

О ВЛИЯНИИ КАЛИБРОВАННОЙ ВЕЛИЧИНЫ СИЛЫ ОБЪЕМНОГО РАССЕЙЯНИЯ S_v ЭХОЛОТА ЕК 500 НА ТОЧНОСТЬ ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ РЫБНЫХ СКОПЛЕНИЙ И ИХ БИОМАСС

Введение

Известно, что для проведения исследований по количественной оценке рыбных запасов гидроакустическим методом используются специальные эхометрические приборы (в нашем случае ЕК 500 Симрад), требующие регулярных калибровок. Калибровка измерительного прибора необходима для обеспечения постоянства инструментального режима измеряемых данных, определяющего в конечном счете заданную точность измерений.

Принятый международным стандартом для использования на акустических съемках эхометрический комплекс ЕК 500 проходит периодические инструментальные поверки на соответствие его технических параметров паспортным данным. При этом следующим этапом проводится калибровка его гидроакустического тракта. Во время этих работ калибруются величины силы цели TS и коэффициента объемного обратного рассеяния S_v , которые определяют при последующих измерениях на эхосъемках корректный численный ряд измеряемых величин силы цели TS и индекса плотности s_A (или $NASC$ – Nautical Area Scattering Coefficient). Последние, как известно, играют определяющую роль в вычислении плотности рыбных скоплений и, следовательно, в точности численной оценки их биомасс.

В представляемой работе анализируется на фактическом материале акустической съемки в мае 2004 г. СТМ «Атлантниро» степень влияния калибруемой величины силы объемного обратного рассеяния S_v (MVBS – Mean Volume Backscattering Strength) на точность численной оценки биомасс шпрота и сельди в 26 и 28-м подрайонах ИКЕС Балтийского моря.

Материалы и методика

Для проведенного исследования использованы материалы результатов стационарных калибровок эхометрического комплекса ЕК 500 на СТМ «Атлантниро» за последние 10 лет. Основу материала составляют протоколы стандартного международного формата, отражающие фактические данные измерений калибруемых параметров.

Кроме того, для исследования влияния основного калибруемого параметра – силы объемного обратного рассеяния S_v на эхосъемочные показания индекса плотности s_A (обозначаемого иначе как коэффициент поверхностного рассеяния, отнесенного на 1 кв.милю, $NASC$) проанализированы материалы международной тралово-акустической съемки, выполненной СТМ «Атлантниро» в мае – июне 2004 г. в 26 и 28-м подрайонах ИКЕС Балтийского моря.

Калибровочные измерения произведены по общепринятой стандартной методике, приведенной в Руководстве по эксплуатации эхолота ЕК 500 [6]. Согласно методике измеряется фактический уровень мощности принимаемого сигнала, позволяющий эхолоту оценить силу объемного обратного рассеяния S_v и силу цели TS при облучении стандартной цели (медной сферы) с ее паспортной силой цели $TS = -33,6$ дБ на частоте 38 кГц.

Собственно калибровке подвергается пиковый уровень усиления G_0 принимаемого эхосигнала от эталонной сферы, который вводится в процессорную программу эхолота при вычислении силы TS (Закон ВАРУ 40lg r) и силы объемного обратного рассеяния S_v (Закон ВАРУ 20lg r). Заметим, что пиковый уровень усиления G_0 различен при вычислении TS и S_v .

Результаты

Научный эхолот ЕК 500, как и любой эхолот со встроенным интегратором, предназначенный для акустической оценки рыбных скоплений, измеряет прежде всего физическую величину коэффициента объемного рассеяния s_v , представляющего собой в элементарном выражении произведение акустического сечения обратного рассеяния одиночной рыбы σ_{bs} и объемной плотности ρ_v :

$$S_v = \rho_v \sigma_{bs}, \quad (1)$$

где $\sigma_{bs} = \sigma_s / 4\pi r_0^2$ – отношение полного акустического сечения рассеяния одиночной рыбы σ_s как ненаправленного рассеивателя энергии по всем направлениям воображаемой поверхности сферы с радиусом $r_0=1$ м [2].

Для получения безразмерной величины s_v перед логарифмированием левая и правая части формулы (1) умножаются на единичный объем V_1 м³. Тогда сила объемного обратного рассеяния представляется известным уравнением:

$$S_v = 10 \lg \rho_v \sigma_{bs} V_1, \quad \text{дБ}. \quad (2)$$

В развернутом виде это уравнение решается процессорной программой ЕК 500 в децибельном формате как:

$$S_v = 10 \lg P_r + 10 \lg (r^2 10^{2ar}) - 10 \lg \left(\frac{P_t G_0^2 r_0 \lambda^2 c \tau \psi}{32\pi^2} \right), \quad (3)$$

где P_r и P_t – принятая и излученная мощность, отнесенная к поверхности антенны;

G_0 – максимальное значение коэффициента усиления, установленное при калибровке;

$r_0 = 1$ м – эталонное расстояние для силы обратного рассеяния;

r – расстояние до облучаемого объекта, м;

λ – длина волны, м;

c – скорость распространения звука в воде, м/сек;

τ – длительность излученного импульса, сек;

ψ – ширина эквивалентной диаграммы направленности антенны;

α – затухание звука в воде, дБ/м.

Однако на эхосъемках для вычисления наблюдаемых плотностей рыбных скоплений стало практически целесообразным оперировать величиной s_A – индексом поверхностного обратного рассеяния. Индекс s_A включает в себе тот же смысл коэффициента обратного рассеяния, но только приведенного к единице поверхности 1 кв.миле. Такое трансформирование осуществляет указанная процессорная программа, которая на основе измеренной величины s_v преобразует ее в регистрируемые на эхосъемке показания s_A . Связь этих величин определяется известными соотношениями [6]:

$$s_A = s_V 4\pi r_0^2 \cdot 1852^2 \cdot (r_2 - r_1), \text{ м}^2/\text{кв.милю}; \quad (4)$$

$$s_V = \frac{P_r 32\pi^2}{P_t G_0^2 r_0^2 \lambda^2 c \tau \Psi} r^2 10^{2ar}, \text{ 1/м}^3; \quad (5)$$

$$s_A = \frac{P_r 32\pi^2}{P_t G_0^2 r_0^2 \lambda^2 c \tau \Psi} r^2 10^{2ar} 4\pi r_0^2 \cdot 1852^2 \cdot (r_2 - r_1), \text{ м}^2/\text{кв.милю}, \quad (6)$$

где $(r_2 - r_1)$ – толщина слоя интегрирования, м.

В идеальном случае величины усиления G_{OSV} , выставляемые на калибровках, должны оставаться для данного прибора ЕК 500 и для одних и тех же географических, погодных и гидрологических условий калибровочных работ неизменными. На практике же величина G_{OSV} колеблется от калибровки к калибровке относительно некоторого среднего уровня. Эти колебания могут быть обусловлены различными факторами: старением аппаратуры, случайными погрешностями измерительных электрических цепей, температурными скачками водной среды, ее солёности и другими причинами.

На основе протоколов калибровок, выполненных за период с 1996 по 2006 г., был проведен анализ полученных значений $G_{OSV\text{калибр}}$, соответствующих калиброванным величинам s_A для ЕК 500 СТМ «Атлантниро». Калиброванные величины $G_{OSV\text{калибр}}$ и их абсолютные значения $g_{OSV\text{калибр}}$, полученные простым преобразованием $G_{OSV\text{калибр}} = 10 \lg g_{OSV\text{калибр}}$, составили нижепоказанный статистический ряд:

Год	1996	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	Σ
$G_{OSV\text{калибр}}$	27,50	26,98	27,00	27,4	27,10	27,3	26,65	27,2	27,75	27,3	-
$g_{OSV\text{калибр}}$	562,3	498,9	501,2	543,3	512,6	532,1	462,4	521,2	595,7	537,0	5266,9

Приведенный ряд проиллюстрирован графиком колебаний значений $G_{OSV\text{калибр}}$ относительно среднего (рис.1).

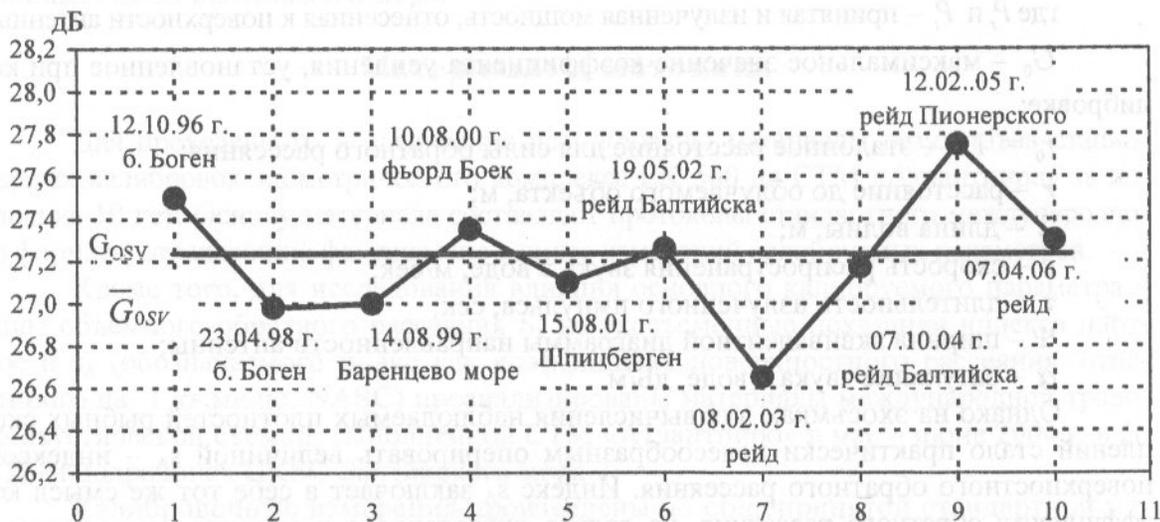


Рис. 1. График колебаний уровня усиления $G_{OSV\text{калибр}}$ эхолота ЕК 500 СТМ «Атлантниро»

Fig. 1. Diagram of the amplification level variations G_{OSV} standard for the echo sounder ЕК 500 installed on board the STM «Atlantniro»

Как видно из графика, эти колебания связаны с различными гидрологическими условиями морской среды различных районов проведения калибровок. Усреднение показанных на графике значений G_{0SV} выражено горизонтальной прямой, соответствующей уровню $\overline{G}_{0SV} = 27,21$ дБ. Наибольший разброс отсчетов $G_{0SV\text{калибр}}$ приходится на его значения 26,65 дБ (08.02.03 г., Балтийск) и 27,75 дБ (12.02.05 г., Пионерский) и составляет 1,1 дБ. Наименьший разброс приходится на показания, полученные при калибровках на рейдах Балтийска (19.05.02 г. и 07.10.04 г.) и Пионерского (07.04.06 г.). Эти показания почти совпадают со средним значением \overline{G}_{0SV} , хотя и выполнены с интервалом 2 года. Остальные калиброванные $G_{0SV\text{калибр}}$ также незначительно отличаются от среднего уровня.

Исходя из того, что значения $G_{0SV\text{калибр}}$ являются случайными величинами, их статистические характеристики определяются как:

среднее $\overline{g}_0 = 526,7;$

дисперсия $s^2 = 1357,75;$

среднеквадратичное

отклонение (стандартное) $s = 36,85;$

коэффициент вариации $CV = s / \overline{g}_0 = 36,85/526,7 = 0,07$, или 7%.

Для рассматриваемого порядка случайных величин $G_{0SV\text{калибр}}$, образующихся при измерении этого параметра одного и того же прибора ЕК 500, значение коэффициента вариации 7% является довольно существенным. По-видимому, это завышение обусловлено включением в показанный ряд значений $G_{0SV\text{калибр}}$, полученных на калибровках 08.02.03 г. и 12.02.05 г., которые следовало бы рассматривать как выбросы (промахи), имея в виду их наибольшее отклонение от среднего уровня. Если это так, то можно предположить при последующем большем объеме накопленных величин $G_{0SV\text{калибр}}$, что их степень изменчивости относительно среднего уровня может быть ограничена какой-то допустимой величиной коэффициента вариации CV, которая служила бы ориентиром качества проводимой калибровки. Например, если исключить эти два выброса из представленного выше ряда, то величина коэффициента вариации будет равна 4 % на основе пересчитанных следующих характеристик:

среднее $\overline{g}_0 = 526,1;$

дисперсия $s^2 = 474,9;$

среднеквадратичное

отклонение (стандартное) $s = 21,8;$

коэффициент вариации $CV = s / \overline{g}_0 = 0,04$, или 4 %.

Эту величину можно было бы принять за допустимый уровень CV при названном исключении промахов, которые свидетельствуют, по-видимому, о недостаточной точности измерений, производимых вне стационарных условий.

Рассмотрим подробную таблицу данных калибровок (табл. 1).

По существу каждая колонка табл. 1 представляет собой алгоритм последовательности производимых установок параметров и их калиброванных измерений. Исходным параметром является величина силы цели TS эталонной сферы, извлеченная из ее паспортной характеристики и соотношенная к конкретным на момент калибровки значениям температуры и солености воды, скорости звука в воде в районе проведения калибровки и величине длительности импульсных посылок рабочего режима эхолота.

**Характеристические параметры калибровок
эхолота EK 500 Симрад СТМ «Атлантниро» за период 1996 – 2006 гг.**

**The 1996-2006 calibration parameters for echo sounder EK 500 Simrad installed
on STM «Atlantniro»**

Показатели	1996	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Температура воды, °С	12	4,1	9,3	5,8	3	6,6	1,9	15,0	1,94	1,8
Соленость, ‰	25	35	33,8	33,8	33	7,0	7,1	7,1	7,3	7,5
Скорость звука	1485	1468	1487	1473	1460	1442,3	1424,2	1474,8	1421,4	1420
TS сферы (паспортная)	-33,6	-33,6	-33,6	-33,6	-33,6	-33,9	-34,1	-33,6	-34,2	-34,3
Усиление G_{OTS}	27	26,5	27,2	27,55	27,55	27,1	27,1	26,5	27,52	27,88
Усиление G_{OTS} калибр	27,43	27,5	27,2	27,55	27,1	27,48	27,37	27,52	27,88	27,64
TS сферы калибр.	-33,6	-33,6	-33,6	-33,6	-33,7	-33,9	-34,1	-33,6	-37,2	-34,3
Усиление G_{OSV}	26,5	26,5	27	27,35	27,35	27,1	27,1	26,5	27,17	27,75
Теоретическая s_A	21247	14611	3124	5528	8009	5316	11569	8334	7169	3294
Измеренное s_A	33866	18218	3166	5522	7169	5733	8749	11337	9352	2654
Усиление G_{OSV} калибр	27,50	26,98	27,00	27,35	27,10	27,26	26,65	27,17	27,75	27,3
Калиброванное s_A	21592	14655	3166	5522	8010	5327	11804	8341	7223	3258

Этот параметр является базовым для настройки 2 условных каналов усиления по: TS (по закону $VARU\ 40lg$) и S_V (по закону $VARU\ 20lg$).

Калиброванная величина усиления G_{OTS} должна дать в идеальном случае отсчет измеряемого показания TS, равный базовой (паспортной) величине силы цели сферы.

Калиброванная величина усиления по G_{OSV} калибр устанавливается путем подборки такого его значения, которое бы приближало измеряемые показания $s_{изм}$ к величине его расчетного значения $s_{Атеор}$, получаемого из соотношения:

$$s_{Атеор} = \frac{4\pi r_0^2 \sigma \cdot 1852^2}{\psi R^2} \text{ м}^2/\text{кв.милю}, \quad (7)$$

где R – расстояние от антенны до эталонной сферы, м;

ψ – ширина эквивалентной идеальной диаграммы направленности антенны;

σ – акустическое сечение обратного рассеяния эталонной сферы, вычисляемое путем потенцирования калиброванной величины TS сферы.

Исходя из пропорциональности величин s_v и s_A в приведенном выше уравнении (4) достигается получение калибровочной величины $s_{Акалибр}$ путем регулировки усиления G_{OSV} по достижении регистрации эхолотом указанного равенства величин $s_{Атеор}$ и $s_{Акалибр}$. Из табл. 1 видно, что эти величины отвечают условию примерного равенства и, следовательно, рассмотренные калибровки следует считать корректными.

Это утверждение было бы справедливым также и для калиброванных в 2003 и 2005 гг. значений G_{OSV} калибр, имеющих наибольшее отклонение от среднего уровня, если исключить полученные несоответствия $s_{Акалибр}$ величине $s_{Атеор}$ (2003 г.) и $TS_{калибр}$ величине $TS_{пасп}$ (2005г.), обусловленные, вероятно, неблагоприятными погодными и гидрологическими условиями калибровки вне стационара, выпадающими на февраль (см. табл. 1).

Какова степень влияния калиброванной величины $G_{OSV\text{калибр}}$ на точность оценки плотности рыбных скоплений и их биомасс рассматривается в разделе «Обсуждение».

Обсуждение

Показательным примером искаженной оценки плотности и биомасс является эхосъемка в Балтийском море в мае – июне 2004 г. на СТМ «Атлантниро». Перед эхосъемкой калибровка не проводилась, поэтому калиброванная величина G_{OSV} была выставлена равной ее значению $G_{OSV\text{калибр}} = 26,65$ дБ, полученному из предыдущей калибровки (08.02.2003 г.). Выполнив эхосъемку с такой установкой, были получены результаты, представленные в формате ИКЕС в табл. 2, А.

Сравнивая показанный в табл. 2, А ряд значений s_A с аналогичным рядом, полученным из результатов эхосъемок иностранных судов стран – партнеров, работавших в смежных квадратах 26-го подрайона ИКЕС, выяснилось, что общий порядок численного ряда s_A в нашем случае оказался завышенным. Это привело к завышенной оценке численности обследуемых биомасс сельди и шпрота.

Для получения приблизительно корректной оценки биомасс, произведенной на этой съемке, было принято решение о пересчете численного ряда s_A при вновь введенной установке калиброванного коэффициента усиления $G_{OSV\text{калибр}} = 27,17$ дБ на том основании, что калиброванные значения $TS_{\text{калибр}}$ и $s_{A\text{калибр}}$ при такой установке принимаются нами корректными, так как совпадают с их паспортной и теоретической величиной. Это значение коэффициента усиления получено из результатов последующей калибровки 07.10.2004 г. и использовано как корректное показание режима работы эхолота.

Таблица 2

Статистические данные по акустической съемке в Балтийском море

Statistical data of the acoustic survey in the Baltic Sea

ИКЕС, подрайон	ИКЕС, квадрат	Площадь, кв.миля	S_A , м ² /кв.милю	$\sigma * 10^4$, м ²	Общий запас, млн.экз	Видовой состав, %	
						сельдь	шпрот
1	2	3	4	5	6	7	8
А							
28-й	44Н1	824,6	580,6	0,88981	5380,2	3,5	96,5
	44Н0	960,5	2279,0	0,94	23372,5	2,8	97,2
	43Н1	412,7	1039,2	1,26	3408,3	10,9	89,1
	43Н0	973,7	1558,4	1,07793	14077,2	1,7	98,3
	42Н0	968,5	969,8	1,21733	7715,8	0,8	99,2
	42Г9	986,9	1226,8	0,79105	15305,3	1,8	98,2
26-й	41Н0	953	1492,4	0,91192	15601,1	0,8	99,2
	41Г9	1000	1283,9	1,07741	11916,1	2,4	97,6
	40Н0	1012	826,4	0,80846	10345,2	0,2	99,8
	40Г9	1013	1616,1	1,03	15838,2	0,1	99,9
	39Н0	882	777,1	0,80	8615,2	0,8	99,2
	39Г9	1026	694,2	1,07	6655,2	0,3	99,7
38Г9	918	977,0	1,00	8934,5	0,8	99,2	
Б							
28-й	44Н1	824,6	456,3	0,890	4228,8	3,5	96,5
	44Н0	960,5	1768,6	0,937	18137,5	2,8	97,2
	43Н1	412,7	817,2	1,258	2680,1	10,9	89,1

1	2	3	4	5	6	7	8
26-й	43Н0	973,7	1221,9	1,078	11037,1	1,7	98,3
	42Н0	968,5	762,4	1,217	6065,4	0,8	99,2
	42G9	986,9	965,4	0,791	12044,6	1,8	98,2
	41Н0	953,3	1174,2	0,912	12274,6	0,8	99,2
	41G9	1000	1007,2	1,077	9348,3	2,4	97,6
	40Н0	1012,1	650,0	0,808	8136,9	0,2	99,8
	40G9	1013	1263,0	1,034	12378,1	0,1	99,9
	39Н0	881,6	611,4	0,795	6778,0	0,8	99,2
	39G9	1026	535,0	1,070	5128,9	0,3	99,7
	38G9	918,2	761,9	1,004	6967,2	0,8	99,2

Обращаясь вновь к графику распределения установок $G_{0SV\text{калибр}}$ (см. рис. 1), видно, что это значение практически совпадает со средним значением \bar{G}_{0SV} , которое в рассматриваемом случае следует принять за истинное в режиме нормально работающего эхолота ЕК 500.

Для корректировки численного ряда отсчетов s_A использована лицензионная программа «SonarDataEchoview», которая при вводе данного значения 27,17 дБ произвела полный перерасчет всех необходимых данных этой эхосъемки. Пересчитанные данные приведены в том же формате ИКЕС в итоговой таблице результатов эхосъемки (табл. 2, Б).

Как видно из сравниваемых численных рядов значений s_A , средняя величина \bar{s}_{A1} равная $1178,5 \text{ м}^2/\text{кв.милю}$ (см.табл.2,А), и средняя величина \bar{s}_{A2} , равная $922,6 \text{ м}^2/\text{кв.милю}$ (см. табл. 2, Б), с очевидностью показывают, что второе значение меньше первого на 22%.

Ввиду пропорциональности определяемых на съемке величин s_A , плотности ρ_s и биомассы B , найденная процентная разница в полной мере относится и к разнице биомасс, оцененных в первом и во втором случае. То есть, полученная после корректировочного пересчета оценка биомассы оказалась на 22% меньше первоначальной оценки.

Выводы

1. Ошибка в определении калиброванного параметра $G_{0SV\text{калибр}}$ из-за ненормального режима работы аппаратуры или из-за некачественных акустических подводных операций, обусловленных как погодными условиями, так и низкой квалификацией исполнителей, может приводить к существенной погрешности в определении численности оцениваемого запаса. В рассмотренном примере эта погрешность составила 22%.

2. Выполнение калибровки научного эхометрического прибора строго обязательно для обеспечения необходимой точности оценки плотности рыбных скоплений и их биомасс.

3. В целях обеспечения качественной калибровки для выполнения акустических измерительных работ требуются стационарные условия их проведения, означающие выбор специальной морской акватории с глубинами 30 – 40 м, с отсутствием подводных течений, волнением не более 2 баллов, наличием надежной носовой и кормовой швартовки судна, наличием совершенного калибровочного оснащения и конечно же высокой квалификации операторов.

4. При отсутствии для калибровки близко расположенного стационарного места допускается ее проведение на прибрежных акваториях при более жестких требованиях как к погодным, так и к гидрологическим условиям (штилевая погода, отсутствие течений, дрейфа судна, наличие надежной якорной стоянки) с дополнительной привязкой к якорным бочкам и др.

5. Последний вариант условий проведения калибровок не исключает, а скорее диктует необходимость периодических (например, раз в три года) калибровок в стационарных условиях с целью проверки калибровочных параметров научного эхолота, полученных в предшествующие годы вне стационара.

Благодарности

Автор благодарит всех сотрудников лаборатории электронной техники морских исследований (ЛЭТМИ) за большую помощь в выполнении данной работы и написании статьи.

Список использованной литературы

1. Гаврилов, Е.Н. Методическое пособие по использованию научного эхолота EK 500 / Е.Н. Гаврилов, В.А. Игнашкин, С.В. Ратушный; ПИНРО. – Мурманск, 2003. – 134с.
2. Клей, К. Акустическая океанография / К. Клей, Г. Медвин. – М.: Мир, 1980. – С. 195-219.
3. Методические рекомендации по калибровке научно-исследовательской гидроакустической аппаратуры / сост.: Е.Н. Гаврилов [и др.]. – Мурманск, 1990. – 125с.
4. Botholt, H. Fish density derived from Echo – Integration and in – situ Target strength Measurements // ICES 1990, с.m.1990/ B: 11Sess 1. – P. 15
5. Echoview 3.50 Tutorial: Getting Started with Echoview; Copyright SonarData Pty Ltd 2006. – 44 p.
6. SIMRAD EK 500, Scientific Echo Sounder, OPERATOR MANUAL, Software Version 5.30., SIMRAD A KONGSBERG Company, Horten. – 1997.

УДК [597-152.6+639.2.055](261.4)

В.А. Рихтер

О ДИНАМИКЕ ЧИСЛЕННОСТИ И УПРАВЛЕНИИ ПРОМЫСЛОМ НЕКОТОРЫХ ПОПУЛЯЦИЙ РЫБ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ АТЛАНТИКИ (РАЙОН НАФО)

Введение

Нет нужды говорить, какую роль в управлении промыслом, основанном на стратегии предосторожного подхода, играет оценка лимитирующих ориентиров нерестовой биомассы (НБ). Однако в настоящей работе, развивающей теорию предыдущей [2], получение соответствующих оценок, хотя и представляет важную с практической точки зрения задачу, все же не является самоцелью. В ней делается попытка на основе выявления принципиальных различий в характере динамики чис-