

УДК 599.742.2

**Опыт оценки численности тюленей методом судового
трансектного учёта с применением секторной
экстраполяции по результатам наблюдений в юго-
западной части Карского моря в летний период 2015 г.**

Н. Г. Челинцев, Ю. И. Горяев, А. В. Ежов, П. Р. Макаревич, Д. Г. Ишкулов

Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН (ФГБУН «ММБИ КНЦ РАН»),
г. Мурманск

E-mail: ygoryaev@yandex.ru

В августе-сентябре 2015 г. сотрудниками ММБИ РАН в юго-западной части Карского моря проведены визуальные учёты кольчатых нерп (*Pusa hispida*) и морских зайцев (лахтаков *Erignathus barbatus*) на 2683 км маршрута с двух бортов НИС «Дальние Зеленцы». Всего было обнаружено 76 групп нерп, состоящих из 89 особей и 22 группы лехтаков, состоящих из 23 особей. По данным расстояний обнаружения проведено оптимальное ограничение учётной полосы до 220 м по каждому борту для нерп и до 250 м для лехтаков. Для уменьшения влияния неравномерности размещения маршрутов на точность оценки численности проведена отдельная экстраполяция, для чего учётная территория поделена на 10 секторов. Проведенные расчёты с использованием специально разработанной программы дали оценку численности кольчатых нерп на учётной территории в 4163 особей со статистической ошибкой $\pm 16,9\%$ и численности лехтаков в 1026 особей со статистической ошибкой $\pm 28,4\%$.

Ключевые слова: кольчатая нерпа *Pusa hispida*, морской заяц *Erignathus barbatus*, маршрутный учёт, отдельная экстраполяция.

ВВЕДЕНИЕ

Карское море — регион Российской Арктики, наиболее плотно населённый арктическими тюленями — кольчатой нерпой (*Pusa hispida* Schreber 1775) и морским зайцем (*Erignathus barbatus* (Erxleben 1777)). Мониторинг размещения и численности их популяций в последние десятилетия проводился почти исключительно в ледовый период года, методом маршрутного учёта, выполнявшегося с ледоколов или воздушных судов, и характеризовал специфически зимнее распределение тюленей [Лукин, Огнетов 2009; Матишов

и др., 2013]. Очевидно, что маршрутный учёт в настоящее время — единственный метод мониторинга ластоногих и в летний (нагульный) период года, на свободной ото льда акватории, однако использование данного метода учёта тюленей в этот сезон в настоящее время не отработано. Опубликованные оценки обилия ластоногих для данного района и периода года не сопровождаются необходимой статистической обработкой, т.е. в сущности, являются экспертными [Лукин, Огнетов, 2009]. Целью настоящей работы было апробирование оригинального метода судового учёта тюленей

с использованием секторной экстраполяции, по результатам наблюдений в ЮЗ части Карского моря в летний период 2015 года.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Учётные маршруты суммарной протяжённостью 2683 км располагались в границах учётного полигона площадью 49 814 тыс. км², к западу от полуострова Ямал. Учёт проводился одним наблюдателем с обоих бортов. Дистанция до тюленей оценивалась глазомерно, с использованием специального шаблона — буксируемого фала полукилометровой длины, на котором была отмечена длина с интервалом 100 м. Всего было обнаружено 76 групп нерп, состоящих из 89 особей и 22 групп лахтаков, состоящих из 23 особей (рис. 1). Для расчёта

численности животных использовался оригинальный метод отдельной секторной экстраполяции, подробно излагаемый ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчёт эффективной ширины учётной полосы. Исследователями разных стран были предложены различные математические модели зависимости вероятности обнаружения животных от их перпендикулярных расстояний, т.е. так называемые «модели функции обнаружения» [Quinn, Gallucci, 1980]. В настоящее время широко применяется программа DISTANCE [Buckland et al., 1993], в которой используются три ключевые модели функции обнаружения Hazard-rate (HR), Half-normal (HN) и Uniform (Un) с добавлением коррек-

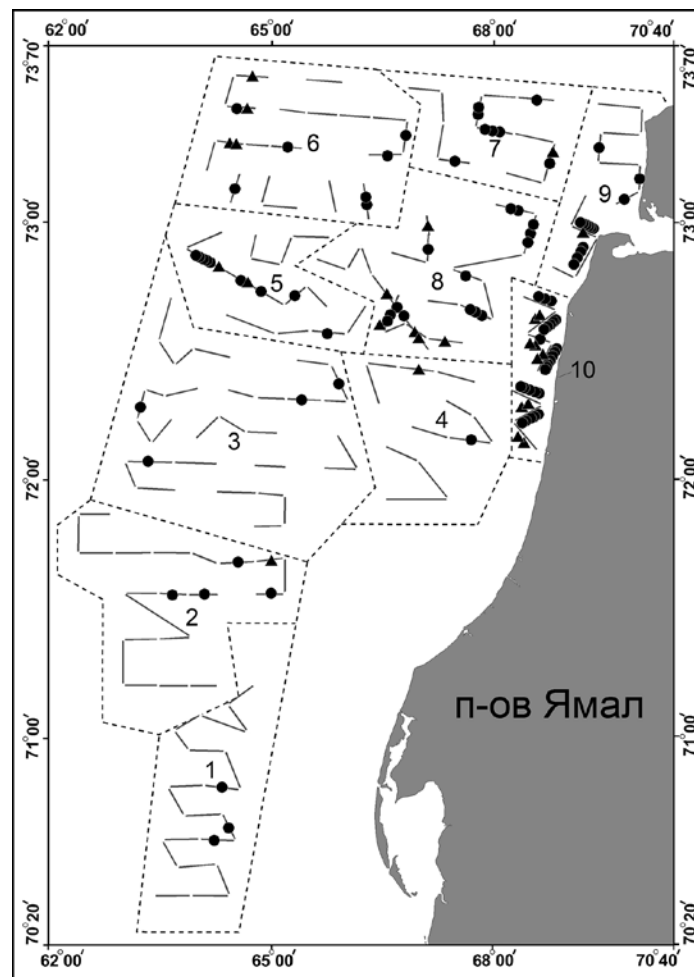


Рис. 1. Карта-схема учётных маршрутов с встречами кольчатых нерп и морских зайцев.

Кружками показаны места встреч кольчатых нерп, треугольниками — морских зайцев. Штриховыми линиями показаны выделенные границы 10 секторов отдельной экстраполяции

тирующих членов. Программа DISTANCE имеет ряд существенных недостатков, одним из которых является применение для оценки среднего размера групп учитываемых животных линейной зависимости размера групп от расстояния обнаружения, приводящее к занижению оценки численности в 1,5–2 раза [Челинцев, 2014].

В разработанной Н. Г. Челинцевым специальной программе «ТЮЛЕНЬ-РАСЧЁТ» применяется интегральная логнормальная функция обнаружения (LN) с фиксированным значением параметра формы $\sigma = 0,4$, которое, как показала практика, наилучшим образом подходит к фактическим распределениям расстояний обнаружения при маршрутных учётах морских млекопитающих. В программе «ТЮЛЕНЬ-РАСЧЁТ» расчёт проводится по обнаружениям особей, что делает ненужным оценку среднего размера групп животных для перехода от оценки численности групп к оценке численности особей.

В программе «ТЮЛЕНЬ-РАСЧЁТ» оценка полноты учёта P на учётной полосе шириной W с каждого борта проводится по формулам [Челинцев, 2000]:

$$B = W(0,78G + 0,22G^{4,3});$$

$$G = \frac{1}{W} \sqrt{\frac{3}{n} \sum_{l=1}^k y_l^2 b_l}; \quad P = \frac{B}{W}, \quad (1)$$

где n — суммарное количество животных учитываемого вида, обнаруженных на полосе W ; k — суммарное количество групп животных, обнаруженных на полосе W ; y_l — расстояние обнаружения l -й группы животных из общего количества обнаруженных групп k ; b_l — число особей в l -й обнаруженной группе животных.

Относительная статистическая ошибка оценок полноты учёта P и эффективной ширины B по формуле (1) рассчитывается по формуле:

$$e(P) = e(B) = \frac{1}{2} \left(\frac{1 + 1,213G^{3,3}}{1 + 0,282G^{3,3}} \right) \times$$

$$\times \frac{C(y^2)}{1 + C(b, y^2)} \sqrt{\frac{1 + C^2(b)}{k}}, \quad (2)$$

где $C(y^2)$ — коэффициент вариации квадратов расстояний обнаружения групп животных на полосе W ; $C(b)$ — коэффициент вариации размеров групп животных на полосе W ; $C(b, y^2)$ — относительная ковариация размеров групп животных (b) и квадратов расстояний их обнаружения (y^2).

Чтобы уменьшить возможную систематическую ошибку при коррекции дистанционного недоучёта в тех случаях, когда имеет место значительное отклонение фактического распределения расстояний обнаружения от модельной функции обнаружения LN, проводится автоматическое ограничение учётной полосы [Челинцев, 2000, 2010].

На рис. 2 представлены гистограммы обнаруженных кольчатых нерп и морских зайцев и аппроксимирующие кривые функций обнаружения для неограниченной и оптимально ограниченной учётных полос двух видов тюленей.

Результаты расчётов полноты учёта с использованием формул (1) и (2) представлены в табл. 1.

Числовые значения в табл. 1 показывают, что, несмотря на ограничение ширины полосы почти вдвое и исключение из расчёта 6 наиболее дальних встреч кольчатых нерп и 2-х встреч морских зайцев, статистическая ошибка оценки полноты учёта для нерпы увеличивается

Таблица 1. Оценки полноты учёта кольчатой нерпы и морского зайца

Кольчатая нерпа				Морской заяц (лахтак)			
Неограниченная полоса 400 м		Ограниченная полоса 220 м		Неограниченная полоса 500 м		Ограниченная полоса 250 м	
Полнота учёта	Относительная стат. ошибка	Полнота учёта	Относительная стат. ошибка	Полнота учёта	Относительная стат. ошибка	Полнота учёта	Относительная стат. ошибка
$P=0,496$	$e(P)=0,096$ (9,6%)	$P_{opt}=0,765$	$e(P_{opt})=0,099$ (9,9%)	$P=0,461$	$e(P)=0,226$ (22,6%)	$P_{opt}=0,734$	$e(P_{opt})=0,184$ (18,4%)

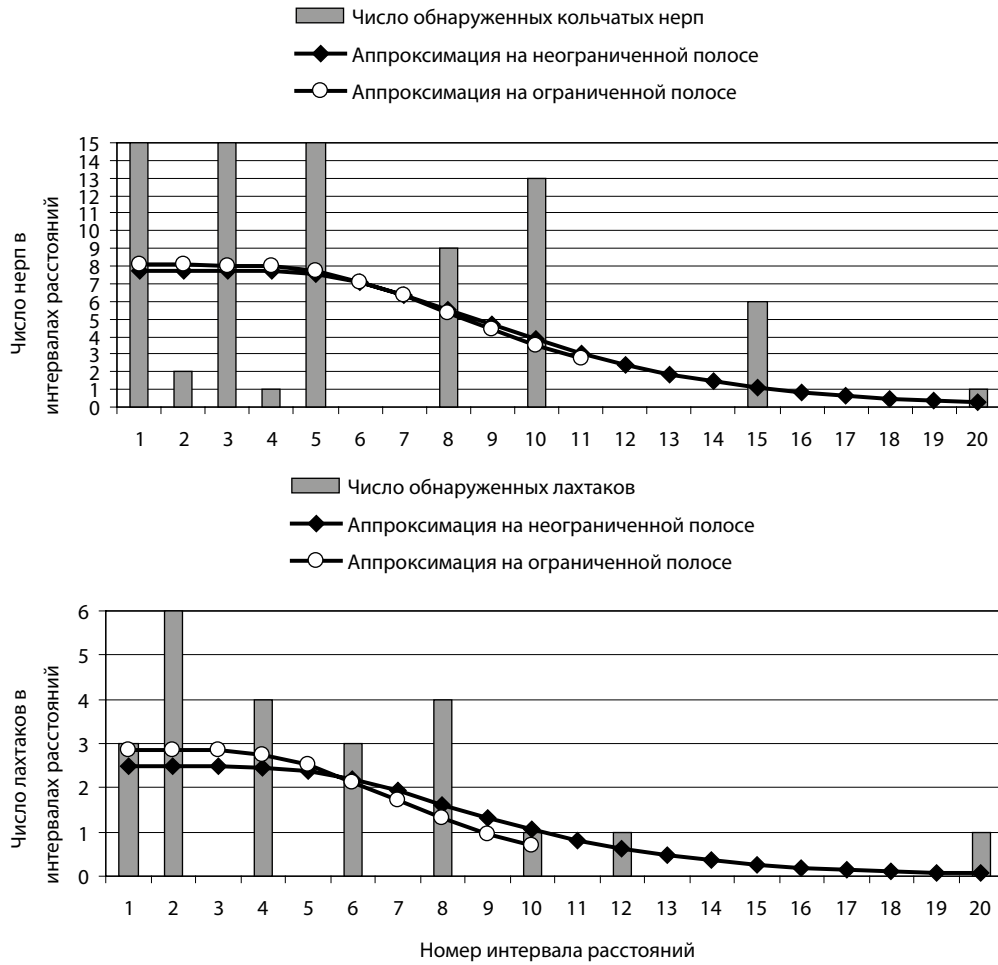


Рис. 2. Гистограмма распределения обнаруженных тюленей.

Вверху — кольчатых нерп на полосе 400 м по каждому борту и рассчитанные программой аппроксимирующие кривые функций обнаружения на неограниченной (400 м) и ограниченной (220 м) полосах, внизу — морских зайцев на полосе 500 м по каждому борту и рассчитанные аппроксимирующие кривые функций обнаружения на неограниченной (500 м) и ограниченной (250 м) полосах

ся незначительно, а для морских зайцев даже уменьшается. В то же время при ограничении учётной полосы существенно увеличивается надёжность оценки полноты учёта и коррекции дистанционного недоучёта за счёт более точной аппроксимации функции обнаружения при удалении её хвостовой части.

Экстраполяция. На рис. 1 представлена картосхема размещения 159 учётных маршрутов и мест обнаружения на них кольчатых нерп и морских зайцев, а также границы 10 секторов раздельной экстраполяции. Для каждого выделенного r -го сектора рассчитывается плотность населения нерп $D_{r,s}$ (в особях на км²) для каждого s -го маршрута на полосе оптимальной ширины с каждого борта W_{opt} и средневзве-

шенная плотность населения D_r для всех U_r маршрутов.

$$D_{r,s} = \frac{n_{r,s}}{q_{r,s}}; \quad q_{r,s} = 2L_{r,s}W_{opt}; \quad D_r = \frac{n_r}{q_r};$$

$$n_r = \sum_{s=1}^{U_r} n_{r,s}; \quad q_r = 2L_rW_{opt};$$

$$L_r = \sum_{s=1}^{U_r} L_{r,s}, \quad (3)$$

где $n_{r,s}$ — количество особей, обнаруженных на s -м маршруте; $q_{r,s}$ — площадь учётной ленты на s -м маршруте в км²; $L_{r,s}$ — длина s -го маршрута в км; n_r — количество кольчатых нерп, обнаруженных на всех U_r маршру-

тах в r -м секторе; q_r — суммарная площадь учётной ленты для всех U_r маршрутов в r -м секторе; L_r — суммарная длина всех U_r учётных маршрутов в r -м секторе. Значение W_{opt} в формуле (3) выражается в км.

Экстраполированная оценка численности кольчатых нерп в r -м секторе рассчитывается по формуле:

$$N_r = D_r Q_r, \quad (4)$$

где Q_r — площадь r -го сектора в км².

Относительная статистическая ошибка экстраполированной оценки нерп в r -м секторе рассчитывается по формуле:

$$e(N_r) = \sqrt{\left(1 - \frac{q_r}{Q_r}\right) \sum_{s=1}^{U_r} \left(\frac{D_{r,s}}{D_r} - 1\right)^2 \frac{q_r^2}{q_r(q_r - q_{r,s})}}. \quad (5)$$

Скорректированная на недоучёт оценка численности нерп в r -м секторе рассчитывается по формуле:

$$N_{r,cor} = N_r / \rho_{opt}, \quad (6)$$

где ρ_{opt} — полнота учёта (показатель дистанционного недоучёта), рассчитанная по формуле (1).

Относительная статистическая ошибка скорректированной на дистанционный недоучёт оценки нерп в r -м секторе рассчитывается по формуле:

$$e(N_{r,cor}) = \sqrt{e^2(N_r) + e^2(\rho_{opt})}, \quad (7)$$

где $e(O_{opt})$ — относительная статистическая ошибка оценки полноты учёта, рассчитанная по формуле (2).

Оценка скорректированной численности нерп на всей учётной территории рассчитывается как сумма скорректированных оценок численности нерп в секторах:

$$N_{cor} = \sum_{r=1}^T N_{r,cor}, \quad (8)$$

где T — число выделенных секторов на учётной территории.

Статистическая ошибка оценки экстраполированной численности нерп на всей территории рассчитывается по формуле:

$$e(N_{cor}) = \sqrt{\sum_{r=1}^T [e(N_r) N_r]^2 / \left(\sum_{r=1}^T N_r\right)^2 + e^2(\rho_{opt})}. \quad (9)$$

Нижняя и верхняя границы доверительного интервала оценки численности кольчатых нерп на всей учётной территории при уровне доверия 90% рассчитываются по формулам [Челинцев, 2000]:

$$N_{cor,L} = N_{cor} \exp\{-1,64f - 0,5f^2\};$$

$$N_{cor,U} = N_{cor} \exp\{1,64f - 0,5f^2\};$$

$$f = \sqrt{\ln[1 + e^2(N_{cor})]}. \quad (10)$$

Примечание. В том случае, когда для какой-то части обнаруженных животных нет измеренных расстояний обнаружения, то для расчёта на ограниченной полосе невозможно провести процедуру исключения встреч исходя из значений расстояний обнаружения. В таком случае экстраполяция проводится для **полного** числа обнаруженных на маршрутах животных, но на полученную оценку численности вводится поправка на её завышение:

$$N_{cor,a} = N_{cor} h; \quad h = 1 - n_a/n, \quad (11)$$

где h — коэффициент завышения; n_a — число обнаруженных особей, для которых нет расстояния обнаружения; n — полное число обнаруженных животных учитываемого вида.

Оценка численности. В табл. 2 представлены первичные данные учётов кольчатых нерп (КН) и морских зайцев (МЗ) для каждого из 10 секторов и в целом для всей акватории при неограниченной и оптимально ограниченной учётной полосе.

В табл. 3 представлены результаты расчётов численности кольчатых нерп и морских зайцев по формулам (1) — (11) в каждом из 10 секторов и в целом для всей территории при неограниченной и оптимально ограниченной учётной полосе.

Для сравнения в табл. 4 и 5, представленных ниже, приведены оценки численности кольчатых нерп и морских зайцев и их статистических ошибок, полученные при отдельной экстраполяции и экстраполяции без выделения секторов, а также при неограниченной и оптимально ограниченной учётной полосе.

Выводы

Таким образом, предварительный анализ показывает, что для обоих видов предпочти-

Таблица 2. Первичные данные учётов кольчатых нерп (КН) и морских зайцев (МЗ)

Номер сектора	Неограниченная ширина				Ограниченная ширина				Общая длина маршрутов, км	Площадь сектора, км ²	Доля обследования		Плотность населения, особей/км ²	
	Число встреч		Число особей		Число встреч		Число особей				КН	МЗ	КН	МЗ
	КН	МЗ	КН	МЗ	КН	МЗ	КН	МЗ						
1	3	0	3	0	3	0	3	0	355,2	5871	0,048	0,061	0,011	0,000
2	4	1	4	1	4	1	4	1	318,0	6924,5	0,037	0,046	0,016	0,003
3	4	0	4	0	4	0	4	0	457,2	9690	0,038	0,047	0,011	0,000
4	1	1	1	1	1	1	1	1	216,6	4635,7	0,037	0,047	0,006	0,005
5	7	2	9	2	7	2	9	2	226,5	3946	0,046	0,057	0,050	0,009
6	7	2	7	3	7	2	7	3	324,9	5890,7	0,044	0,055	0,027	0,009
7	7	0	8	0	6	0	7	0	214,2	3251,8	0,053	0,066	0,047	0,000
8	14	6	14	6	13	6	13	6	352,2	5583	0,050	0,063	0,050	0,017
9	13	1	13	1	12	1	12	1	134,7	2447	0,044	0,055	0,121	0,007
10	26	9	26	9	24	7	24	7	84,3	1574,5	0,043	0,054	0,386	0,107
Вся акватория	86	22	89	23	80	20	83	21	2683,8	49814,2	0,043	0,054	0,041	0,009

Таблица 3. Оценки численности кольчатых нерп и морских зайцев в секторах и на всей акватории для неограниченной и оптимально ограниченной учётной полосы

Номер сектора	Расчёт численности тюленей в секторах и на всей учётной акватории								Расчёт относительной стат. ошибки численности по формуле (9)							
	Неограниченная ширина				Ограниченная ширина				Неограниченная ширина				Ограниченная ширина			
	Численность		Относительная стат. ошибка (%)		Численность		Относительная стат. ошибка (%)		Экстраполированная численность		Относительная стат. ошибка (%)		Экстраполированная численность		Относительная стат. ошибка (%)	
	КН	МЗ	КН	МЗ	КН	МЗ	КН	МЗ	КН	МЗ	КН	МЗ	КН	МЗ	КН	МЗ
1	125	0,0	54	0,0	130	0,0	55	0,0	62	0,0	53	0,0	113	0,0	54	0,0
2	220	47	47	101	228	59	47	101	109	22	46	98	198	44	46	99
3	214	0,0	48	0,0	222	0,0	49	0,0	106	0,0	47	0,0	193	0,0	48	0,0
4	54	46	98	102	56	58	99	102	27	21	97	99	49	43	98	100
5	395	76	59	72	410	94,9	59	72	196	35	58	68	356	70	58	69
6	320	118	38	70	332	148	38	71	159	54	36	70	288	109	37	71
7	306	0,0	43	0,0	318	0,0	44	0,0	152	0,0	42	0,0	276	0,0	43	0,0
8	559	206	31	48	580	259	31	47	277	95	29	43	504	190	29	43
9	595	39	52	101	618	49	53	102	295	18	51	98	537	36	52	99
10	1224	365	24	33	1270	356	24	37	607	168	22	24	1104	261	22	32
Вся акватория	4011	898			4163	1026			1990	414	16,7*	29,9*	3618	753	16,8*	31,5*

Примечание. Числа, отмеченные звёздочкой (*), равны значениям относительных статистических ошибок скорректированных численностей.

Таблица 4. Оценки численности кольчатых нерп на всей акватории четырьмя способами

Оценки численности тюленей четырьмя способами			НЕРПА		
Учётная полоса по каждому борту		Неограниченная 400 м	Ограниченная 220 м		
Параметры	Численность	Относительная стат. ошибка, %	Численность	Относительная стат. ошибка, %	
Экстраполяция	Раздельная (10 секторов)	4011	16,7	4163	16,9
	Нераздельная	4163	19,8	4320	20,1

Таблица 5. Оценки численности морских зайцев на всей территории четырьмя способами

Оценки численности тюленей четырьмя способами			ЛАХТАК		
Учётная полоса по каждому борту		Неограниченная 500 м	Ограниченная 250 м		
Параметры	Численность	Относительная стат. ошибка, %	Численность	Относительная стат. ошибка, %	
Экстраполяция	Раздельная (10 секторов)	898	29,9	1026	28,4
	Нераздельная	926	33,1	1062	30,6

тельными являются оценки, полученные с раздельной экстраполяцией по 10 секторам и с оптимальным ограничением учётной полосы. При отмеченной нами в юго-западной части Карского моря плотности распределения кольчатых нерп и морских зайцев, и затраченном в ходе исследования учётном усилии, использованный метод позволяет получать достаточно точные показатели обилия, пригодные для решения ряда научных и практических задач.

С учётом пропуска какой-то части тюленей, находившихся в момент учёта под водой, требуются дополнительные исследования для введения поправки к получаемым оценкам численности на «подводную» долю активности этих видов ластоногих.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61616X0073).

ЛИТЕРАТУРА

- Лукин Л.Р., Огнетов Г.Н. 2009. Морские млекопитающие Российской Арктики: эколого-фаунистический анализ. Екатеринбург: УрО РАН. 203 с.
 Матишов Г.Г., Горяев Ю.И., Ишкулов Д.Г. 2013. Белый медведь Карского моря (результаты экспе-

диционных работ ММБИ в районе прохождения трасс Севморпути в 1997–2013 гг.). Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН. 119 с.

Челинцев Н.Г. 2000. Математические основы учёта животных. М., 431 с.

Челинцев Н.Г. 2010. Методика расчёта численности белух по данным авиаучётов на параллельных галсах // Бюл. МОИП. Отд. биол. Т. 115. Вып. 3. С. 3–12.

Челинцев Н.Г. 2014. Программа «БЕЛУХА» для расчёта численности белух по данным авиаучёта в Охотском море // Бюл. МОИП. Отд. биол. Т. 119. Вып. 6. С. 3–19.

Buckland S. T., Anderson D. R., Burnham K. P., Laake J. L. 1993. Distance sampling: estimating abundance of biological populations. London. 446 p.

Quinn T. J., Gallucci V. F. 1980. Parametric models for line-transect estimators of abundance // Ecology. Vol. 61. N. 2. P. 293–302.

REFERENS

Lukin L. R., Ognotov G. N. 2009. Morskije mlekopitayushchie Rossijskoj Arktiki: ehkologo-faunisticheskij analiz [Marine Mammals of the Russian Arctic: ecological and faunal analysis]. Ekaterinburg: UrO RAN. 203 s.

Matishov G. G., Goryaev YU. I., Ishkulov D. G. 2013. Belyj medved' Karskogo morya (rezul'taty ehkspedicionnyh rabot MMBI v rajone prohozheniya trass Sevморputi v 1997–2013 gg. [The results of field work in the region of the Murmansk Marine runs

- Sevmorput in 1997–2013]. Rostov-na-Donu: YUNC RAN. 119 s.
- Chelincev N. G. 2000. Matematicheskie osnovy ucheta zhivotnyh [Mathematical foundations of accounting animals]. M. 431 s.
- Chelincev N. G. 2010. Metodika rascheta chislennosti beluh po dannym aviauchetov na parallel'nyh galsah [Methods of calculating the number of beluga according to aerial surveys on parallel tracks] // Byul. MOIP. Otd. biol. T. 115. Выр. 3. S. 3–12.
- Chelincev N. G. 2014. Programma «BELUHA» dlya rascheta chislennosti beluh po dannym aviaucheta v Ohotskom more [Program «WHITE WHALE» to calculate the number of belugas according aerial survey in the Okhotsk Sea] // Byul. MOIP. Otd. biol. T. 119. Выр. 6. S. 3–19.

Поступила в редакцию 21.12.2016 г.
Принята после рецензии 12.07.2017 г.

Experience abundance estimates by the ship transect accounting with pie extrapolations from observations in the south-western part of the Kara Sea in summer 2015

N. G. Chelintsev, Y. I. Goryaev, A. V. Ezhov, P. R. Makarevich, D. G. Ishkulov

Murmansk marine biological institute (FSBSI «MMBI KSC RAS»), Murmansk

Visual counts of ringed seals (*Phoca hispida*) and bearded seals (*Erignathus barbatus*) were carried out by researchers at MMBI along a route 2 683 km long from two sides of the RV «Dalnie Zelentsy» in the southwestern Kara Sea in August and September 2015. In total 76 groups of ringed seals comprising 89 animals and 22 groups of bearded seals comprising 23 animals were detected. According to distances, at which animals were detected, line transects were limited to 220 m for ringed seals and 250 m for bearded seals from both sides of the vessel. To reduce the influence of unevenness of route location on the accuracy of abundance estimation the separate extrapolation was used, for which the study area was divided into 10 sections. Calculations carried out using a specially designed program estimated the abundance of ringed seals at the study area as equal to 4 163 animals with a statistical error of $\pm 16.9\%$ and that of bearded seals as equal to 1026 animals with a statistical error of $\pm 28.4\%$.

Key words: ringed seal *Pusa hispida*, bearded seal *Erignathus barbatus*, ship transect accounting, separate extrapolation.