

УДК 592

ПОСЛЕДСТВИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВРЕДОНОСНОГО “ЦВЕТЕНИЯ” ВОДОРОСЛЕЙ НА ДОННЫХ БЕСПОЗВОНОЧНЫХ НА ШЕЛЬФЕ ВОСТОЧНОЙ КАМЧАТКИ

© 2024 г. Т. Б. Морозов¹ (ORCID: 0000-0001-6782-6921),
Н. П. Санамян^{2,*} (ORCID: 0000-0002-9987-0668),
К. Э. Санамян² (ORCID: 0000-0002-7460-3985)

¹Камчатский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Петропавловск-Камчатский 683000, Россия

²Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН,

Петропавловск-Камчатский 683000, Россия

*e-mail: actinaria@sanamyan.com

Поступила в редакцию 16.01.2024 г.

После доработки 17.06.2024 г.

Принята к публикации 26.06.2024 г.

Проведено сравнение данных учетных донных траловых съемок, проведенных на шельфе Кроноцкого и Авачинского заливов и юго-восточного побережья п-ова Камчатка на глубинах 65–210 м в 2018 и 2022 гг., до и после вредоносного “цветения” микроводорослей, которое произошло у берегов Камчатки осенью 2020 г. Полученные результаты указывают на значительное уменьшение видового разнообразия, плотности поселения и биомассы донных организмов в зоне нижней сублиторали в 2022 г. по сравнению с 2018 г. Наименее пострадавшим оказался самый северный район (Кроноцкий залив), наиболее сильно пострадал самый южный район, у юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный, где снижение биомассы и видового разнообразия оказалось катастрофическим. Это согласуется с данными спутникового мониторинга концентрации хлорофилла *a* у берегов Камчатки в сентябре 2020 г. По этим данным, площадь самой высокой концентрации хлорофилла *a* была наибольшей в районе Авачинского залива и у юго-восточного побережья Камчатки, где отмечено наиболее сильное снижение биоразнообразия морских беспозвоночных.

Ключевые слова: бентос, биомасса, биоразнообразие, донная траловая съемка, “красный прилив”, массовая вегетация микроводорослей, обеднение фауны

DOI: 10.31857/S0134347524060034

Осенью 2020 г. у берегов Камчатки в результате вредоносного “цветения” водорослей (ВЦВ) возникла чрезвычайная экологическая ситуация, которая привела к массовой гибели донных животных (Токранов и др., 2021). Основной причиной ВЦВ послужили положительные аномалии температуры морской поверхности, наблюдавшиеся в июле–сентябре 2020 г. в прибрежных акваториях всего п-ва Камчатка, в то время как антропогенные, а также другие природные факторы не могли служить причиной возникновения экологического происшествия в этом регионе (Бондур и др., 2021). Причиной

“красного прилива” в этом случае впервые стало активное размножение динофлагеллят рода *Karenia* (см. Orlova et al., 2022). Его последствия привели к массовой гибели донных животных и нанесли катастрофический урон бентосным сообществам в верхней сублиторали у юго-восточного побережья Камчатки (Коростелев, Данилин, 2023; Санамян и др., 2023), не затронув, однако, литоральную зону (Данилин и др., 2021, Токранов, 2022). Достаточная аэрация литорали и избегание динофлагеллятами рода *Karenia* опресненных береговыми стоками прибрежных участков (Санамян и др. 2023; Orlova et al., 2022)

позволили избежать заморных явлений и масовой гибели гидробионтов.

При проведении учетных донных траловых съемок на шельфе Камчатки авторы обнаружили большую разницу в биомассе и видовом составе донных гидробионтов до и после 2020 г., когда в верхней сублиторали произошла массовая гибель бентосных организмов (Санамян и др., 2023; Orlova et al., 2022). В настоящей работе мы приводим данные траловых съемок, выполненных в одних и тех же районах в июне–июле 2018 и 2022 гг. в зоне нижней сублиторали, чтобы оценить последствия ВЦВ осенью 2020 г. на всем шельфе юго-восточного побережья Камчатки.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Материалом послужили данные по прилову беспозвоночных (исключая промысловых крабов и крабоидов), собранные в течение двух комплексных учетных донных траловых съемок на шельфе Восточной Камчатки от мыса Кроноцкий до мыса Лопатка в 2018 и 2022 гг. на НИС МРТК “Инженер Мартынов” и НИС МРТК-316. В качестве орудия лова использовали донный трал 18.8/28.5 м проект 591. Трал имеет четырехластную переднюю часть длиной по топенанту 22.36 м и двухластный мешок длиной 11.5 м. Мелкоячеистая вставка в кутке из дели имеет ячейку 10×10 мм. Верхняя подбора трала имеет длину 18.8 м и оснащена кухтылями общей подъемной силой 705 Н. Нижняя подбора оснащена регулировочными и грунтропной цепями общей массой 99.5 кг. При скорости траления 3.0 узла расчетное раскрытие трала составляет 3.5 м по вертикали и 16 м по горизонтали. Вооружение трала представлено сферическими траловыми досками площадью 2.5 м². Трал был оснащен датчиками скорости/симметрии хода трала (арт. 109152), а также датчиками положения досок SS4 DoorSensor (арт. 109503), включая функции измерения температуры (арт. 109148), глубины (арт. 109149-01) и определения углов (арт. 109147-01).

Траления проводили при скорости 3.0 узла на глубинах 65–210 м в течение 30 мин в 2018 г. и в течение 15 мин в 2022 г. Всего в 2018 г. было выполнено 86 тралений в Кроноцком, Аванчинском заливах и на шельфе юго-восточной

части п-ва Камчатка южнее мыса Поворотный; в 2022 г. – 83 траления в тех же районах (рис. 1). Из уловов выбирали всех беспозвоночных и определяли по возможности до вида (Макаров, 1938; Дьяконов, 1949, 1950; Виноградов, 1950; Голиков, 1963, 1980; Скарлато, 1981; Несис, 1982; Кантор, Сысоев, 2006; Fraussen, Terrup, 2007; Jewett et al., 2015), после чего подсчитывали количество особей и массу каждого вида. При невозможности выборки всех беспозвоночных определенной группы (например, морских ежей), брали кратную часть улова, определяли до вида, подсчитывали, взвешивали с последующим пересчетом на весь улов группы в трале.

Плотность поселения (N) и удельную биомассу (M) групп животных на единицу обловленной площади (квадратный километр) для каждой траловой станции рассчитывали площадным методом по формулам:

$$N = \frac{n}{S} = \frac{n}{1.852vt0.001a} \text{ и } M = \frac{m}{S} = \frac{m}{1.852vt0.001a},$$

где n – число (экз.), m – масса (кг) представителей вида или группы в улове; S – площадь облова при тралении (км²); v – скорость траления (узлы), t – время траления (часы); a – горизонтальное раскрытие трала (м) (Аксютина, 1968; Шунтов и др., 2014). Коэффициент уловистости для всех групп принимали за 1 (100%). Расчеты выполняли в программе MS Excel. Схемы распределения построены в программе Surfer 13 методом Kriging. Запас (абсолютная биомасса) рассчитывали в программе ГИС “Chartmaster” методом сплайн-аппроксимации плотности запаса, который опирается на сглаживание с использованием сплайн-функции результатов измерений в хаотически расположенных точках, и последующее интегрирование по обследуемой области (Столяренко, Иванов, 1988; Бизиков и др., 2013; Stolyarenko, 1986, 1987).

При расчете запаса в программе “Chartmaster” выставляли следующие параметры: размерность сетки – 500×500, параметр сглаживания – 0, параметр влияния глубины – 500.

Сбор гидрологической информации (температура, соленость) осуществляли с помощью

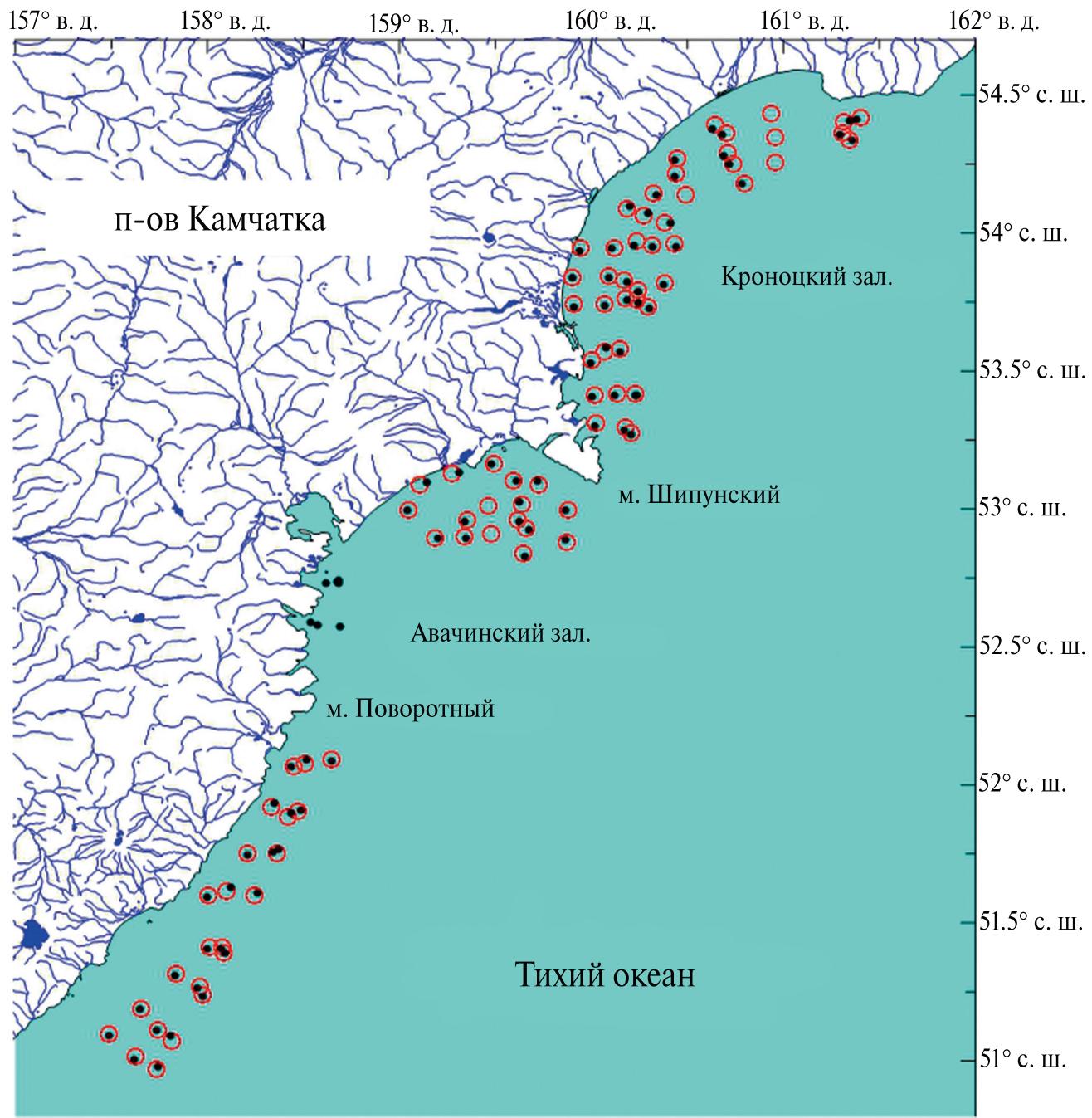


Рис. 1. Карта-схема донных траловых станций. Черными кружками обозначены места тралений 2018 г., красными окружностями – места тралений 2022 г.

гидрологических зондов CTD 48 Sea&Sun в 2018 г. и JFE ASTD-102 в 2022 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В анализ были включены три района исследования: Кроноцкий залив (от мыса Кроноцкий до мыса Шипунский), Авачинский залив

(от мыса Шипунский до мыса Поворотный) и шельф юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный (рис. 1). В каждом районе по результатам траловой съемки, проведенной в 2018 и 2022 гг., для 11-ти групп донных животных (в ранге типа, класса или отряда) вычислены: средняя и максимальная удельная биомасса ($\text{кг}/\text{км}^2$), средняя и максимальная

Таблица 1. Таксономический состав, средняя (Med) и максимальная (Max) удельная биомасса; средняя (Med) и максимальная (Max) плотность поселения; частота встречаемости (в долях единицы); параметры максимальных уловов (температура, соленость, глубина); доля в средней биомассе и абсолютная биомасса беспозвоночных из прилова учетной донной траповой съемки 2018 г. в трех районах на шельфе Восточной Камчатки от мыса Кроноцкий до мыса Лопатка

Группа	Удельная биомасса, кг/км ²			Плотность поселения, экз./км ²			Частота встречаемости			Параметры максимальных уловов			Доля в средней биомассе, %		Абсолютная биомасса, кг
	Med	Max	Med	Max	Med	Max	Med	Max	Med	°C	соленость, psu	глубина, м	Med	Max	
Шельф Кроноцкого залива															
Porifera	0.13	4.63	—	—	0.05	1.89	32.98	88	< 1	589.53					
Actiniaria	3.23	34.16	49	584	0.5	1.58	33.06	204	1	16311.78					
Cephalopoda	46.67	975.37	17	315	0.2	1.57	33.03	110	12	220230.4					
Bivalvia	1.28	32.45	4	67	0.13	1.74	33.05	140	< 1	—					
Gastropoda	19.69	151.83	251	1952	0.7	1.55	33.04	170	5	134959.9					
Astroidea	23.3	137.63	298	4900	0.7	—	—	65	6	74970.8					
Echinoidea	249.37	3208.92	11986	186174	0.63	—	—	64	64	800576.9					
Holothuroidea	0.08	3.15	1	45	0.03	2.22	32.92	80	< 1	—					
Ophiuroidea	12.27	347.45	223	4180	0.3	—	—	105	3	160406.9					
Decapoda	9.05	80.87	2490	51555	0.8	—	—	147	2	67094					
Asciidiacea	27.96	498.2	426	7839	0.38	2.022	32.98	70	7	194171.5					
Шельф Авачинского залива															
Porifera	0.505	5.49	—	—	0.14	2.1	32.9	76	< 1	581.53					
Actiniaria	0.85	11.05	14	104	0.36	4.5	32.38	95	< 1	563.2					
Cephalopoda	10.48	209.76	24	259	0.27	1.86	32.98	141	3	34702.5					
Bivalvia	33.19	584.18	47	831	0.18	1.73	33	111	10	—					
Gastropoda	10.71	108.75	128	934	0.45	4.5	32.38	95	3	7316.3					
Astroidea	19.5	225.4	112	1141	0.68	4.5	32.38	95	6	13795.1					
Echinoidea	188.89	2037.64	8454	108674	0.73	1.86	32.98	141	59	342729.3					
Holothuroidea	3.02	48.03	10	156	0.14	4.5	32.38	95	1	3002.71					
Ophiuroidea	9.56	95.09	1846	25471	0.45	1.86	32.98	141	3	22900.1					
Decapoda	6.17	76.22	1271	22361	0.68	2.33	32.87	111	2	3797.4					
Asciidiacea	40.91	294.87	374	2270	0.59	4.97	32.2	93	13	65692.51					
Шельф юго-восточного побережья Камчатки															
Porifera	1.55	16.95	—	—	0.23	1.67	33.06	155	< 1	2674.39					
Actiniaria	8.6	67.42	133	899	0.45	2.01	32.98	160	2	17189					
Cephalopoda	62.76	613.54	30	157	0.4	1.81	33.03	105	16	138629.4					

Окончание таблицы 1

Bivalvia	0.12	1.39	6	67	0.08	1.67	155	<	—
Gastropoda	20.49	50.88	317	1167	0.58	—	190	5	41140.1
Astroidea	11.19	167.15	102	359	0.58	1.95	118	3	21681.1
Echinoidea	258.24	2562.03	9546	70119	0.48	1.67	155	67	445718
Holothuroidea	0	0	0	0	0	—	—	0	0
Ophiuroidea	5.67	43.64	277	1236	0.38	2.37	33.24	2	10324.1
Decapoda	13.24	56.83	1008	5900	0.6	2.37	33.24	4	28352.5
Asciidaeae	3.14	57.93	104	2045	0.13	2.37	33.24	1	5863.9

Таблица 2. Таксономический состав, средняя (Med) и максимальная (Max) удельная биомасса, средняя (Med) и максимальная (Max) плотность поселения, частота встречаемости (в долях единицы), параметры максимальных уловов (температура, соленость, глубина), доля в средней биомассе и абсолютная биомасса беспозвоночных из прилова учетной донной траловой съемки 2022 г. в трех районах на шельфе Восточной Камчатки от мыса Кроноцкий до мыса Лопатка

Группа	Удельная биомасса, кг/км ²			Плотность поселения, экз./км ²	Частота встречаемости	Параметры максимального улова	Шельф Кроноцкого залива			Доля в средней биомассе, %	Абсолютная биомасса, кг
	Med	Max	Med	Max			°C	соленость, psu	глубина, м		
Porifera	0	0	0	0	0	—	—	—	—	—	—
Actiniaria	2.03	45.17	25	405	0.23	1	32.83	80	1	9219.91	119979.6
Cephalopoda	2.63	112.37	2	45	0.05	1.45	33.13	210	2	—	—
Bivalvia	0.7	29.89	3	135	0.02	0.99	32.88	101	1	81504.08	54176.13
Gastropoda	9.14	111.34	101	1169	0.35	—	—	140	6	542571.4	—
Astroidea	22.33	148.96	73	854	0.47	1.52	33.06	121	15	—	+
Echinoidea	87.18	2010.97	3515	68321	0.4	1.03	32.94	86	60	—	17205
Holothuroidea	0	0	0	0	—	—	—	—	—	—	124388.3
Ophiuroidea	+	+	+	+	+	—	—	—	—	—	—
Decapoda	4.5	32.14	498	11552	0.44	1.08	33.06	147	3	—	—
Asciidaeae	16.66	583.15	96	3057	0.16	1.16	33.04	89	12	—	—

Окончание таблицы 2

Шельф Авачинского залива									
Porifera	0.04	0.67	5	90	0.06	1.36	33.11	106	< 1
Actiniaria	0	0	0	0	—	—	—	0	0
Cephalopoda	12.69	215.75	8	135	0.06	1.73	32.59	98	51
Bivalva	1.02	13.48	5	45	0.12	0.75	32.83	94	4
Gastropoda	1.52	12.1	24	270	0.24	2.61	32.54	144	6
Astroideaa	1.55	26.34	5	90	0.06	1.73	32.59	98	6
Echinoidea	2.09	15.28	90	539	0.53	—	—	75	8
Holothuroidea	+	+	+	+	0.06	—	—	—	+
Ophiuroidea	0	0	0	0	—	—	—	0	0
Decapoda	5.39	42.61	278	2203	0.71	1.36	33.11	106	22
Asciidiacea	0.72	8.09	42	360	0.29	1.36	33.11	106	3
Шельф юго-восточного побережья Камчатки									
Porifera	3.68	26.83	68.4	449	0.43	0.83	32.99	161	21
Actiniaria	0	0	0	0	—	—	—	0	0
Cephalopoda	0.12	2.79	4	45	0.08	0.78	32.94	210	1
Bivalvia	0	0	0	0	—	—	—	0	0
Gastropoda	0	0	0	0	—	—	—	0	0
Astroideaa	0	0	0	0	—	—	—	0	0
Echinoidea	0	0	0	0	—	—	—	0	0
Holothuroidea	0	0	0	0	—	—	—	0	0
Ophiuroidea	0	0	0	0	—	—	—	0	0
Decapoda	13.1	86.89	1233	6787	0.95	0.69	32.92	198	76
Asciidiacea	0.31	583.15	4	3057	0.16	0.75	32.82	89	2

Примечание. “+” – наличие единичных очень мелких экземпляров, которые не учитывались в измерениях.

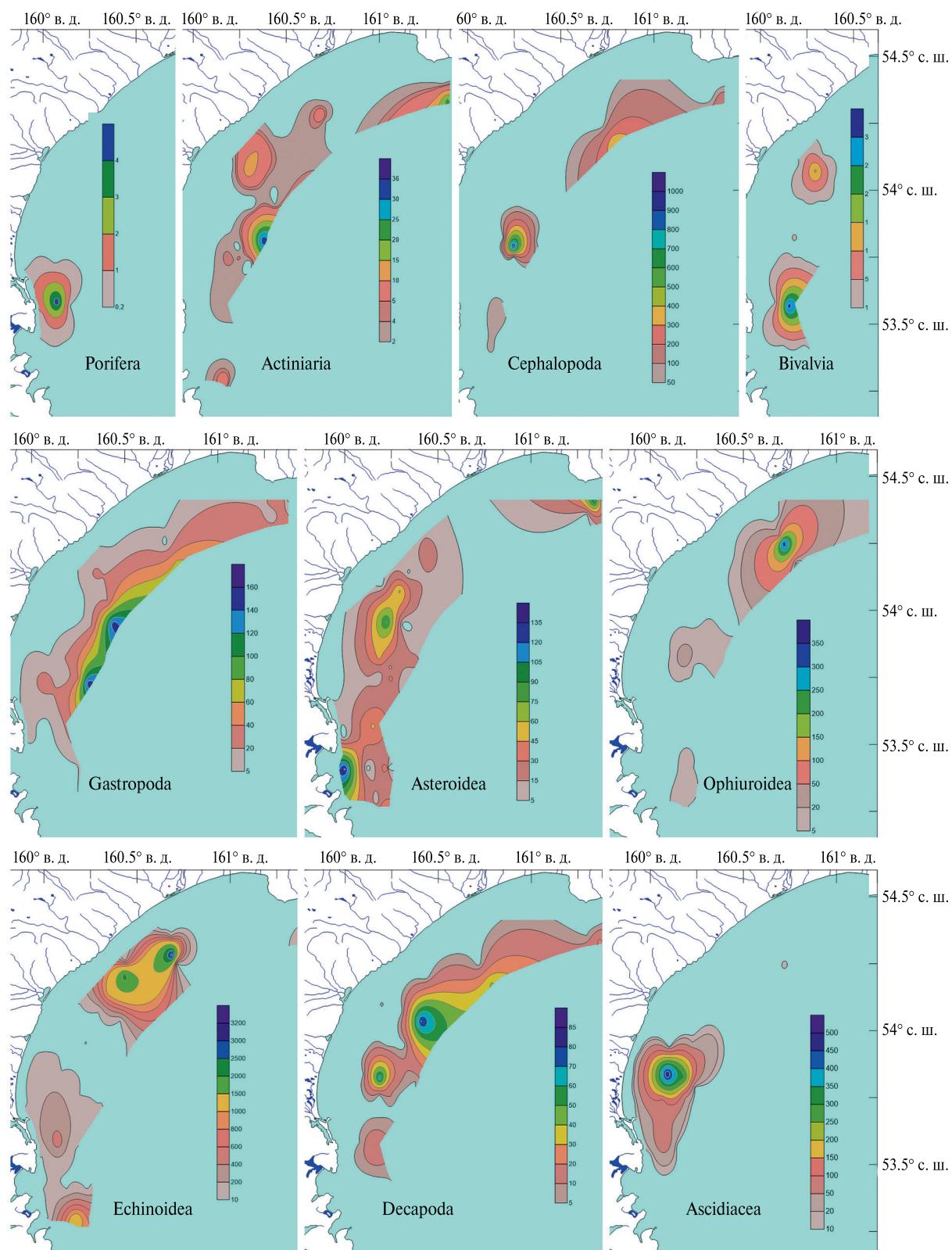


Рис. 2. Распределение удельной биомассы ($\text{кг}/\text{км}^2$) гидробионтов по группам на шельфе Кроноцкого залива в 2018 г.

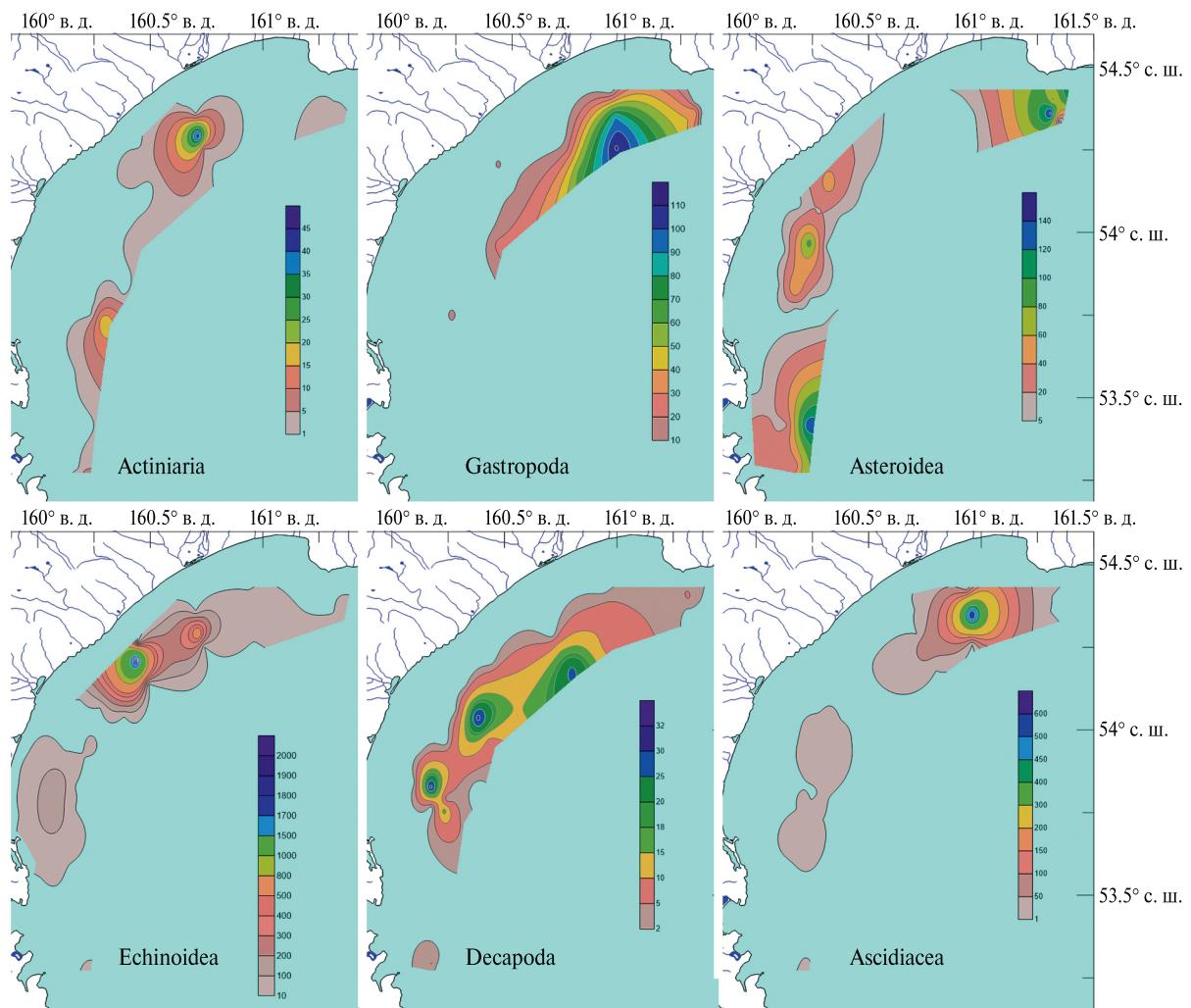


Рис. 3. Распределение удельной биомассы ($\text{кг}/\text{км}^2$) гидробионтов по группам на шельфе Кроноцкого залива в 2022 г.

плотность поселения (экз./ км^2), частота встречаемости (относительное число проб, в которых встречается вид или группа, в долях единицы), абсолютная биомасса (кг) и доля в средней биомассе (%) (табл. 1, 2). Распределение удельной биомассы ($\text{кг}/\text{км}^2$) гидробионтов по группам в каждом районе в 2018 и 2022 гг. отображено на рис. 2–7. Диапазон исследованных глубин составил 65–204 м в 2018 г. и 75–210 м в 2022 г. Диапазон придонных температур – 1.55–4.97°C в 2018 г. и 0.69–2.61°C в 2022 г., при этом максимальные значения температуры наблюдались в Авачинском заливе. Соленость колебалась в диапазоне 32.2–33.24 psu. Видовой состав с указанием частоты встречаемости видов в 2018 и 2022 гг. в трех исследованных районах приведен в табл. 3.

Абсолютная биомасса всех групп гидробионтов, выловленных на всех станциях от мыса Кроноцкий до южной оконечности Камчатки, в 2018 г. составляла 2875664.85 кг, а в 2022 г. – 1048455.57 кг (рис. 8), сократившись в 2.74 раза (на 63.5%). Меньше всего пострадал шельф Кроноцкого залива, где биомасса донных беспозвоночных в 2022 г. по сравнению с 2018 г. сократилась в 1.76 раза, убыль составила чуть более 43%. В Авачинском заливе биомасса в 2022 г. по сравнению с 2018 г. сократилась в 7.77 раза, погибло 87% донных беспозвоночных. Наиболее катастрофические потери наблюдались в самом южном районе исследований – на шельфе юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный, где биомасса донных беспозвоночных в зоне нижней

Таблица 3. Частота встречаемости видов (в долях единицы) в приловах учетной донной траловой съемки в 2018 и 2022 гг. в трех районах на шельфе Восточной Камчатки от мыса Кроноцкий до мыса Лопатка

Вид	2018 г.			2022 г.		
	Кроноцкий залив	Авачинский залив	Юго-восток Камчатки	Кроноцкий залив	Авачинский залив	Юго-восток Камчатки
Porifera						
<i>Porifera varia</i>	0.05	0.14	0.38	—	0.06	0.43
Actiniaria						
<i>Actiniaria varia</i>	0.5	0.32	0.75	0.23	—	—
<i>Liponema brevicorne</i>	0.05	—	0.04	—	—	—
<i>Metridium cf. farcimen</i>	—	0.05	0.17	—	—	—
Cephalopoda						
<i>Enteroctopus cf. dofleini</i>	0.2	0.05	0.5	0.05	0.06	0.08
<i>Rossia pacifica</i>	0.03	0.23	0.21	—	—	—
Bivalvia						
<i>Chlamys beiringiana</i>	—	—	0.08	—	—	—
<i>Serripes groenlandicus</i>	—	—	—	0.02	0.12	—
<i>Keenocardium californiense</i>	0.03	—	0.04	—	—	—
<i>Hiatella arctica</i>	—	0.05	—	—	—	—
<i>Musculus niger</i>	0.05	—	—	—	—	—
<i>Panomya ampla</i>	0.05	0.18	—	—	—	—
Gastropoda						
<i>Fusitriton oregonensis</i>	0.05	0.09	0.21	—	—	—
<i>Beringius beiringii</i>	—	—	0.08	—	—	—
<i>Beringius</i> sp.	—	—	0.04	—	—	—
<i>Buccinum cristatum</i>	0.1	—	—	—	—	—
<i>Buccinum beringense</i>	0.38	0.18	0.38	—	0.06	—
<i>Buccinum cnismatum</i>	0.03	—	—	—	—	—
<i>Buccinum polare</i>	0.18	0.05	0.13	0.28	0.06	—
<i>Buccinum rossicum</i>	—	—	0.04	—	—	—
<i>Buccinum schiretokoense</i>	—	—	0.04	—	—	—
<i>Buccinum</i> sp.	—	—	0.13	—	—	—
<i>Neptunea cf. excelsior</i>	0.08	—	0.04	0.23	—	—
<i>Neptunea beiringiana</i>	0.13	0.05	—	—	0.18	—
<i>Neptunea ventricosa</i>	0.03	0.14	0.08	—	—	—
<i>Neptunea lamellosa</i>	0.1	—	0.04	—	—	—
<i>Neptunea laticostata</i>	0.05	0.14	0.42	—	—	—
<i>Neptunea lyrata</i>	0.05	—	0.33	—	—	—
<i>Neptunea pribiloffensis</i>	0.2	—	—	—	—	—
<i>Neptunea multistriata</i>	0.18	0.05	0.42	—	—	—
<i>Neptunea vinoso</i>	0.03	—	—	—	—	—

Продолжение таблицы 3

<i>Neptunea convexa</i>	0.1	—	0.04	—	—	—
<i>Neptunea</i> sp.	0.03	—	—	—	—	—
<i>Clinopegma decora</i>	0.03	0.05	0.13	—	—	—
<i>Clinopegma chikaoi</i>	0.03	0.23	0.04	—	—	—
<i>Neancistrolepis beringiana</i>	0.28	0.14	0.08	—	—	—
<i>Neancistrolepis glabra</i>	—	—	0.04	—	—	—
<i>Neoheringius frielei</i>	0.15	0.09	0.08	—	—	—
<i>Lussivolutopsis hydractiniferus</i>	—	—	0.04	—	—	—
<i>Plisifusus kroyeri</i>	0.08	0.05	0.21	—	—	—
<i>Pyrulofusus deformis</i>	0.03	—	—	—	—	—
<i>Pyrulofusus harpa</i>	—	0.05	0.08	—	—	—
<i>Volutopsis castaneus</i>	0.13	0.14	0.33	—	—	—
<i>Colidae</i> spp.	—	—	0.08	—	—	—
<i>Crepidula</i> sp.	0.03	—	—	—	—	—
<i>Cryptonatica aleutica</i>	0.05	—	0.04	—	—	—
<i>Euspira</i> sp.	—	0.09	—	—	—	—
<i>Boreotrophon</i> sp.	—	—	0.13	—	—	—
<i>Trichotropis bicarinata</i>	0.03	—	—	—	—	—

Asteroidea

<i>Evasterias echinosoma</i>	—	0.05	—	0.42	—	—
<i>Asterias rathbuni</i>	0.08	—	—	—	—	—
<i>Leptasterias polaris</i>	0.13	0.05	0.01	—	—	—
<i>Leptasterias arctica</i>	—	0.05	0.05	—	—	—
<i>Lethasterias nanimensis</i>	0.55	0.45	0.02	0.02	0.05	—
<i>Crossaster papposus</i>	—	—	0.02	0.05	—	—
<i>Leptychaster</i> sp.	—	0.09	—	—	—	—
<i>Ctenodiscus crispatus</i>	0.03	0.05	—	—	—	—
<i>Trophodiscus uber</i>	0.23	0.32	0.2	—	—	—
<i>Diplopteraster multiples</i>	0.1	—	—	—	—	—
<i>Pteraster militaris</i>	—	—	0.01	—	—	—
<i>Pteraster octaster</i>	—	0.09	0.09	—	—	—
<i>Henricia</i> spp.	0.18	0.05	0.12	0.09	—	—
<i>Hippasterias phrygiana</i>	0.05	0.05	0.06	—	—	—
<i>Ceramaster patagonicus</i>	—	0.05	—	—	—	—

Echinoidea

<i>Echinorachnius parma</i>	0.5	0.64	0.08	0.23	0.35	—
<i>Strongylocentrothrus pallidus</i>	0.5	0.32	0.21	0.21	0.18	—

Holoturoidea

Окончание таблицы 3

<i>Cucumaria</i> sp.	—	0.14	—	—	0.06	—
<i>Synallactes nozawai</i>	0.03	—	—	—	—	—
Ophiuroidea						
<i>Gorgonocephalus eucnemis</i>	0.23	0.41	0.1	0.05	—	—
<i>Ophiura sarsi</i>	0.1	0.09	0.09	0.02	—	—
Decapoda						
<i>Sclerocrangon boreas</i>	—	—	—	—	0.09	—
<i>Argis lar</i>	0.18	0.32	0.08	0.02	0.47	0.3
<i>Argis ochotensis</i>	—	—	0.06	—	—	—
<i>Neocrangon communis</i>	0.13	0.23	0.05	0.05	—	0.17
<i>Crangon dalli</i>	0.08	0.09	0.01	—	0.12	—
<i>Lebbeus groenlandicus</i>	0.03	—	—	—	—	—
<i>Hyas coarctatus</i>	0.18	0.05	0.02	0.09	0.18	0.3
<i>Oregonia gracilis</i>	—	0.14	—	—	—	—
<i>Pandalus borealis</i>	0.03	—	0.02	—	—	0.13
<i>Pandalus goniurus</i>	0.15	0.41	0.07	0.05	0.06	0.26
<i>Labidochirus splendescens</i>	0.03	—	—	—	—	0.3
<i>Pagurus Rathbuni</i>	—	—	—	—	0.29	—
<i>Pagurus brandti</i>	0.68	0.41	0.27	0.37	0.47	0.74
Asciidiacea						
<i>Ascidiae varia</i>	0.23	0.45	0.04	0.07	—	0.08
<i>Boltenia ovifera</i>	0.15	0.41	0.13	—	—	—
<i>Boltenia echinata</i>	0.03	0.09	0.04	—	0.18	—
<i>Chelyosoma orientale</i>	0.05	—	—	—	—	—
<i>Halocynthia aurantium</i>	0.28	0.41	0.17	0.14	—	—
Всего видов	61	49	60	20	18	10
Всего видов по годам	85			30		

сублиторали сократилась почти в 20 раз, погибло 95% учитываемого в приловах тралевых съемок макрообентоса.

Практически полностью в 2022 г. исчезли в уловах голотурии и офиуры (за исключением одного мелкого экземпляра *Cucumaria* sp. и двух очень мелких молодых экземпляров офиур, масса которых отдельно не учитывалась). Из остальных групп наиболее значительное сокращение абсолютной биомассы отмечено у актиний (в 3.7 раза) и морских ежей (в 2.9 раза). Более чем в два раза сократилась абсолютная биомасса головоногих (в 2.6 раза)

и брюхоногих (в 2.2 раза) моллюсков, а также асцидий (в 2.1 раза). Почти вдвое сократилась абсолютная биомасса морских звезд (в 1.9 раза). Наименьшее сокращение (в 1.6 раза) отмечено для декапод (за исключением промысловых крабов и крабоидов). Абсолютная биомасса губок в целом показала увеличение (в 2.2 раза) только за счет трехкратного роста их количества в приловах в самом южном районе – у юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный. В то же время в соседнем районе, на шельфе Авачинского залива, абсолютная биомасса губок сократилась в 1.7 раза,

а на шельфе Кроноцкого залива в 2022 г. губки вовсе не были обнаружены. Актинии полностью исчезли в приловах в Авачинском заливе и до южной оконечности Камчатки, на шельфе Кроноцкого залива их биомасса сократилась в 1.8 раза (на 43.5%). Абсолютная биомасса головоногих моллюсков в 2022 г. по сравнению с данными 2018 г. практически не изменилась в Авачинском заливе, уменьшилась в 1.84 раза (на 47.5%) в Кроноцком заливе и катастрофически сократилась на шельфе юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный – в 486 раз (на 99.8%). Абсолютную биомассу двустворчатых моллюсков не подсчитывали. Абсолютная биомасса брюхоногих моллюсков в Кроноцком заливе в 2022 г. сократилась по сравнению с 2018 г. в 1.66 раза (почти на 40%), в Авачинском заливе – в 4.5 раза (на 77.5%), а на шельфе юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный эта группа исчезла полностью. Аналогичная ситуация была с морскими звездами и морскими ежами: в Кроноцком заливе абсолютная биомасса морских звезд сократилась в 1.4 раза (на 27%) и морских ежей – в 1.5 раза (на 32%), в Авачинском заливе – в 3.4 раза (на 70.6%) и в 127.4 раза (на 99.2%), соответственно. У юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный иглокожие в приловах в 2022 г. исчезли полностью. Фауна асцидий больше всего пострадала в Авачинском заливе, где абсолютная биомасса этой группы уменьшилась в 45 раз (на 97.8%), у юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный – в 11 раз (на 91%), в Кроноцком заливе – в 1.6 раза (на 36%). По ракообразным, представленным в приловах десятиногими ракообразными (исключая промысловых крабов и крабоидов, которых мы здесь не учитываем), картина была совсем другая: в Авачинском заливе абсолютная биомасса увеличилась в 5 раз (на 400%), у юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный она почти не изменилась, а в Кроноцком заливе уменьшилась почти в 4 раза (на 74%). Доля Decapoda в средней биомассе в 2022 г. увеличилась на всех трех участках, но наиболее значительно – на шельфе юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный (в 19 раз) и Авачинского залива (в 11 раз), в меньшей степени – на шельфе Кроноцкого залива (в 1.5 раза).

Средняя удельная биомасса в 2022 г. оказалась ниже, чем в 2018 г., в большинстве групп, кроме головоногих моллюсков в Авачинском заливе (стала выше в 1.2 раза) и губок у юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный (стала выше в 2.4 раза). Максимальные значения удельной биомассы существенно увеличились только в трех группах у юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный: в 1.6 раза для губок, в 1.53 раза для ракообразных и в 10 раз для асцидий. Наиболее обильны на всех трех участках шельфа в 2018 г. были морские ежи: средняя удельная биомасса составляла около 200–250 кг/км², максимальная – около 2000–3000 кг/км². В 2022 г. эти показатели снизились, соответственно, в 2.9 и 1.6 раза в Кроноцком заливе, в 65 и 133 раза в Авачинском заливе и до нуля на шельфе юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный.

Средняя и максимальная плотность поселения (экз./км²) в 2022 г. сильно сократились (от полутора–двух раз до нескольких порядков) во всех группах, кроме Porifera и Decapoda на шельфе юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный (рис. 9). Там же отмечено увеличение в 1.5 раза максимальной плотности поселения Ascidiacea, а на шельфе Кроноцкого залива – увеличение в 2 раза максимальной плотности поселения Bivalvia (табл. 1, 2).

Частота встречаемости сократилась во всех группах, кроме Decapoda на шельфе Авачинского залива и юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный, где также увеличилась частота встречаемости Porifera и Ascidiacea.

Таким образом, в Кроноцком и Авачинском заливах после 2020 г. полностью исчезли в приловах по две группы донных беспозвоночных – из одиннадцати групп осталось девять. У юго-восточного побережья Камчатки из десяти групп осталось четыре: Porifera, Cephalopoda, Decapoda и Ascidiacea.

Из списка видов, составленного по результатам учетных съемок по всем трем районам исследования (табл. 3; всего 88 видов или групп видов), в 2022 г. найдено только 30 видов (для 2018 г. указано 85 видов), видовое разнообразие уменьшилось почти в 3 раза (рис. 10); в том числе

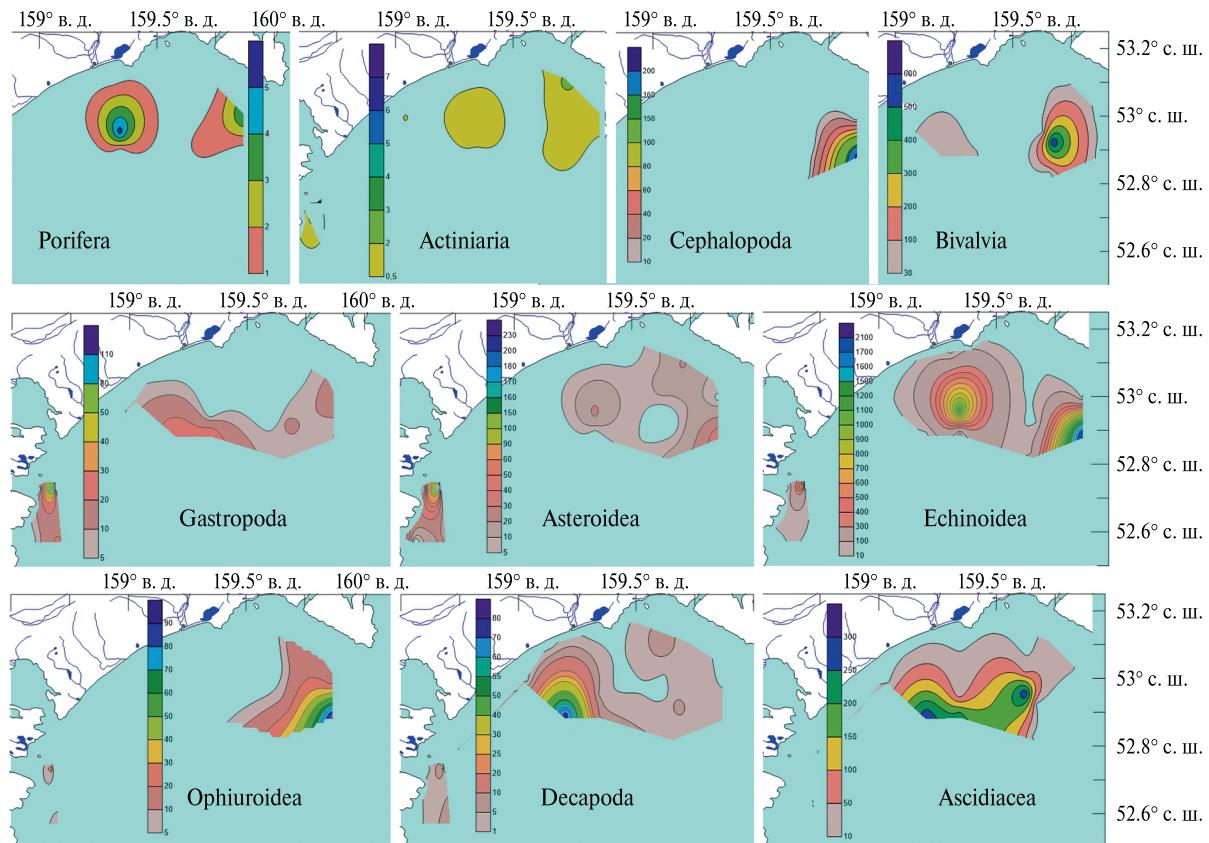


Рис. 4. Распределение удельной биомассы ($\text{кг}/\text{км}^2$) гидробионтов по группам на шельфе Авачинского залива в 2018 г.

в Кроноцком заливе – в 3 раза (исчезло 67% видов), в Авачинском заливе – в 2.7 раза (исчезло более 63% видов), а у юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный – в 6 раз (исчезло более 83% видов). Наибольшие потери видового разнообразия отмечены среди моллюсков (86.4% видов), особенно среди Gastropoda (89%) и Bivalvia (80%), а также среди морских звезд (73.3%) и актиний (67%). В Кроноцком заливе исчезло более 92% видов Gastropoda, в Авачинском – 80%, у юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный – 100%. Разнообразие морских звезд меньше всего пострадало в Кроноцком заливе – в 2022 г. в приловах исчезло 50% видов; в Авачинском заливе лишь на одной станции пойман один вид *Lethasterias panimensis* из одиннадцати, определенных в 2018 г., т.е. исчез 91% видов; а у юго-восточного побережья Камчатки – 100% видов морских звезд.

Частота встречаемости оставшихся в 2022 г. видов в большинстве случаев уменьшилась (табл. 3), кроме двадцати видов, встречаемость

которых увеличилась в одном, реже в двух районах исследования. Половина видов, встречаемость которых увеличилась в 2022 г., относилась к ракообразным (отряд Decapoda), выловленным в районе Авачинского залива и у юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный, где вымирание других групп донных животных оказалось наибольшим. Из трех видов, найденных в 2022 г. и не указанных в 2018 г., два вида также относились к десятиподам, пойманным в Авачинском заливе. Размер ячей орудия лова не позволил провести учет более мелких ракообразных, например, из отряда Amphipoda, вспышка численности которых отмечена в 2021 и 2022 гг. в верхней сублиторали Авачинского залива (Санамян и др., 2023). Однако увеличение абсолютной биомассы (в 5 раз) и встречаемости ракообразных в зоне нижней сублиторали в Авачинском заливе согласуется с данными Санамян с соавторами о том, что ракообразные в целом не сильно пострадали от последствий ВЦВ, а некоторые из них значительно

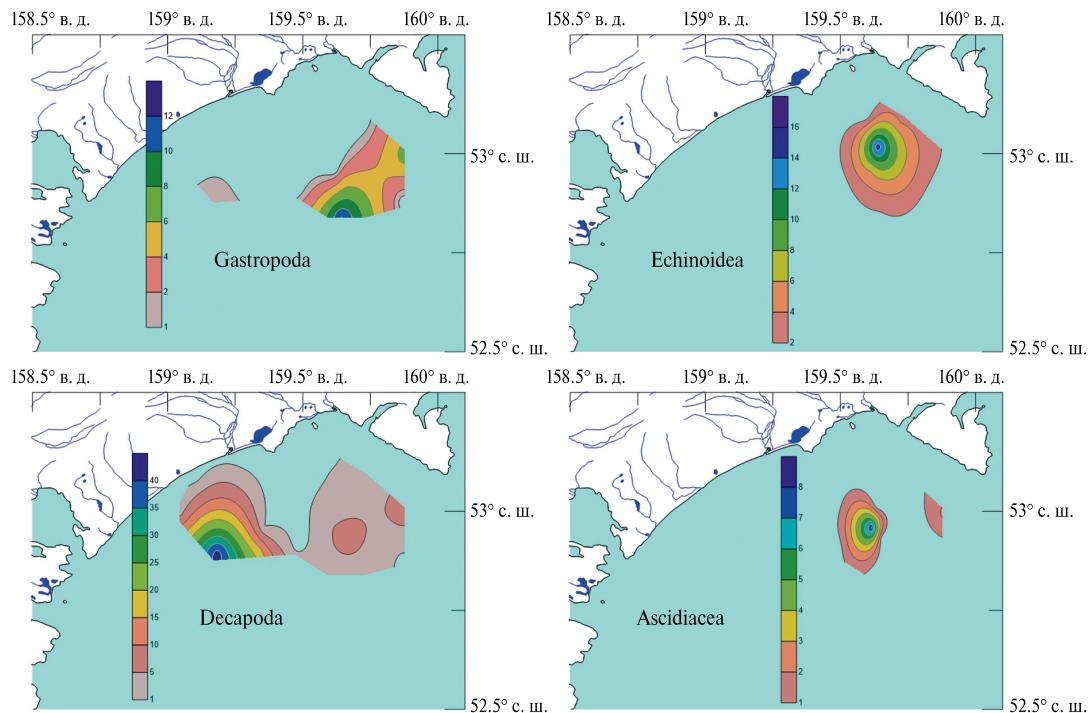


Рис. 5. Распределение удельной биомассы ($\text{кг}/\text{км}^2$) гидробионтов по группам на шельфе Авачинского залива в 2022 г.

увеличили численность, вероятно, из-за снижения давления хищников и увеличения кормовой базы, а также снижения конкуренции раков-отшельников за раковины гастропод (Grant, Ulmer, 1974), освободившиеся из-за массовой гибели моллюсков (Санамян и др., 2023). Таким образом, для всего шельфа Авачинского залива характерно увеличение численности и биомассы ракообразных на фоне снижения биоразнообразия остальных групп донных беспозвоночных. Сокращение биомассы бентоса в нижней сублиторали Авачинского залива на 87% согласуется с визуальной оценкой потерь в 80–90% в верхней сублиторали, сделанной ранее Санамян с соавторами (Санамян и др., 2023). Указанное ранее двукратное сокращение видового состава морских беспозвоночных в верхней сублиторали Авачинского залива после ВЦВ в 2020 г. (Санамян и др., 2023) также близко к настоящей оценке в 2.7 раза в нижней сублиторали. Таким образом, биоразнообразие на всем шельфе Авачинского залива понесло 2–3-кратные потери в видовом составе и сокращение численности и биомассы донных животных на 80–90%. Эти показатели являются промежуточными между такими же данными для Кроноцкого залива и шельфа юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный.

Данные спутникового мониторинга концентрации хлорофилла *a* у берегов Камчатки в сентябре 2020 г. показали наибольшую площадь самой высокой концентрации хлорофилла *a* в районе Авачинского залива и у юго-восточного побережья Камчатки (Бондур и др., 2021). Это свидетельствует о том, что причиной гибели донных организмов стали именно последствия воздействия ВЦВ, вызванного динофлагеллятами рода *Karenia* (Orlova et al., 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После заморных явлений, произошедших в результате ВЦВ осенью 2020 г., на шельфе Восточной Камчатки от мыса Кроноцкий до южной оконечности Камчатки произошло почти трехкратное обеднение донной фауны как по биомассе, так и по видовому разнообразию. Наименее пострадавшей группой можно считать ракообразных: несмотря на то, что регистрировали гибель ракообразных, их потери были меньше, чем в других группах беспозвоночных, а абсолютная биомасса Decapoda на шельфе Авачинского залива в 2022 г. увеличилась в 5 раз по сравнению с 2018 г. Наиболее пострадавшим является самый южный район от мыса Поворотный до мыса Лопатка,

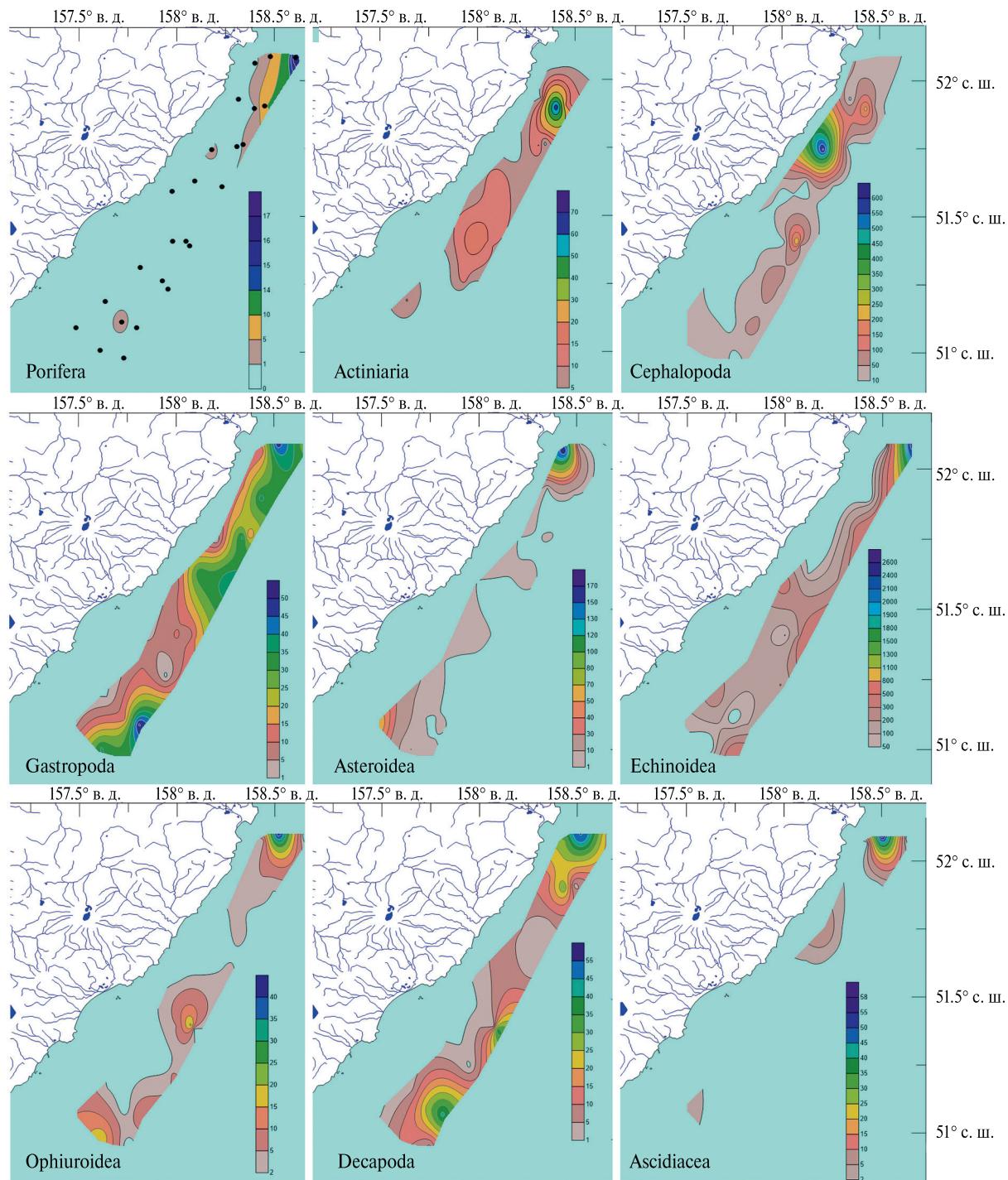


Рис. 6. Распределение удельной биомассы ($\text{кг}/\text{км}^2$) гидробионтов по группам на шельфе юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный в 2018 г.

где произошло почти 20-кратное снижение абсолютной биомассы донных беспозвоночных в зоне нижней сублиторали, т.е. погибло 95% учитываемого в приловах траловых съемок зообентоса. Из десяти групп животных, учтенных

в 2018 г., осталось менее половины. В 2022 г. в этом районе зарегистрировано тотальное отсутствие представителей шести таксонов высокого ранга: отряда *Actiniaria* и классов *Bivalvia*, *Gastropoda*, *Asteroidea*, *Echinoidea* и *Ophiuroidea*

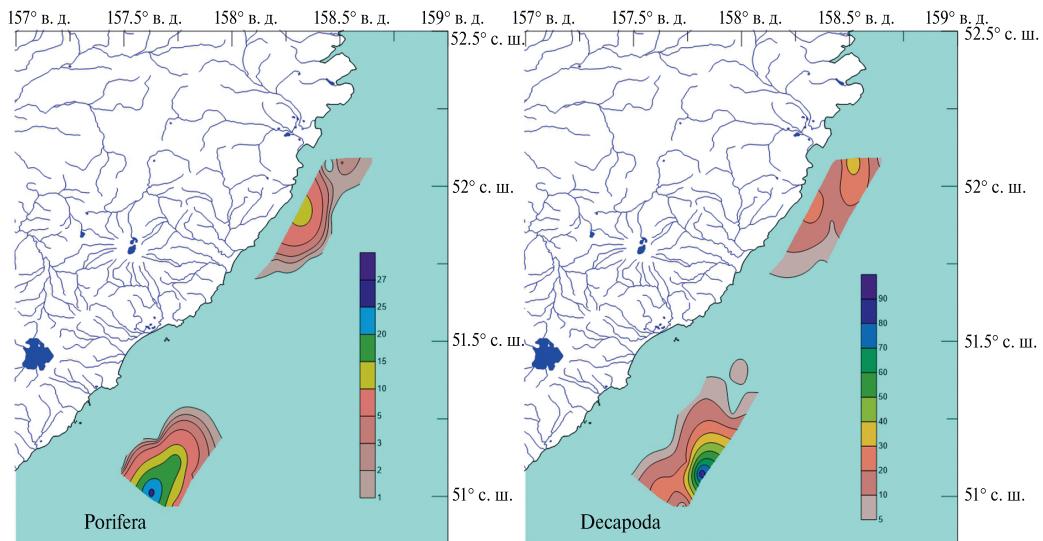


Рис. 7. Распределение удельной биомассы ($\text{кг}/\text{км}^2$) гидробионтов по группам на шельфе юго-восточного побережья Камчатки южнее мыса Поворотный в 2022 г.

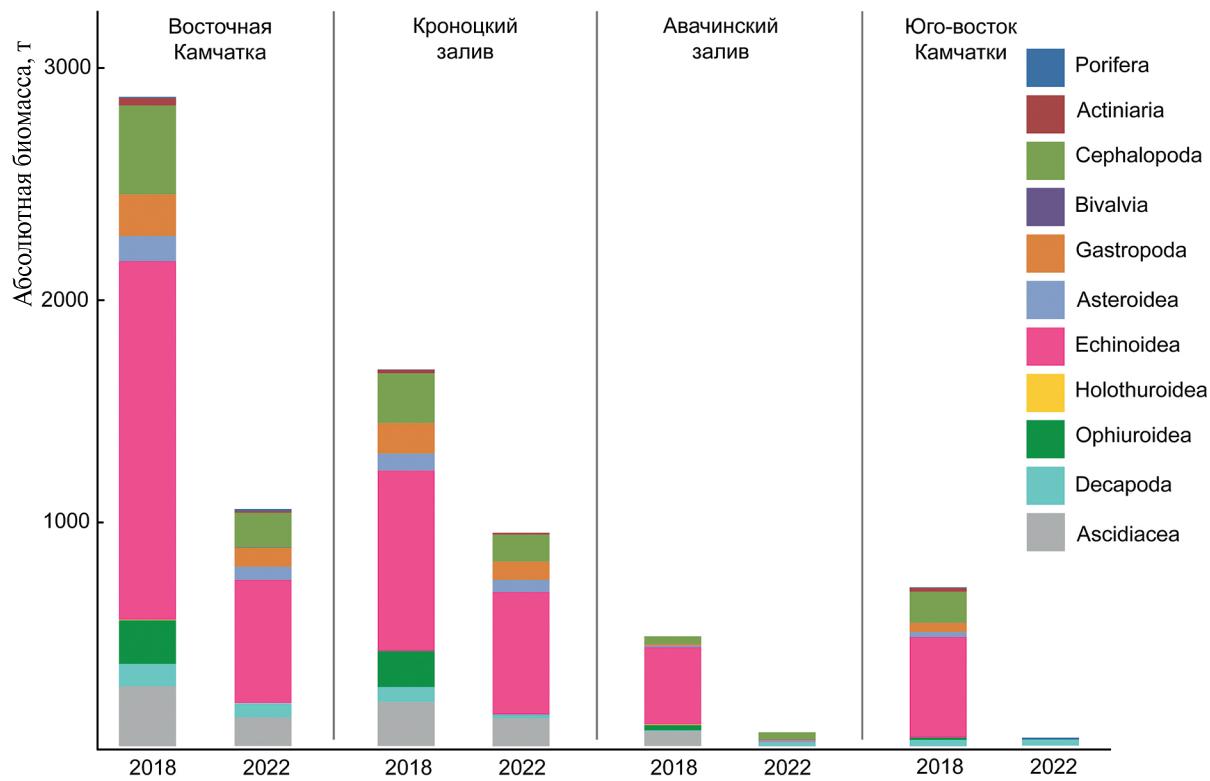


Рис. 8. Абсолютная биомасса групп беспозвоночных, учтенных в приловах донных траловых съемок в 2018 и 2022 гг.

(всего типа Echinodermata); видовое разнообразие уменьшилось в 6 раз (исчезло более 83% видов). Наименее пострадавшим оказался самый северный участок шельфа в районе Кроноцкого залива: абсолютная биомасса сократилась в 1.76 раза (на 43%); из 11 групп донных беспозвоночных, зарегистрированных в 2018 г.,

в 2022 г. исчезли две — тип Porifera и класс Holothuroidea; видовое разнообразие сократилось в 3 раза (исчезло 67% видов). Шельф Авачинского залива пострадал значительно и занимает промежуточное положение при оценке ущерба между северным и южным районами: абсолютная биомасса сократилась в 7.77 раза

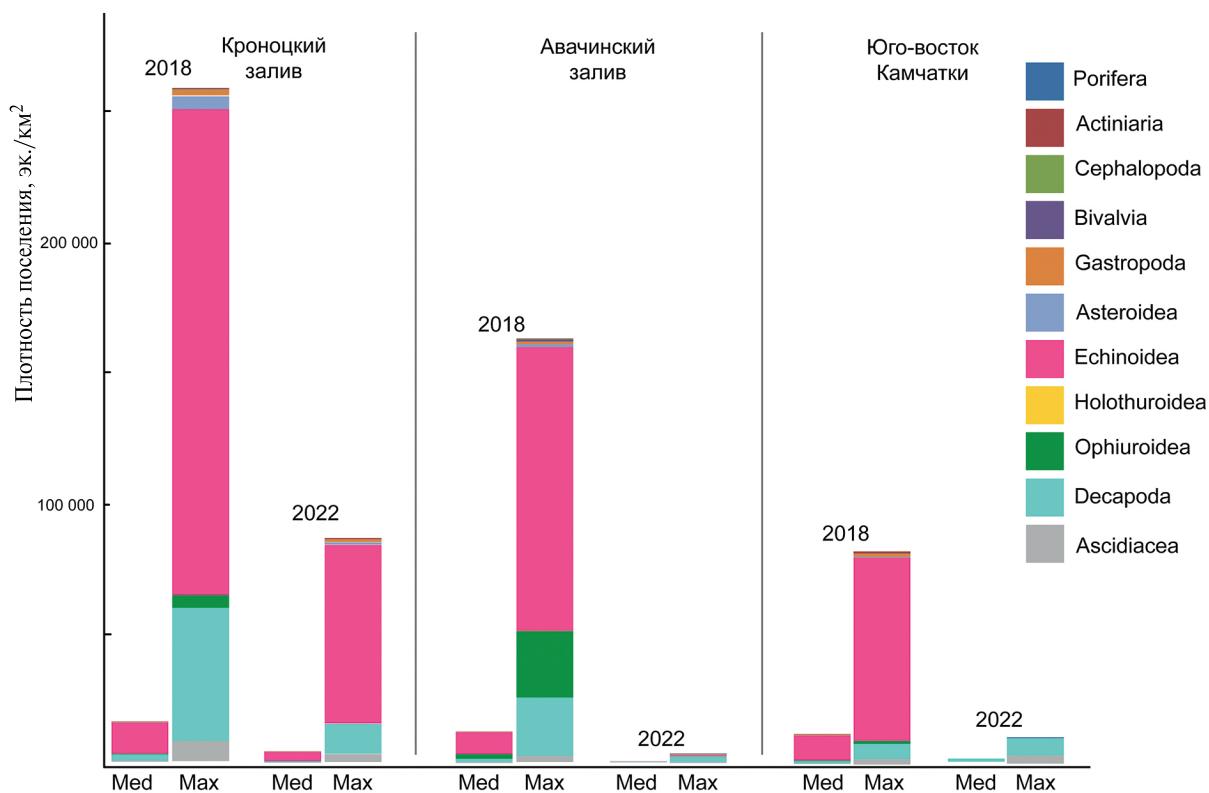


Рис. 9. Средняя (Med) и максимальная (Max) плотность поселения групп беспозвоночных, учтенных в приловах донных траловых съемок в 2018 и 2022 гг.

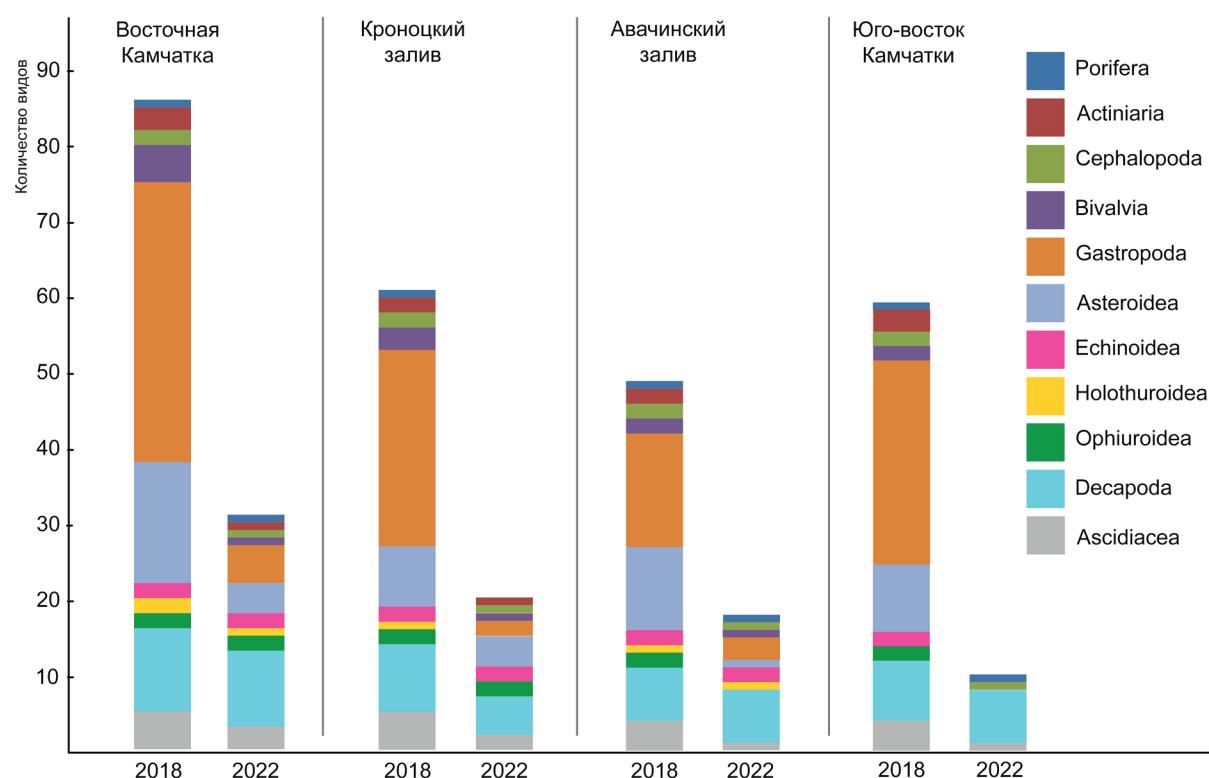


Рис. 10. Количество видов в основных таксонах, найденных в приловах учетных донных траловых съемок в 2018 и 2022 гг.

(на 87%); из 11 групп донных беспозвоночных исчезли две – отряд Actiniaria и класс Ophiuroidea; видовое разнообразие сократилось в 2.7 раза (исчезло 63% видов).

Учитывая такие критерии, как широкое разнообразие таксонов, подвергшихся воздействию ВЦВ (затронуты почти все группы донных беспозвоночных, вплоть до исчезновения в приловах таксонов высокого уровня от отрядов до типов), высокая доля вымерших видов (65% для всех трех районов), последствия ВЦВ 2020 г. оказались катастрофическими для всего шельфа на востоке Камчатки от мыса Кроноцкий до мыса Лопатка.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджетов Камчатского филиала Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии и Камчатского филиала Тихookeанского института географии ДВО РАН. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека и животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аксютина З.М. Элементы математической оценки результатов наблюдений в биологических и рыбохозяйственных исследованиях. М.: Пищевая промышленность, 1968. 288 с.

Бизиков В.А., Буяновский А.И., Гончаров С.М. и др. Базы данных и информационные системы в управлении водными биологическими ресурсами // Матер. I науч. школы молодых ученых и специалистов по рыбному хозяйству и экологии. М.: Изд-во ВНИРО, 2013. С. 108–133.

Бондур В.Г., Замшин В.В., Чверткова О.И. и др. Анализ причин экологического происшествия на Камчатке осенью 2020 г., связанного с красным приливом, на основании космических данных //

Исследование Земли из космоса. 2021. № 3. С. 3–18. <http://doi.org/10.31857/S020596142103009X>

Виноградов Л.Г. Определитель креветок, раков и крабов Дальнего Востока // Изв. ТИНРО. 1950. Т. 33. С. 179–358.

Голиков А.Н. Брюхоногие моллюски рода *Neptunea Bolten* // Фауна СССР. Нов. сер. Моллюски. Т. 5. Вып. 1. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 184 с.

Голиков А.Н. Моллюски *Buccininae* Мирового океана // Фауна СССР. Моллюски. Т. 5. Вып. 2. Л.: Наука, 1980. 508 с.

Данилин Д.Д., Будникова Л.Л., Сахаровский С.И. и др. Предварительные результаты обследования лitorальной зоны Южно-Камчатского природного парка // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: материалы XXII международ. науч. конф., посвященной 120-летию со дня рождения известного камчатского ученого-ихтиолога, одного из организаторов регулярных исследований биологии и состояния запасов морских промысловых рыб у берегов Камчатки, почетного гражданина Петропавловска-Камчатского к.б.н. И.А. Полутова. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2021. С. 184–189.

Дьяконов А.М. Определитель иглокожих дальневосточных морей // Изв. ТИНРО. 1949. Т. 30. С. 1–127.

Дьяконов А.М. Морские звезды морей СССР // Фауна СССР. Иглокожие. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1950. 204 с.

Кантор М.И., Сысоев А.В. Морские и солоноватоводные брюхоногие моллюски России и сопредельных стран: иллюстрированный каталог. М.: Тово-во науч. изд. КМК, 2006. 371 с.

Коростелев С.Г., Данилин Д.Д. Влияние вредоносного цветения водорослей осенью 2020 г. на состояние запасов камбал на шельфе тихookeанского побережья Камчатки и северных Курильских островов // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: Матер. XXIV международ. науч. конф., посвященной 300-летию Российской академии наук. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс. 2023. С. 193–196.

Макаров В.В. Ракообразные *Anomura* // Фауна СССР. Ракообразные. Т. 10. Вып. 3. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1938. 324 с.

Несис К.Н. Краткий определитель головоногих моллюсков Мирового океана. М.: Легкая и пищ. пром-ть, 1982. 358 с.

Санамян Н.П., Коробок А.В., Санамян К.Э. Качественная оценка последствий влияния вредоносного

- цветения водорослей осенью 2020 года у побережья Юго-Восточной Камчатки (Северо-Западная Пацифика) на мелководные бентосные сообщества // Вестн. КамчатГТУ. 2023. № 63. С. 22–44.
- Скарлато О.А.* Двусторчатые моллюски умеренных широт западной части Тихого океана. Л.: Наука, 1981. 480 с.
- Столяренко Д.А., Иванов Б.Г.* Метод сплайн-аппроксимации плотности запаса применительно к многовидовым съемкам // Сыревые ресурсы и биологические основы рационального использования промысловых беспозвоночных. Тез. док. Всесоюз. совещ. Владивосток: ТИНРО, 1988. С. 10–11.
- Токранов А.М.* Состав прибрежной ихтиофауны юго-восточной Камчатки после вредоносного цветения водорослей осенью 2020 г. // Вестн. КамчатГТУ. 2022. Вып. 59. С. 38–48.
- Токранов А.М., Данилин Д.Д., Жигадлова Г.Г. и др.* Оценка воздействия возникшей осенью 2020 г. у берегов Камчатки неблагоприятной экологической обстановки на представителей различных групп гидробионтов // Тр. X Международ. научно-практ. конф. “Морские исследования и образование (MARESEDU-2021)” Т. II (III). Тверь: ООО “ПолиПРЕСС”, 2021. С. 93–96.
- Шунтов В.П., Волченко И.В., Кулик В.В., Бочаров Л.Н.* Макрофауна бентали западной части Берингова моря: таблицы встречаемости, численности и биомассы, 1977–2010. Владивосток: ТИНРО-центр, 2014. 803 с.
- Fraussen K., Terryn Y.* A Conchological Iconography: The Family Buccinidae, Genus *Neptunea*. Hackenheim, Germany: ConchBooks, 2007. 165 p.
- Grant W.C., Ulmer K.M.* Shell selection and aggressive behavior in two sympatric species of hermit crabs // Biol. Bull. 1974. V. 146. P. 32–43.
- Jewett S.C., Clark R.N., Chenelot M.K. et al.* Field Guide to Sea Stars of the Aleutian Islands, Fairbanks, Ala.: Alaska Sea Grant, Univ. of Alaska. 2015. 165 p.
- Orlova T.Y., Aleksanin A.I., Lepskaya T.V. et al.* A massive bloom of *Karenia* species (Dinophyceae) off the Kamchatka coast, Russia, in the fall of 2020 // Harmful Algae. 2022. V. 120. Art. ID 102337. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2022.102337>
- Stolyarenko D.A.* Data analysis of trawl shrimp survey with spline approximation of stock density, International Council for Exploration of the Sea, Shellfish Committee, Doc. no. C.M. 1986/K: 25, Copenhagen: ICES, 1986. 16 p.
- Stolyarenko D.A.* The spline approximation method and survey design using interaction with microcomputer: Spline Survey Designer Software System, International Council for Exploration of the Sea, Shellfish Committee, Doc. no. K: 29, Copenhagen: ICES, 1987. 24 p.

Consequences of Impact of Harmful Algal Bloom on Benthic Invertebrates in the Eastern Kamchatka Shelf

T. B. Morozov^a, N. P. Sanamyan^b, K. E. Sanamyan^b

^a*Kamchatka Branch, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (KamchatNIRO), Petropavlovsk-Kamchatsky 683000, Russia*

^b*Kamchatka Branch, Pacific Institute of Geography, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky 683000, Russia*

Data of bottom trawl surveys conducted in the shelf zone of Kronotsky and Avachinsky Bays and off the southeastern coast of the Kamchatka Peninsula at depths of 65–210 m in 2018 and 2022, before and after the harmful microalgal bloom that occurred off the Kamchatka coast in the fall of 2020, were compared. The results indicate a significant decrease in the species diversity, population density, and biomass of benthic organisms in the lower sublittoral zone in 2022 compared to 2018. The least affected area was the northernmost region (Kronotsky Bay), while the most severely affected area was the southernmost region off the southeastern Kamchatka coast to the waters south of Cape Povorotny, where the biomass and species diversity dramatically decreased. This is consistent with the satellite monitoring data on chlorophyll *a* concentration off the Kamchatka coast in September 2020. According to these data, the area of the highest chlorophyll *a* concentration was the greatest in Avachinsky Bay and off the southeastern Kamchatka coast, where the strongest reduction in biodiversity of marine invertebrates was recorded.

Keywords: benthos, biomass, biodiversity, bottom trawl survey, red tide, intense microalgal bloom, depletion of fauna