

УДК 551.464(265.53)

А.П. Недашковский¹, Г.В. Хен², Н.И. Савельева^{1*}¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43;² Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр, 690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4**ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВПАДИНЫ ТИНРО (ОХОТСКОЕ МОРЕ) В АНОМАЛЬНО ХОЛОДНЫЕ ГОДЫ**

Исследованы главные особенности изменчивости гидрохимических характеристик в водах впадины ТИНРО в 2001–2002 гг., когда наблюдались аномально холодные зимы. В формировании глубинных вод впадины ТИНРО участвуют холодные плотные воды, возникающие в северной части Охотского моря, вследствие чего на глубине 400–500 м ($\sigma_\theta \sim 26,88\text{--}26,92$) образуется температурный максимум с наибольшей концентрацией биогенных элементов и минимум кислорода. В нижележащих слоях впадины наблюдается рост кислорода и уменьшение биогенных элементов. Показано, что потребление кислорода и реминерализация биогенных элементов в глубинной зоне впадины ТИНРО (800–1000 м) протекают с высокими скоростями, характерными для шельфа (мкмоль/год): $dO_2/dt = 18,0$; $dSi/dt = 20,0$; $dP/dt = 0,26$. Причина этого в том, что основной вклад в химическую изменчивость дают процессы на границе морская вода — донные осадки. Изменчивость нитратов дополнительно определяется происходящей в донных осадках впадины денитрификацией, которая существенно уменьшает их концентрацию.

Ключевые слова: Охотское море, впадина ТИНРО, биогенные элементы, растворенный кислород, денитрификация.

DOI: 10.26428/1606-9919-2018-194-86-98.

Nedashkovsky A.P., Khen G.V., Savelieva N.I. Chemical patterns of the TINRO Basin (Okhotsk Sea) in abnormally cold years // *Izv. TINRO*. — 2018. — Vol. 194. — P. 86–98.

Chemical parameters (dissolved oxygen content, concentrations of silicon, phosphate and nitrate, nitrate deficiency) in the TINRO Basin of the Okhotsk Sea (~1000 m depth) are considered for the years 2001–2002 with abnormally cold winters. The Basin water exchange with the southern Okhotsk Sea is limited by the threshold with 500 m depth. The warm Intermediate water penetrates to the Basin above the threshold only. The warm intermediate layer is rather thin ($\sigma_\theta = 26.88\text{--}26.92$ or 400–500 m depth) in the years with abnormally cold winter. It is distinguished by high concentrations of nutrients and low oxygen content; moreover, their values are the highest/lowest for the entire Okhotsk Sea, presumably because of partial isolation of its water in the basin where it is captured by the water gyre and «aged» with biogeochemical processes. The deep waters of the TINRO Basin ($\sigma_\theta \sim 27.02$) are formed by mixing of three

* Недашковский Александр Павлович, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: nealpa@mail.ru; Хен Геннадий Васильевич, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: khen46@yandex.ru; Савельева Нина Ивановна, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: nina@poi.dvo.ru.

Nedashkovsky Alexander P., Ph.D., leading researcher, e-mail: nealpa@mail.ru; Khen Gennady V., Ph.D., leading researcher, e-mail: khen46@yandex.ru; Savelieva Nina I., Ph.D., leading researcher, e-mail: nina@poi.dvo.ru.

components: intermediate Okhotsk Sea waters, waters of the temperature maximum layer and dense cold waters of the Shelikhov Bay. The portion of the latter water mass is evaluated as 37 %. It enriches the Deep water in the Basin with dissolved oxygen and provides relatively low concentrations of nutrients. The peculiarity of the TINRO Basin manifests in the fact that these processes in the deep-sea zone (800–1000 m) proceed with high velocities typical for shelf. In addition, in the deep waters of the Basin, there is a significant deficit of nitrate, presumably due to denitrification, which also proceeds with high rate. This suggests that non-conservative behavior of hydrochemical characteristics in the deep waters is caused by processes occurring on the surface of bottom sediments. The main reason for this behavior is probably an additional accumulation of biogenic material at the bottom of the TINRO Basin as the result of its transfer from shelf by the cold dense waters ventilating the Basin. The TINRO Basin, being a trap for the cold dense shelf waters, apparently is a convenient object for observing and analyzing climate change in the northeastern Okhotsk Sea.

Key words: Okhotsk Sea, TINRO Basin, silicon, nitrate, phosphate, dissolved oxygen, denitrification.

Введение

Большую часть акватории северной части Охотского моря занимают шельф и пологий склон. Исключение составляет впадина ТИНРО, расположенная к западу от п-ова Камчатка (55,0–57,5° с.ш. 152–154° в.д.). Дно ее представляет собой равнину, лежащую на глубине около 850 м при максимальной глубине 990 м (Залогин, Косарев, 1999). От глубоководной части моря впадина ТИНРО отделена узким проходом (желоб Лебеда), имеющим порог глубиной ~500 м. В отличие от глубоководной области Охотского моря, впадина ТИНРО характеризуется особым распределением гидрологических характеристик (Хен и др., 2002; Фигуркин, 2013), обусловленным смешением тихоокеанских вод, поступающих через желоб Лебеда, с высокоплотными водами зимнего происхождения, скатывающимися вдоль северного склона глубин. Вертикальная структура вод во впадине ТИНРО изучена слабо, но предположительно имеет сходство с южной глубоководной частью Охотского моря, за исключением глубинного слоя. По всей видимости, во впадине ТИНРО формируется собственная модификация глубинных вод, на что указывают замкнутые области высокосоленых вод на дне впадины ТИНРО (Фигуркин, 2011).

Гидрохимические характеристики впадины ТИНРО подробно не рассматривались. Исследования, выполненные в 2001–2002 гг., когда наблюдались аномально холодные зимы (Хен и др., 2004; Nedashkovsky et al., 2004; Фигуркин, 2013), показали, что распределение гидрохимических характеристик во впадине ТИНРО в этот период времени существенно отличается от распределения гидрохимических характеристик в глубоководной части моря и от распределения гидрохимических характеристик во впадине ТИНРО в последующие годы с относительно теплыми зимами. Эти особенности гидрохимии впадины ТИНРО проанализированы и описаны в настоящей работе.

Материалы и методы

Наблюдения проводились на судах ТИНРО-центра осенью 2001 и весной 2002 гг. Положение станций, выполненных в 2002 г., показано на рис. 1. В работе использованы наблюдения, проведенные на станциях, расположенных непосредственно во впадине ТИНРО, в желобе Лебеда, на станциях южнее желоба и на отдельных станциях на северо-западном шельфе и в зал. Шелихова (всего на 33 станциях, одна из которых выполнена в глубокой части впадины в 2001 г.). Океанологические работы выполнялись с помощью зонда «MARK-III», снабженного пластиковыми батометрами Нискина емкостью 1,8 л. Исследуемые гидрохимические характеристики (кислород, силикаты, фосфаты и нитраты) определялись на борту судна стандартными методами, принятыми в морской химии*.

* Современные методы гидрохимических исследований океана. М.: ИО АН СССР им. П.П. Ширшова, 1992. 200 с.

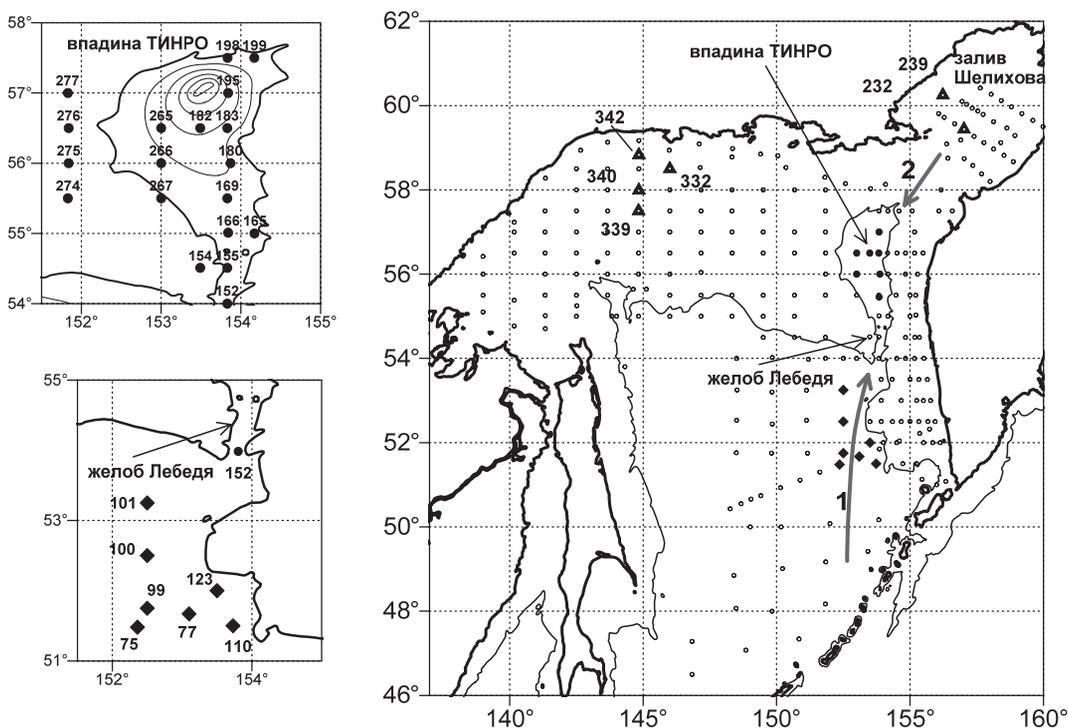


Рис. 1. Схема станций в 21-м рейсе НИС «Профессор Кагановский» (март-июль 2002 г.). Черные кружки — станции во впадине ТИНРО; ромбики — станции в окрестностях желоба Лебеда, через который воды поступают во впадину ТИНРО; треугольники — станции на северо-западном шельфе и в зал. Шелихова, где наблюдаются холодные плотные зимние воды. Цифры — номера станций, использованных в данной работе. Жирные стрелки показывают распространение вод, принимающих участие в формировании глубинных вод впадины ТИНРО: 1 — промежуточные воды южной части Охотского моря; 2 — холодные высокоплотные зимние воды. В левой части — подробная схема станций во впадине ТИНРО и южнее желоба Лебеда

Fig. 1. Scheme of RV Professor Kaganovskiy survey in the Okhotsk Sea in March-July, 2002. Black circles — stations within the TINRO Basin; rhombuses — stations in the Lebed Trough that connects the TINRO Basin with the southern deep-water basins; triangles — stations on northwestern shelf and in the Shelikhov Bay where cold high-density waters form in winter; numbers — numbers of the stations mentioned in the text; bold arrows — flows of the waters contributing to the Deep water forming in the TINRO Basin: 1 — Intermediate water penetrating to the TINRO Basin from the southern Okhotsk Sea; 2 — cold high-density waters. Left panel: detailed scheme of the survey in the TINRO Basin and Lebed Trough

Результаты и их обсуждение

В 2001 г. во впадине ТИНРО выполнена только одна станция (56,5° с.ш. 153,67° в.д.). Распределение гидрологических и гидрохимических характеристик на этой станции и на станциях во впадине ТИНРО в 2002 г. имеет одинаковый характер. По этой причине изменчивость на станции, выполненной в 2001 г., не показана. Представленные рисунки относятся к съемке, выполненной в 2002 г.

θ - S -характеристики вод

На рис. 2 представлены графики зависимости потенциальной температуры от солености вод Охотского моря на станциях во впадине ТИНРО и в районах, воды которых могут служить источниками формирований вод впадины ТИНРО. В рассматриваемом нами интервале глубин (300–1000 м), в котором проявляются особенности гидрохимии впадины ТИНРО, выделяются два характерных слоя воды: слой температурного максимума (СТМ, эллипс 3) и глубокий слой (эллипс 4).

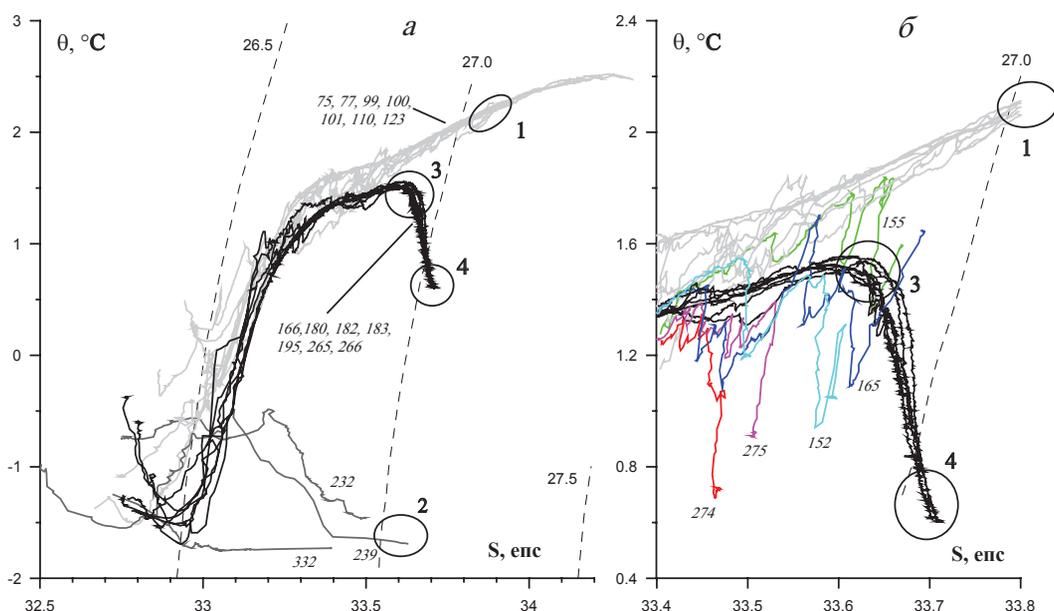


Рис. 2. θ -S-индексы вод в районе исследований в Охотском море (а): штриховые линии — изопикны; курсив — номера станций; эллипсы 1, 2, 3 — θ -S-индексы ядер водных масс, участвующих в формировании глубинных вод впадины ТИНРО (ПОВ, ВЗШ, СТМ); эллипс 4 — глубинные воды впадины ТИНРО; черные линии — район впадины ТИНРО; светло-серые линии — южная котловина Охотского моря; темно-серые линии (ст. 232, 239 и 332) — северная часть Охотского моря; θ -S-диаграммы промежуточных и глубинных вод (б); цветом выделены θ -S-кривые в желобе Лебеда и на склоне, прилегающем к впадине ТИНРО

Fig. 2. Temperature-salinity diagram for stations of RV Professor Kaganovsky survey in the Okhotsk Sea in March-July, 2002: а — θ -S-indices of water masses; б — θ -S-curves for the intermediate and deep layers. Dashed lines — isopycnals; italics — station numbers; ellipses 1, 2, 3 — water masses contributing to the Deep water forming in the TINRO Basin; ellipse 4 — Deep water in the TINRO Basin; black lines — θ -S-curves in the TINRO Basin; light-gray lines — θ -S-curves in the southern Okhotsk Sea, dark-gray lines — θ -S-curves in the northern Okhotsk Sea (st. 232, 239, and 332); colour lines — θ -S-curves in the Lebed Trough and at the continental slope adjacent to the TINRO Basin

Формирование вод, заполняющих впадину ТИНРО, происходит следующим образом. Тихоокеанские воды, трансформированные в Курильских проливах (стрелка 1, см. рис. 1), переносятся Западно-Камчатским течением вдоль побережья Камчатки на промежуточных глубинах (300–500 м; $\sigma_\theta = 26,8$ –26,9) и через желоб Лебеда поступают во впадину ТИНРО. Они охлаждаются, смешиваясь с более холодными водами, поступающими на эти глубины по западному склону впадины ТИНРО и желоба Лебеда, а также с камчатского склона. На западном склоне впадины ТИНРО такие холодные воды наблюдаются на ст. 274–277 на глубинах 300–450 м (рис. 2, б и 3). Взаимодействие этих двух типов вод начинается уже при входе в желоб Лебеда, о чем свидетельствуют заметные интрузии на θ -S-кривых и на вертикальных профилях температуры на ст. 152, 155 и 165 (рис. 2, б и 3, б).

По мере дальнейшего распространения этих вод во впадину ТИНРО их θ -S-показатели выравниваются, и на глубинах 300–500 м образуется водный слой с промежуточными характеристиками, в нижней части которого наблюдается температурный максимум (эллипс 3). С увеличением глубины (собственно впадина ТИНРО, глубины 600–1000 м) наблюдается резкое падение температуры и небольшой рост солёности до 33,7 eps, сопровождающиеся увеличением плотности до $\sim 27,02$ (эллипс 4). Такая плотность характерна для нижней границы промежуточных вод Охотского моря, (Круц, Лучин, 2013). На станциях к югу от желоба Лебеда (ст. 75–101, см. рис. 1) глубинные воды более солёные — $S \sim 34,2$ eps и плотные — $\sigma_\theta \sim 27,5$ (рис. 2).

Глубинные воды впадины ТИНРО (ГВВТ), выделенные эллипсом 4, имеют соленость и плотность более низкие, чем глубинные воды южной котловины, сформированные в Тихом океане (Морошкин, 1966; Kitani, 1973). Следовательно, можно предположить, что ГВВТ формируются в самой впадине при смешении промежуточных охотоморских вод (ПОВ) южной котловины (эллипс 1) и холодных плотных вод, которые образуются в зимний период на севере Охотского моря, и сползают во впадину ТИНРО (эллипс 2). Это предположение подтверждается, во-первых, существованием в зал. Шелихова придонных вод (ВЗШ) с плотностью, достаточной для глубинной вентиляции впадины ТИНРО (эллипс 2, рис. 2 и 3), во-вторых, существованием в ПОВ слоя (рис. 2, эллипс 1) с плотностью, достаточной для погружения этих вод на дно впадины ТИНРО. Во время выполнения наблюдений ПОВ, имеющие плотность 27,02 (эллипс 1, рис. 2), располагались несколько глубже порога желоба Лебеда. Тем не менее, учитывая значительную сезонную и межгодовую изменчивость океанологических условий в Охотском море (Фигуркин, 2002, 2013; Круц, Лучин, 2013), мы полагаем, что эти воды периодически проникают во впадину ТИНРО, формируя ее глубинные воды. Кроме того, на характеристики глубинных вод впадины ТИНРО может оказывать влияние СТМ над впадиной ТИНРО (эллипс 3, рис. 2).

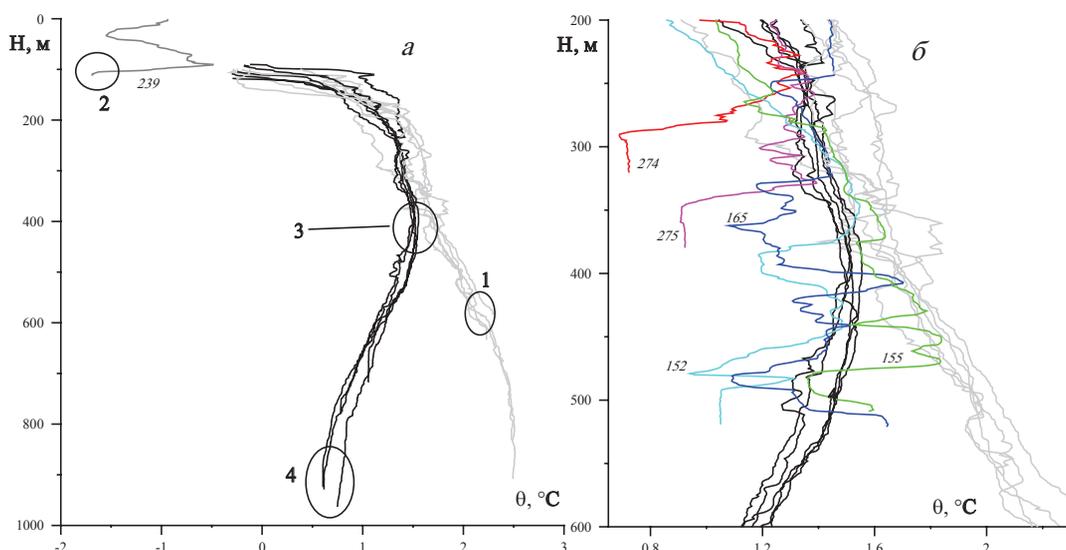


Рис. 3. Вертикальные профили потенциальной температуры вод в районе исследований в Охотском море: **а** — от верхнего водного слоя до дна; **б** — подробно в слое 200–600 м. Обозначения как на рис. 2

Fig. 3. Vertical profiles of water potential temperature in the Okhotsk Sea (**a**) and their detailing for the 200–600 m layer (**b**). Legend as for Fig. 2

Гидрохимические характеристики

Характер вертикального распределения гидрохимических параметров на станциях, выполненных на НИС «Профессор Кагановский» в 2002 г., показан на рис. 4 на примере кислорода и силикатов. Вертикальное распределение этих параметров во впадине ТИНРО отличается от аналогичного распределения на остальных станциях в Охотском море. В верхней части водной толщи над впадиной ТИНРО от поверхности до слоя температурного максимума гидрохимические параметры изменяются обычным образом: фосфаты, нитраты и силикаты увеличиваются, кислород уменьшается. В интервале плотности 26,88–26,92, который соответствует СТМ, гидрохимические параметры достигают экстремальных значений (минимум кислорода и максимум силикатов, фосфатов и нитратов). Глубже этого слоя в водах впадины ТИНРО наблюдается ярко выраженный рост кислорода и падение силикатов, фосфатов и нитратов.

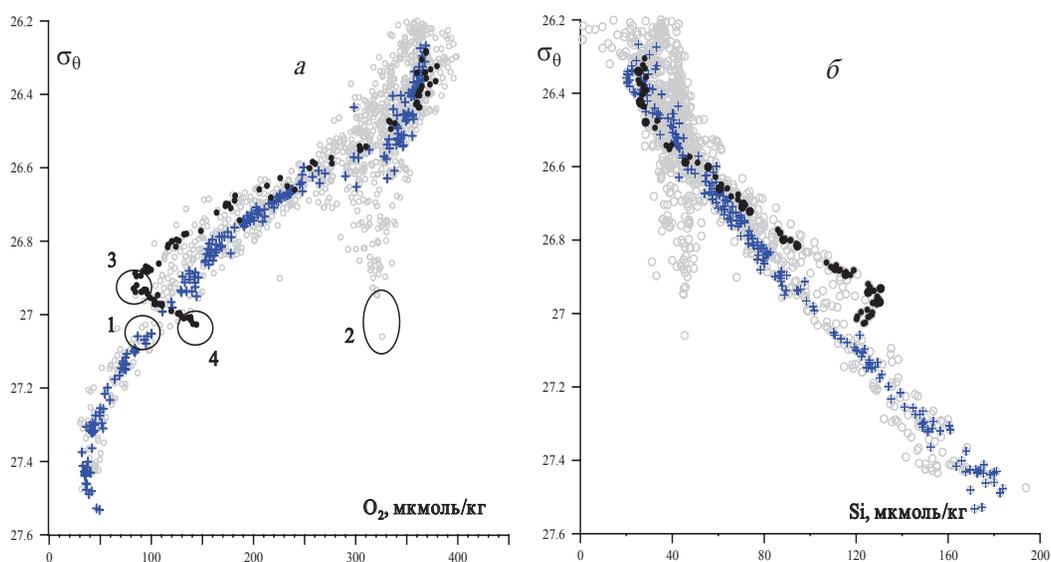


Рис. 4. Вертикальное распределение кислорода (а) и силикатов (б) в Охотском море (серые кружки). Выделены точки во впадине ТИНРО (черные кружки), южная котловина (крестики). Эллипсы 1, 2, 3, 4 соответствуют ядрам ПОВ, ВЗШ, СТМ и ГВВТ

Fig. 4. Vertical profiles of dissolved oxygen (а) and silicon (б) in the Okhotsk Sea, $\mu\text{M}/\text{kg}$. Black circles — TINRO Basin; crosses — southern deep-water basins; gray circles — other areas; ellipses 1, 2, 3, 4 — cores of the main water masses

В юго-восточной части Охотского моря во всей водной толще наблюдается характерная для пелагиали высокая корреляция между фосфатами и нитратами ($r = 0,996$, $n = 344$), выражаемая в нашем случае уравнением (Недашковский и др., 2006)

$$[\text{NO}_3^-] = (14,88 \pm 0,07) [\text{PO}_4^{3-}] - (5,46 \pm 0,17). \quad (1)$$

Особенность впадины ТИНРО состоит в том, что тесная связь между фосфатами и нитратами возможна только при $[\text{PO}_4^{3-}] < 2,5$ мкмоль/кг в верхней части водного слоя (~ до 300 м), что иллюстрирует рис. 5. При более высоких концентрациях $[\text{PO}_4^{3-}]$, наблюдаемых в слое температурного максимума и глубже, происходит заметное отклонение от линейной зависимости между концентрациями фосфатов и нитратов, которое может быть описано с помощью термина дефицита нитратов (Недашковский и др., 2006):

$$d\text{NO}_3^- = [\text{NO}_3^-]_{\text{ожидаем}} - [\text{NO}_3^-]_{\text{наблюд}} \quad (2)$$

где $[\text{NO}_3^-]_{\text{ожидаем}}$ — ожидаемая концентрация нитратов, определяемая уравнением (1); $[\text{NO}_3^-]_{\text{наблюд}}$ — наблюдаемая концентрация.

Характеристики вод впадины ТИНРО (глубинных и СТМ), холодных плотных вод северной части Охотского моря и промежуточных охотоморских (с плотностью $\sigma_\theta = 27,02$), участвующих в образовании глубинных вод впадины, приведены в табл. 1. Характеристики вод впадины ТИНРО рассчитаны для станций 166, 180, 182, 183, 195, 265, 266. Характеристики ПОВ определены на ст. 75, 77, 99, 100, 101, 110, 123, поскольку именно эти воды могли распространиться по желобу Лебеда во впадину ТИНРО. В качестве характеристик холодных плотных вод мы взяли средние значения характеристик придонных вод на ст. 232 и 239 в зал. Шелихова. Отметим, что плотные холодные воды с близкими гидрологическими и гидрохимическими характеристиками наблюдались нами также западнее, на северном шельфе на ст. 332, 339, 340, 342 (воды северного шельфа).

Установлено, что концентрация биогенных элементов в СТМ над впадиной ТИНРО выше (кислород ниже), чем на тех же изопикнических поверхностях в тихоокеанских водах, входящих в желоб Лебеда (см. рис. 4). Более того, в СТМ над впадиной ТИНРО кислород самый низкий, а биогенные элементы самые высокие для этого интервала плотности на всей акватории Охотского моря. Это иллюстрирует рис. 6, на котором представлено распределение силикатов на изопикнической поверхности 26,88. Аналогичная картина наблюдается для других биогенных элементов и дефицита нитратов.

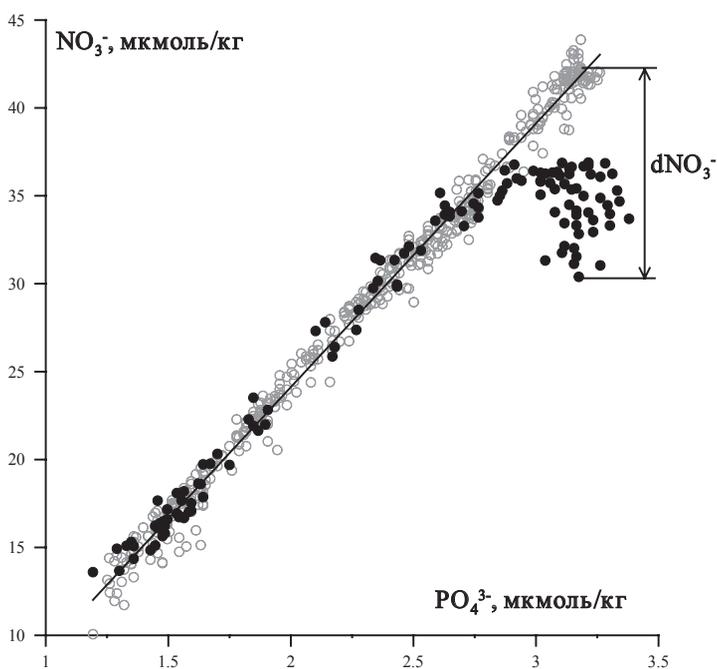


Рис. 5. Корреляционное поле фосфаты–нитраты. Серые кружки — юго-восточная часть Охотского моря. Отрезок прямой — линия регрессии нитратов на фосфаты: $[\text{NO}_3^-] = (14,88 \pm 0,07) [\text{PO}_4^{3-}] - (5,46 \pm 0,17)$. Черные кружки — впадина ТИНРО. В верхней правой части — графическая интерпретация дефицита нитратов, $d\text{NO}_3^-$

Fig. 5. Nitrate-phosphate diagram for the Okhotsk Sea, $\mu\text{M}/\text{kg}$. Gray circles — southeastern Okhotsk Sea; black circles — TINRO Basin; line — nitrate-phosphate regression $[\text{NO}_3^-] = (14,88 \pm 0,07) [\text{PO}_4^{3-}] - (5,46 \pm 0,17)$. Upper right panel: graphic interpretation of nitrate deficiency $d\text{NO}_3^-$

Таблица 1
Гидрологические (θ , S , σ_θ) и гидрохимические характеристики (O_2 , NO_3^- , PO_4^{3-} , Si , $d\text{NO}_3^-$) глубинных вод впадины ТИНРО, слоя температурного максимума над впадиной ТИНРО, а также промежуточных охотоморских, холодных плотных вод зал. Шелихова и северного шельфа

Table 1
Physical (θ , Sal , σ_θ) and chemical (O_2 , NO_3^- , PO_4^{3-} , Si , $d\text{NO}_3^-$, $\mu\text{mol}/\text{kg}$) properties for the Deep water in the TINRO Basin, for the warm intermediate layer in the TINRO Basin, for the Intermediate water in the Okhotsk Sea, and for the cold high-density waters in the Shelikhov Bay and on the northern shelf (median, minimum and maximum values)

Водная масса	θ , °C	S, епс	σ_θ	мкмоль/кг				
				O_2	NO_3^-	PO_4^{3-}	Si	$d\text{NO}_3^-$
ГВВТ (n = 4)	Медиана: 0,68	33,70	27,02	140	31,1	3,17	125	10,9
	Мин: 0,63	33,69	27,00	129	30,4	3,16	123	10,1
	Макс: 0,81	33,70	27,03	144	31,6	3,26	127	12,0
ГВВТ 2001 г., ст. 176	0,44	33,69	27,02	163	31,7	2,98	111	7,2
СТМ (n = 7)	Медиана: 1,39	33,65	26,93	90	35,4	3,26	126	7,0
	Мин: 1,32	33,64	26,92	83	34,7	3,15	125	6,0
	Макс: 1,47	33,66	26,94	95	36,3	3,34	131	9,6
ПОВ (n = 7)	Медиана: 2,11	33,82	27,02	107	37,4	2,91	108	0,4
	Мин: 2,06	33,80	27,00	100	36,9	2,87	104	0,2
	Макс: 2,17	33,84	27,03	111	38,0	2,95	116	1,4
ВЗШ (n = 2)	Медиана: -1,57	33,56	27,00	324	20,7	2,16	45	6,3
	Мин: -1,70	33,50	26,95	321	20,5	2,15	45	5,8
	Макс: -1,46	33,62	27,06	326	20,9	2,18	45	6,7
ВСШ (n = 4)	Медиана: -1,67	33,32	26,81	315	20,2	2,23	50	7,7
	Мин: -1,73	33,30	26,79	285	19,8	2,15	47	6,5
	Макс: -1,36	33,40	26,88	330	21,6	2,33	53	8,2

Пониженный кислород и повышенные биогенные элементы являются следствием окисления органического вещества и растворения взвешенного кремнезема. Уменьшение кислорода и прирост биогенных элементов характеризуются двумя факторами: экспортной продукцией, определяемой функционированием биосообщества над впадиной ТИНРО, и временем обновления вод СТМ во впадине ТИНРО («возрастом»). На наш взгляд, в рассматриваемом феномене второй фактор играет большую роль, поскольку продукция над впадиной ТИНРО вряд ли сильно отличается от продукции на сопредельной акватории. Существующая система достаточно замкнутой циркуляции вод над впадиной ТИНРО (Чернявский, 1981; Лучин, 1998) способствует «удерживанию» вод СТМ в этом районе. Представление об удерживании вод во впадине ТИНРО еще в большей степени относится к глубинной зоне, поскольку заполняющие ее воды имеют плотность выше плотности вод в желобе Лебеда и покинуть впадину ТИНРО не могут. Таким образом, впадина ТИНРО является своеобразной «ловушкой» для поступающих в нее вод: попадая во впадину, эти воды удерживаются здесь в течение времени, достаточного для изменения гидрохимических характеристик.

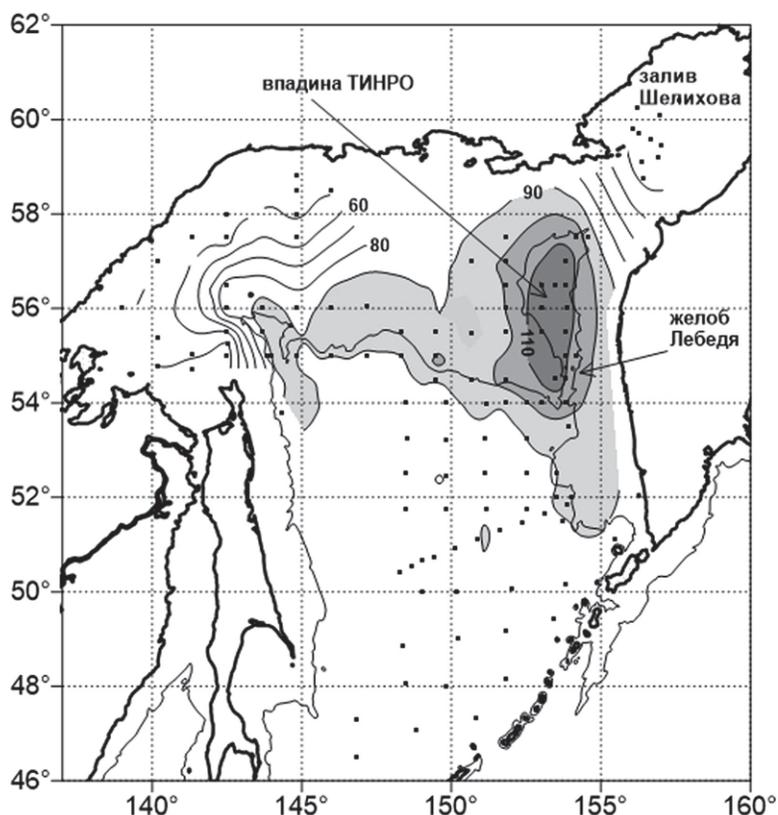


Рис. 6. Распределение силикатов на изопикнической поверхности $\sigma_0 = 26,88$ в Охотском море, $\mu\text{M}/\text{kg}$

Fig. 6. Silicon distribution on the isopycnic surface $\sigma_0 = 26,88$ in the Okhotsk Sea, $\mu\text{M}/\text{kg}$

В работе, опубликованной нами ранее (Недашковский и др., 2006), показано, что дефицит нитратов в водах северной части Охотского моря может объясняться денитрификацией в донных осадках. В районе впадины ТИНРО дефицит нитратов наблюдается уже в СТМ, расположенном на достаточном удалении от дна впадины, на глубине более 500 м. Мы полагаем, что это результат денитрификации, протекающей в осадках на склоне впадины. Чтобы dNO_3^- стал заметен, требуется длительное время для продолжительного контакта вод с осадками на склоне, что подтверждает предположение об «удерживании» вод СТМ.

Другая особенность впадины ТИНРО связана с изменчивостью гидрохимических характеристик ее глубинных вод. Как отмечалось выше, глубинные воды впадины

ТИНРО формируются при смешении ПОВ вод плотностью ~27,02, холодных плотных вод северной части Охотского моря (в нашем случае это ВЗШ) и вод СТМ (см. рис. 2). Расчет, выполненный по треугольнику смешения водных масс (Мамаев, 1970) с использованием данных, приведенных в табл. 1, дает для весны 2002 г. следующие доли исходных компонентов водных масс в глубинных водах впадины ТИНРО: ПОВ — 0,53, ВЗШ — 0,37 и СТМ — 0,10. Используя полученные доли исходных компонентов, мы рассчитали для этого момента времени значения гидрохимических параметров в глубинных водах впадины ТИНРО, в предположении их консервативности:

$$(X)_{\text{ГВВТ}} = (X)_{\text{ПОВ}} \cdot f_{\text{ПОВ}} + (X)_{\text{ВЗШ}} \cdot f_{\text{ВЗШ}} + (X)_{\text{СТМ}} \cdot f_{\text{СТМ}} \quad (3)$$

где (X) — значение гидрохимического параметра; $f_{\text{ПОВ}}$, $f_{\text{ВЗШ}}$ и $f_{\text{СТМ}}$ — соответственно доли промежуточных охотоморских вод, вод зал. Шелихова и слоя температурного максимума.

Рассчитанные значения гидрохимических параметров приведены в табл. 2. Там же даны отклонения рассчитанных значений от наблюдаемых (см. табл. 1), обозначаемые в дальнейшем символом Δ ($\Delta = \text{Расчет} - \text{Наблюдение}$).

Таблица 2

Рассчитанные значения гидрохимических параметров и их отклонения от наблюдаемых величин в глубинных водах впадины ТИНРО

Table 2

Calculated values of chemical parameters for the Deep water in the TINRO Basin and their deflections from the observed values

Параметр	Расчет, мкмоль/кг	Δ , Расчет – Наблюдение	
		мкмоль/кг	Доля от наблюдаемого, %
O ₂	186,0	46,0	33,0
Si	86,0	-39,0	-31,0
PO ₄ ³⁻	2,66	-0,51	-16,0
NO ₃ ⁻	31,14	0,04	0,1
dNO ₃ ⁻	3,50	-7,40	-68,0

Отклонения наблюдаемых значений гидрохимических параметров от рассчитанных обусловлены их неконсервативностью вследствие потребления кислорода, реминерализации фосфатов, нитратов и растворения силикатов в глубинных водах впадины ТИНРО.

В 2001 г. в глубоководной части впадины ТИНРО выполнена одна единственная станция. Несмотря на низкую обеспеченность наблюдений в 2001 г., мы попытались оценить скорости изменения концентрации кислорода и биогенных веществ, обусловленные гидрохимическими процессами, в глубинных водах впадины ТИНРО, сравнивая данные, полученные в октябре 2001 и в апреле 2002 г. Оценки выполнялись при следующих допущениях. Разность концентраций, наблюдаемых в 2002 и 2001 гг. ($\text{Набл}_{2002} - \text{Набл}_{2001}$), определяется изменениями, обусловленными консервативным смешением исходных водных масс ($\Delta_{\text{смешения}}$) и изменениями, вызванными неконсервативностью ($\Delta_{\text{хим}}$). $\Delta_{\text{смешения}}$ рассчитывается по разности между $(X)_{\text{ГВВТ}}$, определенными по уравнению (3) для 2002 и 2001 гг., а именно: $\Delta_{\text{смешения}} = [(X)_{\text{ГВВТ}}]_{2002} - [(X)_{\text{ГВВТ}}]_{2001}$. При этом используется допущение, что гидрологические и гидрохимические характеристики исходных компонентов водных масс, формирующих глубинные воды впадины ТИНРО, имеют одни и те же значения. Получаем:

$$\Delta_{\text{хим}} = (\text{Набл}_{2002} - \text{Набл}_{2001}) - \Delta_{\text{смешения}} \quad (4)$$

Данные, приведенные в табл. 3, показывают изменения за 7,3 мес. Отсюда скорость изменений, обусловленных неконсервативностью, составит: O₂ — 18,0 мкмоль/кг · год, Si — 20,0 мкмоль/кг · год, PO₄³⁻ — 0,26 мкмоль/кг · год, NO₃⁻ — 1,7 мкмоль/кг · год, dNO₃⁻ — 6,0 мкмоль/кг · год. Выше отмечалось, что дефицит нитратов, наблюдаемый в северной шельфовой части Охотского моря, объясняется денитрификацией, происходя-

шей в донных осадках на шельфе. В предположении, что и здесь причина дефицита нитратов — денитрификация, мы оценили ее скорость на единицу площади осадков: $F_{\text{денитр}} = R \cdot V/S$, где V и S — объем и площадь осадков глубинной зоны впадины ТИНРО; R — скорость развития дефицита нитратов в единице объема, составляющая в соответствии с нашей оценкой $\sim 6,0 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ · год. Принимаем, что глубинная зона впадины ТИНРО расположена глубже 800 м. Объем вод, занимающих эту область, и площадь поверхности впадины, вмещающей этот объем, оценены с использованием батиметрической карты высокого разрешения (1 мин) (<https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/wcs-client/>). Оценки составляют: $V = 1,6 \cdot 10^{11}$ м³, $S = 1,8 \cdot 10^9$ м². Тогда $F_{\text{денитр}} = R \cdot V/S = 6,0 \cdot 10^{-3} \cdot 1,61 \cdot 10^{11}/1,83 \cdot 10^9 = 0,53$ моль азота/м² · год.

Таблица 3

Изменения концентраций O₂ и биогенных веществ в глубинных водах впадины ТИНРО, обусловленные деструкцией органического вещества и растворения кремнезема за время с 07.10.2001 по 27.05.2002 г., мкмоль/кг

Table 3

Changes of dissolved oxygen content and nutrients concentrations in the Deep water of the TINRO Basin caused by organic matter decomposition and SiO₂ dissolving in the time from October 7, 2001 to May 25, 2002, mkmol/kg

Параметр	Расчет 2001	$\Delta_{\text{смещения}}$	Набл. ₂₀₀₁	Набл. ₂₀₀₂ – Набл. ₂₀₀₁	$\Delta_{\text{хмм}}$
O ₂	198,0	-12,0	163,0	-23,0	-11,0
Si	84,0	2,0	111,0	14,0	12,0
PO ₄ ³⁻	2,63	0,03	2,98	0,19	0,16
NO ₃ ⁻	29,70	0,44	31,70	-0,60	-1,04
dNO ₃ ⁻	3,44	0,06	7,20	3,70	3,64

Представленные в табл. 2 рассчитанные значения гидрохимических характеристик, их отклонения от наблюдаемых величин, скорости потребления кислорода и реминерализации биогенных элементов, характеризующие изменчивость гидрохимических характеристик в глубинных водах впадины ТИНРО, являются приблизительными оценками, так как настоящие характеристики холодных плотных шельфовых вод, сползающих в глубины впадины ТИНРО, мы не знаем, поскольку используем характеристики холодных плотных вод, задержавшихся в зал. Шелихова в период проведения съемки 2002 г. Тем не менее полученные результаты позволяют сделать некоторые выводы об особенностях гидрохимических процессов в глубинных водах впадины ТИНРО.

Причиной того, что глубже 500 м кислород с глубиной растет, а биогенные элементы падают, является вентиляция глубинной зоны впадины ТИНРО холодными плотными водами зал. Шелихова, которые обогащены кислородом и имеют небольшие концентрации биогенных элементов. Это следует из того, что в глубинных водах впадины рассчитанные значения O₂ больше, а фосфатов, нитратов и силикатов меньше, чем в СТМ, вследствие значительного вклада (37 %) вод зал. Шелихова.

Потребление кислорода, реминерализация фосфатов и растворение кремнезема в глубинной зоне впадины ТИНРО протекают со скоростями, более чем на порядок превышающими скорости в океане. Например, на тех же глубинах в океане при одинаковой экспортной продукции скорость потребления кислорода ~ 1 мкМ/год (Martin et al., 1987), скорость растворения силикатов ~ 1 мкМ/год (Holzer et al., 2014). В отличие от кислорода, фосфатов и силикатов для нитратов рассчитанные значения близки к наблюдаемым. Это объясняется тем, что в глубинной зоне впадины ТИНРО происходит потеря нитратов, практически равная их поступлению при окислении органического вещества (возникает дефицит нитратов). Предполагаемая денитрификация, вызывающая дефицит нитратов, протекает со скоростью, в 2 раза превышающей скорость денитрификации на глубинах 15–30 м в Токийском заливе, $\sim 0,26$ моль азота/м² · год, измеренную I. Koike в 1993 г. (из: Yanagi, 2002) и считающуюся достаточно высокой.

Таким образом, процессы, контролирующие содержание нитратов, также протекают со скоростями, характерными для шельфа.

Возможные причины высоких скоростей окисления органического вещества, ре-минерализации биогенных элементов и денитрификации в глубинных водах впадины ТИНРО, по нашему мнению, следующие. На дно впадины (около 1000 м) может поступать значительное количество биогенной взвеси (примерно 15 % $C_{\text{орг}}$ и 80 % SiO_2 от экспортной продукции в этом районе). Кроме того, холодные плотные воды, образующиеся в северной части Охотского моря и сползающие на дно впадины ТИНРО, по-видимому, могут дополнительно приносить туда взвешенные вещества с шельфа. Накопление взвеси на дне впадины ТИНРО приводит к тому, что процессы на границе осадки — морская вода, которые протекают с большей скоростью, чем процессы в толще воды, начинают играть главную роль в окислении органического вещества и реминерализации биогенных элементов. По этой же причине денитрификация, приводящая к дефициту нитратов, может идти в донных осадках впадины со скоростью не меньшей, чем скорость денитрификации на высокопродуктивном шельфе.

Выводы

Рассмотрены гидрохимические характеристики (растворенный кислород, силикаты, фосфаты, нитраты, дефицит нитратов) вод впадины ТИНРО, достигающей глубины ~1000 м и имеющей ограниченный водообмен с южной глубоководной частью Охотского моря. Выявлены основные особенности изменчивости этих характеристик в аномально холодные годы, когда глубинные воды впадины формируются при сползании плотных холодных шельфовых вод, что приводит к температурному максимуму на TS-кривых во впадине ТИНРО при $\sigma_\theta = 26,88\text{--}26,92$ (на глубинах 400–500 м).

При этих условиях в слое температурного максимума наблюдаются максимумы биогенных элементов (силикатов, фосфатов, нитратов) и минимум кислорода. На изопикнических поверхностях, соответствующих этому слою ($\sigma_\theta = 26,88\text{--}26,92$), экстремумы силикатов, фосфатов, нитратов и кислорода, наблюдаемые над впадиной ТИНРО, являются абсолютными для всей акватории Охотского моря. Вероятная причина такого распределения биогенных элементов и кислорода — циркуляция вод в Охотском море. Существующая система циркуляции над впадиной ТИНРО способствует «удерживанию» в этом районе вод СТМ на глубине 400–500 м. Воды, попавшие в круговорот над впадиной ТИНРО, «стареют», что проявляется в накоплении биогенных элементов, уменьшении кислорода и появлении дефицита нитратов вследствие денитрификации в донных осадках на склоне.

Глубинные воды впадины ТИНРО ($\sigma_\theta \sim 27,02$) в рассматриваемый период времени формируются при смешении трех компонентов: промежуточных охотоморских вод, вод слоя температурного максимума и плотных холодных вод зал. Шелихова. Вследствие значительного вклада холодных вод зал. Шелихова (37 %) глубинные воды впадины обогащены кислородом и имеют пониженные концентрации биогенных элементов.

Наличие порога в виде желоба Лебеда на глубине ~500 м не позволяет водам, попавшим во впадину ТИНРО, быстро покинуть ее. Поэтому наряду с вентиляцией на гидрохимические характеристики глубинных вод впадины ТИНРО влияет окисление органического вещества и растворение SiO_2 . Особенность впадины ТИНРО проявляется в том, что эти процессы в глубинной зоне (800–1000 м) протекают с высокими скоростями, характерными для шельфа. Кроме того, в глубинной зоне впадины наблюдается значительный дефицит нитратов, предположительно обусловленный денитрификацией, протекающей также с высокой скоростью. Это позволяет предположить, что основную роль в неконсервативном поведении гидрохимических характеристик в глубинных водах впадины ТИНРО играют процессы, происходящие на поверхности донных осадков впадины. Причина такого поведения, вероятно, обусловлена тем, что на дне впадины ТИНРО происходит дополнительное накопление биогенного материала вследствие его переноса с шельфа холодными плотными водами, вентилирующими впадину.

Впадина ТИНРО, являясь ловушкой холодных плотных шельфовых вод, по-видимому, может служить удобным объектом наблюдения гидрометеорологической ситуации в северо-восточной части Охотского моря.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы «Дальний Восток» (15-1-1-010).

Список литературы

Залогин Б.С., Косарев А.Н. Моря : моногр. — М. : Мысль, 1999. — Сер.: Природа мира. — 400 с.

Круц А.А., Лучин В.А. Вертикальная структура толщи вод Охотского моря // Изв. ТИНРО. — 2013. — Т. 175. — С. 234–253.

Лучин В.А. Непериодические течения // Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. — Т. 9 : Охотское море, вып. 1 : Гидрометеорологические условия. — СПб. : Гидрометеоздат, 1998. — С. 233–256.

Мамаев О.И. Т, S-анализ вод Мирового океана : моногр. — Л. : Гидрометеоздат, 1970. — 364 с.

Морошкин К.В. Водные массы Охотского моря : моногр. — М. : Наука, 1966. — 67 с.

Недашковский А.П., Ванин Н.С., Хен Г.В. Пространственно-временная изменчивость соотношений между концентрациями нитратов и фосфатов в Охотском море // Океанол. — 2006. — Т. 46, № 3. — С. 362–375.

Фигуркин А.Л. Изменчивость термохалинного состояния придонных вод северной части Охотского моря // Изв. ТИНРО. — 2011. — Т. 166. — С. 255–274.

Фигуркин А.Л. Океанологические условия северо-западного склона и впадины ТИНРО по данным мониторинга 1993–2013 гг. // Результаты исследований гидрометеорологических и гидрохимических условий в дальневосточных морях и открытых вод Тихого океана: особенность, изменчивость, влияние на распределение и динамику промысловых рыб (промежуточный) : отчет о НИР / ТИНРО. № 27477. — Владивосток, 2013. — С. 109–132.

Фигуркин А.Л. Развитие океанологических условий западной Камчатки по данным мониторинговых наблюдений 1997 и 2000 гг. // Изв. ТИНРО. — 2002. — Т. 130. — С. 103–116.

Хен Г.В., Ванин Н.С., Фигуркин А.Л. Особенности гидрологических условий в северной части Охотского моря во второй половине 90-х гг. // Изв. ТИНРО. — 2002. — Т. 130. — С. 24–43.

Хен Г.В., Устинова Е.И., Фигуркин А.Л. и др. Гидрологические условия северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морей в начале 21 века и ожидаемые тенденции // Вопр. пром. океанол. — 2004. — Вып. 1. — С. 40–58.

Чернявский В.И. Циркуляционные системы Охотского моря // Изв. ТИНРО. — 1981. — Т. 105. — С. 13–19.

Holzer M., Primeau F.W, DeVries T., Matear R. The Southern Ocean silicon trap: Data-constrained estimates of regenerated silicic acid, trapping efficiencies, and global transport paths // J. Geophys. Res. Oceans. — 2014. — Vol. 119. — P. 313–331. DOI: 10.1002/2013JC009356.

Kitani K. An oceanographic study of the Okhotsk Sea — particularly in regard to cold waters // Bull. Far Seas Fish. Res. Lab. — 1973. — № 9. — P. 45–76.

Martin J.H., Knauer G.A., Karl D.M. and Broenkow W.W. VERTEX: carbon cycling in the northeast Pacific // Deep-Sea Res. — 1987. — Vol. 34, № 2. — P. 267–285. DOI: 10.1016/0198-0149(87)90086-0.

Nedashkovsky A.P., Vanin N.S., Khen G.V. Peculiarities of the hydrochemical regime of the TINRO Basin (Northern Okhotsk Sea) // Proc. 19th Intern. Symp. on Okhotsk Sea & Sea Ice. — Japan : Published by Okhotsk Sea & Cold Ocean Research Association, 2004. — P. 163–168.

Yanagi T. Water, Salt, Phosphorus and Nitrogen Budgets of the Japan Sea // J. Oceanogr. — 2002. — Vol. 58. — P. 797–804. DOI: 10.1023/A:1022815027968.

References

Zalogin, B.S. and Kosarev, A.N., *Morya* (Seas), Moscow: Mysl', 1999.

Kruts, A.A. and Luchin, V.A., Vertical water structure in the Okhotsk Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2013, vol. 175, pp. 234–253.

Luchin, V.A., Nonperiodical currents, in *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. T. 9: Okhotskoye more* (Hydrometeorology and Hydrochemistry of Seas, vol 9: Sea of Okhotsk), St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1998, issue 1, pp. 233–256.

Мамаев, О.И., *T, S-analiz vod Mirovogo okeana* (T, S-analysis of Waters in the World Ocean), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970.

Moroshkin, K.V., *Vodnye massy Okhotskogo morya* (Water Masses of the Sea of Okhotsk), Moscow: Nauka, 1966.

Nedashkovskii, A.P., Vanin, N.S., and Khen, G.V., Spatial and temporal variability of the ratios between the nitrate and phosphate concentrations in the Sea of Okhotsk, *Oceanology*, 2006, vol., 46, no. 3, p. 335–347. doi: 10.1134/S0001437006030052

Figurkin A.L., Variability of temperature and salinity for bottom waters in the northern Okhotsk Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2011, vol. 166, pp. 255–274.

Figurkin, A.L., Oceanological conditions of the northwestern slope and TINRO basin according to the 1993–2013 monitoring data, *Otchet Nauchn. Issled. Rab. "Rezultaty issledovaniy gidrometeorologicheskikh i gidrokhimicheskikh uslovii v dal'nevostochnykh moryakh i otkrytykh vod Tikhogo okeana: osobennost', izmenchivost', vliyaniye na raspredeleniye i dinamiku promyslovykh ryb"* (Rep. Res. Work "Results of the Studies of Hydrometeorological and Hydrochemical Conditions in the Far Eastern Seas and Open Waters of the Pacific Ocean: The Specifics, Variability, and Effect on Distribution and Dynamics of Commercial Fish"), Available from TINRO, 2013, Vladivostok, no. 27477, pp. 109–132.

Figurkin, A.L., Seasonal variability of oceanological conditions in the West-Kamchatka region based on the data of monitoring surveys in 1997 and 2000, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2002, vol. 130, pp. 103–116.

Khen, G.V., Vanin, N.S., and Figurkin, A.L., Peculiarity of the hydrological conditions in the northern part of the Okhotsk Sea in the second half of 90s, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2002, vol. 130, pp. 24–43.

Khen, G.V., Ustinova, E.I., Figurkin, A.L., Zuenko, Yu.I., Novikov, Yu.V., Sorokin, Yu.D., Gamanyuk, M.V., Hydrological conditions in the northwestern Pacific Ocean and the Far Eastern seas in the early 21st century and the expected trends, *Vopr. Promysl. Okeanol.*, 2004, vol. 1, pp. 40–58.

Chernyavsky, V.I., Circulational systems of the Sea of Okhotsk, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1981, vol. 105, pp. 13–19.

Holzer M., Primeau F.W., DeVries T., Matear R. The Southern Ocean silicon trap: Data-constrained estimates of regenerated silicic acid, trapping efficiencies, and global transport paths // *J. Geophys. Res. Oceans.* — 2014. — Vol. 119. — P. 313–331. doi: 10.1002/2013JC009356

Kitani K. An oceanographic study of the Okhotsk Sea — particularly in regard to cold waters // *Bull. Far Seas Fish. Res. Lab.* — 1973. — № 9. — P. 45–76.

Martin J.H., Knauer G.A., Karl D.M. and Broenkow W.W. VERTEX: carbon cycling in the northeast Pacific // *Deep-Sea Res.* — 1987. — Vol. 34, № 2. — P. 267–285. doi: 10.1016/0198-0149(87)90086-0

Nedashkovsky A.P., Vanin N.S., Khen G.V. Peculiarities of the hydrochemical regime of the TINRO Basin (Northern Okhotsk Sea) // *Proc. 19th Intern. Symp. on Okhotsk Sea & Sea Ice.* — Japan : Published by Okhotsk Sea & Cold Ocean Research Association, 2004. — P. 163–168.

Yanagi T. Water, Salt, Phosphorus and Nitrogen Budgets of the Japan Sea // *J. Oceanogr.* — 2002. — Vol. 58. — P. 797–804. doi: 10.1023/A:1022815027968

Поступила в редакцию 16.04.18 г.

Принята в печать 13.07.18 г.