

## О МЕЛКОМАСШТАБНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В АЗОВСКОМ МОРЕ

Ю.И. Инжебейкин

Южный научный центр Российской Академии наук, г. Ростов-на-Дону  
uinzheb@mail.ru

**Аннотация.** Исследована мелкомасштабная изменчивость температуры и солёности вод Азовского моря в различные сезоны с использованием гидрологических зондов вертикального и горизонтального профилирования с высоким разрешением и малой дискретностью отсчетов. Поскольку изменения температуры и солёности в выделенных пространственно-временных диапазонах представляют собой выраженный случайный процесс, то для их описания использованы методы вероятностного и спектрального анализа, а также математической статистики.

**Ключевые слова:** Азовское море, гидрологические элементы, температура воды, солёность, мелкомасштабная изменчивость.

Вклад мелкомасштабной изменчивости температуры воды и солёности в морях весьма велик, достигая иногда в районах фронтов до 30–35 % от их общей дисперсии [1]. Их исследования актуальны, т.к. именно мелкомасштабные процессы, являясь конечным звеном единой цепи каскадной передачи кинетической энергии всех движений вод в океане с последующим её переходом в теплоту под действием вязкой диссипации, играют существенную роль в изменении погоды и климата Земли [2]. В условиях климатических изменений и частых экстремальных отклонений гидрологических характеристик в Азовском море изучение мелкомасштабной изменчивости очень важно, поскольку последняя в нем практически не изучалась. В данном сообщении приводятся результаты таких исследований.

Мелкомасштабная изменчивость температуры воды и солёности в океане формируется, в основном, мелкомасштабными процессами взаимодействия океана и атмосферы, которые лежат в пределах пограничных слоев, распространяющихся на высоту и глубину в интервале 10–20 м, в горизонтальной плоскости до 10–100 м и во времени от минут до часов. Мелкомасштабные колебания в районе исследований связаны с мелкомасштабной турбулентностью; вертикальной микроструктурой; поверхностными и высокочастотными внутренними волнами, а в пределах верхнего перемешанного слоя – обрушением поверхностных волн и вертикальными сдвигами скорости в этих волнах, создающими неустойчивость и генерацию турбулентности.

Для изучения мелкомасштабных явлений не нужны исследования на больших акваториях, а статистически значимый ряд измерений может быть набран за период от часов до нескольких суток приборами с малоинерционными и малогабаритными датчиками

в районах моря с характерными динамическими и климатическими режимами [3] по избранной сетке станций (рис.1). Для оценки мелкомасштабной изменчивости в Азовском море мы использовали данные гидрологических зондов вертикального и горизонтального профилирования с высоким разрешением STD-90 и SEACAT SBE-19, в которых отсчет значений температуры и электропроводности обеспечивался через каждые полсекунды. Данные обрабатывались при помощи программного обеспечения фирмы-производителя зонда Sea-Bird Electronics Inc. Для анализа брались только данные, получаемые в ходе опускания инструмента, т.к. при подъеме зонда на показания датчиков влияют возмущения водной толщи от корпуса прибора. Скорость опускания зонда находилась в пределах от 0,27 до 0,5 м/с, составляя в среднем около 0,4 м/с. Для более точной оценки и спектрального состава мелкомасштабной изменчивости на отдельных станциях на горизонтах 0,5–1 м проводились непрерывные измерения зондом STD-90 температуры и солёности с дискретностью 0,125 с в течение 2–3 минут.

Поскольку изменения температуры и солёности в выделенных пространственно-временных диапазонах представляют собой выраженный случайный процесс, то для их описания мы использовали методы вероятностного анализа и математической статистики. Флуктуации температуры и солёности в верхнем перемешанном слое, обусловленные мелкомасштабной изменчивостью, с достаточной достоверностью можно оценить по дисперсии (или средне-квадратическим отклонениям – СКО) отклонений температуры и солёности от их средних на момент съемки для всего однородного слоя значений. Такая оценка, во-первых, отфильтровывает из данных колебания более долгопериодных (суточного

и синоптического) масштабов, во-вторых, позволяет исключить пространственную изменчивость более крупных масштабов и, таким образом, наращивать ряды по нескольким станциям [4], данные по которым в соответствии с [5] предварительно были разбиты на 3 района: 1 – Таганрогский залив; 2 – собственно Азовское море; 3 – Керченский пролив. Одновременно с профилированием водной

среды при помощи судовой метеостанции производились метеонаблюдения. В таблицах 1 и 2 приведены полученные нами оценки (среднеквадратические отклонения и размах) мелкомасштабной изменчивости соответственно температуры и солёности моря, а также их доля в процентах от общей дисперсии (СКО), полученной в работе [5] для весны, лета и осени в различных районах моря.



Рис. 1. Схема гидрологических станций в Азовском море.

- 74 – станция вертикального зондирования и ее номер; ▲29 точки, где проводились непрерывные измерения в одной точке в течение нескольких минут

Таблица 1

СКО мелкомасштабной изменчивости температуры воды ( $^{\circ}\text{C}$ ) в верхнем перемешанном слое в разных районах Азовского моря весной, летом и осенью 2007 г.

Р-ны Азовского моря	Весна			Лето			Осень		
	$\sigma_{\text{общ}}$	мелкомасштаб		$\sigma_{\text{общ}}$	мелкомасштаб.		$\sigma_{\text{общ}}$	мелкомасштаб.	
		$\sigma_{\text{млк}}$	% от $\sigma_{\text{общ}}$		$\sigma_{\text{млк}}$	% от $\sigma_{\text{общ}}$		$\sigma_{\text{млк}}$	% от $\sigma_{\text{общ}}$
Таг. з.	1,70	0,101	5,9	1,07	0,068	6,4	1,54	0,004	0,3
Аз.м.	1,63	0,016	1,0	0,98	0,094	9,5	1,45	0,003	0,2
К.п.	1,73	0,200	11,6	1,00	0,105	10,5	1,49	0,015	1,0

Обозначения: Таг з. – Таганрогский залив; Аз.м –собственно Азовское море; К.п. – Керченский пролив;  $\sigma_{\text{млк}}$  – среднее квадратическое отклонение мелкомасштабной изменчивости;  $\sigma_{\text{общ}}$  – среднее квадратическое отклонение общей изменчивости.

Таблица 2.

СКО мелкомасштабной изменчивости солёности ( $\text{‰}$ ) в верхнем перемешанном слое в разных районах Азовского моря весной, летом и осенью 2007 г.

Р-ны Азовского моря	Весна			$\sigma_{\text{общ}}$	Лето		$\sigma_{\text{общ}}$	Осень	
	$\sigma_{\text{общ}}$	мелкомасштаб.			$\sigma_{\text{млк}}$	% от $\sigma_{\text{общ}}$		$\sigma_{\text{млк}}$	% от $\sigma_{\text{общ}}$
		$\sigma_{\text{млк}}$	% от $\sigma_{\text{общ}}$						
Таг. з.	2,916	0,072	2,5	2,545	0,048	1,9	2,383	0,036	1,5
Аз.м.	0,875	0,019	2,2	1,030	0,009	0,9	1,016	0,031	3,1
К.п.	1,286	0,076	5,9	1,536	0,196	12,8	2,188	0,039	1,8

Обозначения как в таблице 1.

Таблица 3.

**Условия формирования и некоторые характеристики мелкомасштабной изменчивости гидрологических элементов в Таганрогском заливе в апреле 2007 г.**

№ ст.	L, км	Глубина, м	$T_{\text{воз}}^{\circ}\text{C} / T_{\text{вод}}^{\circ}\text{C}$	Wt	Волнение тип/высота, м	O	r	R
12	13	2,2	9,6 11,45	E 2,7	з 0,2	0	0,826	0,6828
29	53	4,8	11,6 11,96	NE 2,2	з 0,2	St 1	0,828	0,6862
52	89	3,9	14,2 13,23	NE 3,2	вв 0,3	Sc 3	0,462	0,2134
48	144	6,1	12,0 8,49	NE 5,3	вв 0,7	Sc 1	0,265	0,0703

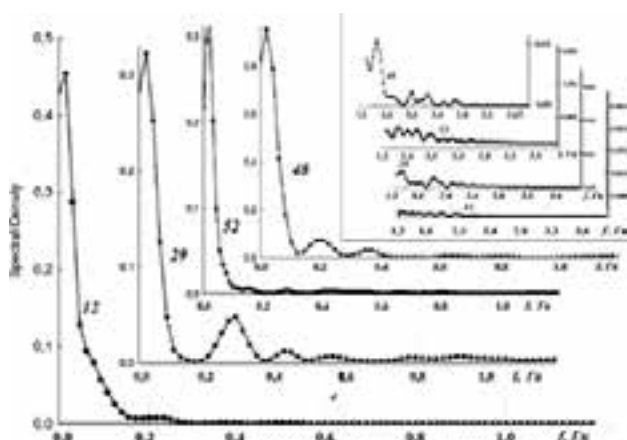
**Обозначения:** L – расстояние от морского края дельты Дона, км;  $T_{\text{вод}}$  – средняя температура воды поверхностного слоя, °C; Wt – ветер (направление/скорость, м/с); O – облачность (вид, количество, в баллах); r – коэффициент корреляции между отклонениями температуры воды и солёности; R – коэффициент детерминации.

При исследовании спектрального состава мелкомасштабной изменчивости 25–28 апреля 2007 г. в Таганрогском заливе эта изменчивость формировалась при следующих гидрометеорологических условиях (табл. 3).

На фоне повышенного атмосферного давления в пределах 1023–1027 гПа температура воздуха изменялась от 9,6°C до 14,7°C, различаясь на 0,4–2°C ниже температуры воды поверхностного слоя, а в определенные промежутки времени, находясь на 1–4°C выше таковой (табл. 3), обеспечивая то отток, то приток тепла в результате теплообмена поверхностного слоя моря с приводным слоем атмосферы. Ветер, в основном, был слабый 2–4 м/с, северо-восточных направлений, и лишь во время выполнения работ на ст. 48 усилился до 6 м/с, облачность изменялась от полного отсутствия до 5 баллов. В период исследований наблюдались волны зыби высотой 0,2–0,3 м, и большую часть времени – ветровые волны в 0,3–0,5 м, направление которых, в основном, совпадало с направлением ветра.

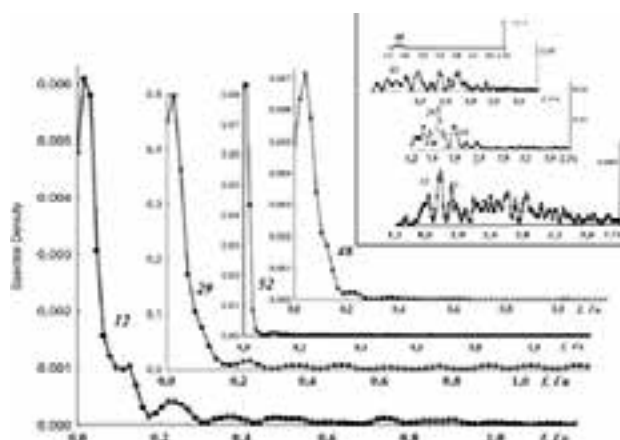
Из табл. 3 можно заметить, что в мелкомасштабной изменчивости температуры и солёности существует определенная связь. Однако эта связь для разных станций неодинакова, и коэффициент корреляции меняется от 0,265 на ст. 48, до 0,828 на ст. 29. При этом имеется тенденция, что по мере удаления от морского края дельты Дона степень связи существенно уменьшается, позволяя предположить, что в вершине Таганрогского залива в пульсациях как температуры, так и солёности доминируют общие факторы, вероятнее всего динамического характера.

На рисунках 2 и 3 представлены графики функций спектральной плотности вариаций температуры воды и солёности по измерениям на четырех станциях 12, 29, 52 и 48, расположенных по мере удаления от морского края дельты. В спектре отклонений как температуры воды, так и солёности первый пик приходится на частоту 0,012 Гц (период около 1,5 минуты), вторые по мощности вариаций почти на всех станциях приходятся на диапазон частот 0,188–0,236 Гц с периодами 4,2–5,3 с, а третий – на частоту 0,38 Гц (период 2,63 с).



**Рис. 2.** Спектральные плотности пульсаций воды от среднего значения на станциях 12, 29, 52 и 48.

На врезке высокочастотная часть спектров температуры



**Рис. 2.** Спектральные плотности пульсаций воды от среднего значения на станциях 12, 29, 52 и 48.

На врезке высокочастотная часть спектров солёности

Из гидрологических процессов в районе исследований вариации с такими периодами могли быть обусловлены: для первого максимума в спектре – внутренними волнами и цугами внутренних и ветровых волн; для второй группы – волнами зыби; для третьей группы – ветровыми волнами. Далее в энергетическом спектре осцилляций температуры участок «тишины», и следующие пики небольшой мощности появляются в полосе частот от 1,2 до 2 Гц, которые могли быть обусловлены вариациями, вызванными более высокочастотными ветровыми волнами и мелкомасштабной турбулентностью. Лишь спектр мелкомасштабной изменчивости солёности на ближайшей к дельте Дона станции 12 отличается наличием дополнительных пиков на частотах 0,12 и 0,625 Гц, отсутствием максимума на частоте 0,865 Гц, а также тем, что в высокочастотной области максимумы сгруппированы по определенным диапазонам частот (рис. 3). Все это свидетельствует о существовании дополнительных механизмов мелкомасштабной изменчивости солёности в вершине Таганрогского залива.

Из данных таблиц 1 и 2, а также спектрального анализа мелкомасштабной изменчивости можно сделать следующие выводы. В Азовском море мелкомасштабная изменчивость гидрологических элементов весьма высока (среднеквадратические отклонения по температуре 0,003–0,200 °C, а по солёности 0,009–0,196 ‰ в зависимости от сезона и района моря). Из трех перечисленных районов моря весной наибольший вклад в общую дисперсию температуры в верхнем перемешанном слое мелкомасштабные процессы вносят в Керченском проливе (до 12 % от общей изменчивости температуры), что обусловлено более ярко выраженной термической фронтальной зоной и наличием пятен и линз, вследствие адвекции более теплых в этот период черноморских вод. Схожая картина по пространственному распределению вклада мелкомасштабной изменчивости солёности, который оказался наибольшим в Керченском проливе (около 6 % от суммарной изменчивости солёности в этом районе). Вторым районом по значимости вклада мел-

комасштабной изменчивости как по температуре (почти 6 %), так и солёности (2,5 %) в суммарную их изменчивость весной является Таганрогский залив, что обусловлено распресненными и относительно холодными в этот период (из-за речного стока Дона) водами, распространяющимися в поверхностном слое.

Летом по абсолютным значениям мелкомасштабной изменчивости температуры воды в Таганрогском заливе и в Керченском проливе происходит снижение вследствие пространственной однородности температуры в этих районах, а в собственно море – рост, что обусловлено увеличением вертикального градиента температуры воды вследствие сильного прогрева и более слабого, по сравнению с двумя другими районами, перемешивания. Во всех районах летом наблюдается высокое значение (соответственно 6,4; 9,5 и 10,5 %) относительного вклада мелкомасштабной изменчивости в общую дисперсию температуры, обусловленное летней стабилизацией термического режима и относительным ростом роли мелкомасштабных процессов. Вклад мелкомасштабной изменчивости солёности оказался высоким лишь в Керченском проливе, составляя более 12 % от суммарной изменчивости солёности в верхнем перемешанном слое, что объясняется частыми вторжениями более солёных черноморских вод при сгонно-нагонных и сейшевых движениях.

Осенью на фоне роста общей изменчивости температуры воды по всему морю и, отчасти солёности, вклад мелкомасштабных составляющих снижается.

В мелкомасштабной изменчивости температуры и солёности существует определенная связь, при этом имеется тенденция, что в Таганрогском заливе по мере удаления от морского края дельты Дона степень связи существенно уменьшается. Спектры мелкомасштабной изменчивости температуры и солёности достаточно близки.

*Исследования выполнялись в соответствии с Государственным заданием, по теме № 0259–2014–0003 (№ госрегистрации 01201363187).*

### Список литературы

1. Глуховский Б.Х. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. II. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеоиздат. 1991. 240 с.
2. Корчагин Н.Н. Локальные явления и мелкомасштабные процессы в тонкостратифицированных водах океана. Автореф. дисс...докт. физ.-мат. наук по специальности 11.00.08 «Океанология». М.: Изд. ИО РАН. 1996. 44 с.
3. Пака В.Т. Эффекты мелкомасштабных гидрофизических процессов в океане и методы их экспериментального исследования. Дисс. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук по специальности 01.04.12 «Геофизика». Калининград. 1983. 529 с.
4. Инжебейкин Ю.И. // Вестник ЮНЦ РАН. Т. 11, № 2. 2015. С.45–52.
5. Matishov D., Gargopa Yu. & all. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2008. G. Matishov, S. Levitus, Eds., NOAA Atlas NESDIS 65, US Government Printing Office, Washington, D/C. 2008. 148 pp. CD-ROM.
6. Симонов А.И., Альтман Э.Н. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 5. Азовское море. Л.: Гидрометеоиздат. 1991. 237 с.



## ON SMALL-SCALE VARIABILITY OF HYDROLOGICAL ELEMENTS IN THE SEA OF AZOV

Yu.I. Inzhebeikin,

Southern scientific center of the Russian Academy of Sciences. Rostov-on-Don

uinzheb@mail.ru

**Abstract.** Small-scale variability of hydrological elements in the sea of Azov by means of hydrological sounding from research vessels is investigated. Water temperature and salinity were probed in different seasons using hydrological vertical and horizontal profiling probes with high resolution and small sampling rate STD-90 and SEACAT SBE-19. In these devices, the water temperature and salinity are measured every half second. For the analysis, only the data obtained during the lowering of the instrument were taken. When lifting the probe, the sensor readings are affected by water disturbances from the device body. For a more accurate assessment and spectral composition of small-scale variability at individual stations on the horizons of 0.5–1 m continuous measurements were carried out by the probe STD-90 of temperature and salinity with a resolution of 0.125 s for 2–3 minutes. Since changes in temperature and salinity in the selected space-time ranges are a pronounced random process, we used the methods of probability analysis and mathematical statistics to describe them. Temperature and salinity fluctuations in the upper mixed layer due to small-scale variability can be estimated with sufficient confidence by variance or standard deviation of temperature and salinity deviations from their average at the time of shooting for the entire homogeneous layer of values. Such an assessment, firstly, filters out the data of the fluctuations of longer-period (daily and SYNOPTIC) scales. This procedure also allows to exclude the spatial variability of larger scales and thus to increase the number of stations [4], the data on which in accordance with [5] were previously divided into 3 areas: 1-Taganrog Bay; 2-the Azov sea; 3-Kerch Strait. Simultaneously with the profiling of the water environment with the help of the ship's weather station, meteorological observations were made.

In the Azov sea, small-scale variability of hydrological elements is very high (standard deviations in temperature of 0.003–0.200 °C, and in salinity of 0.009–0.196 ‰ depending on the season and the sea area). It is revealed that in small-scale variability of temperature and salinity there is a certain connection.

**Keywords:** Sea of Azov, water temperature, salinity, small-scale variability.

## References

1. Gluhovskij B.H. 1991. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morej SSSR*. Vol. 2. *Beloe more*. Iss. 1. *Gidrometeorologicheskie usloviya*. [Hydrometeorology and Hydrochemistry seas of the USSR. Vol. II. White Sea. Iss. 1. Hydrometeorological conditions]. Leningrad. Gidrometeoizdat: 240 p. (In Russian).
2. Korchagin N.N. Lokal'nye yavleniya i melkomasshtabnye processy v tonkostratificirovannykh vodakh okeana. [Local phenomena and small-scale processes in thin-grained ocean waters]. Изд. ИО РАН. 1996. 44 p. (In Russian).
3. Paka V.T. Effekty melkomasshtabnykh gidrofizicheskikh processov v okeane i metody ih ehksperimental'nogo issledovaniya. Diss. na soiskanie uchenoj stepeni doktora fiz.-mat. nauk po special'nosti 01.04.12 «Geofizika». Kaliningrad. 1983. 529 p. (In Russian).
4. Inzhebeikin Yu.I. // *Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra*. T. 11, № 2. 2015. S.45–52. (In Russian).
5. Matishov D., Gargopa Yu. et al. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2008. G. Matishov, S. Levitus, Eds., NOAA Atlas NESDIS 65, US Government Printing Office, Washington, D/C. 2008. 148 pp. CD-ROM.
6. Simonov A.I., Al'tman E.N. 1991. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morej SSSR*. Vol. IY. *Azovskoe more*. Iss. 1. *Gidrometeorologicheskie usloviya*. [Hydrometeorology and Hydrochemistry seas of the USSR. Vol. IY. Sea of Azov. Iss. 1. Hydrometeorological conditions]. Leningrad. Gidrometeoizdat. 340 p. (In Russian).