число Фруда и величины, необходимые для расчёта этого параметра, по данным измерений на станциях S06 и INF показаны на рис. 3. Из этого рисунка видно, что имеют место достаточно протяжённые временные интервалы, для которых характерен сверхкритический режим. Эти временные интервалы как раз соответствуют прохождению внутренних боров высокой интенсивности, на которых генерируются короткопериодные внутренние волны большой амплитуды.

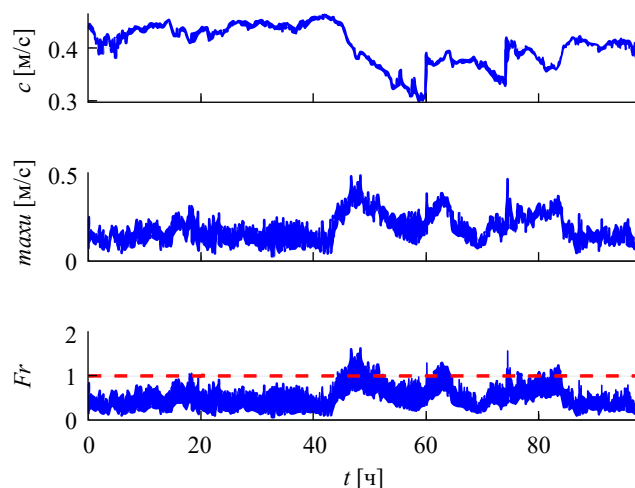


Рис. 3. Сверху вниз: фазовая скорость длинных линейных внутренних волн первой моды, максимальная скорость стратифицированного течения и число Фруда для данных наблюдений на станциях S06 и INF. На нижней панели красным пунктиром показано критическое значение числа Фруда $Fr = 1$

Градиентное число Ричардсона (Ri) для нашей задачи определяется из соотношения:

$$Ri(z, t) = \frac{N^2(z, t)}{Sh^2(z, t)},$$

где

$$N^2(z) = \frac{g}{\rho(z)} \frac{d\rho(z)}{dz}, \quad Sh^2 = \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2,$$

здесь N — частота плавучести, z — глубина, g — ускорение свободного падения, ρ — плотность воды, Sh — модуль вертикального сдвига скорости течения, U и V — северная и восточная компоненты скорости течения, соответственно. Параметр Ri часто используется при решении задач, связанных с вопросами вертикального турбулентного перемешивания в стратифицированной морской среде [12–16]. Существуют два критерия: для линейной неустойчивости сдвигового потока необходимым (но недостаточным) условием является $Ri < 0.25$ [17, 18], а для нелинейной устойчивости необходимым и достаточным условием является $Ri > 1$ [19]. Согласно данным глоссария [20] существует предположение о гистерезисе: ламинарный поток становится турбулентным при $Ri < 0.25$, но турбулентный поток может существовать до $Ri = 1.0$, прежде чем стать ламинарным.

Расчёты вспомогательных величин для вычисления градиентного числа Ричардсона Ri : квадрата частоты плавучести $N^2(z, t)$ по данным наблюдений на станции S06 и величин $\frac{\partial U}{\partial z}$ и $\frac{\partial V}{\partial z}$ по данным наблюдений на станции INF показывают, что числитель и знаменатель Ri имеют один и тот же порядок величины — $10^{-4} 1/c$, поэтому неустойчивые режимы могут реализовываться в районе измерений. Это подтверждается и рис. 4, где показан параметр Ri от времени (вместе с критическими значениями $Ri = 0.25$ и $Ri = 1$) для верхнего ($27.5 \text{ м} < z < 33.5 \text{ м}$) и нижнего ($33.5 \text{ м} < z < 39.5 \text{ м}$) придонных слоёв, где проводились измерения течения на станции INF. Вероятность выполнения необходимого условия неустойчивости $P(Ri < 0.25)$ сдвигового потока в нижнем слое составляет 16%, а в верхнем — 15%. На рис. 5 показана диаграмма рассеяния $N^2 - Sh^2$, рассчитанная по данным наблюдений на станциях S06 и INF. Учёт двух критических значений показывает, что в слое измерения течений за время наблюдений генерация турбулентной кинетической энергии возможна примерно в 15% случаев, а её сохранение — в 44% случаев.

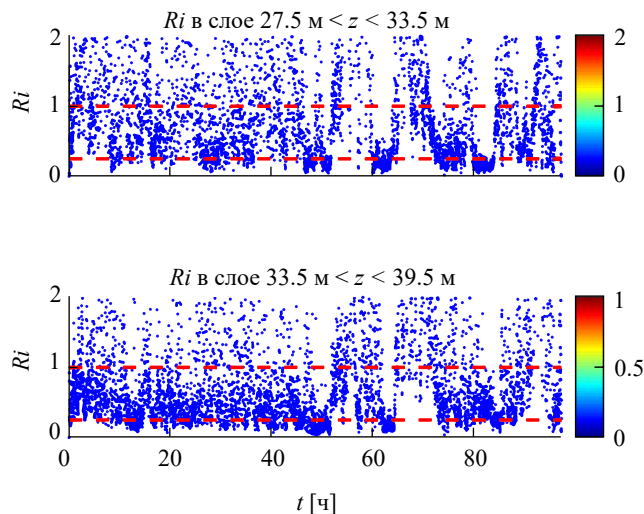


Рис. 4. Градиентное число Ричардсона Ri по данным наблюдений на станциях S06 и INF. Критические значения $Ri = 0.25$ и $Ri = 1$ показаны красным пунктиром

Следует обратить внимание, что канонический критерий неустойчивости $Ri < 0.25$ основан на предположении о плоскопараллельном стратифицированном сдвиговом течении. Лабораторные эксперименты и численное моделирование показали, что критерий для искривлённого стратифицированного сдвигового течения при прохождении короткопериодных внутренних волн может быть изменен на $Ri < 0.1$ [6].

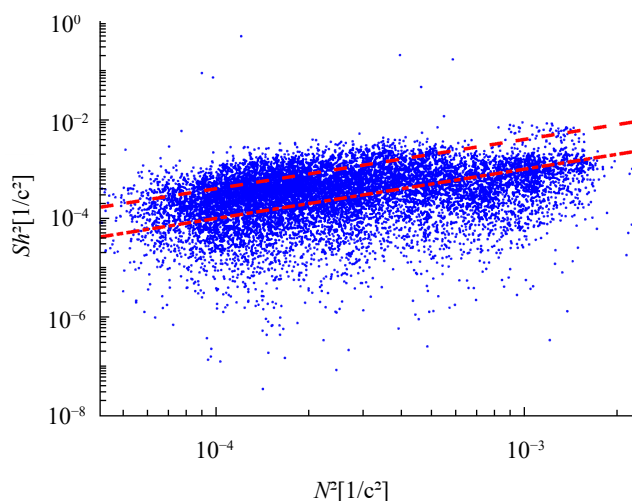


Рис. 5. Диаграмма рассеяния $N^2 - Sh^2$, рассчитанная по данным наблюдений на станциях S06 и INF. Критические значения $Ri = 0.25$ и $Ri = 1$ показаны красным пунктиром и штрих-пунктиром соответственно

Вероятность выполнения этого условия в нашем случае $P(Ri < 0.1)$ составляет всего 1.7% в нижнем слое и 1.2% — в слое над ним. Скорее всего, такие события связаны с волнами большой крутизны и амплитуды.

Основная проблема использования Ri для оценки параметров вертикального турбулентного перемешивания по данным мелкомасштабных измерений заключается в его сильной зависимости от приращения глубины (Δz), на котором рассчитываются соответствующие производные:

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta z},$$

или, другими словами, от разрешающей способности приборов. В работе [16] показано, что по данным наблюдений в Чёрном море вероятность достижения критических значений параметра Ричардсона $Ri < 0.25$ экспоненциально падает с ростом Δz , уменьшаясь от 20% при $\Delta z = 0.5$ м до 3% при $\Delta z = 6$ м. Это говорит о том, что в морских условиях выполнение критерия неустойчивости чаще встречается на малых масштабах. В нашем случае измерения течений проводились с вертикальным разрешением $\Delta z = 6$ м, поэтому мы получаем лишь нижнюю оценку вероятности появления возможных зон неустойчивости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведён анализ данных одновременных измерений стратификации плотности и придонных стратифицированных течений в Японском море (залив Посыета, залив Петра Великого) на гидрофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН в октябре 2022 г. Результаты обработки натурных экспериментальных данных показали, что за период наблюдений течения около 25 часов имеют место достаточно протяжённые (до нескольких часов) временные интервалы, для которых характерен сверхкритический режим, когда возникает резонансное взаимодействие длинных внутренних волн со сдвиговым потоком, что согласуется с наблюдаемой активной генерацией короткопериодных внутренних волн большой амплитуды в эти периоды времени. Хотя рассматриваемые критерии (не)устойчивости возникли при рассмотрении линейных уравнений и при асимптотическом анализе гармонических волновых возмущений малой амплитуды, при приближении к зонам и слоям, где эти критерии нарушаются, происходит

быстрая генерация старших вертикальных мод и волновых гармоник, линейное описание здесь не применимо даже для волн малой амплитуды, и для корректного описания происходящих процессов нужно решать полную систему уравнений гидродинамики.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности по темам FSWE-2023-0004 и 124022100074-9 и при поддержке Лаборатории нелинейной гидрофизики и природных катастроф ТОИ им. В.И. Ильичева ДВО РАН, грант Министерства науки и высшего образования РФ соглашение № 075-15-2022-1127 от 01.07.2022 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошелева А. В., Ярошук И. О., Швырев А. Н., Самченко А. Н., Пивоваров А. А., Коротченко Р. А. Экспериментальные исследования фоновых внутренних волн в прибрежной части залива Петра Великого // Физика геосфер. 2019. С. 110–113.
2. Yaroshchuk I., Kosheleva A., Lazaryuk A., Dolgikh G., Pivovarov A., Samchenko A., Shvyrev A., Gulin O., Korotchenko R. Estimation of Seawater Hydrophysical Characteristics from Thermistor Strings and CTD Data in the Sea of Japan Shelf Zone // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. V. 11(6). P. 1204. 1–24.
3. Yaroshchuk I., Liapidevskii V., Kosheleva A., Dolgikh G., Pivovarov A., Samchenko A., Shvyrev A., Gulin O., Korotchenko R., Khrapchenkov F. Observation and Modeling of Nonlinear Internal Waves on the Sea of Japan Shelf // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. V. 12(8). P. 1301. 1–20.
4. Степанянц Ю. А., Фабрикант А. Л. Распространение волн в сдвиговых гидродинамических течениях // Успехи физических наук. 1989. Т. 159. № 9. С. 83–123.
5. Polzin K. Statistics of the Richardson number: Mixing models and finestructure // Journal of Physical Oceanography. 1996. V. 26(8). P. 1409–1425.
6. Chang M. H. Marginal instability within internal solitary waves // Geophysical Research Letters. 2021. V. 48(9). P. e2021GL092616.
7. Mayer F. T., Fringer O. B. An unambiguous definition of the Froude number for lee waves in the deep ocean // J. Fluid Mech. 2017. V. 831. P. R3. 1–9.
8. Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T., Barnes B. A nonlinear model of internal tide transformation on the Australian North West Shelf // J. Phys. Oceanogr. 1997. V. 27(6). P. 871–896.
9. Kurkina O. E., Talipova T. G., Soomere T., Kurkin A. A., Rybin A. V. The impact of seasonal changes in stratification on the dynamics of internal waves in the sea of Okhotsk // Estonian Journal of Earth Sciences. 2017. V. 66(4). P. 238–255.
10. Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K. Baroclinic tides: theoretical modeling and observational evidence. Cambridge University Press, 2005. 350 p.
11. Kurkina O. E., Talipova T. G. Huge internal waves in the vicinity of the Spitsbergen Island (Barents Sea) // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. V. 11. P. 981–986.
12. Munk W., Anderson E. Notes on a theory of the thermocline // J. Mar. Res. 1948. V. 3. P. 267–295.
13. Pacanowski R. C., Philander S. G. H. Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans // J. Phys. Ocean. 1981. V. 11. P. 1443–1451.
14. Redekopp L. G. Elements of instability theory for environmental flows // Environmental stratified flows. Boston, MA: Springer US. 2001. P. 223–281.
15. Galperin B., Sukoriansky S., Anderson P. S. On the critical Richardson number in stably stratified turbulence // Atmospheric Science Letters. 2007. V. 8. P. 65–69.
16. Морозов А. Н. Статистика чисел Ричардсона по данным наблюдений с океанографической платформы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 2. С. 39–46.
17. Miles J. W. On the stability of heterogeneous shear flows // J. Fluid Mech. 1961. V. 10 (4). P. 496–508.
18. Baines P. G. Topographic effects in stratified flows. Cambridge University Press, 1998. 498 p.
19. Abarbanel H. D. I., Holm D. D., Marsden J. E., Ratiu T. Richardson number criterion for nonlinear stability of three-dimensional stratified flow // Physical Review Letters. 1984. V. 52. P. 2352–2355.
20. American Meteorological Society, 2023: Critical Richardson number. Glossary of Meteorology, http://glossary.ametsoc.org/wiki/critical_Richardson_number

CHARACTERISTICS OF SHEAR STRATIFIED FLOWS IN THE CONDITIONS OF THE SEA OF JAPAN SHELF BASED ON IN-SITU MEASUREMENTS IN 2022

© 2025 O. E. Kurkina^a, I. O. Yaroshchuk^b, A. V. Kosheleva^b,
Academician of the RAS G. I. Dolgikh^b, E. N. Pelinovsky^{b,c}, A. A. Kurkin^{a,b,#}

^a*R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia*

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

^c*A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

[#]*E-mail: aakurkin@nntu.ru*

The article presents some analysis results of in situ data of shear stratified flow measurements on the shelf of the Sea of Japan. The study of critical zones and layers is performed in terms of dimensionless Froude and Richardson parameters. It is shown that during the passage of high-intensity internal bores, sufficiently long (up to several hours) time intervals exist, which are characterized by a supercritical Froude regime, when active generation of short-period internal waves of large amplitude is predicted and occurs. The statistics of the Richardson number shows that with the lower probability estimate in the near-bottom layers during the observation period, the occurrence of shear instability is possible in 15% of cases, and its preservation is possible in 44% of cases.

Keywords: internal waves, Froude number, Richardson number, resonance generation of waves, shear instability