

А.Н.Морозов

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь***СТАТИСТИКА ЧИСЕЛ РИЧАРДСОНА ПО ДАННЫМ  
НАБЛЮДЕНИЙ С ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ**

Обсуждаются результаты измерений, выполненных 17 – 21 мая 2013 г. с океанографической платформы, расположенной в прибрежных водах вблизи пгт.Кацивели. Измерения выполнялись с помощью распределенного термопрофилемера, акустического доплеровского профилометра течений и CTD-зонда. Обсуждаются методические вопросы совместной обработки данных. Рассматриваются оценки чисел Ричардсона ( $Ri$ ) в зависимости от разрешающей способности приборов. Показано, что вероятность выполнения необходимого условия линейной неустойчивости ( $P_{Ri < 0,25}$ ) спадает по экспоненте с ростом приращения глубины, на котором рассчитываются соответствующие производные.  $P_{Ri < 0,25}$  линейно уменьшается с глубиной и проявляет логарифмическую зависимость от частоты плавучести. В качестве альтернативы числам Ричардсона рассматриваются соотношения измеренных значений средних сдвигов скорости течения с их значениями, оцененными по спектру Гаррета и Манка (GM76).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *вертикальный сдвиг скорости течения, числа Ричардсона, термопрофилемер, ADCP, Черное море*

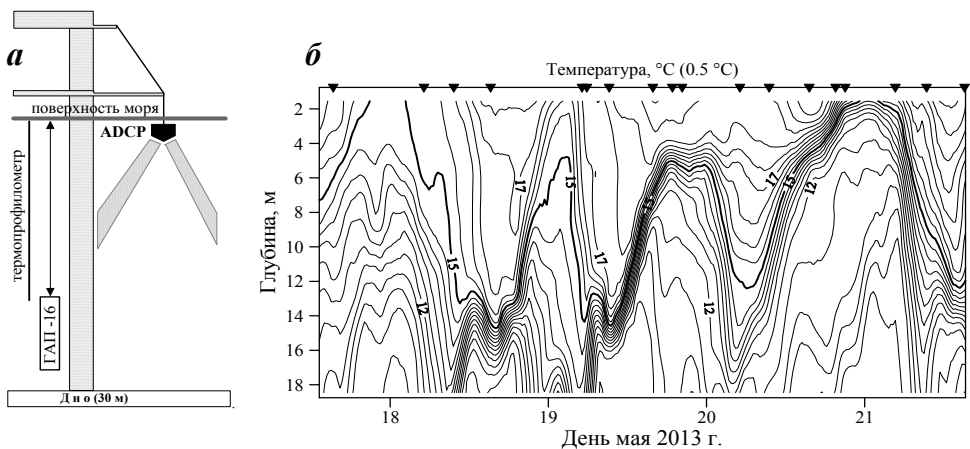
doi:10.22449/2413-5577-2018-2-39-46

**Введение.** Закономерности мелкомасштабной динамики вод в настоящее время изучены недостаточно. Мелкомасштабные процессы в прибрежной зоне моря формируются, в основном, в результате взаимодействия крупномасштабных явлений глубокого моря с неоднородностями рельефа дна и ветрового воздействия на водную поверхность. Интенсификация мелкомасштабных процессов приводит к усилению вертикального турбулентного обмена и вертикальных потоков тепла, соли, кислорода, биогенов и др., что может оказывать значительное влияние на функционирование прибрежной экосистемы.

На современном этапе развитие техники океанологических измерений позволяет исследовать закономерности мелкомасштабной динамики прибрежных вод в ее взаимосвязи с плотностной стратификацией и другими гидрологическими параметрами. В практике натуральных исследований широко распространено совместное использование акустических доплеровских профилометров течений (ADCP) и гирлянды датчиков температуры [1, 2], что дает возможность получать новые знания о мелкомасштабных процессах и их роли в вентилиации прибрежных акваторий.

Цель статьи – представить и обсудить статистические характеристики чисел Ричардсона, полученные на основе натуральных данных по течениям и температуре, собранных с океанографической платформы, расположенной в ~ 500 м от берега вблизи пгт.Кацивели.

© А.Н.Морозов, 2018



Р и с . 1 . Схема размещения приборов на платформе (а) и фрагмент записи распределенного термопрофиломера, соответствующий времени проведения измерений (б). Треугольники маркируют время выполнения *CTD*-зондирований.

**Приборы и данные.** Измерения выполнялись с 13:51 *UTC* 17 мая по 15:34 *UTC* 21 мая 2013 г. На рис.1, а схематично приведено размещение приборов на платформе. *ADCP WHM1200* (производство *RDI*, рабочая частота 1200 кГц) использовался для измерения профилей горизонтальных компонент скорости течения с разрешением по глубине 0,5 м и дискретностью по времени 12 с. Слой измерений составил от 1,5 до 11,5 м глубины. *CTD*-зондирования проводились с помощью гидрологического автономного прибора ГАП-16. Разрешение по глубине 0,5 м. Всего на интервале наблюдений было выполнено 18 зондирований (рис.1, б, треугольники на верхней шкале маркируют время проведения). Профили температуры измерялись с помощью распределенного термопрофиломера (РТП) с октября 2012 г. по октябрь 2013 г. [3]. Разрешение по глубине 1,5 м, по времени 1 мин. Первый горизонт 0,75 м, последний 19,5 м. На рис.1, б приведен фрагмент записи РТП с 12:00 *UTC* 17 мая по 16:00 *UTC* 21 мая 2013 г. Во время проведения измерений наблюдалось волнообразное смещение положения изотерм с периодом около суток и амплитудой ~ 5 м. Детально результаты измерений представлены в [4].

Перед проведением совместной обработки данных *ADCP*, РТП и *CTD* решались следующие методические вопросы: 1) по данным *CTD*-зондирований были определены коэффициенты усредненной линейной зависимости условной плотности ( $\sigma_\theta$ ) от температуры ( $T_{CTD}$ ):  $\sigma_\theta = 16,334 - 0,236T_{CTD}$ ; 2) синхронизация данных по течениям и температуре выполнялась на основе сопоставления показаний встроенного датчика температуры *ADCP* ( $T_{ADCP}$ ), находившегося на горизонте ~ 0,5 м, и первого сегмента РТП ( $T_{РП1}$ ), соответствующая глубина ~ 0,75 м. Сдвиг по времени определялся подбором  $\tau$ , соответствующего минимуму значения  $\langle (T_{ADCP}(t) - T_{РП1}(t + \tau))^2 \rangle$ , где  $t$  – время,  $\langle \dots \rangle_t$  – оператор осреднения по времени на интервале выполнения измерений, и составил – 35 мин; 3) калибровка элементов РТП ( $j$ ) выполнялась с использованием *CTD*-данных методом наименьших квадратов для установления усредненных зависимостей  $T_{CTD}(z_j) = a_j + b_j T_{РПj}$ . Коэффици-

енты  $a_j$  – изменялись в диапазоне  $\pm 1,5$  °С в зависимости от сегмента. Отклонение коэффициентов  $b_j$  от 1 составило не более 5 %.

**Теория.** Градиентное число Ричардсона ( $Ri$ ) определяется из соотношения:

$$Ri = N^2 / Sh^2; \quad N^2 = g / \rho \cdot \partial \rho / \partial z; \quad Sh^2 = (\partial U / \partial z)^2 + (\partial V / \partial z)^2,$$

где  $N$  – частота плавучести,  $z$  – глубина,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\rho$  – плотность воды,  $Sh$  – модуль вертикального сдвига скорости течения,  $V$  и  $U$  – северная и восточная компоненты скорости течения, и часто используется при решении задач, связанных с вопросами вертикального турбулентного перемешивания в устойчиво стратифицированной морской среде [5 – 7]. Существуют два критерия: для линейной неустойчивости сдвигового потока необходимым (но недостаточным) условием является  $Ri < 0,25$  [8]; для нелинейной стабильности необходимым и достаточным условием является  $Ri > 1$  [9]. Именно эти критерии рассматриваются в статье при обсуждении статистики чисел Ричардсона.

Основная проблема использования  $Ri$  для оценки параметров вертикального турбулентного перемешивания по данным мелкомасштабных измерений заключается в его сильной зависимости от приращения глубины ( $\Delta z$ ), на котором рассчитываются соответствующие производные ( $\partial U / \partial z = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} (\Delta U / \Delta z)$ ;  $\Delta U / \Delta z \neq \partial U / \partial z$ ), или, другими словами, от разрешающей способности приборов. Ранее была разработана параметризация для расчета скорости диссипации турбулентной кинетической энергии по мелкомасштабным данным [10], учитывающая  $\Delta z$ , но не получившая развития, из-за неудовлетворительного соответствия натурным данным [11].

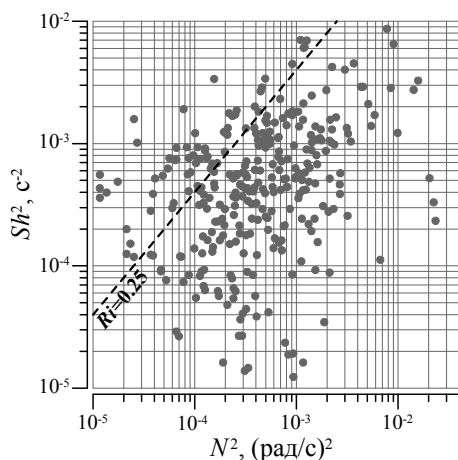
В настоящее время для оценки параметров вертикального турбулентного перемешивания по мелкомасштабным данным широко распространено использование моделей, не содержащих  $Ri$ , и основанных на сопоставлении измеренных сдвигов течений со сдвигами, оцененными по спектру Гаррета и Манка (GM76). В рамках данной статьи использован спектр сдвигов скорости течения  $\Phi_{GM76}(k)$  (где  $k$  – вертикальное волновое число), приведенный в работе [12]. В упрощенном виде он может быть представлен следующим соотношением:

$$\Phi_{GM76}(k) = \begin{cases} a_1 N^2 k^2 / (a_2 N + k)^2, & k \leq k_c \\ a_1 N^2 k_c k / (a_2 N + k)^2, & k \geq k_c \end{cases},$$

где  $k_c$  – волновое число среза (обычно  $k_c = 0,1 \text{ м}^{-1}$ ),  $a_1 = 7,275$  и  $a_2 = 0,22$  для значений регулируемых коэффициентов GM76, использованных в [12]. Передаточная функция пространственного осреднения, свойственного ADCP-измерениям,  $H_{ADCP}(k) = (\sin(\pi b k) / (\pi b k))^4$ , где  $b = 0,5 \text{ м}$  – дискретность по глубине. Передаточная функция дифференцирования на конечном приращении глубины  $H_{Dif}(k) = (\sin(\pi \Delta z k) / (\pi \Delta z k))^2$ . Значение квадрата сдвига GM76 в рамках данной статьи рассчитывалось по соотношению:

$$Sh_{GM76}^2 = \int_0^{20} \Phi_{GM76}(k) H_{ADCP}(k) H_{Dif}(k) dk.$$

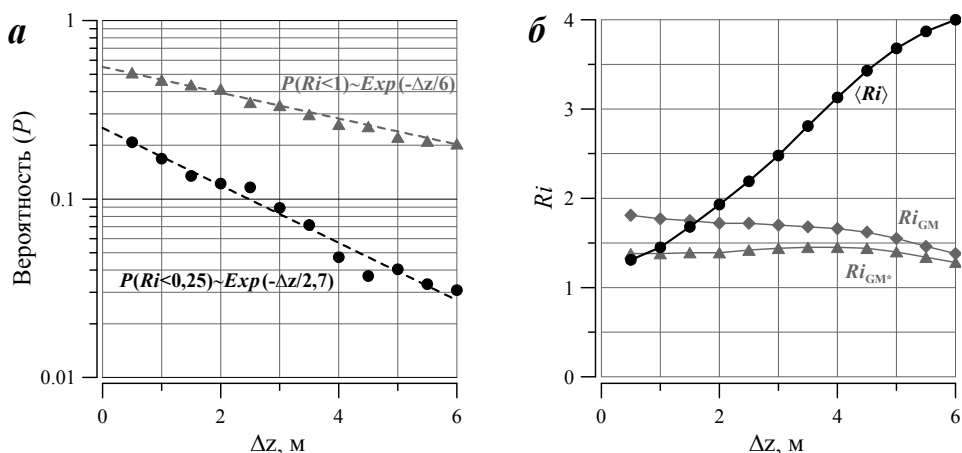
**Результаты и обсуждение.** На рис.2 приведена диаграмма рассеяния – абсцисса  $N^2$ , ордината  $Sh^2$ , рассчитанные на приращениях  $\Delta z \approx 0,5$  м по данным ADCP и CTD-зондирований. Серые кружочки – исходные данные (~ 400), штриховая линия соответствует критическому значению  $Ri = 0,25$ .



Р и с . 2 . Исходные данные CTD-зондирований и ADCP-измерений.

На рис.3, а приведена зависимость вероятности выполнения необходимого условия неустойчивости ( $P_{Ri < 0,25}$ ) сдвигового потока от  $\Delta z$ .  $P_{Ri < 0,25}$  в слое измерения (1,5 – 11,5 м) на интервале наблюдения (4 суток) проявляет экспоненциальное спадание с ростом  $\Delta z$  ( $P_{Ri < 0,25} = 0,25 \exp(-\Delta z/2,7)$ ) и уменьшается от 20 % при  $\Delta z = 0,5$  м до 3 % при  $\Delta z = 6$  м. Такое поведение вероятности хорошо согласуется с натурными данными, приведенными в работе [11], и показывает, что в морских условиях выполнение условия неустойчивости чаще встречается на малых масштабах. Полученный результат может быть следствием эволюции турбулентных пятен после их образования, которая со временем приводит к уменьшению их толщины и увеличению площади горизонтального сечения, вследствие растекания по изопикнической поверхности.

Вероятность выполнения условия  $Ri < 1$  также проявляет экспоненциальное спадание с ростом  $\Delta z$  ( $P_{Ri < 1} = 0,55 \exp(-\Delta z/6)$ ). В соответствии с глоссарием американских метеорологов [7], ламинарный поток может стать турбулентным, если  $Ri < 0,25$ , и поток может сохраняться турбулентным при  $Ri < 1$ . Совместно две полученные зависимости показывают, что при  $\Delta z \rightarrow 0$  в слое измерения за время наблюдений генерация турбулентной кинетической энергии возможна в 25 % случаев, ее сохранение в 45 %.

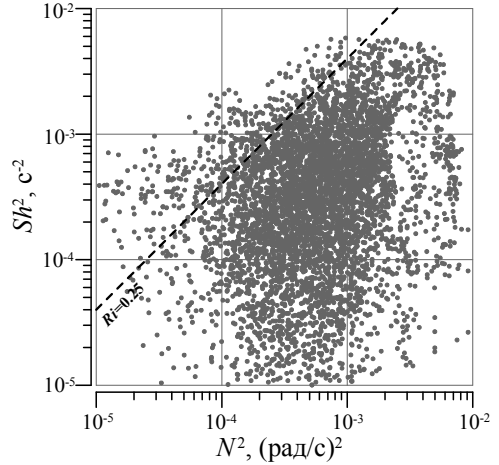


Р и с . 3 . Статистика чисел Ричардсона по CTD/ADCP-данным.

Черная линия на рис.3, б представляет зависимость среднего значения числа Ричардсона  $\langle Ri \rangle = \langle N^2 \rangle / \langle Sh^2 \rangle$ , где  $\langle \dots \rangle$  – оператор осреднения по всему массиву данных) от приращения глубины.  $\langle Ri \rangle$  проявляет существенную зависимость от  $\Delta z$ , что подчеркивает необходимость учета разрешающей способности приборов при использовании мелкомасштабных данных для расчета параметров вертикального перемешивания на основе моделей, содержащих  $Ri$ .

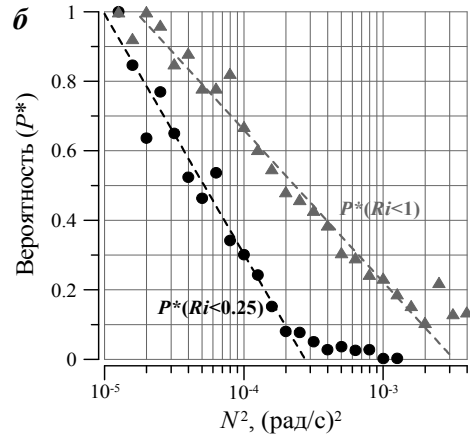
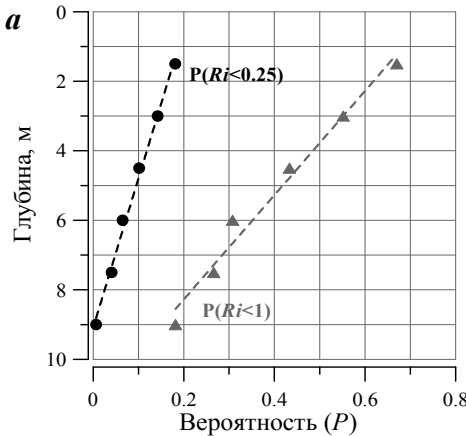
На рис.3, б отношения квадратов сдвигов  $Ri = Sh^2_{GM76} / Sh^2$  представлены серыми линиями. Маркеры  $Ri_{GM}$  и  $Ri_{GM*}$  соответствуют  $k_c = 0,1 \text{ м}^{-1}$  и  $k_c = 0,0685 \text{ м}^{-1}$ . Среднеквадратическое значение частоты плавучести составляло  $18 \text{ час}^{-1}$ .  $Ri_{GM}$  и  $Ri_{GM*}$  проявляют существенно меньшую изменчивость, чем  $\langle Ri \rangle$ , так как зависимость от  $\Delta z$  учтена в выражении для  $Sh^2_{GM76}$ .

Отметим, что выборка из 18-ти CTD-зондирований может не в полной мере представлять процессы, происходившие во время выполнения наблюдений. Использование РТП в сочетании с ADCP позволяет получать мгновенные значения  $Ri$  с большей равномерностью и детализацией по времени. На рис.4 приведена диаграмма рассеяния – абсцисса  $N^2$ , ордината  $Sh^2$ , измеренные на приращениях глубины  $\sim 1,5 \text{ м}$ . Исходные данные представлены серыми точками ( $\sim 6000$ ), черная пунктирная линия соответствует критическому значению  $Ri$ .



Р и с . 4 . Исходные данные термопрофилера и ADCP-измерений.

На рис.5, а приведены профили вероятности  $P_{Ri < 0,25}(z)$  и  $P_{Ri < 1}(z)$ . Профиль  $P_{Ri < 0,25}(z)$  показывает почти линейное уменьшение вероятности ( $P_{Ri < 0,25} = 0,21 - 0,023z$  – штриховая линия) выполнения необходимого условия неустойчивости с глубиной, что на каче-



Р и с . 5 . Статистика чисел Ричардсона по данным термопрофилера и ADCP.

ственном уровне означает уменьшение интенсивности вертикального турбулентного перемешивания в нижних слоях моря. Такое поведение вероятности может объясняться тем, что в верхнем слое интенсивность процессов перемешивания во многом определяется воздействием ветра на поверхность моря.

На рис.5, б приведена зависимость вероятности  $P^*_{Ri < 0,25}$  (звездочка означает, что вероятности рассчитывались на отрезках  $\Delta \lg(N^2) = 0,1$ ) от квадрата частоты плавучести, проявляющая резкое уменьшение с ростом  $N^2$  (пунктирная линия  $\exp(-P^*_{Ri < 0,25}/0,6) = N/N_0$ ,  $N_0 = 9,4 \text{ час}^{-1}$ ). Это показывает, что при больших значениях частоты плавучести необходимое условие неустойчивости наблюдается реже, и может быть следствием усиленного подавления турбулентности в слоях с большей плотностной стратификацией.

На рис.6 приведены усредненные зависимости  $Sh^2$  от  $N^2$ , полученные по данным ADCP/CTD (рис.6, а) и ADCP/РТП (рис.6, б). Обе зависимости проявляют аналогичное поведение: постоянное значение  $\langle Sh^2 \rangle$  при  $\sqrt{\langle N^2 \rangle} < 5,7(8) \text{ час}^{-1}$ ;  $\langle Sh^2 \rangle \propto \sqrt{\langle N^2 \rangle}$  при  $6(8) < \sqrt{\langle N^2 \rangle} < 58(36) \text{ час}^{-1}$  и резкое спадание при  $\sqrt{\langle N^2 \rangle} < 58(36) \text{ час}^{-1}$  (в скобках указаны значения для ADCP/РТП). Сплошные черные линии соответствуют значению сдвига, рассчитанному по спектру GM76 с учетом передаточных функций приборов. Эмпирические зависимости в значительной степени отличаются от GM76 и показывают существенное уменьшение отношения  $\langle Sh^2 \rangle / Sh^2_{GM}$  с ростом частоты плавучести, что, на качественном уровне, означает ослабление интенсивности вертикального перемешивания в слоях с большей плотностной стратификацией.

**Заклучение.** На основе натурного материала показано, что модели расчета параметров вертикального турбулентного перемешивания, содержащие  $Ri$ , должны учитывать его зависимость от приращения глубины, на котором рассчитываются соответствующие производные. Модели, основанные на сопоставлении со спектром GM76, как это приведено в статье, в достаточной мере компенсируют конечность приращения глубины на масштабах до 6 м.

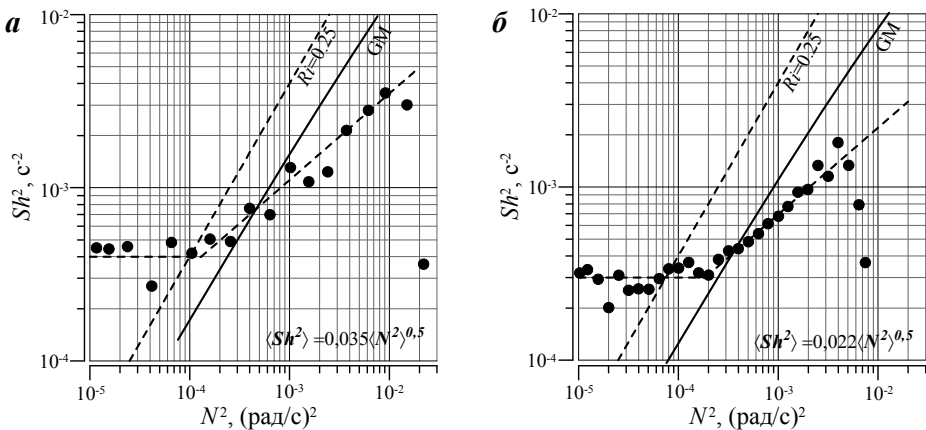


Рис. 6. Масштабирование усредненных зависимостей по данным CTD-зондирований, термопрофилемера и ADCP.

Оба подхода подразумевают осреднение по ансамблю профилей и могут служить основой для оценки осредненных характеристик перемешивания, соответствующих определенному интервалу времени и слою проведения измерений.

Использование распределенного термопрофилера или гирлянды датчиков температуры должно предусматривать их текущую калибровку по данным *CTD*-зондирований из-за значительного в смещения нулевого значения во времени.

Работа выполнена в МГИ РАН в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0002, при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-05-41102 РГО\_а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В., Низов С.С., Пиотух В.Б., Соловьев В.А., Швоев Д.А., Цибульский А.Л., Куклев С.Б., Куклева О.Н., Москаленко Л.В., Подымов О.И., Баранов В.И., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кубряков А.А., Соловьев Д.М., Станичный С.В.* Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // *Физика атмосферы и океана.*– 2014.– т.50, № 1.– С.16-29.
2. *Серебряный А.Н., Иванов В.А., Кузнецов А.С., Химченко Е.Е., Лаврова О.Ю., Симонова Ю.В.* Исследования внутренних волн и течений в Черном море с платформы Морского гидрофизического института летом 2014 г. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря и комплексное использование ресурсов шельфа.*– 2014.– вып.28.– С.62-70.
3. *Гайский П.В.* Результаты годовых наблюдений профиля температуры на океанографической платформе с помощью распределенных термопрофилеров // *Системы контроля окружающей среды.*– Севастополь, 2014.– вып.20.– С.44-53.
4. *Морозов А.Н., Шутов С.А., Зима В.В., Дерюшкин Д.В., Лемешко Е.М., Белус Н.С.* Динамика вод на Черноморском подспутниковом полигоне по данным ADCP-наблюдений / *Мониторинг прибрежной зоны на экспериментальном подспутниковом полигоне* / Под ред. В.А.Иванова, В.А.Дулова.– Севастополь, 2014.– С.385-400.
5. *Munk W., Anderson E.* Notes on a theory of the thermocline // *J. Mar. Res.*– 1948.– 3.– P.267-295.
6. *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.
7. *Galperin B., Sukoriansky S., Anderson P.S.* On the critical Richardson number in stably stratified turbulence // *Atmospheric Science Letters.*– 2007.– 8.– P.65-69. doi: 10.1002/asl.153.
8. *Miles J.W.* On the stability of heterogeneous shear flows // *J. Fluid Mech.*– 1961.– 10, issue 4.– P.496-508.
9. *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.– 52.– P.2352-2355.
10. *Kunze E., Williams A.J. III, Briscoe M.G.* Observations of shear and vertical stability from the neutrally buoyant flow // *J. Geophys. Res.*– 1990.– 95.– P.18127-18142.
11. *Polzin K.* Statistic of the Richardson Number: mixing models and finestructure // *J. Phys. Ocean.*– 1996.– v.26.– P.1409-1425.

12. *Fer I. Scaling turbulent dissipation in Arctic fjord. // Deep-Sea Research (Part II).– 2006.– v.53.– P.77-95.*

Материал поступил в редакцию 13.04.2018 г.  
После доработки 22.05.2018 г.

A. N. Morozov

STATISTIC OF THE RICHARDSON NUMBER  
ACCORDING TO OBSERVATIONS FROM THE OCEANOGRAPHIC PLATFORM

The results of measurements carried out on 17 – 21 May 2013 from the oceanographic platform located near Kaciveli coast are discussed. The measurements were performed using a distributed thermoprofiler, an acoustic Doppler current profiler and a CTD probe. Methodical issues of data processing are discussed. The estimation of Richardson numbers ( $Ri$ ) depended on the resolution of devices is considered. It is shown that the probability of fulfilling the necessary condition for linear instability ( $P_{Ri < 0.25}$ ) decreases exponentially with increasing increment of depth at which the corresponding derivatives are calculated.  $P_{Ri < 0.25}$  decreases linearly with depth and exhibits a logarithmic dependence on buoyancy frequency. As an alternative to the Richardson numbers, the ratios of the measured average shears of current with shear values estimated from the Garrett and Munk spectra (GM76) are considered.

KEYWORDS: vertical shear of current, Richardson numbers, thermoprofiler, ADCP, the Black Sea