

Научная статья

УДК [639.2.081.7:681.883.4]/(268.56)

DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-580-600

EDN: FMKCOF



АКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ САЙКИ *BOREOGADUS SAIDA*
(GADIDAE) В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧУКОТСКОГО МОРЯ
В 2003–2020 ГГ.

М.Ю. Кузнецов, В.И. Поляничко, Е.В. Сыроваткин*

Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

Аннотация. На основе гидроакустических данных и траловых проб, полученных в ходе рейсов ТИНРО в Арктические моря, рассматриваются особенности пространственного распределения и обилия сайки *Boreogadus saida* в юго-западной части Чукотского моря (зона России) в 2003–2020 гг. Самые высокие показатели обилия сайки в виде измеряемого эхоинтеграционным методом коэффициента обратного поверхностного рассеяния s_A ($\text{м}^2/\text{миля}^2$), оценки плотности рыб по численности (тыс. экз./ миля^2) и биомассе ($\text{т}/\text{миля}^2$) были зарегистрированы в августе 2003 г. В 2007–2008 гг. оценки плотности рыб, как акустические, так и биологические, существенно снизились и в 2010 г. были минимальны. В 2014 г. показатели обилия заметно выросли за счет высокой доли молоди в скоплениях. Однако в последующие годы акустические оценки плотности сайки продолжили снижение, достигнув минимальных значений в 2020 г. Снижение концентрации сайки в юго-западной части Чукотского моря происходит на фоне общего потепления в Арктике и роста численности минтая. Сайка распределена преимущественно в северо-восточной и юго-западной частях учетного полигона, где образует обширные поля, состоящие из мелких косячков или разреженных слоев рыб. Характерной является двухслойная вертикальная структура скоплений в приповерхностном и придонном слое. К востоку от 174° з.д. скопления, как правило, образованы более крупными особями. Типичными для этого района являются протяженные агрегации сайки в придонной области. В западном секторе полигона рыбы обитают в подповерхностных горизонтах 10–20 м (слой термоклина) или имеют двухслойную структуру скоплений с преобладанием молоди в верхнем слое. Характерны также эхограммы в виде плотных косячков высотой до 30 м и горизонтальной протяженностью 120–400 м предположительно мигрирующих рыб. Вертикальные перемещения сайки в зависимости от времени суток не выражены. Ночью структура агрегаций, как правило, более рыхлая, однако встречаются локальные скопления рыб, состоящие из плотных косячков как в дневное, так и в ночное время суток.

Ключевые слова: Чукотское море, акустические измерения, сайка, полигон, скопления, распределение, вертикальная структура, плотность, обилие

* Кузнецов Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией, mikhail.kuznetsov@tinro-center.ru, ORCID 0000-0001-6917-9959; Поляничко Владимир Ильич, ведущий специалист, vladimir.polyanichko@tinro-center.ru, ORCID 0000-0002-8813-3494; Сыроваткин Евгений Владимирович, ведущий специалист, evgeniy.syrovatkin@tinro-center.ru, ORCID 0000-0003-3502-5753.

Для цитирования: Кузнецов М.Ю., Поляничко В.И., Сыроваткин Е.В. Акустические исследования сайки *Boreogadus saida* (Gadidae) в юго-западной части Чукотского моря в 2003–2020 гг. // Изв. ТИНРО. — 2022. — Т. 202, вып. 3. — С. 580–600. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-580-600. EDN: FMKCOF.

Original article

Acoustic researches of arctic cod *Boreogadus saida* (Gadidae) in the southwestern Chukchi Sea in 2003–2020

Mikhail Yu. Kuznetsov*, Vladimir I. Polyanichko**, Evgeny V. Syrovatkin***

*, **, *** Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia

* Ph.D., head of laboratory, mikhail.kuznetsov@tinro-center.ru

** leading specialist, vladimir.polyanichko@tinro-center.ru

*** leading specialist, evgeniy.syrovatkin@tinro-center.ru

Abstract. Spatial distribution patterns and abundance of arctic cod *Boreogadus saida* are considered for the southwestern Chukchi Sea on the data of acoustic surveys and trawl samples obtained by TINRO research vessels in 2003–2020. The highest abundance and biomass of this species indicated by the echosounder-measured backscattering coefficient s_A (m^2 per sq.n.mile) were observed in August 2003, decreased significantly in 2007–2008 and later, with the minimum in 2010, increased in 2014 due to the high portion of juveniles, but continued to decrease in recent years and reached the lowest value in 2020. This negative tendency for arctic cod contradicts to the walleye pollock abundance increasing in the southwestern Chukchi Sea on the background of warming in the Arctic. The arctic cod were distributed mainly in the northeastern and southwestern parts of the surveyed area, usually as vast fields of small schools or sparse layers. To the east from $174^\circ W$, the aggregations were formed by large-sized fish distributed mostly at the bottom. In the western area, the aggregations were formed within thermocline at the depth of 10–20 m or had two-layer structure with the juveniles dominated in the upper layer and larger fish at the bottom. Typical echograms showed dense schools of arctic cod with the height up to 30 m and horizontal size of 120–400 m, presumably formed by migrating fish. Diurnal vertical migrations were not expressed for this species, though the aggregations of lower density were observed at night, in general, with some local aggregations of permanently dense schools, both in the daytime and at night.

Keywords: Chukchi Sea, acoustic measurement, arctic cod, survey, fish aggregation, fish distribution, vertical structure, school density, fish abundance

For citation: Kuznetsov M.Yu., Polyanichko V.I., Syrovatkin E.V. Acoustic researches of arctic cod *Boreogadus saida* (Gadidae) in the southwestern Chukchi Sea in 2003–2020, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 202, no. 3, pp. 580–600. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-580-600. EDN: FMKCOF.

Введение

На фоне активной эксплуатации водных биологических ресурсов в традиционных районах промысла в последние годы все больше исследований посвящается оценке состояния и возможности промыслового освоения массовых видов nekтона, обитающих в более отдаленных и труднодоступных местах, в частности в водах Арктики.

Сайка (полярная тресочка) — холодноводный, преимущественно планктоноядный вид семейства тресковых (Gadidae). Распространена на всей акватории Северного Ледовитого океана и является наиболее многочисленным представителем ихтиофауны в арктических морях России. Благодаря большой суммарной биомассе сайка играет ключевую роль в трофической сети морской экосистемы Арктики, поскольку входит в рацион многих млекопитающих и птиц [Bradstreet et al., 1986; Welch et al., 1993].

В восточной части Арктики сайка, помимо Чукотского моря, встречается также в северной части Берингова моря, где обычно наблюдается в Беринговом проливе, заливах Нортон и Анадырском. В отдельные годы проникает вдоль азиатского побережья

на юг вплоть до южной части Карагинского залива. Наиболее широкое распространение сайки в ИЭЗ России было зарегистрировано в аномально холодном 1999 г. Сайка встречалась не только в северо-западной части Берингова моря, а также почти на всей обследованной акватории шельфа от Чукотского полуострова до Олюторского залива [Борец и др., 2001]. Характерными являются значительные межгодовые колебания численности и пространственная неоднородность ее скоплений [Николаев и др., 2008]. Кроме этого, являясь одним из наиболее холодолюбивых представителей тресковых, нагульные миграции сайки сильно ограничены температурным режимом вод. Был сделан вывод, что массового распространения сайки в южную часть Чукотского моря можно ожидать спустя 1–2 года после появления высокоурожайного поколения и при условии относительно холодного типа года [Николаев и др., 2008].

Организация специализированного промысла сайки сдерживается экономическими причинами, связанными прежде всего с кратковременной доступностью акватории арктических морей для работы промыслового флота, а также многочисленными рисками по причине слабой изученности мест локализации, закономерностей образования промысловых скоплений и влияния на них абиотических и биотических факторов, т.е. сложностью прогнозирования запаса этого объекта, относящегося к группе высокофлюктуирующих видов.

Целью работы является обобщение данных акустических измерений, выполненных при проведении учетных съемок ТИНРО в юго-западной части Чукотского моря, выявление особенностей пространственного распределения, вертикальной структуры и плотности скоплений сайки, их межгодовой динамики.

Материалы и методы

При подготовке статьи были использованы акустические и биологические материалы рейсов ТИНРО-центра и Тихоокеанского филиала ВНИРО (ТИНРО) в арктические моря в 2003–2020 гг. В Чукотском море съемки выполнялись в юго-западной его части, в пределах примерно одного и того же участка между мысом Дежнева и о. Врангеля, выбранного в качестве полигона, примерно в одни и те же сроки (август–сентябрь). Акустические измерения выполнялись по схеме траловых станций, по результатам которых производилась видовая и размерная идентификация эхограмм. Соответственно этим схемам формировались галсовые маршруты акустических съемок (рис. 1). Границы и площади обследованных акваторий варьировали в различные годы. Тем не менее общее расположение полигона было достаточно стабильно, что позволяет оценить динамику распределения и плотности сайки в этом секторе Чукотского моря в межгодовом аспекте.

В качестве основной гидроакустической измерительной системы использовался калиброванный исследовательский эхолот SIMRAD EK–60 с рабочими частотами 38 и 120 кГц. Регистрация акустических данных производилась программой SIMRAD ER–60 круглосуточно на обеих частотах. Для количественной оценки плотности и обилия рыб использовалась частота 38 кГц, распределения зоопланктона — частота 120 кГц. Навигационное сопровождение акустического комплекса осуществлялось с использованием системы спутникового позиционирования GPS. Для визуализации и постпроцессорной обработки акустических данных использовался программный комплекс, включающий интегрированную базу данных в среде Access и программу многовидовой обработки эхограмм SALTSE [Кузнецов и др., 2021]. Акустические измерения сопровождалась регистрацией в интегрированной базе данных результатов контрольных тралений, биологических, навигационных и других данных.

Технология обработки акустических данных строилась на принципе детальной стратификации района работ с учетом размерно-частотной композиции регистрируемых скоплений, выявляемой по результатам тралений. При интегрировании устанавливался порог по уровню объемного рассеяния –70 дБ, порог по TS –65 дБ. Для перехода к абсолютным оценкам

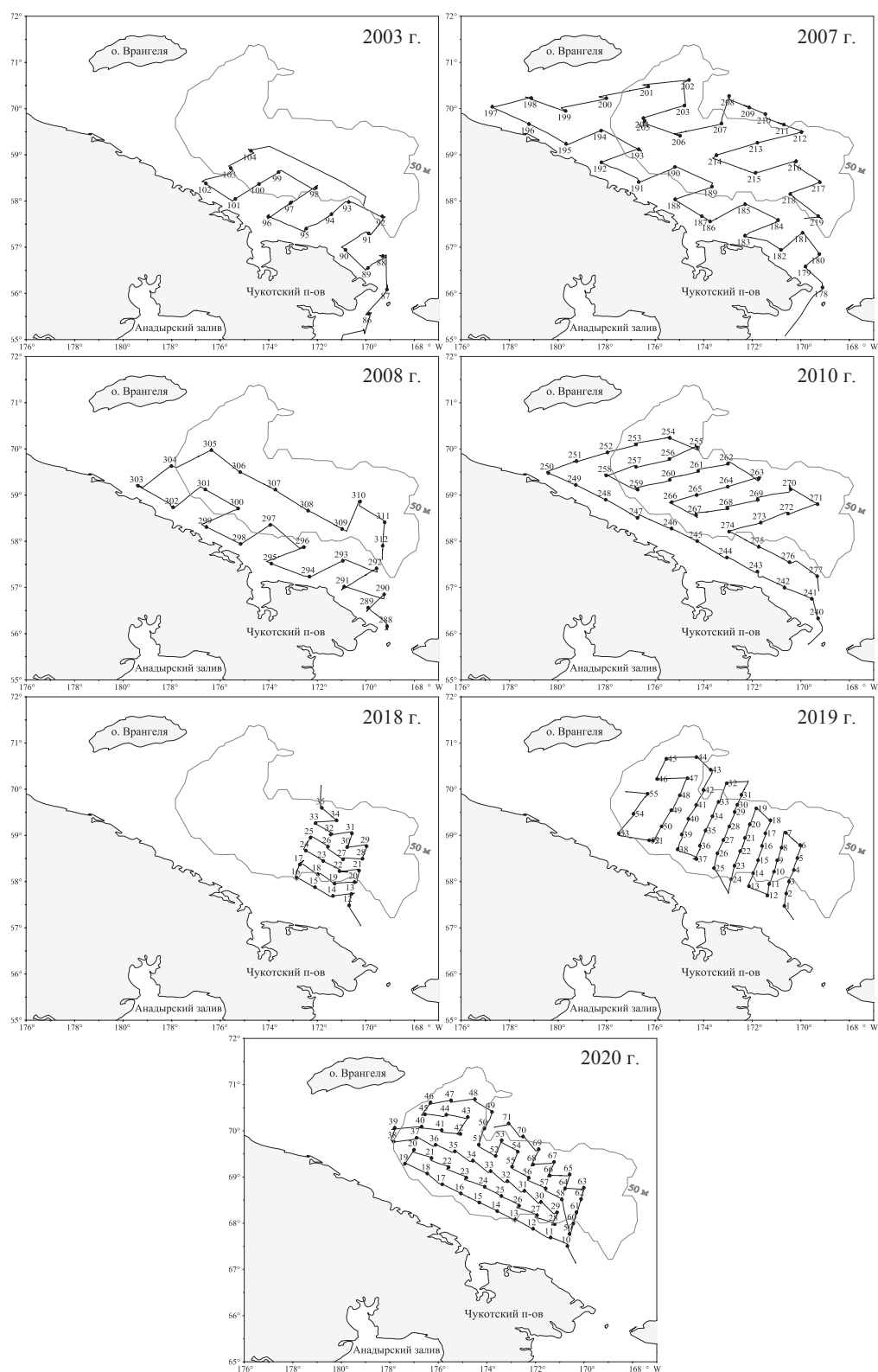


Рис. 1. Схема акустических галсов и траловых станций в юго-западной части Чукотского моря (2003–2020 гг.)

Fig. 1. Scheme of acoustic transects and trawl stations in the southwestern Chukchi Sea (2003–2020)

численности использовались уравнения, связывающие силу цели сайки и ее зоологическую длину: $TS = 12,8\log(L) - 64,3$ ($L < 15$ см), $TS = 21,8\log(L) - 74,9$ ($L \geq 15$ см) [Мамылов, 1999].

В результате последовательной обработки эхограмм формировались оценки акустической плотности рыб вдоль галсов с размером отдельного элемента 0,5 мили по дистанции и 1 м по глубине в пределах выделенных для обработки слоев. Для расчета средневзвешенной глубины обитания сайки на каждой i -той миле пути создавались два ряда данных: $f_i(x, y, z_j, t)$ — плотность рыб (усредненная по 5-метровым интервалам глубины численность сайки на квадратную милю) и $H_i(z_j)$ — глубина, где x, y — координаты, z_j — интервал глубины, $j = 1, \dots, n_i$, n_i — число интервалов глубины, t — время. Средневзвешенная по численности глубина местоположения рыб на i -той миле пути определялась как

$$H_{iAVG} = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} (f_j \cdot H_j)}{\sum_{j=1}^{n_i} f_j}.$$

Поскольку границы и площади обследованных акваторий варьировали в разные годы, для представления межгодовой динамики обилия использовались не абсолютные оценки численности и биомассы сайки, а значения ее плотности на единицу горизонтальной площади в виде измеряемого эхолотом коэффициента обратного поверхностного рассеяния s_A ($\text{м}^2/\text{миля}^2$), а также плотности рыб по численности Q_N (тыс. экз./ миля^2) и по биомассе Q_B ($\text{т}/\text{миля}^2$).

Результаты и их обсуждение

Гидроакустические исследования в восточном секторе Арктики были впервые предприняты в августе 2003 г. при проведении пелагической траловой съемки юго-западной части Чукотского моря на НИС «ТИНРО». Тогда акустические оценки численности и биомассы скоплений сайки в этом секторе Чукотского моря были самыми высокими за весь период последующих наблюдений.

Рассмотрим результаты акустических исследований на выделенном участке Чукотского моря в 2003–2020 гг. в сравнительном аспекте. Распределение сайки представлено на рис. 2, обобщенные оценки обилия — в таблице и на рис. 3.

Оценки обилия сайки в юго-западной части Чукотского моря
в августе-сентябре 2003–2020 гг.
Estimates of arctic cod abundance in the southwestern Chukchi Sea
in August-September of 2003–2020

Год	Районы									
	Восточнее 174° W					Западнее 174° W				
	A, миля ²	s _A , м ² /миля ²	Q _N , тыс. экз./миля ²	Q _B , т/миля ²	L _{ср} , см	A, миля ²	s _A , м ² /миля ²	Q _N , тыс. экз./миля ²	Q _B , т/миля ²	L _{ср} , см
2003	16494	1145	16005	216	12,5	6611	671	6389	110	12,4
2007	21600	70	941	5	7,8	17810	252	3336	21	8,6
2008	19082	180	4100	9	5,6	14894	173	4814	4	4,7
2010	20914	17	130	2	12,9	15964	7	72	1	10,3
2014	1952	588	7254	29	7,3	1519	246	6072	11	5,4
2015	402	41 (93)	—	—	—	835	378 (207)	—	—	—
2018	10562	110	932	13	10,8	—	—	—	—	—
2019	17620	76	498	13	13,3	11903	78	449	13	13,1
2020	16931	45	375	4	11,2	12563	48	497	4	11,0

Примечание. A — обследованная площадь; L_{ср} — средневзвешенная длина рыб.

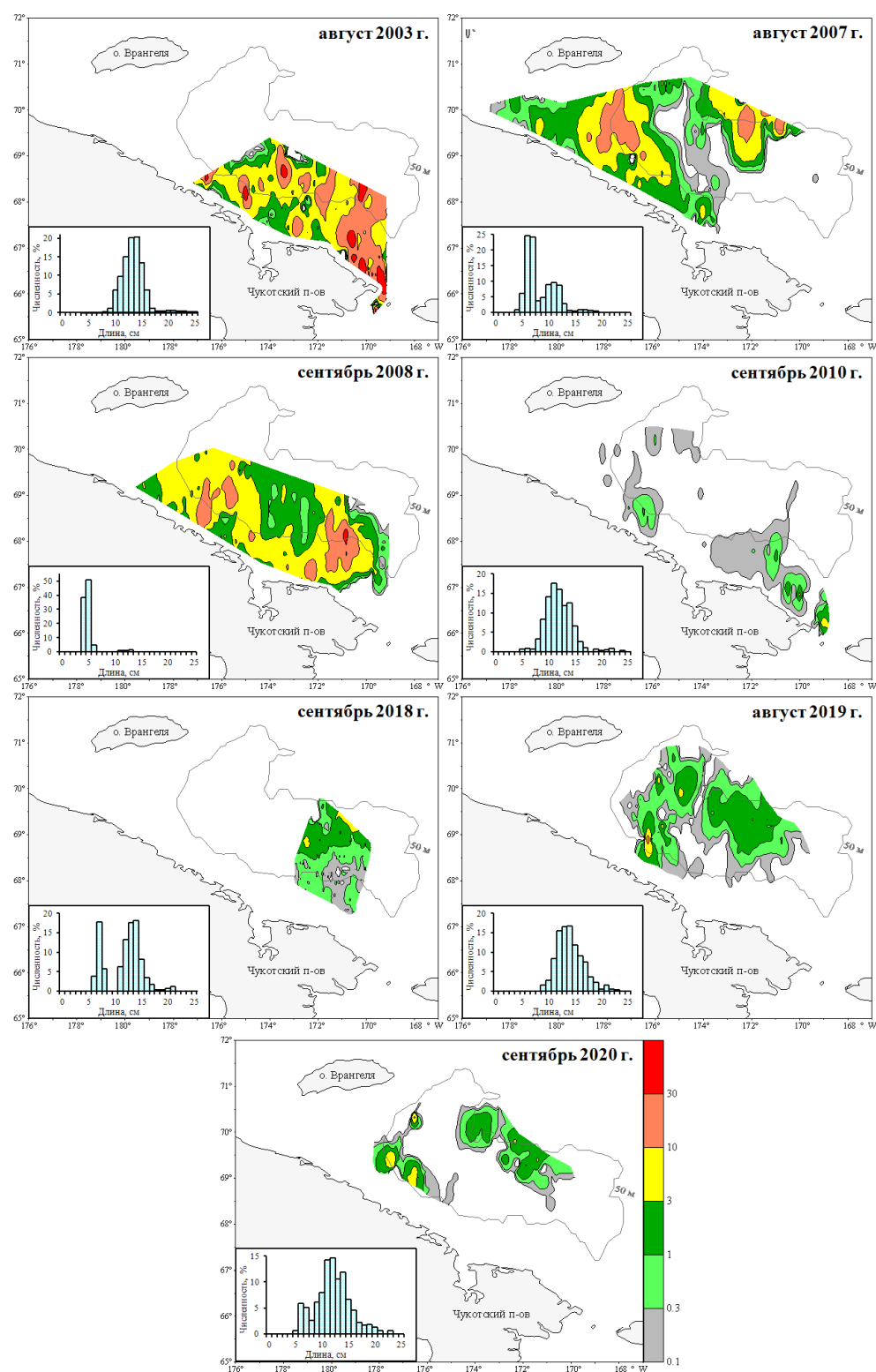


Рис. 2. Пространственное распределение сайки (млн экз./миля²) в юго-западной части Чукотского моря по результатам акустических измерений в 2003–2020 гг. (на врезке — размерный состав сайки по траловым уловам)

Fig. 2. Spatial distribution of arctic cod ($\times 10^6 \text{ ind./nmi}^2$) in the southwestern Chukchi Sea by results of acoustic surveys in 2003–2020 (Insert: size composition of arctic cod in trawl catches)

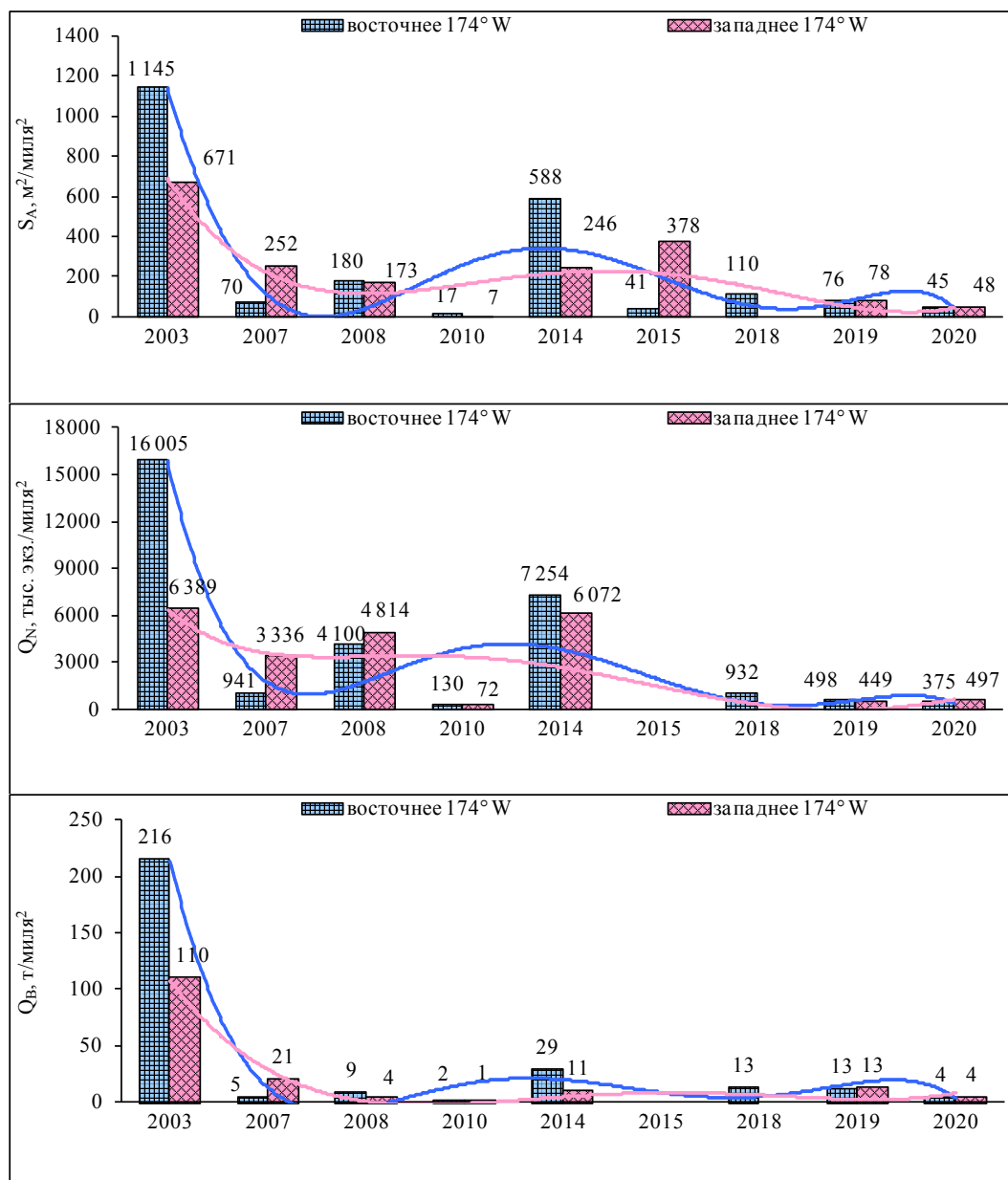


Рис. 3. Межгодовая динамика плотности скоплений сайки (*B. saida*) в юго-западной части Чукотского моря в единицах коэффициента обратного рассеяния s_A ($m^2/миля^2$), Q_N (тыс. экз./ $миля^2$) и Q_B ($т/миля^2$)

Fig. 3. Interannual dynamics of the arctic cod aggregations density in the southwestern Chukchi Sea in the units of backscattering coefficient s_A (m^2/nmi^2), abundance Q_N ($\times 10^3$ ind./ nmi^2) and biomass Q_B (t/nmi^2)

В августе 2003 г. плотные скопления сайки были зарегистрированы еще в Беринговом проливе и далее встречались на всем полигоне в юго-западной части Чукотского моря практически повсеместно. Наибольшие концентрации сайки, где плотность в скоплениях достигала значений свыше 30 млн экз./ $миля^2$ (> 500 т/ $миля^2$), были сосредоточены в восточной части обследованной акватории Чукотского моря, примыкающей к Берингову проливу. Здесь сайка обитала преимущественно в нижней части диапазона глубин, придерживаясь придонных горизонтов (рис. 4, А). В западной части

полигона пространственная структура скоплений была более пятнистой, при этом плотные скопления сайки были распределены как в нижних, так и в средних горизонтах глубин (рис. 4, Б). В результате на суммарном вертикальном распределении (по всему району) наблюдалось явно выраженное тяготение сайки к придонным горизонтам: частота встречаемости сайки в августе 2003 г. составила 22 в верхней (0–25 м) и 78 % в нижней (25–50 м) частях водного слоя (рис. 5). Размерный состав сайки в восточной и западной частях обследованного района существенно не различался (см. таблицу). Скопления были образованы в основном особями длиной 10–16 см и небольшим количеством крупных рыб до 27 см (см. рис. 2). Средняя длина сайки составила 12,5 см, средняя масса — 16,6 г.

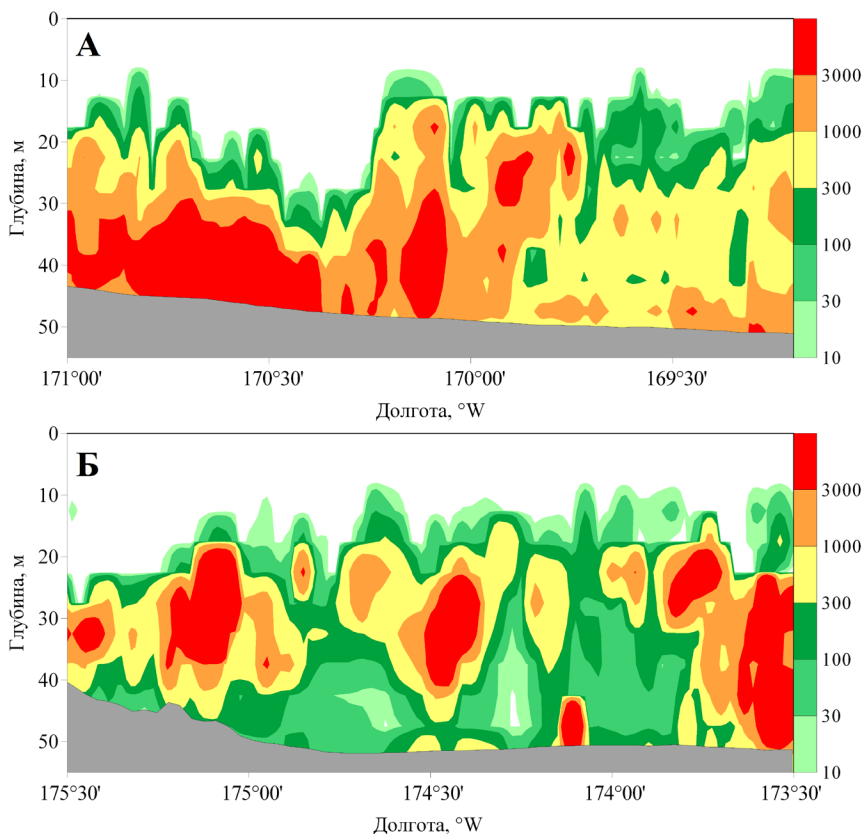


Рис. 4. Вертикальное распределение обилия сайки (тыс. экз./миля²) по слоям глубины с шагом 5 м вдоль разрезов в юго-западной части Чукотского моря в августе 2003 г.: А — к востоку от 174° з.д. (67–68° с.ш.); Б — к западу от 174° з.д. (68–69° с.ш.)

Fig. 4. Vertical distribution of arctic cod abundance, by strata ($\times 10^3$ ind./nmi² per 5 m stratum) along the transects in the southwestern Chukchi Sea in August 2003: А — east of 174°W (67°–68°N); Б — west of 174°W (68°–69°N)

В аналогичный период 2007 г. район исследований был расширен в северном направлении до о. Геральда и в северо-западном — до прол. Лонга и о. Врангеля (см. рис. 1). В отличие от 2003 г., не наблюдалось экзотических скоплений сайки в Беринговом проливе и на примыкающей к проливу акватории Чукотского моря. Первые скопления сайки были зафиксированы только на траверсе Колюченской губы. При этом скопления имели значительно меньшую плотность в обследованном районе в сравнении с 2003 г. (рис. 3).

Максимальные концентрации как пелагических, так и придонных скоплений сайки с плотностью свыше 10 млн экз./миля² были зарегистрированы в западной и северо-восточной частях обследованной акватории (см. рис. 2). На пространственном распределении эти агрегации разделены областью с низкой плотностью скоплений, где

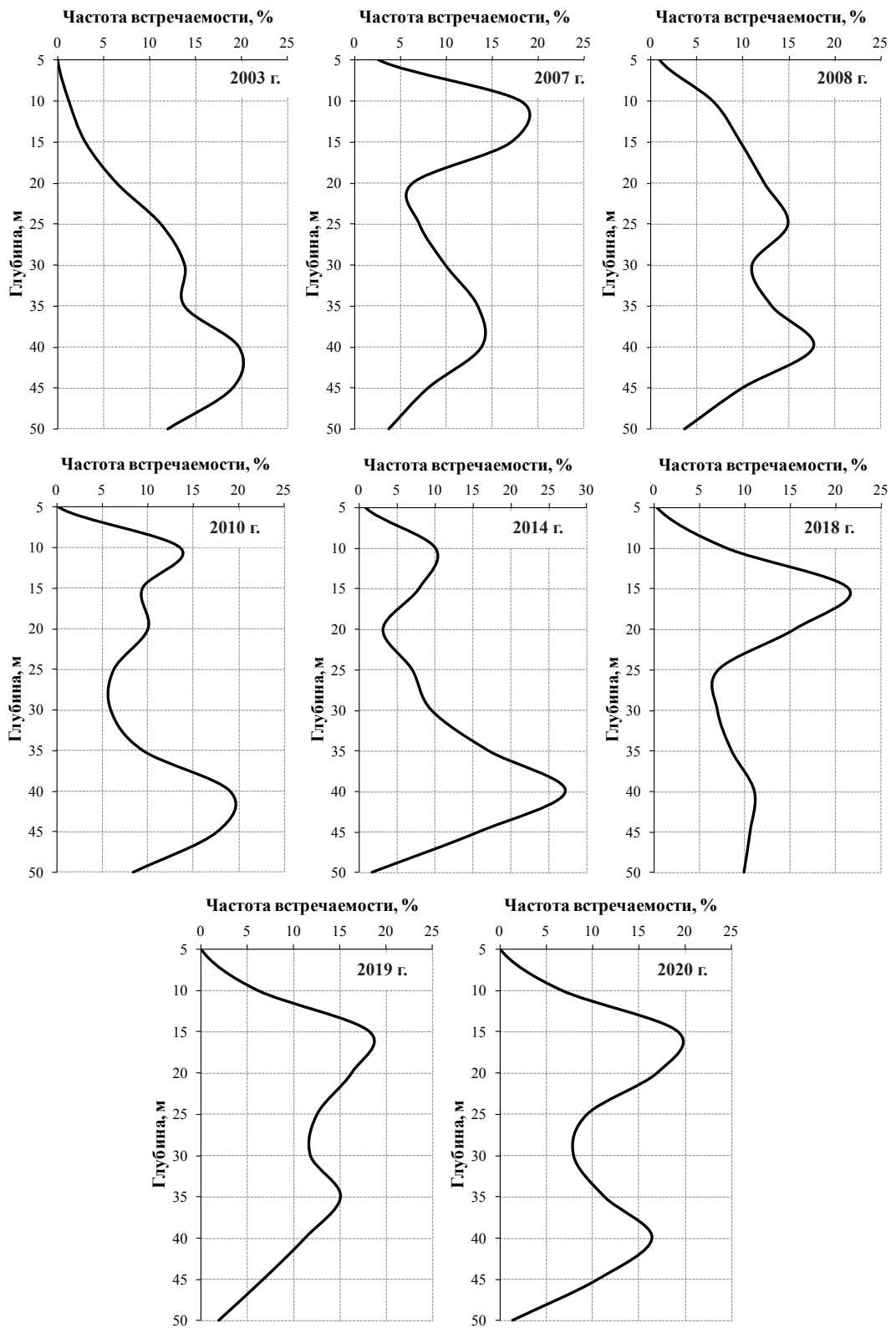


Рис. 5. Вертикальное распределение сайки в юго-западной части Чукотского моря в августе-сентябре 2003–2020 гг.

Fig. 5. Vertical distribution of arctic cod in the southwestern Chukchi Sea in August-September of 2003–2020

через исследуемую акваторию в северо-западном направлении проходили воды теплого берингоморского течения. Особенно заметно в 2007 г. «размытие» берингоморскими водами придонных скоплений сайки и их концентрация в богатых зоопланктоном антициклонических вихрях на западе и на севере района съемки (рис. 6).

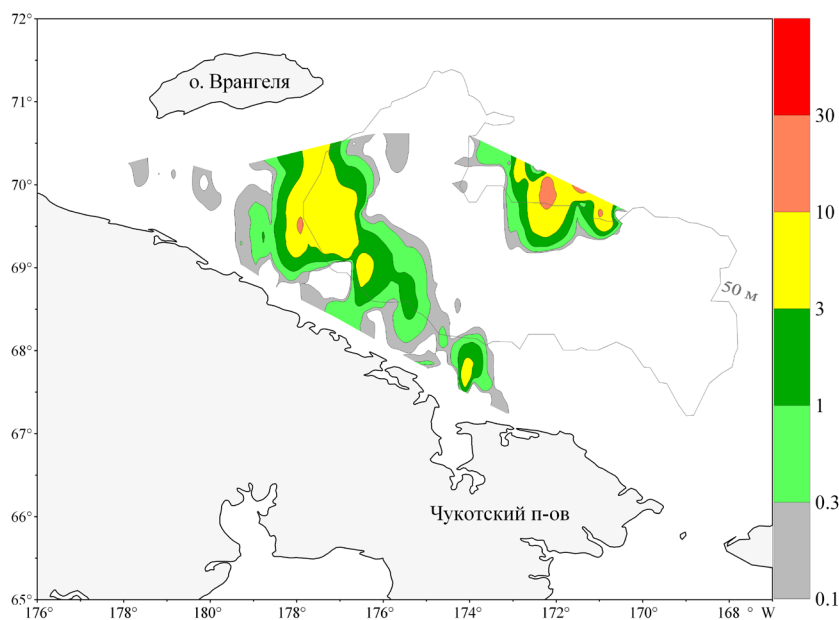


Рис. 6. Распределение придонных скоплений сайки в юго-западной части Чукотского моря в августе 2007 г. (млн экз./миля², слой 0–10 м от грунта)

Fig. 6. Distribution of near-bottom concentrations of arctic cod in the southwestern part of the Chukchi Sea, August 2007 ($\times 10^6$ ind./nmi², layer 0–10 m from the bottom)

Сайка в скоплениях была представлена в основном сеголетками длиной 5–8 см и особями 9–13 см с преобладанием молоди 6–7 см (см. рис. 2). Основные скопления сайки были зарегистрированы как в верхней, так и в нижней частях диапазона глубин (рис. 7, А). Нередко встречалась двухслойная структура скоплений, особенно в западной части обследованной акватории (рис. 7, Б). Вертикальное распределение сайки было двухмодальным и, в отличие от 2003 г., соотношение рыб в верхней (0–25 м) и нижней (25–50 м) частях водного столба было примерно равным: соответственно 52 и 48 % (см. рис. 5). Достаточно плотные агрегации в приповерхностном слое были образованы большей частью сеголетками сайки, в то время как более крупные особи обитали преимущественно в придонной области, что подтвердили результаты контрольных тралений. Судя по размерному составу скоплений, урожайность сайки в 2004 г. и в последующие годы, видимо, была невысока, что привело к многократному сокращению средних и крупных рыб на обследованной акватории Чукотского моря в 2007 г. по сравнению с 2003 г.

В 2008 г. сайка была распределена на акватории съемки повсеместно, но пространственная структура скоплений была неоднородна. На пространственном распределении выделялись две области скоплений. Один участок скоплений повышенной плотности (более 10 млн экз./миля²) был расположен в западной части обследованного прибрежного шельфа. Другой участок, где были зарегистрированы наиболее плотные концентрации сайки (свыше 30 млн шт./миля²), находился в восточной части района исследований на траверзе мыса Сердце-Камень (см. рис. 2). На вертикальном распределении скопления в западной части полигона размещались выше грунта на 5–10 м в слое 10–30 м (рис. 8, А). В восточной части полигона скопления также держались преимущественно в средней части диапазона глубин (рис. 8, Б), но встречались достаточно плотные придонные агрегации этих рыб (рис. 9), образующие участки максимальной

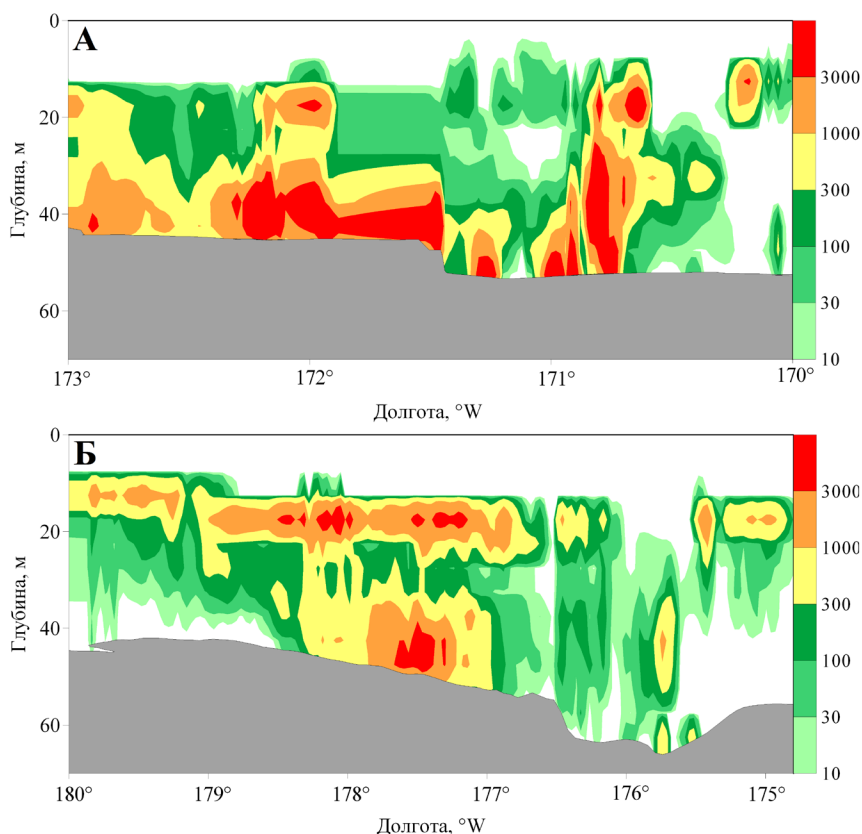


Рис. 7. Вертикальное распределение обилия сайки (тыс. экз./миля²) по слоям глубины с шагом 5 м вдоль разрезов в юго-западной части Чукотского моря в августе 2007 г.: **А** — к востоку от 174° з.д. (69°30′–70°00′ с.ш.); **Б** — к западу от 174° з.д. (70°00′–70°30′ с.ш.)

Fig. 7. Vertical distribution of arctic cod abundance, by strata ($\times 10^3$ ind./nm² per 5 m stratum) along transects in the southwestern Chukchi Sea in August 2007: **А** — east of 174°W (69°30′–70°00′N); **Б** — west of 174°W (70°00′–70°30′N)

плотности на горизонтальном распределении. В результате соотношение суммарной плотности по вертикали составило 45 % в слое 0–25 м и 55 % — в слое 25–50 м (см. рис. 5). Скопления сайки в 2008 г. были образованы в подавляющем большинстве (95 %) сеголетками размером 3–6 см. Более крупные особи длиной 10–17 см составили немногим более 4 % от суммарной численности сайки и обитали преимущественно в придонном слое в восточном секторе съемки. Этим обусловлена разница средних размеров сайки восточнее и западнее 174° з.д. (см. таблицу).

В 2010 г. в южной части Чукотского моря зарегистрирована аномально низкая плотность сайки. Оценки обилия сайки в виде измеряемого эхолотом обратного поверхностного рассеяния s_A и плотности рыб по численности Q_N и биомассе Q_B были минимальными за весь период наблюдений (см. таблицу, рис. 3). Более-менее устойчивые агрегации сайки с плотностью 1–3 млн экз./миля² располагались вдоль прибрежного шельфа в восточной части обследованного полигона между мысами Сердце-Камень и Дежнева (см. рис. 2), в зоне влияния Сибирского прибрежного течения и берингоморских вод. В западном секторе съемки наблюдалось рассеянное состояние скоплений (0,3 млн экз./миля² и менее).

В период исследований размеры сайки варьировали от 5 до 24 см. Средняя ее длина по району исследований также несколько различалась, что определило вертикальное распределение скоплений. В восточной части съемки обитали более крупные особи

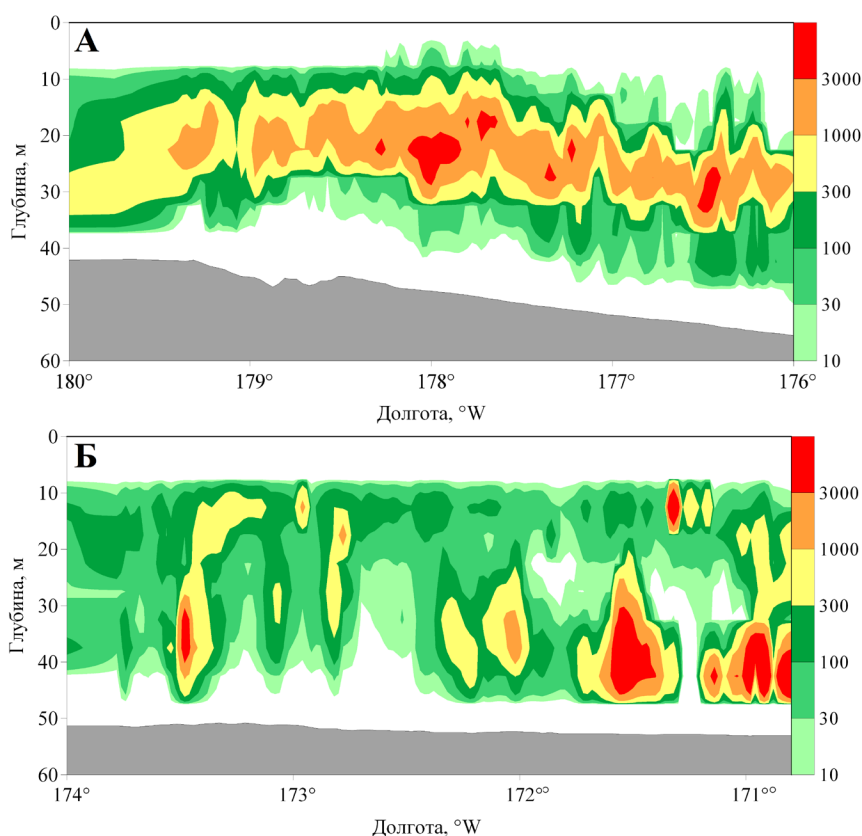


Рис. 8. Вертикальное распределение обилия сайки (тыс. экз./миля²) по слоям глубины с шагом 5 м вдоль разрезов в юго-западной части Чукотского моря в сентябре 2008 г.: А — к западу 174° з.д. (69–70° с.ш.); Б — к востоку от 174° з.д. (68–69° с.ш.)

Fig. 8. Vertical distribution of arctic cod abundance, by strata ($\times 10^3$ ind./nmi² per 5 m stratum) in the southwestern Chukchi Sea in September 2008: А — west of 174°W (69–70°N); Б — east of 174°W (68–69°N)

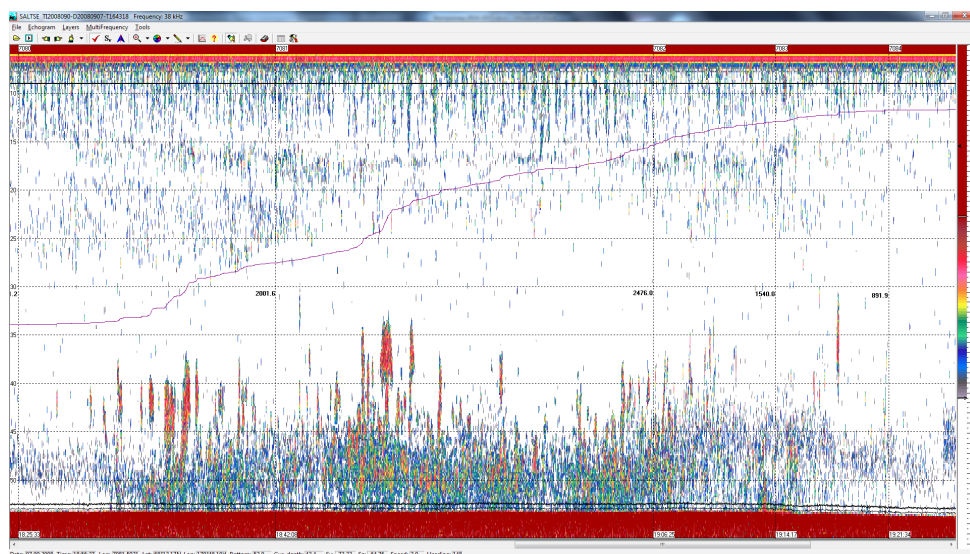


Рис. 9. Акустические изображения скоплений сайки в юго-западной части Чукотского моря к востоку от 174° з.д. (сентябрь 2008 г.)

Fig. 9. Acoustic images of arctic cod aggregations obtained in the southwestern Chukchi Sea eastward from 174°W in September 2008

($L_{cp} = 12,9$ см), которые предпочитали глубины свыше 30 м и придонные горизонты: 60 % суммарной численности рыб зарегистрировано в слое 25–50 м (см. рис. 5). В западном секторе скопления формировали особи меньшего размера ($L_{cp} = 10,3$ см), обитающие рассеянно преимущественно в приповерхностных горизонтах 10–20 м (40 % численности).

Спустя 4 года, в 2014 г., из-за технических ограничений акустические данные о пространственном распределении и обилии сайки были получены лишь частично с небольшого участка обследованной акватории Чукотского моря (рис. 10). Такие данные не способны отразить картину распределения объекта на всем полигоне, поэтому эта информация не приводится. Однако из имеющихся данных можно получить значения плотностей скоплений сайки в акустических единицах s_A ($m^2/миля^2$), а также, используя промеры уловов учетных тралений, значения плотности рыб по численности (тыс. экз./миля²) и биомассе (т/миля²), которые приведены в таблице и на рис. 3.

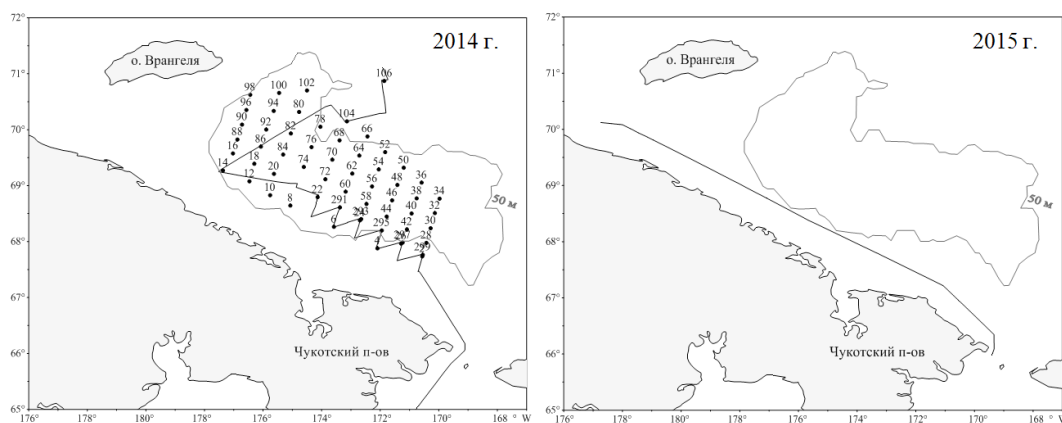


Рис. 10. Схема акустических галсов в юго-западной части Чукотского моря в 2014–2015 г.
Fig. 10. Scheme of acoustic transects in the southwestern Chukchi Sea in 2014–2015

Результаты измерений показали значительный рост характеристик обилия сайки в виде акустической плотности рыб s_A , особенно в восточной части обследованной акватории. За счет высокой доли молоди в уловах в 2014 г. оценки плотности по численности рыб Q_N заметно выросли и были сравнимы с таковыми 2003 г. (рис. 3). Высокую плотность скоплений сайки в юго-западной части Чукотского моря в сентябре 2014 г. демонстрируют эхограммы на рис. 11. Мойва, которая была вторым по численности объектом и встречалась в донных и пелагических уловах повсеместно, образовывала характерные акустические изображения в виде плотных косяков на фоне протяженных скоплений сайки (рис. 12).

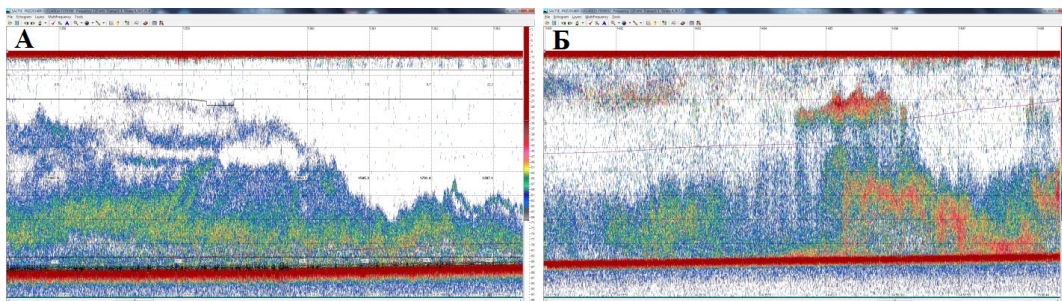


Рис. 11. Акустическое изображение скоплений сайки в Чукотском море в сентябре 2014 г.:
А — день; Б — ночь
Fig. 11. Acoustic image of arctic cod aggregations obtained in the Chukchi Sea in September 2014: А — day; Б — night

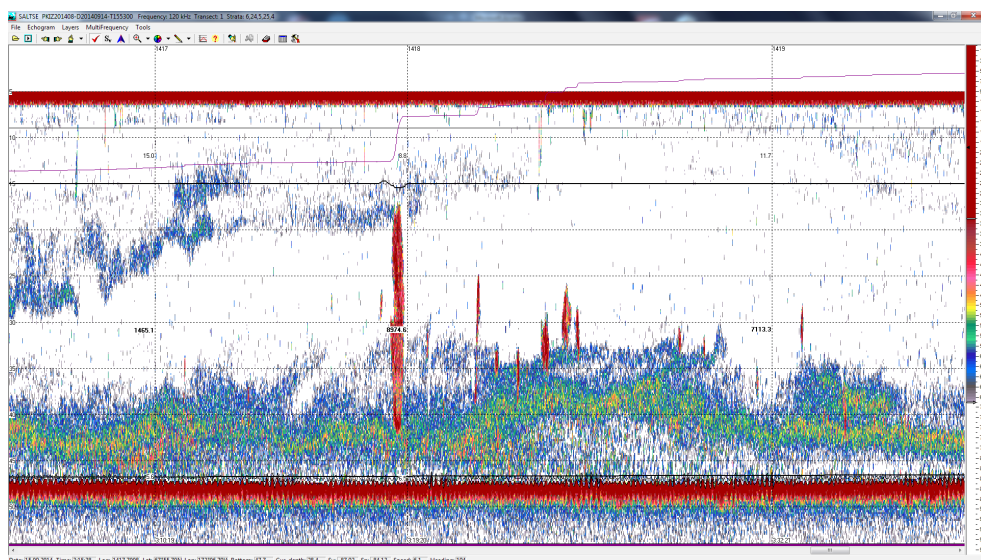


Рис. 12. Акустическое изображение косячков мойвы на фоне скоплений сайки в Чукотском море в сентябре 2014 г.

Fig. 12. Acoustic image of capelin shoals on the background of arctic cod aggregations obtained in the Chukchi Sea in September 2014

Размеры сайки менялись от 3 до 26 см, при этом средняя длина ее особей в восточной части съемки была почти на 2 см больше, чем в западной (см. таблицу). Вообще для выделенного полигона типичным является тяготение сайки к придонным горизонтам, где обитают более крупные особи, в восточной его части и двухслойная структура скоплений — в западной с преобладанием молоди в пелагиали. Поскольку в 2014 г. плотность сайки к востоку от 174° з.д. была намного выше, чем к западу (см. таблицу), распределение рыб по вертикали составило суммарно 70 % в нижней части диапазона глубин 25–50 м и 30 % в слое 0–25 м (см. рис. 5).

В комплексной съемке 2015 г. Чукотское море не исследовалось. Судно прошло через акваторию полигона в море Лаптевых сквозным галсом вдоль прибрежного шельфа без учетных тралений (см. рис. 10). Причем данный проход был выполнен дважды: в августе 2015 г. (прямой) и в сентябре (обратный). Так как траления не производились, нет информации по видовому и размерному составу улова, которая нужна для вычисления численности и биомассы гидробионтов эхоинтеграционным методом. Поэтому мы можем оперировать только акустическими данными — информацией о плотностях скоплений сайки вдоль галса в условных акустических единицах s_A ($m^2/миля^2$), представленных в таблице и на рис. 3.

В августе 2015 г. плотность рыб в западной части полигона была на порядок выше, чем в восточной. Поэтому подавляющее большинство сайки (90 %) было зарегистрировано в верхней части водного слоя с максимальной плотностью на глубине около 20 м (рис. 13, А). В сентябре соотношение обилия сайки к востоку и к западу от 174° з.д. изменилось. Плотность рыб в западной части ослабла, в восточной — наоборот, увеличилась (см. таблицу, значения в скобках). Изменилось и вертикальное распределение скоплений: в пределах верхнего 25-метрового слоя обитало 40 % сайки, а 60 % — в более глубоких горизонтах (рис. 13, Б). Суммарные оценки плотности скоплений сайки в восточной и западной частях съемки были значительно ниже, чем в 2014 г. (прямой галс — в 1,8 раза, обратный галс — в 3,0 раза), определив дальнейшую тенденцию снижения ее запаса (см. рис. 3).

Следующая съемка в Чукотском море состоялась в сентябре 2018 г. и охватывала участок акватории в восточной части полигона (см. рис. 1). Локальность обследованного участка исключает возможность суждения о пространственном распределении

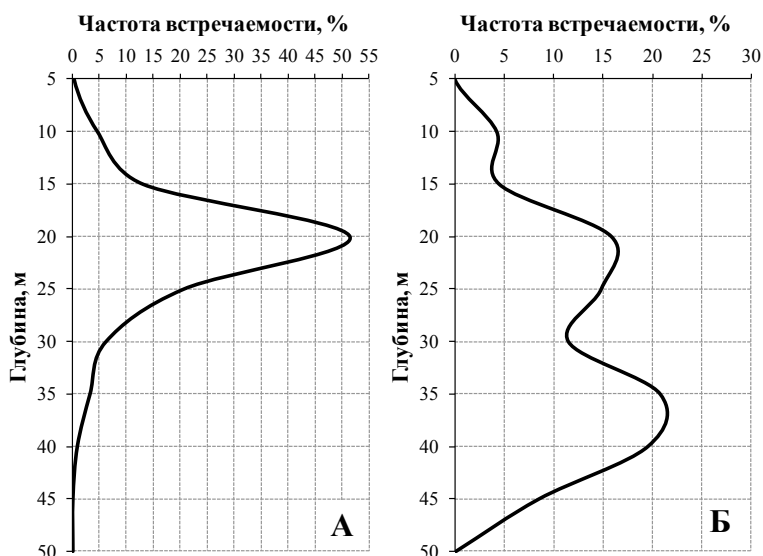


Рис. 13. Вертикальное распределение сайки в юго-западной части Чукотского моря: А — август 2015 г.; Б — сентябрь 2015 г.

Fig. 13. Vertical distribution of arctic cod in the southwestern Chukchi Sea: А — August 2015; Б — September 2015

рыб на всей акватории полигона. Можно лишь отметить усиление концентрации сайки в северном направлении, где плотность скоплений достигала 1–3 млн экз./миля² (рис. 2). По вертикали сайка доминировала в подповерхностном слое на глубинах 15–20 м в северной части съемки (в основном молодь 6–8 см) и в придонных горизонтах на юге (более 10 см). В результате в слое 0–25 м обитало суммарно 52 % скоплений, в слое 25–50 м — 48 % сайки (рис. 5). Средняя плотность рыб в пределах обследованного участка была невысокой, поддерживая таким образом тенденцию ее снижения в межгодовом плане (см. таблицу, рис. 3).

В августе 2019 г., как и в 2007 г., в Беринговом проливе и на примыкающей к проливу акватории скопления сайки отсутствовали. Первые скопления были зафиксированы только на траверзе мыса Сердце-Камень, но имели гораздо меньшую степень локализации в обследованном районе в сравнении с 2007 г. (см. рис. 2). На распределении максимальные концентрации сайки в восточной части полигона не превышали 3 млн экз./миля² и 5 — в западной, за исключением локального скопления вблизи южной границы района между мысами Шмидта и Ванкарем с плотностью до 30 млн экз./миля² (рис. 14). При этом, как и в 2007 г., прослеживается снижение плотности (т.н. «размытие» поля скоплений сайки) в районе 174° з.д. под воздействием северо-западного потока теплых берингоморских вод (см. рис. 2).

Вертикальное распределение демонстрирует приуроченность сайки к слою термоклина в западной части полигона (рис. 15, А). К востоку от 174° з.д. сайка обитала более широко, захватывая придонные горизонты (рис. 15, Б). Суммарно 53 % рыб на обследованной акватории зарегистрировано в пределах слоя 0–25 м и 47 % — в нижней части диапазона глубин (в слое 25–50 м) (см. рис. 5).

В сентябре 2020 г. тенденция снижения средней плотности и площади распространения сайки в юго-западной части Чукотского моря продолжилась (см. таблицу), а избегание ею берингоморских водных масс стало еще более ощутимо. Сайка не была зарегистрирована эхолотом в Беринговом проливе и на прилегающей акватории моря. Скопления отсутствовали также в центральной части обследованного района, где проходил поток берингоморских вод, и были обнаружены только в более холодных антициклонических вихрях в северо-восточном и юго-западном секторах съемки с уси-

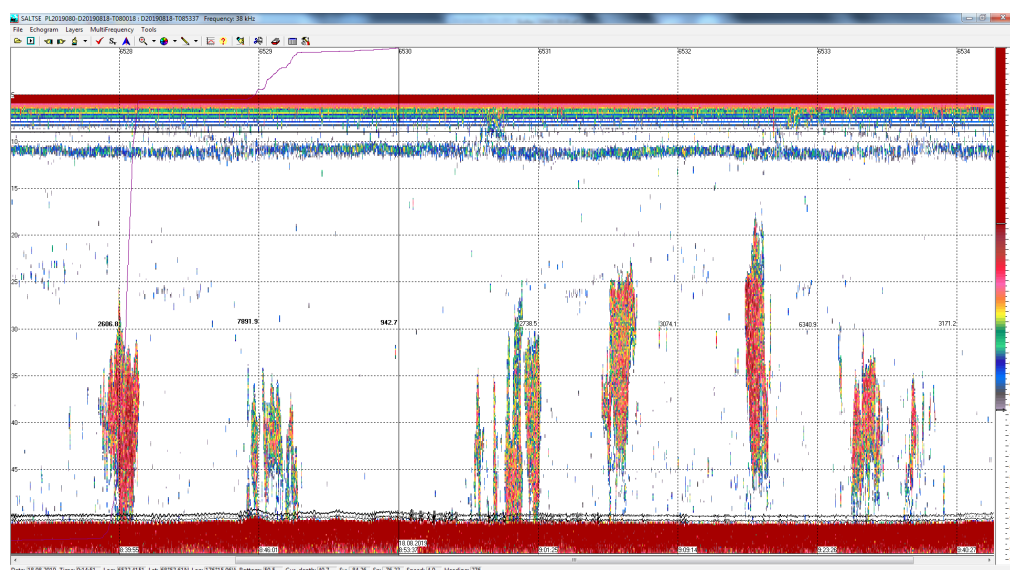


Рис. 14. Акустическое изображение скоплений сайки в южной части полигона ($68^{\circ}54'$ с.ш. $176^{\circ}15'$ з.д.) в августе 2019 г. (темное время суток)

Fig. 14. Acoustic image of arctic cod aggregations in the southern part of the surveyed polygon ($68^{\circ}54'N$ $176^{\circ}15'W$) in August 2019 (nighttime)

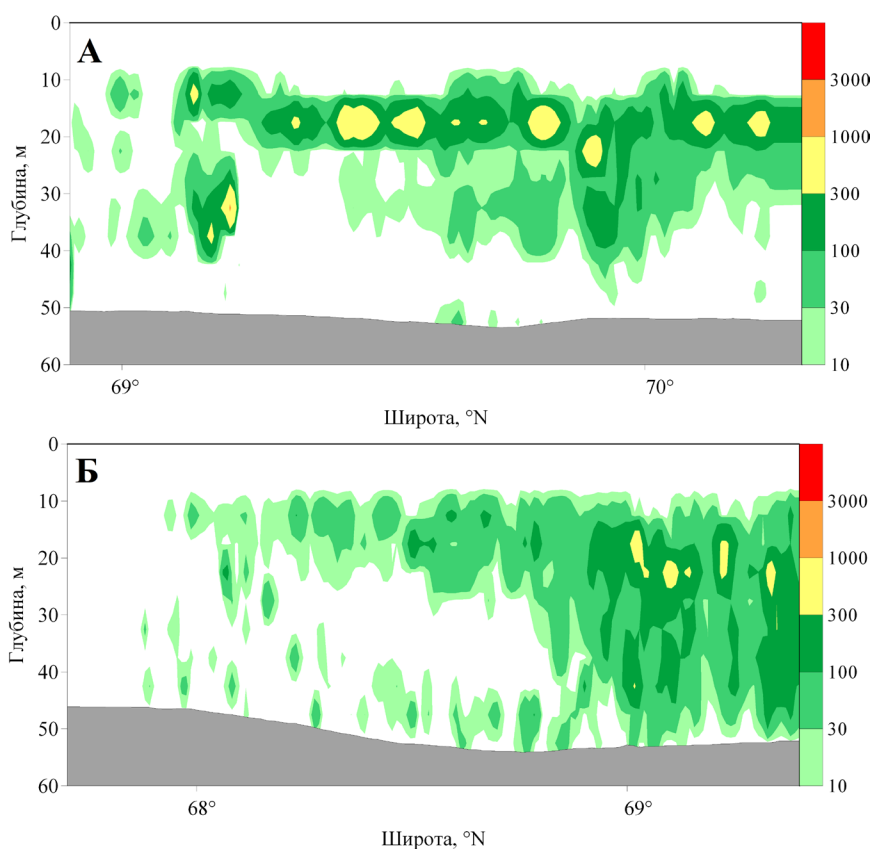


Рис. 15. Вертикальное распределение обилия сайки (тыс. экз./миля²) по слоям глубины с шагом 5 м вдоль разрезов в юго-западной части Чукотского моря в августе 2019 г.: А — к западу от 174° з.д.; Б — к востоку от 174° з.д.

Fig. 15. Vertical distribution of arctic cod abundance, by strata ($\times 10^3$ ind./nmi² per 5 m stratum) in the southwestern Chukchi Sea in August 2019: А — west of $174^{\circ}W$; Б — east of $174^{\circ}W$

лением концентрации к внешним границам полигона (см. рис. 2). Акустические оценки обилия (т.е. плотности по S_A , Q_N и Q_B) были минимальны с 2010 г. (см. таблицу, рис. 3).

Вертикальное распределение сайки имело выраженную двухслойную структуру (рис. 16) соответственно вертикальной структуре вод в этой части моря — разделенные термоклинном поверхностный и придонный слои. Устойчивые скопления в верхней части водного столба 0–25 м (52 % численности рыб) были приурочены к глубинам 15–20 м, где залегал слой скачка температур. В нижней части диапазона глубин 25–50 м (48 % учтенных особей) глубина максимальной концентрации рыб составила около 40 м (см. рис. 5).

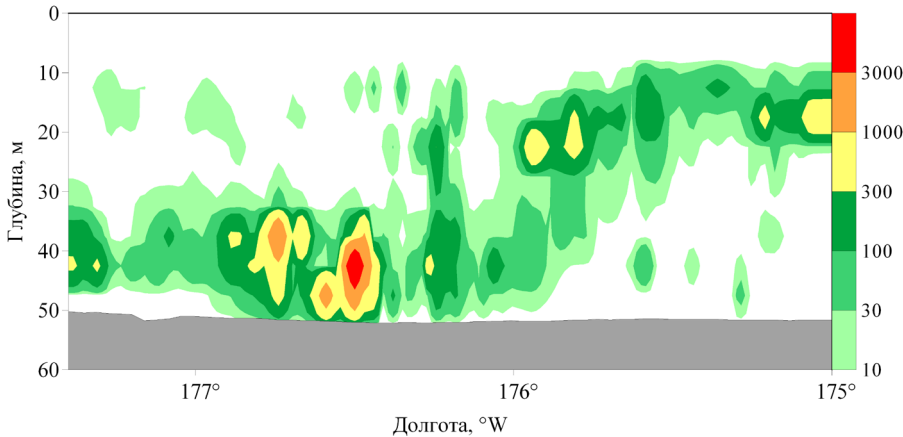


Рис. 16. Вертикальное распределение обилия сайки (тыс. экз./миля²) по слоям глубины в сентябре 2020 г. (68°30′–69°00′ с.ш.)

Fig. 16. Vertical distribution of arctic cod abundance, by strata ($\times 10^3$ ind./nmi² per 5 m stratum) in September 2020 (68°30′–69°00′N)

Активных вертикальных перемещений сайки в зависимости от времени суток в периоды съемок не наблюдалось, в отличие от кормовых организмов, совершающих на обследованной акватории суточные миграции по глубине (рис. 17). Как правило, скопления сайки регистрировались эхолотом в виде протяженных агрегаций перемен-

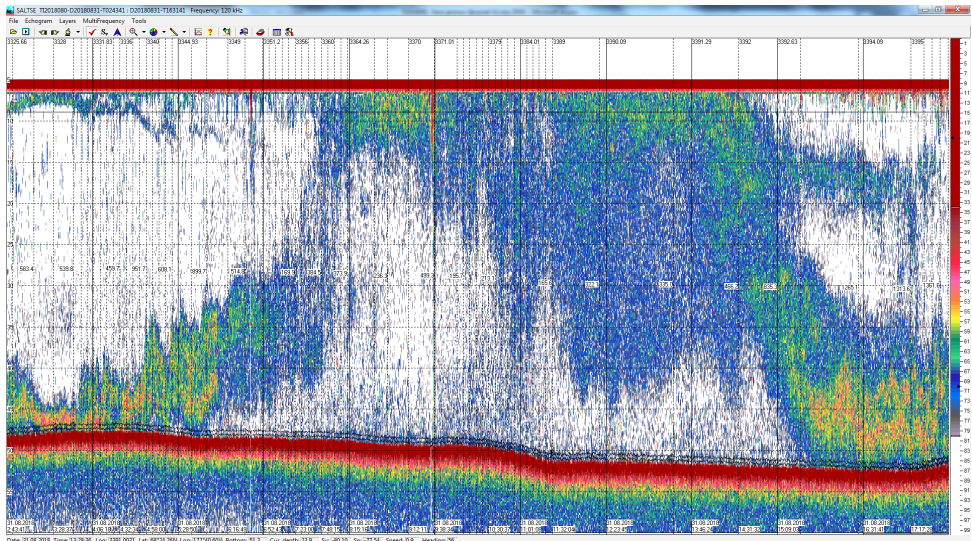


Рис. 17. Акустическое изображение суточных вертикальных миграций зоопланктона в Чукотском море (частота 120 кГц)

Fig. 17. Acoustic image of diurnal vertical migrations of zooplankton in the Chukchi Sea (frequency 120 kHz)

ной плотности, расположенных в подповерхностном и (или) придонном слоях. Однако встречались локальные концентрации сайки в виде плотных косяков с вертикальным развитием до 30 м и горизонтальной протяженностью 120–400 м. Возможно, это были мигрирующие стаи, поскольку плотное состояние является признаком синхронизированного движения скопления и поведенческой стратегией рыб, повышающей эффективность плавания и уменьшающей риск хищничества [Pitcher, Parrish, 1993]. На остальной акватории чаще всего сайка образовывала обширные поля, состоящие из мелких косячков или разреженных слоев, видимо, свободно плавающих и активно питающихся рыб.

Структура скоплений сайки и их протяженность на доступной для обзора акватории полигона в течение суток также заметно не изменялись. Ночью структура агрегаций была, как правило, менее плотной, вплоть до дисперсной. Однако при этом сайка часто встречалась в разреженном состоянии днем и, наоборот, образовывала плотные концентрации в темное время суток (см. рис. 14).

Межгодовая динамика величин плотности сайки на выделенном полигоне, оцененных эхоинтеграционным методом, представлена на рис. 3. Из имеющегося ряда наблюдений съемка 2003 г. показала самые высокие оценки обилия сайки. Во время следующей съемки, в 2007 г., плотность рыб существенно снизилась, особенно в восточном секторе полигона, где в 2003 г. были зарегистрированы максимальные концентрации сайки. Скопления (в основном в западной части района) формировали сеголетки и небольшое количество более крупных рыб. Можно предполагать, что за 3 года, прошедшие между съемками, урожайного пополнения сайки не было и численность более крупных особей в результате выедания хищниками и естественной смертности постепенно сокращалась. Возможно, отсутствию скоплений в юго-восточной части обследованной акватории в 2007 г. способствовал высокий температурный фон, создаваемый затоком вод берингоморского течения.

От 2003 к 2008 г. прослеживается увеличение доли молоди. Однако относительно высокая численность сеголеток в 2008 г. не дала видимого увеличения обилия сайки в последующие годы. В 2010 г. обследованная акватория была самой большой, а акустические оценки плотности были самыми низкими за весь ряд наблюдений. Значимых пелагических скоплений на акватории полигона в сентябре 2010 г. гидроакустическими приборами обнаружено не было, а донными тралами учтено то небольшое количество сайки, которое обитает в непосредственной близости от грунта.

Результаты гидроакустических измерений на акватории съемки в 2014 г. показали заметный рост запасов сайки. Показатели ее обилия как акустические, так и биологические в межгодовом аспекте были значительно выше, чем в 2007–2008 гг. и тем более в 2010 г. (см. рис. 3). Рост был вызван появлением на обследованной акватории достаточно плотных и протяженных пелагических и придонных скоплений молоди. В 2015 г. акустические оценки плотности скоплений сайки в восточной части полигона опять заметно снизились. В последующие три года (2018–2020 гг.) показатели обилия и уровень учетных запасов сайки на выделенном полигоне продолжали снижаться, достигнув минимума в 2020 г. При этом влияние берингоморских водных масс на ее распределение стало особенно заметным.

Снижение запасов сайки в южной части Чукотского моря происходит на фоне повышенного теплосодержания вод. В 2018 г. в донных тралах стал встречаться минтай, численность которого в последние годы растет*. Причиной этого, видимо, является конкуренция за кормовые ресурсы и вытеснение (замещение) сайки другим представителем семейства тресковых — минтаем, для которого условия обитания в этой части моря стали более благоприятными.

* Шейбак А.Ю., Грицай Е.В., Бомко С.П. О результатах научно-исследовательских работ по оценке биологических ресурсов в Беринговом и Чукотском морях на НИС «ТИНРО» с 7 августа по 31 октября 2020 г.: рейсовый отчет. Владивосток: ТИНРО, 2020. № 28402. 291 с.

Заключение

Выявлены особенности пространственного распределения сайки на учетном полигоне в южной части Чукотского моря между мысами Дежнева и о. Врангеля. Характерна двухслойная вертикальная структура скоплений соответственно вертикальной термической структуре вод в этой части моря. Скопления к востоку от 174° з.д. образованы, как правило, более крупными особями. Для этого района типичными являются протяженные агрегации сайки в нижней части диапазона глубин, преимущественно в придонной области. Для западного сектора полигона свойственно обитание рыб в подповерхностных горизонтах 10–20 м (слой термоклина) или двухслойная структура скоплений с преобладанием молоди в верхнем слое. Встречаются также акустические изображения сайки в виде серий косяков, высокая плотность которых указывает на их миграционное поведение.

Существенных вертикальных миграций сайки в зависимости от времени суток не обнаружено. Небольшая часть скоплений (обычно двух- и трехлетки) ночью может перемещаться в приповерхностные горизонты вслед за планктонными организмами. Но при глубинах на акватории полигона менее 50 м это происходит нерегулярно и не так масштабно, как, например, у минтая Охотского моря на изобатах свыше 200 м [Кузнецов, 2011]. Ночью структура скоплений, как правило, более рыхлая, однако встречаются локальные скопления рыб, состоящие из плотных косяков как в дневное, так и в ночное время суток.

За период наблюдений с 2003 г. отмечаются значительные межгодовые колебания показателей обилия сайки в пределах полигона при общем снижении ее запасов в последние 5 лет. Резкие межгодовые колебания численности являются характерными для этого короткоциклового вида. Кроме этого, следует учитывать, что обследуемая на протяжении ряда лет акватория Чукотского моря является лишь частью ареала сайки. Часть рыб, возможно и большая, оставалась во время съемок за пределами полигона.

Снижение концентрации сайки в юго-западной части Чукотского моря происходит на фоне общего потепления в Арктике и сокращения площади льда, что, конечно же, сказывается на масштабе распространения сайки в южном направлении. Снижению обилия сайки, видимо, способствует высокий температурный фон, который создается на исследуемой акватории в последние годы под влиянием тихоокеанских водных масс, поступающих через Берингов пролив, и который одновременно является благоприятным для проникновения в эту часть Чукотского моря берингоморского нагульного минтая.

По имеющемуся ряду наблюдений очередного увеличения численности сайки в южной части Чукотского моря можно ожидать лишь в 2023–2024 гг., при условии появления высокоурожайного поколения и холодного термического состояния вод Берингова моря. Хотя с учетом общего потепления в арктических морях этот подъем, вряд ли, может быть столь значительным, как в 2003 и даже в 2014 гг. Поэтому о перспективах промышленного освоения сайки в этом секторе российской Арктики в ближайшие годы говорить пока рано.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают благодарность своим коллегам-ихтиологам, участвовавшим в рейсах ТИНРО в арктические моря, за предоставленные биологические данные, которые были использованы при подготовке настоящей статьи.

The authors express their acknowledgement to their colleagues-ichthyologists, members of scientific crews in the research cruises the Arctic Seas conducted by TINRO for their kindly delivered biological data used in this study.

Финансирование работы (FUNDING)

Результаты настоящего исследования были получены в рамках выполнения государственного задания ФГБНУ «ВНИРО» (Работа 2 «Регулярные наблюдения за

распределением, численностью, качеством и воспроизводством водных биоресурсов, являющихся объектами рыболовства, а также средой их обитания») Минобрнауки России (номер для публикаций: 5.9510.2017/8.9).

The study was conducted within implementation of the state task to TINRO № 2 (Regular monitoring on distribution, abundance, quality and reproduction of aquatic biological resources that are objects for fishery, as well as on their environments) from the Ministry of Education and Science of Russia (code 5.9510.2017/8.9).

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных соблюдены. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

All applicable international, national and/or institutional principles for the care and use of animals have been observed. The authors state that they have no conflict of interest.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

Концепция исследования — М.Ю. Кузнецов; сбор и обработка материала — Е.В. Сыроваткин, В.И. Поляничко; написание текста — М.Ю. Кузнецов.

Concept of the study — M.Yu. Kuznetsov; collection and processing of the material — E.V. Syrovatkin, V.I. Polyanichko; writing the text — M.Yu. Kuznetsov.

Список литературы

Борец Л.А., Савин А.Б., Бомко С.П., Пальм С.А. Состояние донных ихтиоценов в северо-западной части Берингова моря в конце 90-х годов // *Вопр. рыб-ва.* — 2001. — Т. 2, № 2(6). — С. 242–257.

Кузнецов М.Ю. Гидроакустические исследования распределения и вертикальных миграций минтая *Theragra chalcogramma* в северной части Охотского моря в весенний период // *Науч. тр. Дальрыбвтуза.* — 2011. — Т. 23. — С. 44–53.

Кузнецов М.Ю., Убарчук И.А., Поляничко В.И., Сыроваткин Е.В. Программный комплекс для визуализации, многовидовой обработки и хранения данных гидроакустических ресурсных съемок // *Тр. ВНИРО.* — 2021. — Т. 183. — С. 174–190. DOI: 10.36038/2307-3497-2021-183-174-190.

Мамылов В.С. Некоторые аспекты оценки плотности рыбных скоплений тралово-акустическими методами // *Развитие технических методов рыбохозяйственных исследований* : сб. науч. тр. — Мурманск : ПИНРО, 1999. — С. 147–163.

Николаев А.В., Кузнецов М.Ю., Сыроваткин Е.В. Акустические исследования сайки (*Boreogadus saida*) в российских водах Берингова и Чукотского морей в 1999–2007 гг. // *Изв. ТИНРО.* — 2008. — Т. 155. — С. 131–143.

Bradstreet M.S.W., Finley K.J., Sekerak A.D. et al. Aspects of the feeding biology of Arctic cod (*Boreogadus saida*) and its importance in Arctic marine food chains : *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* — Winnipeg, 1986. — № 1491. — 193 p.

Pitcher T.J., Parrish J.K. Functions of shoaling behaviour in teleosts // *The behaviour of teleost fishes.* — L., 1993. — P. 363–440.

Welch H.E., Crawford R.E., Hop H. Occurrence of Arctic Cod (*Boreogadus saida*) schools and their vulnerability to predation in the Canadian High Arctic // *Arctic.* — 1993. — Vol. 46, № 4. — P. 331–339. DOI: 10.14430/arctic1361.

References

Borets, L.A., Savin, A.B., Bomko, S.P., and Pal'm, S.A., The state of bottom ichthyocenoses in the northwestern Bering sea in the late 1990s, *Vopr. Rybolov.*, 2001, vol. 2, no. 2(6), pp. 242–257.

Kuznetsov, M.Yu., Hydroacoustic researches of distribution and vertical migrations of wall-eye pollock *Theragra chalcogramma* in northern part of Okhotsk Sea in springtime, *Nauchn. Tr. Dal'rybvtuza*, 2011, vol. 23, pp. 44–53.

Kuznetsov, M.Yu., Ubarchuk, I.A., Polyanichko, V.I., and Syrovatkin, E.V., The software complex for visualization, multiple-view processing and data storage of hydroacoustic resource

surveys, *Tr. Vses. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2021, vol. 183, pp. 174–190. doi 10.36038/2307-3497-2021-183-174-190

Mamylov, V.S., Some aspects of estimating the density of fish accumulations by trawl-acoustic methods, in *Sb. nauchn. tr. "Razvitiye tekhnicheskikh metodov rybokhozyaystvennykh issledovaniy"* (Collect. Sci. Works "Development of technical methods of fisheries research"), Murmansk: PINRO, 1999, pp. 147–163.

Nikolaev, A.V., Kuznetsov, M.Yu., and Syrovatkin, E.V., Acoustic research of arctic cod (*Boreogadus saida*) in the Bering and Chuckchee Seas (Russian EEZ) in 1999–2007, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2008, vol. 155, pp. 131–143.

Bradstreet, M.S.W., Finley, K.J., Sekerak, A.D., Griffiths, W.B., Evans, C.R., Fabigan, M.F., and Stallard, H.E., Aspects of the feeding biology of Arctic cod (*Boreogadus saida*) and its importance in Arctic marine food chains, *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.*, Winnipeg, 1986, no. 1491.

Pitcher, T.J. and Parrish, J.K., Functions of shoaling behaviour in teleosts, *The behaviour of teleost fishes*, London, 1993, pp. 363–440.

Welch, H.E., Crawford, R.E., Hop, H., Occurrence of Arctic Cod (*Boreogadus saida*) schools and their vulnerability to predation in the Canadian High Arctic, *Arctic*, 1993, vol. 46, no. 4, pp. 331–339. doi 10.14430/arctic1361

Bomko, S.P., Ksenofontov, M.M., Bel'dy, M.V., Borilko, O.Yu., Gostrenko, L.M., Chul'chekov, D.N., Polyanchko, V.I., and Lysenko, A.V., *O rezul'tatakh nauchno-issledovatel'skikh rabot po otsenke biologicheskikh resursov v Beringovom i Chukotskom moryakh na NIS «TINRO» s 7 avgusta po 31 oktyabrya 2020 g.* (On the results of research work on the assessment of biological resources in the Bering and Chukchi Seas on the R/V TINRO from August 7 to October 31, 2020), *Reysovyy otchet*, Vladivostok: TINRO, 2020, № 28402.

Поступила в печать 28.04.2022 г.

После доработки 18.05.2022 г.

Принята к публикации 1.09.2022 г.

*The article was submitted 28.04.2022; approved after reviewing 18.05.2022;
accepted for publication 1.09.2022*