

УДК 551.464 (261.24)

## ЭВОЛЮЦИИ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ СТРУКТУР ВОД БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

В. Ф. Дубравин, М. В. Капустина, В. А. Кречик

### EVOLUTION OF HYDROCHEMICAL STRUCTURES OF THE BALTIC SEA WATERS

V. F. Dubravin, M. V. Kapustina, V. A. Krechik

Выполнена оценка климатических параметров за период 1950-2005 гг. (для месяцев и года) гидрохимических (ГХ) параметров в среднем для моря: кислорода ( $O_2$  – мл/л), фосфора фосфатов ( $PO_4$  – мкг-ат P/л), аммонийного и нитратного азота ( $NH_3$  и  $NO_3$  – мкг-ат N/л) из [1]. По предложенным авторами численным критериям рассчитаны вертикальные границы характерных слоев структур гидрохимических параметров как в среднем для моря, так и в характерных точках Южной и Центральной Балтики (для месяцев и года): верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) и ядра главного слоя скачка – нижней границы деятельного слоя (ДС). Проведено сравнение положения вертикальных границ в характерных точках Южной и Центральной Балтики для термохалинных (температуры воды  $T_w$ , °C и солености, PSU) и гидрохимических параметров. Рассмотрена сезонная изменчивость параметров и характерных уровней гидрохимических структур: по данным гармонического анализа в сезонном ходе (СезХ) для  $O_2$ ,  $PO_4$ ,  $NH_3$  и  $NO_3$  на поверхности и  $O_2$  у дна, и для характерных уровней большинства параметров выявлено преобладание годовой волны, вклад которой (квота) возрастает от 0,53 для кислорода у дна и до 0,96 для фосфатов на поверхности. Наступление максимума в годовом ходе параметров и их характерных уровней в среднем для моря приходится на холодное полугодие – от ноября (аммонийный азот на поверхности моря и нижняя граница ВКС кислорода) до марта (нижняя граница ДС нитратного азота).

*гидрохимические параметры (кислород, фосфор фосфатов, аммонийный и нитратный азот), структурные зоны (поверхностная, или деятельный слой, и глубинная), вертикальный градиент, верхний квазиоднородный слой, главный слой скачка, ядро главного слоя скачка, или нижняя граница деятельного слоя, сезонная изменчивость, гармонический анализ*

In this paper the hydrochemical climatic parameters average (for months and years) over the period of 1951-2005 were calculated for the sea: oxygen ( $O_2$ -ml/l), mineral phosphorus ( $PO_4$ - $\mu$ g-at P/l), ammonium and nitrate nitrogen ( $NH_3$  and  $NO_3$ - $\mu$ g-at N/l). According to the numerical criteria proposed by the authors, the vertical boundaries of the hydrochemical parameters of the characteristic layers are calculated, both on average for the sea and at the specific points of the Southern and Central Baltic, for months and years: the upper quasi-homogeneous layer (UQL) and the core of the main transition layer (the lower boundary of the active layer (AL)). Position of the vertical

boundaries at the specific points of the Southern and Central Baltic for thermohaline (water temperature  $T_w$ , deg C and salinity, PSU) and hydrochemical parameters is compared. Seasonal variability of parameters and characteristic levels of hydrochemical structures is considered. According to the harmonic analysis, the seasonal course for  $O_2$ ,  $PO_4$ ,  $NH_3$  and  $NO_3$  in the surface layer and  $O_2$  in the bottom layer and the characteristic levels of most parameters, the prevalence of the annual wave, whose contribution (quota) increases from 0.53 for oxygen at the bottom and up to 0.96 for phosphates on the surface. The peak in the annual course of the parameters and their characteristic levels on the average for the sea falls on the cold half of the year - from November (ammonium nitrogen on the sea surface and the lower boundary of oxygen UQL) to March (lower limit of nitrate nitrogen AL).

*hydrochemical parameters (oxygen, mineral phosphorus, ammonium and nitrate nitrogen, structural zones (surface or active layer and bottom layer), vertical gradient, upper quasihomogeneous layer, main transition layer, core of the main transition layer or lower boundary of the active layer, seasonal variability, harmonic analysis*

## ВВЕДЕНИЕ

В Балтийском море (средиземном, внутриматериковом или внутриконтинентальном) [2, 3] под действием солеформирующих факторов (атмосферной циркуляции, речного стока и водообмена с Северным морем) [4] создается устойчивая плотностная стратификация, определяющая гидрологический и гидрохимический режимы. Однако в формировании гидрохимического режима, кроме физических процессов, приводящих к образованию главного скачка плотности (пикноклина), участвуют и биохимические: продуцирование в процессе фотосинтеза, деструкция органического вещества и биологический круговорот веществ. Таким образом, как термохалинная структура<sup>1</sup> [5], так и структуры гидрохимических параметров Балтики представлены двумя структурными зонами (СЗ): поверхностной, или деятельным слоем, и глубинной.

Из-за затрудненного водообмена между поверхностными (выше постоянного пикноклина) и глубинными слоями можно выделить три типа вертикального распределения гидрологических и гидрохимических параметров: к первому (с прямой стратификацией – падение с глубиной) следует отнести кислород; ко второму (с обратной стратификацией – рост с глубиной) – соленость, фосфор и азот и к третьему – температуру воды, которая сначала падает до ядра холодного промежуточного слоя (ХПС), а затем растет [6].

В настоящей работе рассматриваются основные особенности сезонной изменчивости структуры и характерных уровней ГХ параметров  $O_2$ ,  $PO_4$ ,  $NH_3$  и  $NO_3$  для моря в целом, а также и в характерных точках Южной и Центральной Балтики. Проведенное сравнение положения нижней границы ДС в этих характерных точках для термохалинных и гидрохимических параметров выявило сходство их структур, за исключением аммонийного азота.

Авторы считают приятным долгом выразить искреннюю признательность А. В. Смирнову за выполненные расчеты рядов гидрохимических параметров и их обработку на персональном компьютере.

---

<sup>1</sup> Структура вод (СВ) – сочетание структурных слоев (зон) по вертикали.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В литературе нет единого мнения о критериях выделения границ между характерными слоями и СЗ в Балтике. В данной работе, как и ранее [7], в пределах ДС выделяется ВКС и нижняя часть ДС, или верхняя часть главного слоя скачка, а в глубинной СЗ – нижняя часть главного слоя скачка и придонный слой. При этом за нижнюю границу ВКС принимаем: начало оксиклина  $G^{O_2} \geq 0,1$  мл  $O_2$ /л·м; начало фосфатоксиклина  $G^{PO_4} \geq 0,01$  мкг-ат Р/л·м; начало главного слоя скачка аммония  $G^{NH_3} \geq 0,01$  мкг-ат N/л·м; начало главного нитратоклина  $G^{NO_3} \geq 0,01$  мкг-ат N/л·м; а за границу между СЗ: для  $O_2$  и  $NO_3$  – глубину максимального вертикального градиента  $G^{O_2}_{max}$  и  $G^{NO_3}_{max}$ ; для  $PO_4$  – глубину залегания изофосфаты 1,0 мкг-ат Р/л.

Таким образом, цель данного исследования – получить количественные оценки сезонной изменчивости структуры и характерных уровней ГХ параметров  $O_2$ ,  $PO_4$ ,  $NH_3$  и  $NO_3$  с помощью гармонического анализа [8] на базе массива данных наблюдений за гидрологическими и гидрохимическими параметрами в одноградусных трапециях из атласа [1].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Средние за год характерные уровни гидрохимических структур.** На рисунке и в табл. 1 приводятся среднемесячные кривые вертикального распределения в слое 0-150 м и СезХ нижних границ ВКС и ДС (м)  $O_2$ ,  $PO_4$ ,  $NH_3$  и  $NO_3$ , средних для моря в целом, за 1950-2005 гг. (рассчитано по [1]).

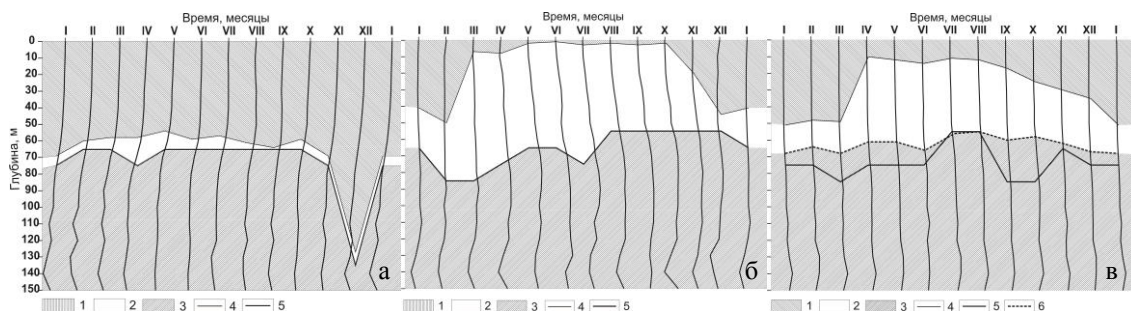


Рис. Внутригодовая изменчивость кислородной (а), нитратной (б) и фосфатной (в) структур верхнего 150-метрового слоя, среднего для всего Балтийского моря за 1950-2005 гг. (рассчитано по [1]): 1 – верхний квазигомогенный слой; 2 – нижняя часть деятельного слоя; 3 – глубинная структурная зона; 4 – верхняя граница главного слоя скачка; 5 – ядро главного слоя скачка; 6 – изофосфата 1,00 мкг-ат Р/л

Fig. Intra-annual variability of the oxygen (a), nitrate (b) and phosphate (c) structures of the upper 150-m layer, average for the entire Baltic Sea in 1950-2005 (calculated according to the data [1]): 1 – upper quasihomogeneous layer; 2 – the lower part of the active layer; 3 – deep structural zone; 4 – upper boundary of the main transition layer; 5 – core of the main transition layer; 6 – isophosphate 1,00  $\mu$ g-at P/l

Этим рисунком подтверждаются два типа стратификации – прямая (для кислорода) (рис. а) и обратная (для биогенов) (рис. б, в) – и правомерность (корректность) использования средних для Балтики гидрохимических полей в слое до 90-100 м, поскольку ниже имеет место череда наведенных экстремумов.

Таблица 1. Средний для Балтийского моря сезонный ход нижних границ ВКС и ДС (м) кислорода ( $O_2$ ), фосфатов ( $PO_4$ ), аммония ( $NH_3$ ) и нитратов ( $NO_3$ ) за 1950-2005 гг. (рассчитано по [1])

Table 1. Average seasonal course of the lower boundaries of the UQL and AL (m) of oxygen ( $O_2$ ), phosphates ( $PO_4$ ), ammonium ( $NH_3$ ) and nitrates ( $NO_3$ ) for the Baltic Sea for 1950-2005 (calculated according to the data [1])

Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I-XII
	Нижняя граница ВКС												
$O_2$	69	60	58	58	54	59	57	61	64	59	69	<u>127</u>	60
$PO_4$	<u>51</u>	48	49	10	12	14	11	12	17	25	30	35	30
$NH_3$	69	66	67	<u>70</u>	3	5	5	3	6	32	63	67	35
$NO_3$	41	<u>50</u>	7	8	2	1	3	2	3	2	20	45	9
Нижняя граница ДС ( $G_{max}$ )													
$O_2$	75	65	65	75	65	65	65	65	65	65	75	<u>135</u>	65
$PO_4$	75	75	<u>85</u>	75	75	75	55	55	<u>85</u>	<u>85</u>	65	75	75
$PO_4^{1)}$	<u>68</u>	64	<u>68</u>	61	61	66	56	55	60	58	62	67	61
$NH_3$	<u>135</u>	125	<u>135</u>	<u>135</u>	<u>135</u>	105	125	<u>135</u>	125	<u>135</u>	<u>135</u>	<u>135</u>	135
$NO_3$	65	<u>85</u>	<u>85</u>	75	65	65	75	55	55	55	55	55	55

Примечание. <sup>1)</sup> Сезонный ход изофосфаты 1,0 мкг-ат Р/л.

Максимальные величины даны курсивом и подчеркнуты снизу, минимальные – курсивом

В среднем для Балтики нижняя годовая граница ВКС увеличивается от 9 м для нитратов до 30-35 – для фосфатов и аммония и до 60 – для кислорода. Нижняя граница ДС (если за нее принимать максимум вертикального градиента гидрохимического параметра –  $G_{max}$ ) возрастает от 55-65 м для  $NO_3$  и  $O_2$  до 75 – для  $PO_4$  и до 135 – для  $NH_3$  (табл. 1).

Дальнейший анализ показал, что использование в качестве критерия нижней границы поверхностной СЗ глубины залегания максимума вертикального градиента справедливо только для  $O_2$  и  $NO_3$ . Этот вывод основывается на том, что плотностная стратификация Балтийского моря в первую очередь определяется вертикальным распределением солености (обратная стратификация), а рост температуры ниже ядра ХПС приводит лишь к ослаблению главного пикноклина, значит, логично в качестве «эталона» нижней границы ДС принять глубину максимального вертикального градиента солености –  $G_{max}^S$  (PSU/м). В табл. 2 представлены глубины залегания (м) максимумов вертикального градиента гидрологических ( $T_w$  и  $S$ ) и гидрохимических ( $O_2$ ,  $PO_4$ ,  $NH_3$  и  $NO_3$ ) параметров, средние за 1950-2005 гг., в характерных точках: Арконской (кв. -3), Борнхольмской (кв. 11), Гданьской (кв. 36), Готландской (кв. 47) впадинах, Финском заливе (кв. 68) и Балтике в целом. Как видим, в Южной и Центральной Балтике глубина  $G_{max}$  в среднем за год для  $S$ ,  $T_w$ ,  $O_2$  и  $NO_3$  сначала возрастает от 15 м в Арконском бассейне до 55-75 – в Борнхольмской и Гданьской котловинах, а затем несколько уменьшается (до 65 м) в Готландской. На входе в Финский залив, где уже заметно влияние речных вод, глубина  $G_{max}$  для этих параметров располагается между 45 и 75 м. Что касается  $PO_4$  и  $NH_3$ , то глубина залегания их  $G_{max}$  резко отличается от  $G_{max}$  для  $S$ ,  $T_w$ ,  $O_2$  и  $NO_3$ , поэтому в качестве нижней границы ДС использовать  $G_{max}^{PO_4}$

или  $G_{\max}^{\text{NH}_3}$  нельзя. Ранее нами в [9] за границу ДС  $\text{PO}_4$  принималась глубина залегания изофосфаты 1,0 мкг-ат Р/л. Из табл. 2 видно, что её глубина в характерных точках моря мало отличается от  $G_{\max}$  для S,  $T_w$ ,  $\text{O}_2$  и  $\text{NO}_3$  (различия не превышают  $\pm 5$  м).

Таблица 2. Глубина залегания (м) максимумов вертикального градиента температуры ( $T_w$ ), солености (S), кислорода ( $\text{O}_2$ ), фосфатов ( $\text{PO}_4$ ), аммония ( $\text{NH}_3$ ) и нитратов ( $\text{NO}_3$ ), средняя за 1950-2005 гг., в Арконской (кв. -3), Борнхольмской (кв. 11), Гданьской (кв. 36), Готландской (кв. 47) впадинах, Финском заливе (кв. 68) и Балтике в целом (рассчитано по данным [1])

Table 2. Depth (m) of the maximum vertical gradient of temperature ( $T_w$ ), salinity (S), oxygen ( $\text{O}_2$ ), phosphates ( $\text{PO}_4$ ), ammonium ( $\text{NH}_3$ ) and nitrates ( $\text{NO}_3$ ), averaged for 1950-2005 in Arkona (sq. -3), Bornholm (sq. 11), Gdansk (sq. 36), Gotland basins (sq. 47), the Gulf of Finland (sq. 68) and Entire Baltic (calculated according to the data [1])

Регион (кв.)	$G_{\max}^{T_w}$ (°C/м)	$G_{\max}^S$ (PSU/м)	$G_{\max}^{\text{O}_2}$ (мл/л·м)	$G_{\max}^{\text{PO}_4}$ (мкг-ат/л·м)	P = 1,0· мкг-ат/л	$G_{\max}^{\text{NH}_3}$ (мкг-ат/л·м)	$G_{\max}^{\text{NO}_3}$ (мкг-ат/л·м)
Кв. (-3)	15	15	15	15	20	15	15
Кв. (11)	55	55	55	65	54	75	55
Кв. (36)	75	75	75	95	70	85	75
Кв. (47)	65	65	65	215	63	135	65
Кв. (68)	75	55	65	65	50	75	45
Вся Балтика	105	75	65	75	61	135	55

**Сезонная изменчивость гидрохимических параметров и характерных уровней их структур.** Известно [2], что во всей Балтике СезХ кислорода в поверхностном слое имеет максимум весной и минимум летом. Годовой максимум связан с весенней вспышкой фитопланктона и фитобентоса (на мелководье). Летний минимум обусловлен как снижением фотосинтетической деятельности фитопланктона, связанным с истощением запасов биогенных элементов, так и уменьшением растворимости  $\text{O}_2$  в воде из-за прогрева поверхностного слоя и увеличения интенсивности окислительных процессов при повышении температуры. С началом холодного сезона содержание  $\text{O}_2$  начинает увеличиваться на поверхности за счет абсорбции из атмосферы, а по мере усиления конвекции – и на нижележащих горизонтах. Что касается СезХ биогенов ( $\text{PO}_4$  и N), то во всей Балтике в поверхностном слое он имеет однотипный характер с максимумом зимой и минимумом летом. Годовой максимум связан с максимумом конвективного перемешивания, вызывающим поступление биогенов из нижележащих слоев, и минимумом фотосинтеза из-за минимума солнечной радиации. Летний минимум обусловлен истощением запасов биогенных элементов в результате весенне-летней фотосинтетической деятельности фитопланктона. С началом осеннего охлаждения начинается рост биогенов в поверхностном слое из-за поступления из нижележащих слоев в результате осенне-зимней конвекции [2].

Из рисунка и табл. 1 следует, что в среднем для моря в верхнем слое содержание всех ГХ параметров медленно убывает с глубиной так, что нижняя граница ВКС в холодный сезон простирается до 50 м в январе-феврале ( $\text{PO}_4$  и  $\text{NO}_3$ ),

до 69-70 м в январе и апреле ( $\text{NH}_3$ ) и до 127 м в декабре ( $\text{O}_2$ ). В теплый сезон граница ВКС поднимается до 54 м в мае ( $\text{O}_2$ ), до 10-14 м в апреле-августе ( $\text{PO}_4$ ), до 3-6 м в мае-сентябре ( $\text{NH}_3$ ) и 1-3 м в мае-октябре ( $\text{NO}_3$ ). Ниже начинается главный слой скачка. Его ядро в годовом ходе в некоторой степени повторяет изменение нижней границы ВКС, что особенно четко проявляется для структуры  $\text{O}_2$  – ядро оксиклина в годовом ходе повторяет изменение нижней границы ВКС, располагаясь на 5-10 м глубже (рис. а). Ядро нитратоклина в течение года находится между 85 м в феврале-марте и 55 м от августа до декабря (рис. б), а ядро фосфатоклина (изофосфата 1,0 мкг-ат Р/л) – между 67-68 м в декабре, январе, марте и 55-56 м в июле-августе (рис. в). Ниже ядра главного слоя скачка начинается глубинная СЗ. Таким образом, ГХ структуры Балтийского моря определяются следующими характерными уровнями (слоями): поверхностным максимумом для  $\text{O}_2$  (минимумом для  $\text{PO}_4$  и  $\text{NO}_3$ ), ядром главного слоя скачка и придонным минимумом для  $\text{O}_2$  (максимумом для  $\text{PO}_4$  и  $\text{NO}_3$ ).

В табл. 3 приводятся гармонические постоянные внутригодового хода ГХ параметров на поверхности и их характерных уровней в среднем для Балтийского моря за 1950-2005 гг. Ее анализ показал, что в среднем для моря СезХ:

- кислорода на поверхности характеризуется правильным годовым ходом (вклад первой гармоники  $q_I = 0,95$ ,  $A_I = 1,4$  мл  $\text{O}_2$ /л и дата наступления максимума  $T_{\text{maxI}} = 23.02$ ). Для ВКС и ДС выявлено слабое преобладание годовой волны  $q_I = 0,33$  и  $q_I = 0,26$  (квоты II, III и IV гармоник от 0,1 до 0,2),  $A_I = 15,3$  м и  $A_I = 13,8$  м,  $T_{\text{maxI}} = 25.11$  и  $T_{\text{maxI}} = 07.12$ ;

- фосфатов на поверхности характеризуется правильным годовым ходом (вклад первой гармоники  $q_I = 0,96$ ,  $A_I = 0,22$  мкг-ат Р/л и дата максимума  $T_{\text{maxI}} = 11.01$ ). Для ВКС и ДС выявлено преобладание годовой волны  $q_I = 0,77$  и  $q_I = 0,60$  ( $q_{II} = 0,10$  и  $q_{II} = 0,07$ ),  $A_I = 19,1$  м и  $A_I = 4,7$  м,  $T_{\text{maxI}} = 03.01$  и  $T_{\text{maxI}} = 29.01$ ;

- аммония на поверхности характеризуется преобладанием годовой волны ( $q_I = 0,64$ ,  $A_I = 0,15$  мкг-ат N/л и дата максимума  $T_{\text{maxI}} = 19.11$ ). Для ВКС вклад годовой волны возрос до  $q_I = 0,86$ ,  $A_I = 39,3$  м,  $T_{\text{maxI}} = 10.01$ . Оценки СезХ нижней границы ДС аммония не рассматриваем как не соответствующие действительности, поскольку средняя для моря в целом глубина ДС – 130 м;

- нитратов на поверхности характеризуется правильным годовым ходом ( $q_I = 0,93$ ,  $A_I = 3,28$  мкг-ат N/л и дата максимума  $T_{\text{maxI}} = 20.01$ ). Для ВКС и ДС выявлено преобладание годовой волны:  $q_I = 0,70$  и  $q_I = 0,66$  ( $q_{II} = 0,19$  и  $q_{II} = 0,15$ ),  $A_I = 21,5$  м и  $A_I = 12,8$  м,  $T_{\text{maxI}} = 30.12$  и  $T_{\text{maxI}} = 18.03$ .

Рассмотрим результаты гармонического анализа СезХ  $\text{O}_2$  на поверхности и у дна в каждой одноградусной трапеции (табл. 4). Табл. 4 подтверждает корректность годового хода  $\text{O}_2$  на поверхности, полученную по данным табл. 3, – на большей части моря вклад годовой гармоники  $q_I \geq 0,88$  при максимуме  $q_{\text{maxI}} = 0,98$  в Арконском море и минимуме  $q_{\text{minI}} = 0,57$  в Готландской котловине; ее амплитуда, в основном превышающая  $A_I \geq 1,4$  мл  $\text{O}_2$ /л, наблюдается вдоль южного и восточного побережий моря при максимуме  $A_{\text{maxI}} = 2,2$  мл  $\text{O}_2$ /л (Финский залив) и минимуме  $A_{\text{minI}} = 1,0$  мл  $\text{O}_2$ /л (Ботнический залив); дата наступления максимума для большей части моря отмечается после  $T_{\text{maxI}} = 28.02$ , позднее всего максимум наступает в Готландской котловине ( $T_{\text{maxI}} = 26.03$ ), а раньше всего ( $T_{\text{maxI}} = 08.02$ ) – на западе моря в Кильской бухте. Что касается среднегодового поверхностного

содержания кислорода, то для большей части акватории  $A_0 \geq 8,0$  мл  $O_2$ /л, максимальное значение  $A_{\max 0} = 8,7$  мл  $O_2$ /л отмечено южнее Слупского желоба у побережья Польши, а минимальное –  $A_{\min 0} = 7,2$  мл  $O_2$ /л на западе моря в Кильской бухте и Финском заливе.

Таблица 3. Гармонические постоянные среднего для моря СезХ кислорода (мл  $O_2$ /л), фосфатов (мкг-ат Р/л), аммония (мкг-ат N/л) и нитратов (мкг-ат N/л) на поверхности и характерных уровней их структур в Балтийском море за 1950-2005 гг. (рассчитано по [1])

Table 3. Harmonic constants of the average for the sea seasonal course of oxygen (ml  $O_2$ /l), phosphates ( $\mu\text{g-at P/l}$ ), ammonium ( $\mu\text{g-at N/l}$ ) and nitrates ( $\mu\text{g-at N/l}$ ) on the surface and structures characteristic levels in the Baltic Sea for 1950-2005 (calculated according to the data [1])

Параметр	Гармоники						$A_I/A_{II}$	$A_0$
	I (годовая волна)			II (полугодовая волна)				
	Амплитуда I	Дата I	Квота I	Амплитуда II	Дата II	Квота II		
$O_2$ (мл/л) 0 м	1,39	23.02	0,95	0,29	23.04(23.10)	0,04	4,77	7,87
ВКС (м)	15,3	25.11	0,33	11,6	03.06(03.12)	0,19	1,32	66
ДС (м)	13,8	07.12	0,26	12,6	28.05(28.11)	0,22	1,10	73
$PO_4$ (мкг-ат Р/л) 0 м	0,22	11.01	0,96	0,04	03.02(03.08)	0,03	0,27	5,58
ВКС (м)	19,1	03.01	0,77	6,8	25.01(25.07)	0,10	2,80	26
ДС (м)	4,7	29.01	0,60	1,6	03.06(03.12)	0,07	2,97	62
$NH_3$ (мкг-ат N/л) 0 м	0,15	19.11	0,64	0,07	29.04(29.10)	0,12	2,32	0,40
ВКС (м)	39,3	10.01	0,86	4,5	28.03(28.09)	0,01	8,67	38
ДС (м)	5,7	12.12	0,22	4,4	22.03(22.09)	0,13	1,29	130
$NO_3$ (мкг-ат N/л) 0 м	3,28	20.01	0,93	0,78	20.01(20.07)	0,05	4,22	4,22
ВКС (м)	21,5	30.12	0,70	11,2	28.06(28.12)	0,19	1,92	15
ДС (м)	12,8	18.03	0,66	6,0	07.02(07.08)	0,15	2,13	66

Сезонная изменчивость  $O_2$  в придонном слое иная, она связана с местными условиями (близостью к Датским проливам, рельефом дна и плотностной стратификацией). Так, средний вклад годовой гармонике уменьшился до  $q_1 \geq 0,53$  при максимуме  $q_{\max I} = 0,99$  в Арконском море и минимуме  $q_{\min I} = 0,01$  в Ландсорской котловине; ее средняя амплитуда несколько уменьшилась ( $A_I \geq 1,2$  мл  $O_2$ /л) при максимуме  $A_{\max I} = 3,0$  мл  $O_2$ /л (Арконское море и Рижский залив) и минимуме  $A_{\min I} = 0,02$  мл  $O_2$ /л (Ландсорская котловина); дата наступления максимума в среднем для моря сдвинулась на  $T_{\max I} = 09.04$ , позднее всего он наступает на восточном склоне Готландской котловины ( $T_{\max I} = 27.07$ ), а раньше всего ( $T_{\max I} = 02.01$  и  $T_{\max I} = 24.01$ ) – в Финском заливе и Ландсорской котловине. При этом среднегодовое содержания кислорода у дна по сравнению с поверхностным сократилось более чем в двое – до  $A_0 = 3,8$  мл  $O_2$ /л, хотя максимальное значение понизилось всего на 0,4 мл  $O_2$ /л – до  $A_{\max 0} = 8,3$  мл  $O_2$ /л (вершина Ботнического залива), однако минимальное уменьшилось до острого дефицита

$O_2 - A_{\min 0} \leq 0,3$  мл  $O_2$ /л (запад Северо-Балтийской котловины). Отметим, что содержание  $O_2$  вблизи дна выше среднего придонного значения отмечается в нескольких регионах в силу различных причин. Так, в Арконском море  $A_0 = 4,3 \div 5,8$  мл  $O_2$ /л, несмотря на глубины менее 30-40 м, но сильную плотностную стратификацию, из-за близости к Датским проливам, аэрация придонного слоя осуществляется за счет токами североморских вод даже малой интенсивности. Вдоль побережья Латвии и в Рижском заливе  $A_0 = 4,0 \div 7,3$  мл  $O_2$ /л, в вершине Финского залива  $A_0 = 3,8 \div 4,7$  мл  $O_2$ /л, при глубинах менее 50 м и невысокой стратификации аэрация придонного слоя идет с поверхности в период осенне-зимней конвекции, такой же механизм действует и в Ботническом заливе ( $A_0 = 7,4 \div 8,3$  мл  $O_2$ /л), где, несмотря на глубины более 50-150 м, но слабую плотностную стратификацию, аэрация придонного слоя за счет конвективного перемешивания приводит к тому, что даже в летние месяцы содержание  $O_2 \geq 6,1$  мл/л.

Таблица 4. Гармонические постоянные СезХ (средние и предельные значения) кислорода (мл  $O_2$ /л) на поверхности и у дна в Балтийском море за 1950-2005 гг. (рассчитано по [1])

Table 4. Harmonic constants of the seasonal course (average and limiting values) of oxygen (ml  $O_2$ /l) at the surface and at the bottom in the Baltic Sea for 1950-2005 (calculated according to [1])

Параметр	Гармоники						$A_I/A_{II}$	$A_0$
	I (годовая волна)			II (полугодовая волна)				
	Амплитуда I	Дата I	Квота I	Амплитуда II	Дата II	Квота II		
$O_2$ (мл/л) 0 м	1,45	28.02	0,877	0,41	18.04(18.10)	0,075	4,19	8,00
$O_2$ (мл/л) 0 м максимум	2,18	26.03	0,984	0,82	03.06(03.12)	0,186	12,29	8,72
$O_2$ (мл/л) 0 м минимум	1,05	08.02	0,574	0,10	16.03(16.09)	0,007	1,88	7,23
$O_2$ (мл/л) дно	1,16	09.04	0,530	0,37	14.04.(14.10)	0,103	4,29	3,76
$O_2$ (мл/л) дно максимум	3,00	27.07	0,988	0,88	25.06(25.12)	0,506	27,55	8,30
$O_2$ (мл/л) дно минимум	0,02	02.01	0,008	0,02	04.01(04.07)	0,001	0,37	0,26

## ВЫВОДЫ

1. Среднеклиматические значения за 1950-2005 гг. для Балтийского моря на поверхности составляют:  $O_2 = 7,87$  мл/л;  $PO_4 = 5,58$  мкг-ат P/л;  $NH_3 = 0,40$  мкг-ат N/л и  $NO_3 = 4,22$  мкг-ат N/л.

2. Выявлена двуслойность ГХ структуры для исследуемых параметров: поверхностная, или ДС (ВКС и верхняя часть главного слоя скачка), и глубинная (нижняя часть главного слоя скачка и придонный слой).

3. В Южной и Центральной Балтике глубина  $G_{\max}$  в среднем за год для  $S$ ,  $T_w$ ,  $O_2$  и  $NO_3$  возрастает от 15 м в Арконском море до 55-75 – в Борнхольмской и Гданьской котловинах, а затем несколько уменьшается – до 65 м в Готландской. На входе в Финский залив, где уже заметно влияние речных вод, глубина  $G_{\max}$  для этих параметров располагается между 45 и 75 м. Для  $PO_4$  и  $NH_3$  их  $G_{\max}$  в качестве нижней границы использовать нельзя. Была подтверждена правомерность примене-



ния в качестве границы ДС фосфатов глубины залегания изофосфаты 1,0 мкг-ат Р/л, предложенной в [9].

4. Выявлено преобладание годовой волны в СезХ для  $O_2$ ,  $PO_4$ ,  $NH_3$  и  $NO_3$  на поверхности и  $O_2$  у дна и для характерных уровней большинства параметров, вклад которой (квота) возрастает от 0,53 для кислорода у дна и до 0,96 для фосфатов на поверхности. Наступление максимума содержания параметров и их характерных уровней в годовом ходе в среднем для моря приходится на холодное полугодие – от ноября ( $NO_3$  на поверхности моря и ВКС  $O_2$ ) до марта (ДС  $NO_3$ ).

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Feistel, R. State and Evolution of the Baltic Sea, 1952–2005. A Detailed 50-Year Survey of Meteorology and Climate, Physics, Chemistry, Biology, and Marine Environment / R. Feistel, G. Nausch, N. Wasmund. – 2008. 712 p.

2. Берникова, Т. А. Гидрология и промысловая океанология: учебник / Т. А. Берникова. – Москва: Пищевая промышленность, 1980. – 240 с.

3. Балтийское море. Энциклопедия / И. С. Зонн [и др]. – Москва: Международные отношения, 2015. – 576 с.

4. Антонов, А. Е. Крупномасштабная изменчивость гидрометеорологического режима Балтийского моря и ее влияние на промысел: моногр. / А. Е. Антонов. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. – 248 с.

5. Добровольский, А. Д. Об определении водных масс / А. Д. Добровольский // Океанология. – 1961. – Т. 1. – Вып. 1. – С. 12-24.

6. Дубравин, В. Ф. Мониторинг деятельного слоя в пределах российского сектора Юго-Восточной Балтики / В. Ф. Дубравин, Ж. И. Стонт, О. А. Гушин // Сборник материалов X Международного экологического форума «День Балтийского моря» – Санкт-Петербург: ООО «Макси-Принт», 2009. – С. 205-206.

7. Дубравин, В. Ф. Долгопериодная изменчивость термохалинной структуры вод Балтийского моря / В. Ф. Дубравин, Г. Е. Маслянкин, Е. В. Дорохова // Инновации в науке и образовании-2010: VIII Международная научная конференция (19-21 окт.): к 80-летию образования университета: в 2 ч. / ФГБОУ ВПО «КГТУ». – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2010. – Ч. 1. – С. 135-138.

8. Брукс, К. Применение статистических методов в метеорологии / К. Брукс, Н. Карузерс. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1963. – 416 с.

9. Гидрохимические показатели и взвешенное вещество / В. Ф. Дубравин [и др.] // Нефть и окружающая среда Калининградской области: в 2 т. – Т. II. Море / под ред. В. В. Сивкова (отв. ред.), Ю. С. Каджояна, О. Е. Пичужкиной, В. Н. Фельдмана. – Калининград: Терра Балтика, 2012. – С. 276-291.

#### REFERENCES

1. Feistel R., Nausch G., Wasmund N. State and Evolution of the Baltic Sea, 1952–2005. A Detailed 50-Year Survey of Meteorology and Climate, Physics, Chemistry, Biology, and Marine Environment. 2008, 712 p.

2. Bernikova T. A. *Gidrologija i promyslovaja okeanologija: uchebnik* [Hydrology and commercial oceanology: student's book]. Moscow, Pishhevaja promyshlennost', 1980, 240 p.

3. Zonn I. S. [i dr.]. *Baltijskoe more. Jenciklopedija* [The Baltic sea. Encyclopedia]. Moscow, Mezhdunarodnye otnosheniya, 2015, 576 p.

4. Antonov A. E. *Krupnomasshtabnaja izmenchivost' gidrometeorologicheskogo rezhima Baltijskogo morja i ee vlijanii na promysel* [Large-scale changeability of the hydrometeorological conditions at the Baltic sea and its influence on the economy]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1987, 248 p.

5. Dobrovolskij A. D. Ob opredelenii vodnyh mass [On definition of water bodies]. *Okeanologija*, 1961, vol. 1, iss. 1, pp. 12-24.

6. Dubravin V. F., Stont Zh. I., Gushhin O. A. Monitoring dejatel'nogo sloja v predelah rossijskogo sektora Jugo-Vostochnoj Baltiki [Monitoring of the active layer within the Russian sector of the south-eastern Baltic]. *Sbornik materialov X Mezhdunarodnogo jekologicheskogo foruma «Den' Baltijskogo morja»* [Proceedings of the X International ecological forum "The Baltic sea day"]. Saint-Petersburg, ООО «Макс-Print», 2009, pp. 205-206.

7. Dubravin V. F., Masljankin G. E., Dorohova E. V. Dolgoperiodnaja izmenchivost' termohalinnoj struktury vod Baltijskogo morja [Long-period variability of the thermohaline structure of the Baltic sea waters]. *Innovacii v nauke i obrazovanii-2010: VIII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya (19-21 okt.): k 80-letiju obrazovanija universiteta* [Innovations in science and education-2010: VIII International scientific conference (19-21 Oct.): dedicated to the 80<sup>th</sup> anniversary of the university foundation]. Federalnoye Agentstvo po rybolovstvu; FGBOU VPO «KGTU». Kaliningrad, 2010, vol. 1, pp. 135-138.

8. Bruks K., Karuzers N. *Primenenie statisticheskikh metodov v meteorologii* [Application of statistical methods in meteorology]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1963, 416 p.

9. Dubravin V. F., Dorohova E. V., Sivkov V. V. Smyslov Gidrohimicheskie pokazateli i vzveshennoe veshhestvo [Hydrochemical indicators and suspended material]. *Neft' i okružhajushhaja sreda Kaliningradskoj oblasti. Vol. II. More*. Kaliningrad, Terra Baltika, 2012, pp. 276-291.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Дубравин Владимир Филиппович* – Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН; доктор географических наук, доцент; ведущий научный сотрудник;  
E-mail: v\_dubravin@mail.ru

*Dubravin Vladimir Filippovich* – Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences; Grand PhD in Geographic sciences, Associate Professor, leading researcher; E-mail: v\_dubravin@mail.ru

*Капустина Мария Владимировна* – Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН; младший научный сотрудник; E-mail: kapustina.mariya@yandex.ru

*Kapustina Mariia Vladimirovna* – Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences; Research Assistant; E-mail: kapustina.mariya@yandex.ru

*Кречик Виктор Антонович* – Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН; инженер-исследователь; E-mail: myemail.gav@gmail.com

*Krechik Viktor Antonovich* – Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences; Research Engineer; E-mail: myemail.gav@gmail.com