

УДК [551.464.6:504.05](269.4)

**ТЯЖЁЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОДЕ  
АТЛАНТИЧЕСКОГО СЕКТОРА АНТАРКТИКИ  
В 79-М РЕЙСЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СУДНА  
«АКАДЕМИК МСТИСЛАВ КЕЛДЫШ»**

© 2020 г. **Н. Ю. Мирзоева<sup>1</sup>, Н. Н. Терещенко<sup>1</sup>, А. А. Параскив<sup>1</sup>,  
В. Ю. Проскурнин<sup>1</sup>, Е. Г. Морозов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей  
имени А. О. Ковалевского РАН», Севастополь, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, Москва, Российская Федерация  
E-mail: [natmirz@mail.ru](mailto:natmirz@mail.ru)

Поступила в редакцию 22.09.2020; после доработки 22.09.2020;  
принята к публикации 25.12.2020; опубликована онлайн 30.12.2020.

Актуальность мониторинга содержания тяжёлых металлов в водах Атлантического сектора Антарктики определяется необходимостью современной оценки качества водной среды для принятия ответственных решений по сохранению морских живых ресурсов в этом уникальном регионе Мирового океана. Цель проводимых исследований — получить новые данные об уровнях и пространственном распределении концентрации микроэлементов, преимущественно тяжёлых металлов, в поверхностной воде. Отбор проб поверхностной морской воды производили в антарктической экспедиции 79-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» на 21 станции в районе проливов Дрейка, Брансфилда, Антарктика, а также в морях Уэдделла и Скотия. Экстракцию и концентрирование растворённой формы 13 микроэлементов (Be, Se, Sb, Tl, V, Pb, Cd, Cu, Zn, Ni, Mo, Co и Fe) осуществляли с помощью диэтилдитиокарбамата натрия и четырёххлористого углерода (CCl<sub>4</sub>). Измерение элементов проводили масс-спектрометрическим методом. Только для Mo на девяти станциях, расположенных в проливах Дрейка и Брансфилда, в северном районе моря Уэдделла, а также возле южного побережья острова Огненная Земля, отмечали превышение его концентрации в морской воде в 1,2–2,8 раза по отношению к ПДК микроэлементов в воде рыбохозяйственных объектов РФ (ПДК<sub>РФ</sub>). Согласно международным нормативно-правовым актам, таким как «Голландские листы», зарегистрированы единичные случаи превышения MPC (maximum permissible concentration — ПДК при краткосрочном воздействии) для Cd и Zn, а также превышение TV (target value — контрольные уровни при хроническом воздействии) для Cu, Pb, Cd, Zn, Se и Co на нескольких станциях. Исследования показали, что, несмотря на ограниченный режим антропогенной нагрузки в этом регионе Южного океана, в морской воде отдельных районов Атлантического сектора Антарктики в современный период зафиксированы повышенные концентрации некоторых микроэлементов, включая тяжёлые металлы. Необходимо дальнейшее изучение источников поступления и особенностей распределения микроэлементов в морских водах Атлантической части Антарктики для объяснения происходящих процессов, а также для принятия мер по рациональному управлению и экологически приемлемому природопользованию в Антарктическом регионе.

**Ключевые слова:** тяжёлые металлы, поверхностная морская вода, Атлантический сектор Антарктики

С 30.11.2019 по 08.05.2020 в рамках международных обязательств Российской Федерации как сторонёй Договора об Антарктике (Договор об Антарктике..., 2020) и Конвенции по сохранению морских живых ресурсов Антарктики (Commission for the Conservation..., 2020) проходил 79-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Атлантический сектор Антарктики (Морозов и др., 2020). Организацию и руководство экспедицией осуществлял Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН. В ходе рейса были решены фундаментальные задачи, поставленные перед учёными России в ряде документов (Стратегия научно-технологического развития..., 2016 ; Стратегия развития морской деятельности..., 2010 ; Стратегия развития деятельности..., 2010). Они указывают на необходимость получения новых результатов для комплексной оценки состояния экосистем Антарктики и влияния на них климатических изменений и других факторов, в том числе ограниченного антропогенного воздействия.

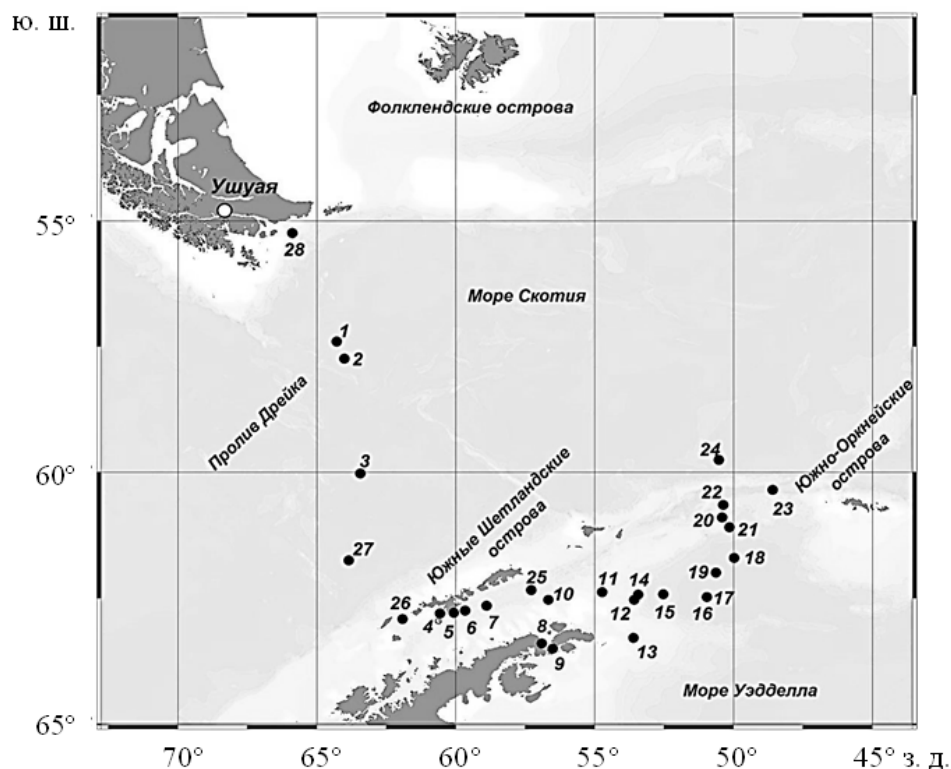
Микроэлементы являются одним из важных компонентов морской среды. Известно, что они играют существенную роль в функционировании живых организмов (Bowen, 1988 ; Mertz, 2013), при этом превышение определённого предела содержания в организме данных веществ приводит к токсическим эффектам (Fuentes et al., 2016 ; Rainbow, 2002). Так, V, Co, Ni, Cu и Zn относятся к умеренно опасным токсикантам, а Cd и Pb — к высоко опасным (Характеристики загрязняющих веществ..., 2016). Эти химические элементы и ряд других тяжёлых металлов входят в перечень веществ, количество которых в природных средах, включая океанические и морские воды, подлежит регулярному мониторингу (Кленкин и др., 2007). Вопрос изучения уровней и перераспределения тяжёлых металлов актуален и для Антарктического региона. Согласно международным договорённостям (Договор об Антарктике..., 2020 ; Commission for the Conservation..., 2020), на Антарктическом материке и в водах Южного океана ведётся ограниченная деятельность человека. Там, например, работают участники научно-исследовательских экспедиций и персонал станций, а также экипажи судов, добывающих морепродукты и обеспечивающих функционирование туристической отрасли. Ранее проведённые исследования показали, что увеличение концентрации тяжёлых металлов в водах близ Антарктиды может быть вызвано и природными процессами (Ahn et al., 1996, 2004 ; Samyshev & Minkina, 2019). К ним, в частности, относятся смыв элементов тектонического происхождения с материка в результате усиленного таяния ледников, вызванного глобальным потеплением в последние десятилетия (Ahn et al., 1996, 2004 ; Samyshev & Minkina, 2019 ; Sanchez et al., 2019), и подъём глубинных вод (Honda et al., 1987).

Актуальность мониторинга тяжёлых металлов в водах Атлантической части Антарктики определяется прежде всего тем, что там формируются благоприятные условия для существования устойчивых скоплений антарктического криля (*Euphausia superba* Dana, 1852) с наибольшей плотностью биомассы в Южном океане (Быкова и др., 2004 ; Samyshev & Minkina, 2019). Этот район является местом современного промысла криля. Многие представители водной биоты, в том числе криль, накапливают тяжёлые металлы до концентраций, многократно превышающих их содержание в воде (Поликарпов и др., 1986 ; Чудиновских, 2016 ; Honda et al., 1987 ; Mertz, 2013). При этом они могут как сами подвергаться токсическим эффектам (особенно их самые чувствительные стадии развития — икра, личинки, молодь), так и служить «передаточным звеном» для токсических веществ по трофическим цепям вплоть до человека, питающегося морепродуктами (Casas et al., 2008 ; Samyshev & Minkina, 2019). Именно поэтому мониторинг уровней концентрации тяжёлых металлов в водах Южного океана представляет значительный научный и практический интерес.

Целью исследования было получить новые данные об уровнях и пространственном распределении микроэлементов (преимущественно тяжёлых металлов) в поверхностной воде для оценки современного качества морской среды природных комплексов Атлантического сектора Антарктики.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

**Районы и материал исследования.** Пробы морской воды для определения содержания растворённых форм микроэлементов, включая тяжёлые металлы, отбирали в период с 10.02.2020 по 01.03.2020 в антарктической экспедиции 79-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Атлантическом секторе Антарктики на 21 станции в районе проливов Дрейка и Брансфилда, пролива Антарктика, отделяющего Антарктический полуостров от группы островов Жуэнвиль, а также в морях Уэдделла и Скотия (рис. 1). Координаты станций отбора проб и характеристики водной среды (температура, солёность) приведены в табл. 1.



**Рис. 1.** Карта-схема района исследований и расположение станций отбора проб

**Fig. 1.** Map of studied area and location of sampling stations

**Методы определения микроэлементов.** Для определения микроэлементов, включая тяжёлые металлы, в водной среде исследуемого региона с борта судна отобрана 21 проба поверхностной (0–5 м) морской воды (рис. 1, табл. 1). Температура и солёность воды (см. табл. 1) определены автоматически с использованием CTD-зонда SBE 911 plus с кассетой, имеющей 21 батометр ёмкостью 5 л каждый. В пробах воды определяли 13 микроэлементов: Be, Se, Sb, Tl, V, Pb, Cd, Cu, Zn, Ni, Mo, Co и Fe. Обработку проб проводили в судовой лаборатории в соответствии с руководящим документом РД 52.10.243-92 (*Руководство по химическому анализу...*, 1993). Метод пробоподготовки основан на экстракционном отделении и концентрировании следовых количеств металлов с помощью диэтилдитиокарбамата натрия и четырёххлористого углерода (CCl<sub>4</sub>). Азотнокислые растворы экстрактов доставляли в береговую лабораторию; измерение изучаемых элементов проводили в Центре коллективного пользования ФИЦ ИнБЮМ «Спектрометрия и хроматография» на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой PlasmaQuant MS Elite (Analytik Jena AG) (ГОСТ Р 56219-2014. *Вода...*, 2015 ; *Масс-спектрометры...*, 2014). Градуировку спектрометра производили с использованием стандартного раствора «Калибровочный

стандарт многоэлементный IV-28, HNO<sub>3</sub>/HF, 125 мл» (Inorganic Ventures). Режим измерения на масс-спектрометре включал 7 повторностей по 10 сканирований для каждого определяемого элемента от 10 000 до 100 000 мкс в зависимости от его ожидаемой концентрации. Вычисление и оформление результатов измерений выполняли согласно ГОСТ Р 56219-2014 и РД 52.10.243-92 (ГОСТ Р 56219-2014. Вода..., 2015 ; Руководство по химическому анализу..., 1993). Средняя относительная ошибка определения составляла не более  $\pm 10\%$ .

**Таблица 1.** Метаданные станций отбора проб

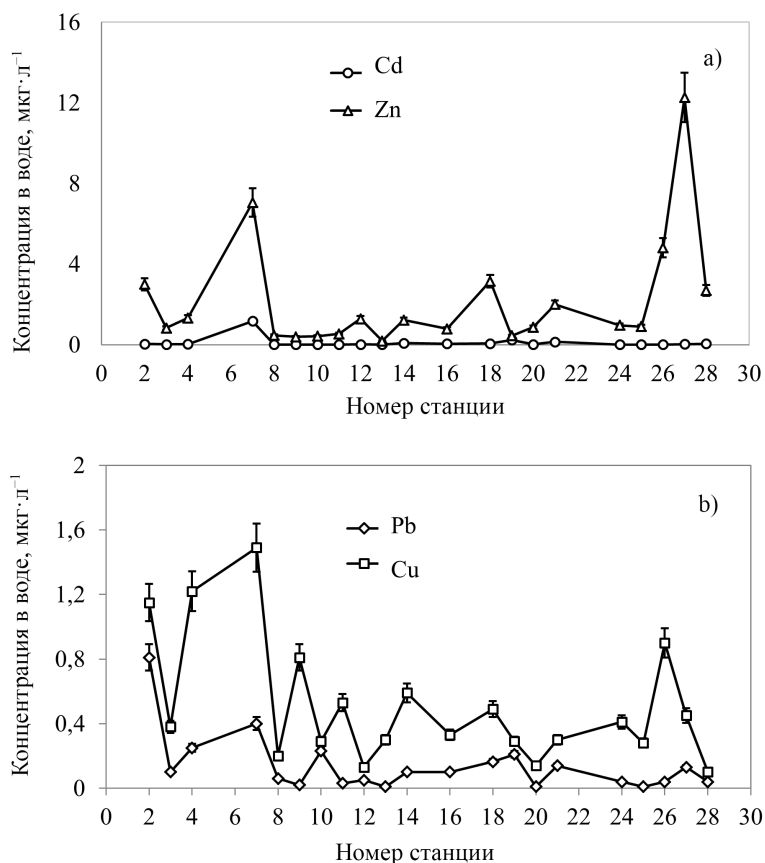
**Table 1.** Metadata of sampling stations

Номер станции	Дата отбора проб	Координаты		Глубина океана, м	Температура воды, °С	Солёность, ПЕС
		ю. ш.	з. д.			
2	10.02.2020	57°44.4074'	63°59.9839'	4130	+8,62	33,92
3	11.02.2020	60°01.5902'	63°25.3325'	3778	+5,73	33,63
4	12.02.2020	62°48.3626'	60°33.7133'	373	+3,16	34,11
7	12.02.2020	62°39.3628'	58°52.8365'	1574	+4,19	34,14
8	13.02.2020	63°24.4219'	56°53.5885'	187	-0,91	34,28
9	13.02.2020	63°30.5974'	56°29.7344'	736	+0,64	34,27
10	14.02.2020	62°32.0215'	56°39.2660'	345	+1,64	34,04
11	14.02.2020	62°23.0395'	54°43.0033'	362	-0,72	34,21
12	15.02.2020	62°32.2922'	53°33.7689'	1030	-0,67	34,32
13	15.02.2020	63°17.4354'	53°35.9791'	362	+0,25	33,88
14	16.02.2020	62°26.0611'	53°25.7918'	1383	-0,02	33,66
16	17.02.2020	62°29.0724'	50°57.3809'	3290	-0,42	33,27
18	18.02.2020	61°42.2470'	49°58.2523'	1743	+0,26	32,74
19	19.02.2020	61°59.7085'	50°37.6094'	700	+1,00	33,97
20	19.02.2020	60°53.9809'	50°24.0082'	940	+0,89	34,03
21	20.02.2020	61°05.5251'	50°08.3302'	2766	+0,31	32,99
24	24.02.2020	59°45.2400'	50°30.7537'	3787	+2,94	34,12
25	26.02.2020	62°20.7280'	57°16.5980'	1331	+3,22	34,12
26	27.02.2020	62°55.1235'	61°54.2073'	800	+2,61	33,8
27	27.02.2020	61°45.3571'	63°50.9526'	3622	+4,17	33,64
28	28.02.2020	55°14.6157'	65°51.9639'	1098	+10,64	33,46

## РЕЗУЛЬТАТЫ

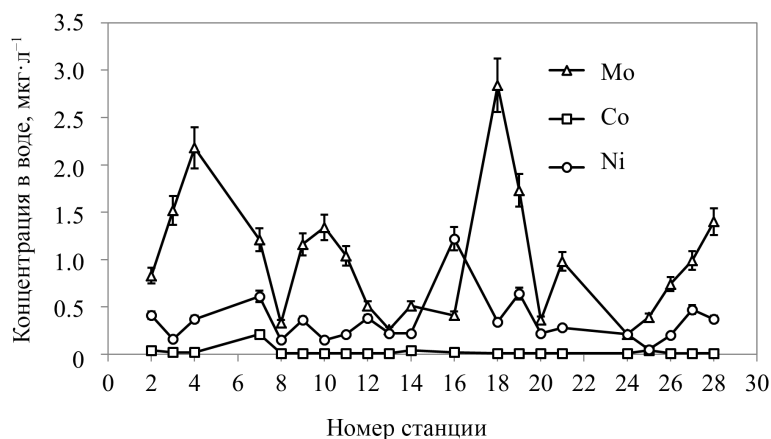
Среди исследованных тяжёлых металлов, как отмечено выше, к наиболее токсичным поллютантам относятся медь, цинк, кадмий и свинец (Кленкин и др., 2007). Результаты измерения их концентраций представлены на рис. 2.

Бериллий и таллий также относятся к высокотоксичным веществам (Характеристики загрязняющих веществ..., 2016), но концентрации этих микроэлементов в пробах морской воды на всех станциях были очень низкими: содержание не превышало 0,005 мкг·л<sup>-1</sup> (Be) и 0,001 мкг·л<sup>-1</sup> (Tl). Измеренные значения были ниже в 60 раз для Be, чем предельно допустимая концентрация для воды рыбохозяйственных водоёмов (ПДК<sub>РХ</sub>), и в 1000 раз ниже для Tl, чем ПДК для воды водоёмов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения (Характеристики загрязняющих веществ..., 2016). Молибден, кобальт и никель характеризуются как токсичные вещества, но им свойственно также канцерогенное и мутагенное действие на живые организмы (Характеристики загрязняющих веществ..., 2016). Результаты определения этих микроэлементов отражены на рис. 3.



**Рис. 2.** Концентрация Cd и Zn (a) и Pb и Cu (b) в поверхностной морской воде в исследованных акваториях Антарктического региона

**Fig. 2.** Concentration of Cd and Zn (a) and Pb and Cu (b) in surface seawater in the studied areas of the Antarctic

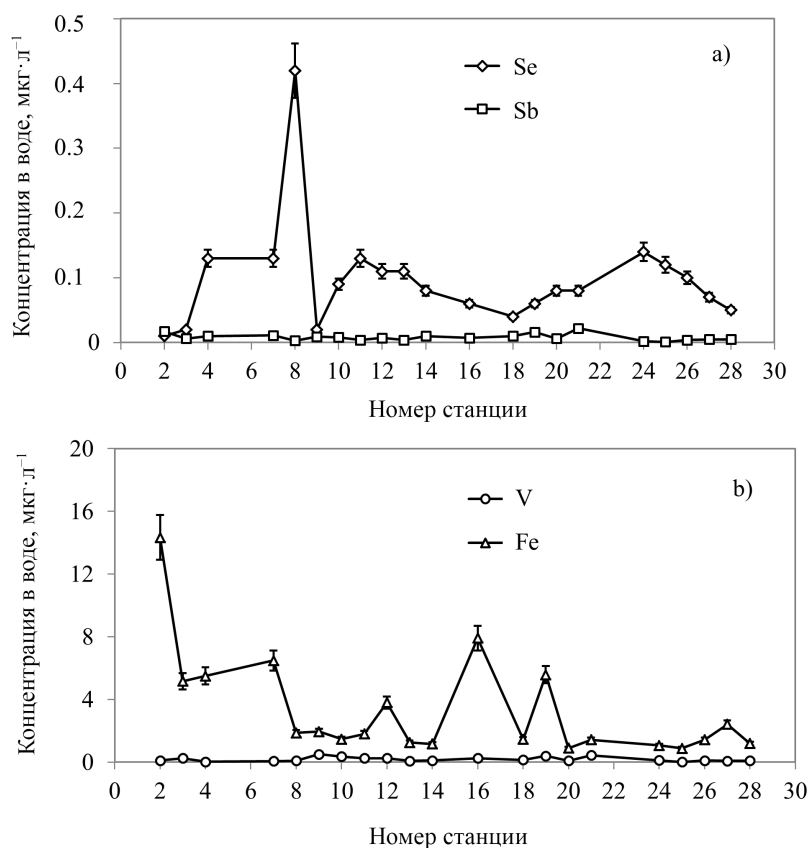


**Рис. 3.** Концентрация Mo, Co и Ni в поверхностной морской воде в исследованных акваториях Антарктического региона

**Fig. 3.** Concentration of Mo, Co, and Ni in surface seawater in the studied areas of the Antarctic

В число исследованных нами микроэлементов также вошли токсические вещества селен и ванадий, вредное опасное вещество сурьма и менее токсичное железо ([Характеристики загрязняющих веществ...](#), 2016). Изменения концентраций этих химических элементов в морской поверхностной воде показаны на рис. 4.

Исследуемые акватории относятся к району промысла антарктического криля, поэтому для характеристики экологического состояния вод Антарктического региона полученные данные были сопоставлены с ПДК<sub>РХ</sub> (Характеристики загрязняющих веществ..., 2016). Кроме того, мы сравнивали свои результаты с нормативными значениями, приведёнными в «Голландских листах», — с МРС (maximum permissible concentration — предельно допустимая концентрация загрязнителя при кратковременном воздействии) и с TV (target value — контрольный уровень концентрации загрязнителя при долговременном (хроническом) воздействии) (Warmer & van Dokkum, 2001), а также с фоновыми концентрациями изучаемых элементов в поверхностной морской воде (Crommentuijn et al., 1997) и в поверхностных водах в открытом океане (Израэль и Цыбань, 2009).



**Рис. 4.** Концентрация микроэлементов Se и Sb (a) и V и Fe (b) в поверхностной морской воде в исследованных акваториях Антарктического региона

**Fig. 4.** Concentration of trace elements Se and Sb (a) and V and Fe (b) in surface seawater in the studied areas of the Antarctic

## ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных результатов (рис. 2, 3, 4) свидетельствует об относительно низких уровнях концентраций микроэлементов в поверхностной морской воде исследованных акваторий Антарктического региона. Однако при сравнении наших данных с концентрациями этих микроэлементов в водах открытого океана (Израэль и Цыбань, 2009) отмечено, что у преимущественного числа изучавшихся химических элементов (Pb, Cd, Zn, Cu, Be, Mo, Co и V) в Антарктическом регионе их максимальные концентрации выше таковых, характерных для вод открытого океана, — в диапазоне от 2,3 раза для Se до 211,3 раза для Zn (табл. 2).



**Таблица 2.** Сравнение измеренных значений концентраций химических элементов в поверхностных океанических водах Антарктического региона с их фоновыми и нормативно установленными концентрациями, принятыми в Российской Федерации и приведёнными в «Голландских листах» ( $\mu\text{г}\cdot\text{л}^{-1}$ )

**Table 2.** Comparison of the measured values of trace element concentrations in surface ocean waters in the Antarctic with their background and normatively established concentrations, accepted in the Russian Federation and given in “Dutch sheets” ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )

Химический элемент	Диапазон измеренных значений концентрации растворённой формы элемента в воде	Фоновые концентрации		Нормативные показатели химических элементов		
		$C_{\text{откр}}^*$	$C_{\text{МВФ}}^{**}$	ПДК <sub>РХ</sub> <sup>***</sup> для рыбохозяйственных водоёмов	МРС <sup>****</sup> — ПДК по «Голландским листам»	TV <sup>*****</sup> — контрольные уровни по «Голландским листам»
Pb	0,01...0,90	$\frac{0,001}{0,034}$	0,02	10	11	0,3
Cd	< 0,002...1,17	$\frac{0,00010}{120}$	0,025	10	0,4	0,08
Zn	0,39...12,26	$\frac{0,003}{0,058}$	0,35	50	9,4	2,9
Cu	0,10...1,49	—	0,25	5	1,5	0,5
Tl	< 0,01	—	—	—	1,6	0,06
Be	< 0,005	—	—	0,3	0,2	0,02
Mo	< 0,21...2,84	—	—	1	290	4,3
Co	0,003...0,21	—	—	5	2,8	0,2
V	< 0,01...0,67	$\frac{1,02}{1,78}$	—	1	4,3	0,9
Ni	0,05...1,22	$\frac{0,116}{0,70}$	—	10	5,1	3,3
Se	< 0,01...0,419	$\frac{0,04}{0,18}$	—	2	5,3	0,09
Sb	< 0,001...0,02	—	—	—	0,4	1,6
Fe	0,76...14,33	$\frac{0,005}{0,140}$	—	50	—	—

**Примечание:** \*  $C_{\text{откр}}$  — поверхностная концентрация элемента в водах открытого океана (фоновая) (минимальное значение — над чертой, максимальное — под чертой) (Израэль и Цыбань, 2009); \*\*  $C_{\text{МВФ}}$  — фоновая концентрация элемента в поверхностных морских водах (Crommentuijn et al., 1997); \*\*\* ПДК<sub>РХ</sub> — предельно допустимая концентрация элемента для водных объектов рыбохозяйственного значения, принятая в Российской Федерации (Характеристики загрязняющих веществ..., 2016); \*\*\*\* МРС (maximum permissible concentration) — предельно допустимая концентрация для растворённой формы элемента в поверхностной воде (при кратковременном воздействии) (Warner & van Dokkum, 2001); \*\*\*\*\* TV (target value) — контрольный уровень недействующей концентрации для растворённой формы элемента при хроническом (долговременном) воздействии в поверхностной воде (Warner & van Dokkum, 2001).

**Note:** \*  $C_{\text{откр}}$  is concentration of an element in surface water of the open ocean (background) (minimum value is above the line, maximum value is below the line) (Israel & Tsyban, 2009); \*\*  $C_{\text{МВФ}}$  is background concentration of an element in surface seawater (Crommentuijn et al., 1997); \*\*\* ПДК<sub>РХ</sub> is maximum permissible concentration of an element for fishery water bodies, accepted in the Russian Federation (Kharakteristika zagryaznyayushchikh veshchestv..., 2016); \*\*\*\* МРС is maximum permissible concentration for dissolved form of an element in surface water (under short-term exposure) (Warner & van Dokkum, 2001); \*\*\*\*\* TV is target value of concentration for dissolved form of an element in surface water considered as safe under chronic (long-term) exposure (Warner & van Dokkum, 2001).

Поскольку исследуемые акватории относятся к району промысла антарктического криля, было проведено сравнение полученных данных с ПДК<sub>РХ</sub> ([Характеристики загрязняющих веществ...](#), 2016). Сопоставление показало, что содержание Pb, Cd, Zn, Cu, Co, Be, Ni, V, Se и Fe не достигало ПДК<sub>РХ</sub> (рис. 2, 3, 4). Их концентрации многократно ниже значений ПДК<sub>РХ</sub> для всех районов исследования (табл. 2). Только для Мо на девяти станциях (рис. 3) отмечены значения, превосходящие ПДК<sub>РХ</sub> в 1,2–2,8 раза. Так, повышенные концентрации молибдена зарегистрированы в центральной части пролива Дрейка (ст. 3), вдоль пролива Брансфилда (ст. 4, 7, 10, 11) и вдоль северного района моря Уэдделла (ст. 9, 18, 19) (рис. 1, 3). Превышение уровня ПДК<sub>РХ</sub> для Мо отмечено также в воде около южного побережья о-ва Огненная Земля (ст. 28) (рис. 1, 3). Согласно «Голландским листам» (табл. 2), концентрации молибдена не достигали MPC и TV, установленных для острого и хронического воздействия загрязнителя ([Warmer & van Dokkum, 2001](#)).

Предполагаем, что некоторое количество молибдена в Атлантическую часть Антарктики может поступать из Южной Америки, так как Чили занимает третье место в мире по его запасам и добыче ([National Minerals Information Center...](#), 2020). Известно ([Меденосный пояс Южной Америки...](#), 2004), что с территории Чили в поверхностный слой Тихого океана поступают континентальные поверхностные воды с возможными примесями Мо и других металлов из районов разработки меденосного пояса Южной Америки. Запасы меди в Чили составляют 82 % от запасов месторождений континента; месторождение Эль-Теньенте, например, разрабатывают с 1904 г., а Чукикамата — с 1915 г. ([Меденосный пояс Южной Америки...](#), 2004). Запасы Мо в молибденовых рудах в Чили оценены в 2,3 млн т, а запасы его как побочного продукта переработки медной руды — в 2,5 млн т (13 % от общемировых запасов) ([Меденосный пояс Южной Америки...](#), 2004 ; [Мировой рынок молибдена...](#), 2020). Молибден, попавший в океанические воды, затем течениями переносится и, возможно, распределяется в том числе и в морских водах вдоль побережья Антарктиды. Наибольшие концентрации Мо отмечены на станциях в центральной части пролива Брансфилда (ст. 7) и северо-восточной части моря Уэдделла (ст. 18) (см. рис. 1). Такую особенность можно объяснить также поступлением молибдена с тальми водами материковых антарктических льдов в морскую среду ([Samyshev & Minkina, 2019](#)) и вероятным влиянием гидрологических процессов на распределение растворённых элементов, в частности трансфронтальным переносом водных масс с севера мощными синоптическими вихрями, наблюдаемыми в проливе Дрейка ([Koshlyakov & Tarakanov, 2011](#)). В этой работе авторы определяли перенос вод вихрями на юг только в термоклине, не выделяя отдельно верхний слой.

Мощное Антарктическое циркумполярное течение в проливе Дрейка переносит на восток поверхностные воды из Тихого океана. За счёт присутствия значительных синоптических вихрей в проливе Дрейка поверхностные воды могут переноситься и в южную его часть. Течение в проливе Брансфилда, направленное на северо-восток вдоль Южных Шетландских островов, является самой южной струёй Антарктического циркумполярного течения.

Группа станций 13–17 находится в западной части моря Уэдделла. В этом районе циклонический (по часовой стрелке) круговорот в море Уэдделла выносит воды в том числе и южной части моря, и здесь концентрации металлов являются низкими, поскольку на антарктическом континенте нет промышленной добычи металлов. Авторы работы ([Sanchez et al., 2019](#)) показывают, что вдоль восточной границы Антарктического полуострова на север течения выносят соединения железа, которые поступают из природного источника на юге. Это подтверждают наши измерения на ст. 16 и 19. На границе морей Скотия и Уэдделла в районе фронта Уэдделла (Weddell-Scotia confluence zone) происходит слияние вод Антарктического циркумполярного течения и вод циклонического круговорота моря Уэдделла, что приводит к поступлению туда как тихоокеанских вод, так и вод моря Уэдделла со своими примесями металлов.



Согласно «Голландским листам», для Tl, Sb, Be, Ni, V и Fe измеренные концентрации были значительно ниже MPC и TV (Warmer & van Dokkum, 2001) для всех станций в Атлантическом секторе Антарктики (см. табл. 2). В изучаемых акваториях, по «Голландским листам» (Warmer & van Dokkum, 2001), превышение MPC зарегистрировано для Cd на ст. 7 и для Zn на ст. 27 (рис. 2а); превышение TV отмечено для Cu на семи станциях, для Zn — на трёх, для Cd и Pb — на двух, для Se — на девяти, для Co — на одной станции (табл. 2, рис. 2, 3, 4).

Значимость гидрологических процессов, прежде всего течений, в распределении повышенных концентраций растворённых форм химических элементов в водах Антарктики доказана схожестью распределения исследуемых нами микроэлементов в морской среде по станциям отбора проб (рис. 2, 3, 4). Известно, что прибрежное пограничное течение в проливе Брансфилда является важным фактором циркуляции вод в этом районе. Совместно с Антарктическим циркумполярным течением в проливе Дрейка оно играет существенную роль в переносе вод на восток (Морозов, 2007).

По итогам одного исследования сложно определить основные источники поступления микроэлементов в антарктические воды. Оно может быть результатом как антропогенных, так и природных процессов на материке и в толще вод, а также в других районах планеты; микроэлементы могут достигать региона Антарктиды в результате трансграничного переноса веществ (Кленкин и др., 2007; Характеристики загрязняющих веществ..., 2016; Fuentes et al., 2016; Samyshev & Minkina, 2019; Sanchez et al., 2019).

**Заключение.** Получены новые данные по уровням и пространственному распределению 13 микроэлементов (Be, Se, Sb, Tl, V, Pb, Cd, Cu, Zn, Ni, Mo, Co и Fe), включая тяжёлые металлы, в современный период в Антарктическом регионе. Только концентрации Mo превышали ПДК<sub>РХ</sub> на девяти станциях.

Отмечены единичные случаи превышения MPC для Cd и Zn; зарегистрировано превышение TV на нескольких станциях для Cu, Pb, Cd, Zn, Se и Co, согласно «Голландским листам».

Наблюдавшиеся уровни содержания микроэлементов в морской воде Антарктического региона свидетельствуют о наличии повышенных концентраций отдельных тяжёлых металлов, несмотря на ограниченный режим антропогенной нагрузки на этот район Южного океана.

Повышенные концентрации элементов по сравнению с установленными ПДК<sub>РХ</sub>, MPC и TV в северной части пролива Дрейка связаны, возможно, со стоком вод с промышленных предприятий Чили, более 100 лет занимающихся добычей и переработкой меди и молибдена, однако не исключено и влияние природных источников. Повышенная концентрация железа в северной части моря Уэдделла (бассейн Пауэлла) определяется, вероятнее всего, поступлением соединённый железа из природных источников на западе моря Уэдделла, что согласуется с более ранними исследованиями.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Комплексные исследования современного состояния экосистемы Атлантического сектора Антарктики» (№ гос. регистрации АААА-А19-119100290162-0) и государственного задания ИО РАН «Оценка современного состояния природных комплексов Атлантического сектора Южного океана и их разнопериодной изменчивости (экосистемы, биопродуктивность, гидрофизика, гидро- и геохимия)» (№ гос. регистрации АААА-А18-118051490130-3).*

**Благодарность.** Авторы выражают искреннюю благодарность Институту океанологии имени П. П. Ширшова РАН, Атлантической базе флота и экипажу НИС «Академик Мстислав Келдыш» за отличную организацию и проведение на высоком уровне морской экспедиции в Атлантический сектор Антарктики. Авторы благодарны сотрудникам ЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ, а также ведущему инженеру ОРХБ Н. В. Кравченко за помощь в измерениях по данному исследованию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Быкова В. М., Быков В. П., Кривошеина Л. И., Радакова Т. Н., Гройсман М. Я., Глазунов О. И. Основные направления комплексного использования криля // *Труды ВНИРО*. 2004. Т. 143. С. 17–32. [Bykova V. M., Bykov V. P., Krivosheina L. I., Radakova T. N., Groisman M. Ya., Glazunov O. I. The main directions in complex use of krill. *Trudy VNIRO*, 2004, vol. 143, pp. 17–32. (in Russ.)]
2. ГОСТ Р 56219-2014. Вода. Определение содержания 62 элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой : дата введения 01.01.2016. Москва : Стандартинформ, 2015. 36 с. [*GOST R 56219-2014. Water. Determination of 62 elements by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) method* : data vvedeniya 01.01.2016. Moscow : Standartinform, 2015, 36 p. (in Russ.)]
3. Договор об Антарктике. Международный договор от 01 декабря 1959 года (с дополнительным протоколом от 04 октября 1991 года) // *Техэксперт. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации* : официальный сайт. 2020. [Dogovor ob Antarktike. Mezhdunarodnyi dogovor ot 01 dekabrya 1959 goda (s dopolnitelnym protokolom ot 04 oktyabrya 1991 goda) // *Tekhekspert. Elektronnyi fond pravovoi i normativno-tekhnicheskoi dokumentatsii* : ofitsial'nyi sait. 2020. (in Russ.)]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1901494> [accessed: 14.09.2020].
4. Израэль Ю. А., Цыбань А. В. *Антропогенная экология океана*. Москва : Флинта : Наука, 2009. 519 с. [Israel Yu. A., Tsyban A. V. *Anthropogenic Ecology of the Ocean*. Moscow : Flinta : Nauka, 2009, 519 p. (in Russ.)]
5. Кленкин А. А., Корпакова И. Г., Павленко Л. Ф., Темердашева З. А. *Экосистема Азовского моря: антропогенное загрязнение / Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства*. Краснодар : AzNIIRX, 2007. 324 с. [Klenkin A. A., Korpakova I. G., Pavlenko L. F., Temerdasheva Z. A. *Ekosistema Azovskogo morya: antropogennoe vozdeistvie / Azovskii nauchno-issledovatel'skii institut rybnogo khozyaistva*. Krasnodar : AzNIIRKh, 2007, 324 p. (in Russ.)]
6. *Масс-спектрометры с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС): PlasmaQuant MS и PlasmaQuant MS Elite*. Инструкция по эксплуатации. Analytik Jena AG. Издание 12/2014. Германия, 2014. 143 с. [*Mass-spektrometriya s induktivno-svyazannoi plazmoi (IPS-MS): PlasmaQuant MS i PlasmaQuant MS Elite*. Instruktsiya po ekspluatatsii. Analytik Jena AG. Izdanie 12/2014. Germany, 2014, 143 p. (in Russ.)]
7. *Меденосный пояс Южной Америки*. Большая российская энциклопедия. 2004 : [сайт]. [*Medenosnyi poyas Yuzhnoi Ameriki*. Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya. 2004 : [site]. (in Russ.)]. URL: <https://bigenc.ru/geology/text/2197422> [accessed: 14.09.2020].
8. *Мировой рынок молибдена // Мировые товарные рынки* : [сайт]. 2020. [Mirovoi rynok molibdena // *Mirovye tovarnye rynki* : [site]. 2020. (in Russ.)]. URL: <https://www.cmmarket.ru/markets/moworld.htm> [accessed: 17.09.2020].
9. Морозов Е. Г. Течения в Проливе Брансфилд // *Доклады Академии наук*. 2007. Т. 415, № 6. С. 823–825. [Morozov E. G. Tcheniya v Prolive Bransfild. *Doklady Akademii nauk*, 2007, vol. 415, no. 6, pp. 823–825. (in Russ.)]
10. Морозов Е. Г., Спиридонов В. А., Молодцова Т. Н., Фрей Д. И., Демидова Т. А., Флинт М. В. Исследования экосистемы атлантического сектора Антарктики (79-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // *Океанология*, 2020. Т. 60, № 5. С. 823–825. [Morozov E. G., Spiridonov V. A., Molodtsova T. N., Frey D. I., Demidova T. A., Flint M. V. Investigations of the ecosystem in the Atlantic sector of Antarctica (Cruise 79 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh). *Oceanology*, 2020, vol. 60, no. 5, pp. 823–825. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.31857/S0030157420050172>
11. Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н. *Морская динамическая радиохемоэкология*. Москва : Энергоатомиздат, 1986. 176 с. [Polikarpov G. G., Egorov V. N. *Morskaya dinamicheskaya radiokhemoekologiya*. Moscow : Energoatomizdat, 1986, 176 p. (in Russ.)]
12. *Руководство по химическому анализу морских вод* : руководящий документ РД 52.10.243-92. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1993. 264 с. [*Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh vod* : rukovodyashchii

- dokument RD 52.10.243-92. Saint Petersburg : Gidrometeoizdat, 1993, 264 p. (in Russ.). URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293815/4293815261.pdf> [accessed: 14.09.2020].
13. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации : указ Президента РФ от 01 декабря 2016 г. № 642 // *Собрание законодательства РФ*. 2016. № 49. Ст. 6887. [Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii : ukaz Prezidenta RF ot 01 dekabrya 2016 goda no. 642 // *Sobranie zakonodatel'stva RF*, 2016, no. 49, st. 6887. (in Russ.)]
  14. Стратегия развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года : распоряжение Правительства РФ от 8 декабря 2010 г. № 2205-р // *Собрание законодательства РФ*. 20.12.2010. № 51. Ст. 6954. [Strategiya razvitiya morskoi deyatel'nosti Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda : rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 8 dekabrya 2010 goda no. 2205-r // *Sobranie zakonodatel'stva RF*, 20.12.2010, no. 51, st. 6954. (in Russ.)]
  15. Стратегия развития деятельности Российской Федерации в Антарктике на период до 2020 года и на более отдалённую перспективу : распоряжение Правительства РФ от 30 октября 2010 г. № 1926-р // *Собрание законодательства РФ*. 08.11.2010. № 45. Ст. 5914. [Strategiya razvitiya deyatel'nosti Rossiiskoi Federatsii v Antarktike na period do 2020 goda i na bolee otdalennuyu perspektivu : rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 30 oktyabrya 2010 goda no. 1926-r // *Sobranie zakonodatel'stva RF*, 08.11.2010, no. 45, st. 5914. (in Russ.)]
  16. *Характеристики загрязняющих веществ : из раздела «II. Для водных объектов» ... : справочник / сост. Н. В. Костылева, Н. Л. Рогачёв. Пермь : Изд-во ФГБУ УралНИИ «Экология», 2016. 296 с. [Kharakteristika zagryaznyayushchikh veshchestv : iz razdela "II. Dlya vodnykh ob"ektov" ... spravochnik / N. V. Kostyleva, Y. K. Rogachev (Contrs). Perm : Izd-vo FGBU UralNII "Ekologiya", 2016, 296 p. (in Russ.)]*
  17. Чудиновских Е. С. Состав и распределение фитопланктона в районе Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» в 2007/8 гг. // *Природная среда Антарктики: современное состояние изученности* : материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Нарочь, Беларусь, 18–21 мая 2016 г. Минск : Конфидо, 2016. С. 370–378. [Chudinovskikh E. S. Sostav i raspredelenie fitoplanktona v raione Ukrain-skoi antarkticheskoi stantsii "Akademik Vernadskii" v 2007/8 gg. In: *Природная среда Антарктики: современное состояние изученности* : материалы II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Naroch, Belarus, 18–21 May 2016. Minsk : Konfido, 2016, pp. 370–378. (in Russ.)]
  18. Ahn I.-Y., Lee S. H., Kim K. T., Shim J. H., Kim D. Y. Baseline heavy metal concentrations in the Antarctic clam, *Laternula elliptica* in Maxwell Bay, King George Island, Antarctica. *Marine Pollution Bulletin*, 1996, vol. 32, iss. 8–9, pp. 592–598. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(95\)00247-K](https://doi.org/10.1016/0025-326X(95)00247-K)
  19. Ahn I.-Y., Chung K. H., Cho H. J. Influence of glacial runoff on baseline metal accumulation in the Antarctic limpet *Nacella concinna* from King George Island. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, vol. 49, no. 1, pp. 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.03.008>
  20. Bowen H. J. M. Trace elements in biological samples. In: *Nuclear Analytical Techniques in Medicine / R. Cesareo (Ed.)*. Amsterdam ; Oxford ; New York ; Tokyo : Elsevier, 1988, chap. 1, pp. 1–17. (Techniques and Instrumentation in Analytical Chemistry ; vol. 8). [https://doi.org/10.1016/S0167-9244\(08\)70218-X](https://doi.org/10.1016/S0167-9244(08)70218-X)
  21. Casas S., Gonzalez J. L., Andral B., Cossa D. Relation between metal concentration in water and metal content of marine mussels (*Mytilus galloprovincialis*): Impact of physiology. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, vol. 27, iss. 7, pp. 1543–1552. <https://doi.org/10.1897/07-418.1>
  22. *Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCAMLR)* : [site]. URL: <https://www.ccamlr.org/> [accessed: 14.09.2020].
  23. Crommentuijn T., Polder M. D., van de Plassche E. J. *Maximum Permissible Concentration and Negligible Concentration for Metals, Taking Background Concentration Into Account*. Bilthoven, Netherlands : National Institute of Public Health and the Environment, 1997, 260 p. (RIVM Report no. 601501 001).
  24. Fuentes V., Alurralde G., Meyer B., Aguirre G. E., Canepa A., Wöflf A.-C., Hass A. C., Williams G. N., Schloss I. Glacial melting:

- An overlooked threat to Antarctic krill. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, art. no. 27234. <https://doi.org/10.1038/srep27234>
25. Honda K., Yamamoto Y., Tatsukawa R. Distribution of heavy metals in Antarctic marine ecosystem. *Proceedings of the NIPR Symposium on Polar Biology*, 1987, vol. 1, pp. 184–197.
26. Koshlyakov M. N., Tarakanov R. Yu. Water transport across the subantarctic front and the global ocean conveyor belt. *Oceanology*, 2011, vol. 51, no. 5, pp. 721–735. <https://doi.org/10.1134/S0001437011050110>
27. Mertz W. (Ed.) *Trace Elements in Human and Animal Nutrition*. 5<sup>th</sup> edition. Orlando, FL : Academic Press, 2013, 499 p.
28. National Minerals Information Center. *Molybdenum Statistics and Information* : [site]. URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/molybdenum/mcs-2016-molyb.pdf> [accessed: 14.09.2020].
29. Rainbow P. S. Trace metal concentrations in aquatic invertebrates: Why and so what? *Environmental Pollution*, 2002, vol. 120, iss. 3, pp. 497–507. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00238-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00238-5)
30. Samyshev E. Z., Minkina N. I. Coastal ecosystem contamination by heavy metals as an indicator of climate change in Antarctica. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 228–236. <https://doi.org/10.1166/jctn.2019.7729>
31. Sanchez N., Reiss C. S., Holm-Hansen O., Hewes C. D., Bizsel K. C., Ardelan M. V. Weddell-Scotia confluence effect on the iron distribution in waters surrounding the South Shetland (Antarctic Peninsula) and South Orkney (Scotia Sea) Islands during the Austral Summer in 2007 and 2008. *Frontiers in Marine Science*, 2019, vol. 6, art. no. 771 (16 p.). <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00771>
32. Warmer H., van Dokkum R. *Water Pollution Control in the Netherlands : Policy and Practice 2001*. Lelystad, Netherlands : RIZA, 2002, 76 p. (RIZA report 2002.009).

**HEAVY METALS IN SURFACE WATER  
OF THE ATLANTIC SECTOR OF THE ANTARCTIC  
DURING THE 79<sup>TH</sup> CRUISE  
OF THE RESEARCH VESSEL “AKADEMIK MSTISLAV KELDYSH”**

**N. Yu. Mirzoeva<sup>1</sup>, N. N. Tereshchenko<sup>1</sup>, A. A. Paraskiv<sup>1</sup>,  
V. Yu. Proskurnin<sup>1</sup>, and E. G. Morozov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation

<sup>2</sup>P. P. Shirshov Institute of Oceanology, Moscow, Russian Federation

E-mail: [natmirz@mail.ru](mailto:natmirz@mail.ru)

Relevance of monitoring heavy metals content in the water of the Atlantic sector of the Antarctic is due to the need for a current assessment of quality of the marine environment for making responsible decisions on the conservation of marine living resources in this unique area of the World Ocean. The aim of the study was to obtain new data on levels and spatial distribution of concentrations of trace elements, mainly heavy metals, in surface water. Sampling of surface seawater was carried out during the Antarctic expedition of the 79<sup>th</sup> cruise of the RV “Akademik Mstislav Keldysh” at 21 stations in the area of the Drake Passage, the Bransfield Strait, and the Antarctic Sound, as well as in Weddell and Scotia seas. Extracting and concentrating of dissolved form of 13 trace elements (Be, Se, Sb, Tl, V, Pb, Cd, Cu, Zn, Ni, Mo, Co, and Fe) were performed using sodium diethyldithiocarbamate and carbon tetrachloride (CCl<sub>4</sub>). The elements were measured by mass spectrometry. Among all trace elements content, only Mo concentration in seawater at 9 stations, located in the Drake Passage, the Bransfield Strait, northern Weddell Sea, and off the southern coast of Tierra del Fuego Island, exceeded 1.2–2.8 times maximum permissible concentration of trace elements in fishery water bodies of the Russian Federation (MPC<sub>F</sub>). According to international regulatory legal acts, such as “Dutch sheets”, there were single cases of exceeding MPC (maximum permissible concentration under short-term exposure) for Cd and Zn, as well as exceeding TV (target value under chronic exposure) for Cu, Pb, Cd, Zn, Se,

and Co at several stations. The research has shown as follows: despite limited anthropogenic pressure on this area of the Southern Ocean, in seawater of some regions of the Atlantic sector of the Antarctic, increased concentrations of several trace elements, *inter alia* heavy metals, are recorded. Further study of the sources of trace elements intake and the peculiarities of their distribution in seawater of the Atlantic sector of the Antarctic is required in order to account for ongoing processes, take measures for rational management, and provide ecologically acceptable use of natural resources in the Antarctic.

**Keywords:** heavy metals, surface seawater, Atlantic sector of the Antarctic