

УДК 51:597.56:639.2.053

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НУЛЕВОЙ СТАДИИ РАЗВИТИЯ АТЛАНТИЧЕСКОЙ ТРЕСКИ В НОРВЕЖСКОМ МОРЕ

**Чанцев Валерий Юрьевич**

кандидат географических наук, доцент

ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», г.

Санкт-Петербург

chantsev@hotmail.com

### Аннотация

Представлена численная модель, позволяющая рассчитать продолжительность эмбрионального развития атлантической трески под действием меняющейся температуры воды в Норвежском море. Логранжев подход моделирования в результате воздействия системы течений позволяет рассчитать распространение икры и личинок на акваториях Норвежского и Баренцева морей, отмечая долю икры и личинок попадающих в благоприятные условия для развития или наоборот.

Проведенный численный эксперимент показал, что температурные и гидродинамические условия весны 2021 года не позволили получить максимальную урожайность данного поколения атлантической трески.

**Ключевые слова:** эмбриональное развитие рыб, нерест, атлантическая треска, метод случайных блужданий.

## NUMERICAL SIMULATION OF THE ZERO STAGE OF ATLANTIC COD DEVELOPMENT IN THE NORWEGIAN SEA

**Valery Yu. Chantsev**

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor

Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg

### ABSTRACT

A numerical model that allows calculating the duration of the embryonic development of Atlantic cod under the influence of changing water temperatures in the Norwegian Sea is presented. The lograngean modeling method in the presence of currents makes it possible to calculate the distribution of eggs and larvae in the waters of the Norwegian and Barents Seas, noting the proportion of eggs and larvae that fall into favorable conditions for development, or vice versa.

The performed numerical experiment showed that the temperature and hydrodynamic conditions of the spring of 2021 did not allow obtaining the maximum yield of this generation of Atlantic cod.

**Keywords:** fish embryonic development, spawning, Atlantic cod, random walk method.

### Введение

Управление морскими биологическими ресурсами является одной из важнейших задач не только эксплуатации естественных популяций промысловых видов рыб, но и их сохранения. Сегодня возможности управления строятся на разработке математических моделей оценки промышленной эксплуатации совместно с учетом особенностей жизненного цикла основных объектов морского промысла.

Существующие подходы математического моделирования динамики численности различных видов рыб осуществляются на основе информации, получаемых из районов промысла [1], а также на основе лабораторных исследований [2] и отдельных натурных исследований особенностей питания, возрастного географического распределения и особенностей воспроизводства. Тем не менее, получаемой информации явно недостаточно для разработки высокоэффективных прогнозов динамики промысловых запасов рыб для различных районов Мирового океана.

Наиболее развитой системой управления морскими промысловыми ресурсами можно считать систему управления промысловыми запасами рыб Баренцева моря [3]. Работа над такой системой началась еще во второй половине 20 столетия с разработки математических моделей динамики численности популяций [4,5], межвидовых взаимодействий [6,7] и моделей промысла [8].

Действующие системы управления рыбными запасами Баренцева моря, в первую очередь, основываются на том, что в промысле участвуют только популяции половозрелых рыб. Такое ограничение промыслового изъятия того или иного вида рыб позволяет оценивать их численность на разных этапах жизненного цикла, разделив общую популяцию на возрастные когорты от икры и личинок (0 стадия развития) до возраста вступления в половозрелость.

Самым большим камнем преткновения прогнозирования динамики численности вида является невозможность получить достоверную оценку численности (биомассы) существующего запаса. Сегодня все оценки строятся на виртуально-популяционном анализе запаса [9], и только для половозрелой части популяции (нерестовый запас). Единственно достоверным источником информации служит оценка численности икры в районе нереста путем проведения ихтиопланктонных съемок и статистической оценки плодовитости родительского стада.

Для повышения качества прогноза динамики численности промыслового вида строятся математические зависимости связи численности икры на нерестилище с численностью половозрелой части популяции. Но оказалось, что корреляция между этими состояниями развития одного поколения является незначимой. Это означает, что качественную информацию о численности икры в районе нереста нельзя использовать в математических моделях типа «запас-пополнение» [10]. На самом деле проблема заключается в том, что из оплодотворенной икры из-за воздействия штормовых условий и неблагоприятного распределения температуры воды выклеивается не более 10% личинок, а до малька доживает еще меньше. Для решения моделей типа «запас-пополнение» необходима окончательная численность личинок вступающих в стадию малька.

Предлагаемую к рассмотрению численную модель можно назвать моделью урожайности поколения определенного вида рыб. Она предназначена для расчета продолжительности эмбрионального периода рыб под действием меняющейся

температуры окружающей среды и определением района благоприятного для дальнейшего развития личинок.

#### Описание модели

Процесс вычисления основывается на уже разработанной модели распространения пелагической икры [11]. Суть модели заключается в следующем. Под действием течений в верхнем слое моря оплодотворенная икра дрейфует из района нереста в район нагула личинки и развития малька. За время дрейфа происходит вылупление личинки. Продолжительность эмбрионального развития зависит от меняющейся температуры воды.

Расчет распространения икры проводится методом «случайных блужданий» в виде описания перемещения икринок и личинок как пассивных частиц в лагранжевой системе координат, траектория движения каждой из которых описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} X_i^{t+\Delta t} &= X_i^t + U_i \Delta t + r \cdot \xi_i(-1,1) \\ Y_i^{t+\Delta t} &= Y_i^t + V_i \Delta t + r \cdot \xi_i(-1,1) \end{aligned} \quad (1)$$

где  $X, Y$  – пространственные координаты  $i$ -ой частицы в моменты времени  $t$  и  $t+\Delta t$ ,  $U, V$  – горизонтальные компоненты скорости течения в точке расположения  $i$ -ой частицы,  $\xi$  – случайное число в диапазоне от  $-1$  до  $1$ , а  $r$  – радиус диффузионного разброса частиц.

Продолжительность эмбрионального периода развития морских рыб исследовалась в лабораторных условиях. Практически все исследования [12-14] показали, что независимо от вида рыб, уравнение продолжительности инкубационного периода ( $\tau$ ) может быть записано как:

$$\tau = A + B \exp(-CT_{inc}) \quad (2)$$

где  $A, B, C$  – числовые коэффициенты,  $T_{inc}$  – средняя температура воды инкубационного периода.

В лабораторных условиях выдержать постоянную температуру несложно, но в естественных условиях температура непрерывно меняется. Скорость развития эмбриона, согласно работы [14], можно принять квазилинейной в зависимости от температуры среды. В связи с этим уравнение (2) для меняющейся температуры воды ( $T_w$ ) можно представить в виде:

$$E = \sum_{j=1}^n \frac{\Delta t}{A + B \exp(-CT_w)} \quad (3)$$

Согласно выражению (3) выклев личинки будет происходить, когда  $E = 1$ , а продолжительность инкубационного периода определяется как  $\Delta t n$ , где  $n$  – количество шагов времени для выполнения формулы (3).

#### Исходные данные

В качестве объекта исследования выбран наиболее популярный промысловый вид Северо-восточной Атлантики – атлантическая треска. Согласно исследованиям [13] параметры уравнения (2) принимают значения:  $A = 7, B = 30,3, C = 0,215$ .

Нерест трески осуществляется в период с середины февраля до конца марта. Поэтому с сайта CMEMS-Copernicus (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) были получены поля течений и температуры воды за период с 1.02.2021 по 30.04.2022 для района Норвежского и Баренцева морей.

#### Результаты численного эксперимента

Весенний нерест атлантической трески проходит вдоль Норвежского побережья от района Мёре-ог-Ромсдал до Лофотенских островов. В благоприятные годы массовый нерест смещен к Лофотенским островам и более всего в Вест-фьерде. Весной 2021г. видно, что благоприятный температурный режим смещен к южной периферии района нереста (рис.1). Причем, необходимо отметить, что это нижний предел температуры нереста, который будет сильно влиять на продолжительность эмбрионального развития икры трески.

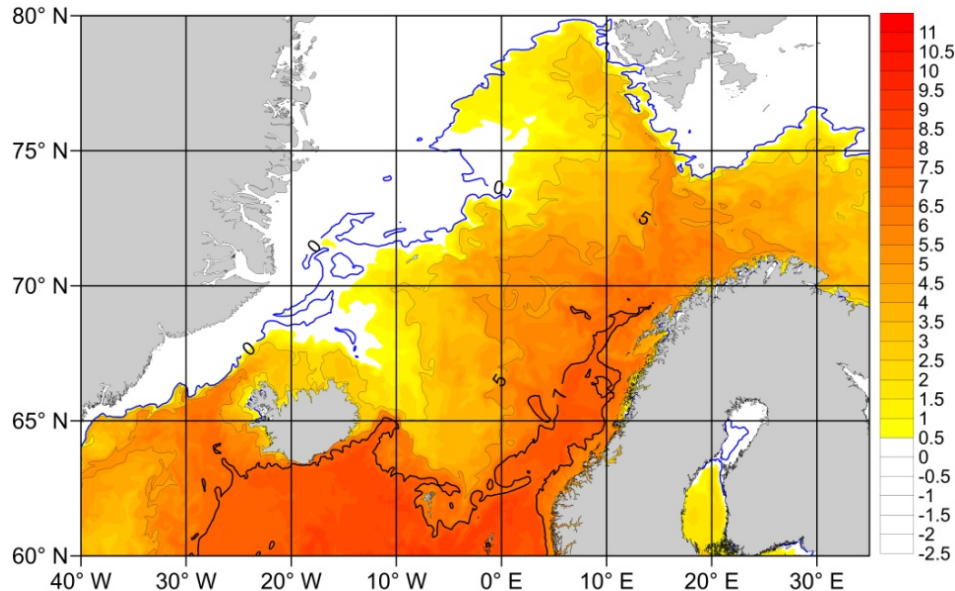


Рисунок 1. Распределение температуры поверхности воды в Норвежско-Баренцевоморском регионе 01.03.2021 г.

Вдоль норвежского побережья икра с Норвежским течением должна переместиться в благоприятный район нагула личинки и формирования малька. С Нордкапским течением проникая на южную окраину Баренцева моря личинка трески оказывается в наиболее благоприятных условиях для дальнейшего развития. Но на начало марта 2021 г. видно, что структура Норвежского течения не выражена и четкого формирования Нордкапского течения не видно (рис. 2). Такая ситуация не обеспечивает максимального выживания личинок трески и развития малька.

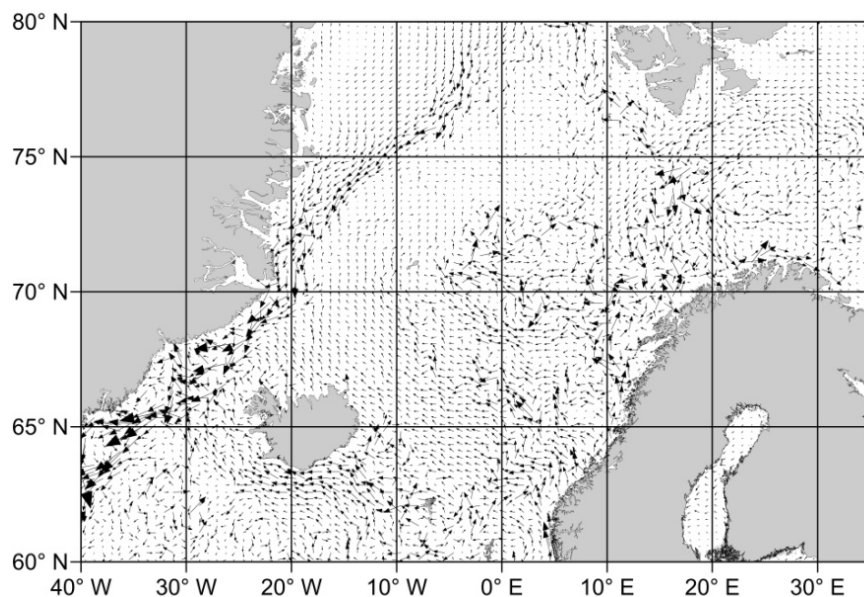


Рисунок 2. Распределение течений в поверхностном слое в Норвежско-Баренцевоморском регионе 01.03.2021 г.

В соответствии с имеющимся распределением температуры воды на начало нереста, район нереста был задан ближе к южной окраине своего возможного положения (рис. 3). Модельный нерест продолжался в течение с 15 февраля по 31 марта. Расчет эмбрионального развития личинок трески и их распространение под действием течений продолжался до 30 апреля, полагая, что к этому моменту личинки достигнут областей благоприятных для нагула и формирования мальков.

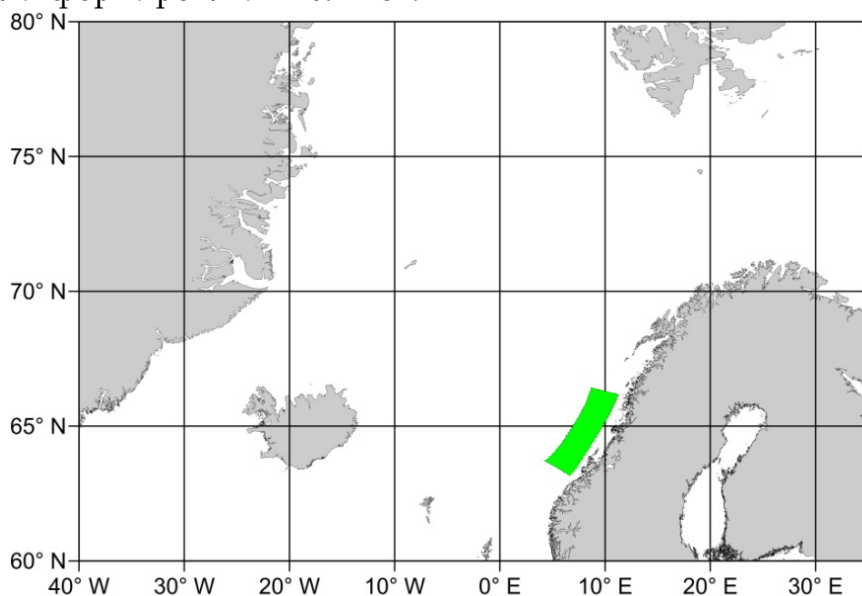


Рисунок 3. Положение нерестового района (зеленая фигура) на 15.02.2021 г.

Слабая выраженность Норвежского течения к концу февраля 2021 г. привела к тому, что вся масса икры трески остается в районе нереста (рис. 4). К этому моменту, т.е. на 13 сутки после начала нереста стали появляться первые личинки. В благоприятные годы по температурному режиму выклев личинки начинается на 7-8 сутки. В данном случае выклев личинок начался почти на неделю позже и это происходит на западной окраине распространения икры, где сложились наиболее благоприятные условия. Количество выклюнувшихся личинок составило всего 0,06% от всей оплодотворенной на этот момент икры, и 33% от икры первых моментов нереста.

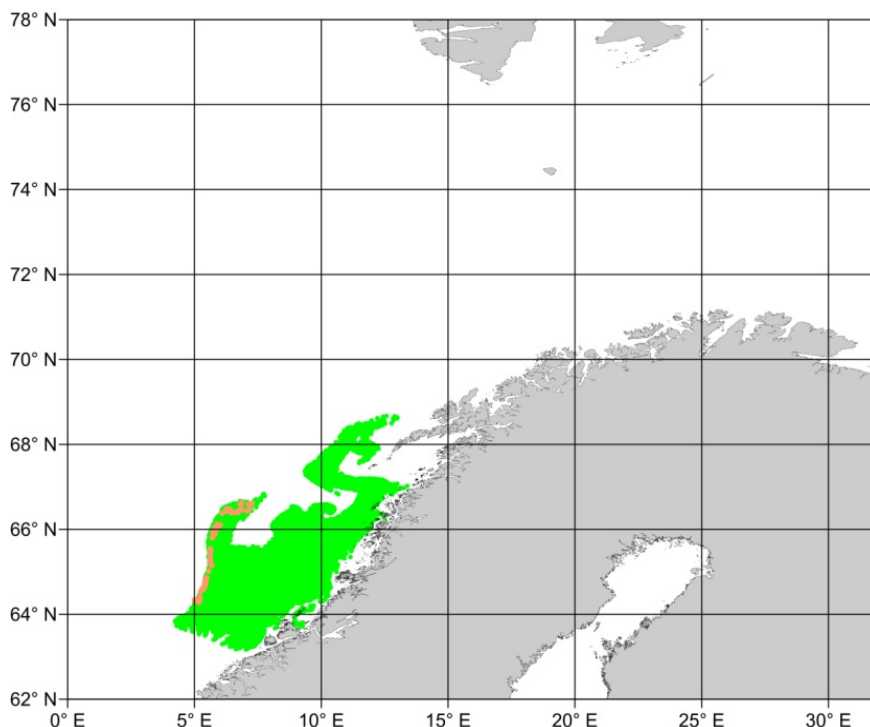


Рисунок 4. Распределение икры (зеленые точки) и личинок (желтые точки) на 28.02.2021

К концу апреля 2021 г. все эмбрионы перешли в стадию личинки и максимально далеко распространились от района промысла (рис.5). К этому времени в личиночную стадию перешло 47,8% от всей выметанной икры. Остальные эмбрионы погибли из-за неблагоприятного влияния температуры окружающей среды. Из рис. 5 хорошо видно, что массовая доля личинок осталась в Норвежском море, и только 9,4% личинок переместились в Баренцево море.

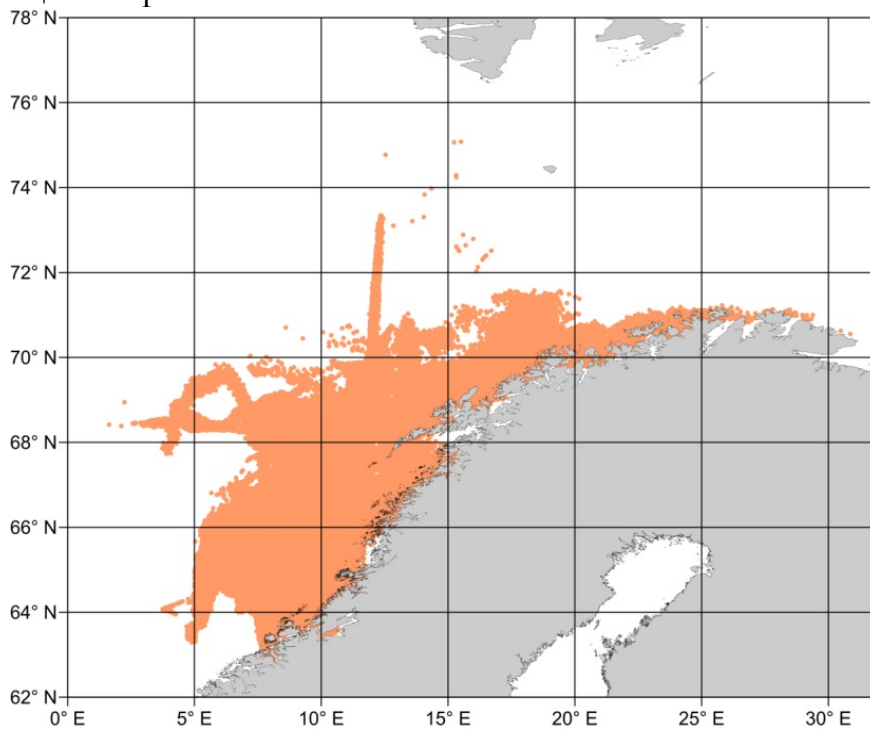


Рисунок 5. Распределение личинок трески на 30.04.2021 г.

Кормом личинки, оставшиеся в Норвежском море, могут быть обеспечены только в прибрежной зоне. Остальная масса личинок открытой части моря неизбежно погибнут. Но

и в прибрежной зоне в районе Лофотенских островов и далее на юг личинки трески будут массово подвергаться хищничеству со стороны мойвы и молоди сельди.

### Заключение

Представленная численная модель урожайности поколения атлантической трески, ориентированная на расчет продолжительности эмбрионального развития на нулевой стадии, хорошо показала влияние температуры воды и распределения течений на распространение икры и личинок и их выживаемость.

Взятый для численного эксперимента весенний период 2021 г. показал, что массовая доля эмбрионов трески не достигла стадии личинки. При этом только десятая часть выклюнувшейся личинки достигла благоприятного района для дальнейшего развития.

Проведенный численный эксперимент позволяет сделать вывод, что предложенный подход расчета изменения численности атлантической трески на нулевой стадии своего развития может восполнить недостаточность информации для более точной оценки нерестового запаса данного вида в Норвежско-Баренцевоморском регионе. Именно численность личинок, а в последствие и мальков трески является необходимым элементом таких математических моделей, как модель «запас-пополнение». С момента формирования личинки и развития малька начинаются вычисления когортного развития промыслового вида рыб.

Представленная модель имеет возможность дальнейшего развития, которое может заключаться в учете еще многих факторов, влияющих на развитие эмбрионов рыб, личиночную стадию и на условия выживания мальков в первую зиму.

### Список литературы:

1. Булгакова Т.И. Регулирование многовидового рыболовства на основе математического моделирования. – М.: ВНИРО, 2009. 252 с.
2. De Ciechowski J.D. Influence of some environmental factors upon the embryonic development of the Argentine anchovy *Engraulis anchoita* (Hubbs, Marini) // Calif. Coop. Fish. Invest. Rpt., vol. 11, 1967. P. 67-71.
3. Models for Multispecies Management /For Rodseth (ed.). – Heidelberg: New York: Physica-Verlag, 1998. 274 pp.
4. Бивертон Р., Холт С. Динамика численности промысловых рыб. – М.: Пищевая промышленность, 1969. 246 с.
5. Ricker W. Computation and interpretation of biological statistics of fish populations // Bull. Fish. Res. Board Can., vol. 191, 1975. 382 pp.
6. Bogstad B., Hauge K.H., Ulltang O. MULTSPEC – A Multi-species Model for Fish and Marine Mammals in the Barents Sea // J. North. Atl. Fish. Sci., Vol. 22, 1997. P. 317-341.
7. Tjelmeland S. and B. Bogstad. MULTSPEC - a review of a multispecies modelling project for the Barents Sea // Fisheries Research 37(1-3), 1998. P. 127-142.
8. Schaefer M.B. Some aspects of dynamics of populations important to the management of commercial marine fisheries // Int. Amer. Trop. Tuna Comm. Bull. 1, 1954. P. 27-56.
9. Коржев В.А., Долгов А.В. Многовидовая модель MSVPA сообщества промысловых видов Баренцева моря. – Мурманск: ПИНРО, 1999. 82 с.

10. Булгакова Т.И. Модель популяции типа «запас-пополнение», учитывающая влияние кормовой базы производителей на выживание молоди // Труды ВНИРО, т. 128, 1978. С. 16-22.
11. Аверкиев А.С., Чанцев В.Ю. Расчет распространения икры трески в верхнем слое на водоразделе Норвежского и Баренцева морей на основе гидродинамической модели / Вопросы промысловой океанологии северного бассейна. Сб. научных трудов. – Мурманск: ПИНРО, 1995. С. 131-138.
12. Jean Y. A study of spring and fall spawning herring (*Clupea harengus* L.) at Grande-Riviere, Bay of Chaleur, Quebec // Contr. Dept. Fish., vol. 49, 1956. P. 1-76.
13. Dannevig H. The influence of temperature on the development of the eggs of fishes // Annual Rep. Fish. Bd. Scotland, vol. 13, N. 5, 1995. P. 147-152.
14. Буслов А.В., Сергеева Н.П. Эмбриогенез и раннее постэмбриональное развитие тресковых рыб дальневосточных морей // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и север-западной части Тихого океана, вып. 29, 2013. 69 с.

#### References:

1. Bulgakova T.I. Regulation of multi-species fisheries based on mathematical modeling. – M.: VNIRO, 2009. 252 p. [in Russian]
2. De Ciechowski J.D. Influence of some environmental factors upon the embryonic development of the Argentine anchovy *Engraulis anchoita* (Hubbs, Marini) // Calif. Coop. Fish. Invest. Rpt., vol. 11, 1967. P. 67-71.
3. Models for Multispecies Management /For Rodseth (ed.). – Heidelberg: New York: Physica-Verlag, 1998. 274 pp.
4. Biverthon R., Holt S. Dynamics of the number of commercial fishes. – M.: Food industry, 1969. 246 p. [in Russian]
5. Ricker W. Computation and interpretation of biological statistics of fish populations // Bull. Fish. Res. Board Can., vol. 191, 1975. 382 pp.
6. Bogstad B., Hauge K.H., Ulltang O. MULTSPEC – A Multi-species Model for Fish and Marine Mammals in the Barents Sea // J. North. Atl. Fish. Sci., Vol. 22, 1997. P. 317-341.
7. Tjelmeland S. and B. Bogstad. MULTSPEC - a review of a multispecies modelling project for the Barents Sea // Fisheries Research 37(1-3), 1998. P. 127-142.
8. Schaefer M.B. Some aspects of dynamics of populations important to the management of commercial marine fisheries // Int. Amer. Trop. Tuna Comm. Bull. 1, 1954. P. 27-56.
9. Korzhev V.A., Dolgov A.V. Multi-species model MSVPA of the community of commercial species of the Barents Sea. – Murmansk: PINRO, 1999. 82 p. [in Russian]
10. Bulgakova T.I. A "stock-r recruitment " model estimating the impact of the availability of food for spawners on the survival of offspring // Proceedings of VNIRO, V. 128, 1978. P. 16-22. [in Russian]
11. Averkiev A.S., Chantsev V.Yu. Calculation of cod eggs distribution in the upper layer on the divide of the Norwegian and Barents Seas based on a hydrodynamic model / Aspects of fisheries oceanography of the northern basin. Selected papers. – Murmansk: PINRO, 1995. P. 131-138. [in Russian]

12. Jean Y. A study of spring and fall spawning herring (*Clupea harengus* L.) at Grande-Riviere, Bay of Chaleur, Quebec // Contr. Dept. Fish., vol. 49, 1956. P. 1-76.
13. Dannevig H. The influence of temperature on the development of the eggs of fishes // Annual Rep. Fish. Bd. Scotland, vol. 13, N. 5, 1995. P. 147-152.
14. Buslov A.V., Sergeeva N.P. Embryogenesis and earlier postembryonic development of cod fish in the Far Eastern seas // Studies of aquatic biological resources of Kamchatka and the northwestern part of the Pacific Ocean, issue 29, 2013. 69 pp. [in Russian]