

**УСЛОВИЯ ОБИТАНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ**

УДК 574.583:551.46

**Ю.И. Зуенко, Е.О. Басюк\***Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр,  
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ  
НА СОСТАВ И ОБИЛИЕ ЗООПЛАНКТОНА В НАВАРИНСКОМ  
ПРОМЫСЛОВОМ РАЙОНЕ БЕРИНГОВА МОРЯ И ИХ ЗНАЧЕНИЕ  
ДЛЯ РОССИЙСКОГО МИНТАЕВОГО ПРОМЫСЛА**

По данным многолетних съемок рассмотрены сезонные и межгодовые изменения состава и обилия зоопланктона в районе у мыса Наварин, который является основным районом российского промысла минтая в Беринговом море. Показано, что в этом районе кормовая база минтая в течение нагула принципиально меняется: летом она образуется преимущественно крупными копеподами, а осенью — эвфаузидами, прежде всего *Thysanoessa inermis*. Межгодовые изменения обилия массовых видов зоопланктона видоспецифичны и обусловлены разными факторами среды. В частности, для аллохтонных эвфаузиид особое значение имеет характер циркуляции вод в северной части Берингова моря, обеспечивающий их перенос из районов воспроизводства. В последние два десятилетия адвекция вод в район мыса Наварин происходила либо с юга, т.е. с континентального склона (до 2006 г.), либо с востока и запада, т.е. с шельфа (в 2007–2014 гг.), что соответствует смене относительно теплого океанологического режима на относительно холодный, которая проявляется в динамике ледовитости и площади области холодных придонных шельфовых вод. Адвекция со склона обеспечивает вынос эвфаузиид в наваринский район, а в годы с холодным режимом складываются неблагоприятные условия для этого. С другой стороны, холодный океанологический режим благоприятен для воспроизводства большинства массовых видов зоопланктона, в том числе эвфаузиид, по причине более высокой продуктивности вод. В результате в наваринском районе наблюдается куполообразная зависимость обилия большинства массовых видов зоопланктона от термических условий: максимальные биомассы наблюдаются в теплые годы внутри холодных периодов и в холодные годы внутри теплых периодов. В годы с суровыми зимами из-за слабого транспорта эвфаузиид в наваринский район обратная миграция минтая из этого района начинается сразу же после сезонного сокращения численности крупных копепод, уже в конце августа, а после мягких зим снижается обилие большинства видов зоопланктона, что также не способствует продолжительному нагулу минтая в наваринском районе. Оптимальные условия для длительного нагула минтая складываются в «средние» годы, когда российский промысел минтая в Беринговом море продолжается дольше, до ноября-декабря, что позволяет достичь годового вылова свыше 500 тыс. т (1996–1999, 2001, 2007–2008 гг.).

**Ключевые слова:** Берингово море, наваринский промысловый район, адвекция, зоопланктон, копепода, эвфаузида, транспорт планктона, минтай, промысел минтая.

\* Зуенко Юрий Иванович, доктор географических наук, заведующий лабораторией, e-mail: [zuenko\\_yury@hotmail.com](mailto:zuenko_yury@hotmail.com); Басюк Евгений Олегович, старший научный сотрудник, e-mail: [basyuk@tinro.ru](mailto:basyuk@tinro.ru).

Zuenko Yuri I., D.Sc., head of laboratory, e-mail: [zuenko\\_yury@hotmail.com](mailto:zuenko_yury@hotmail.com); Basyuk Eugene O., senior researcher, e-mail: [basyuk@tinro.ru](mailto:basyuk@tinro.ru).

**Zuenko Yu.I., Basyuk E.O.** Impact of changing oceanographic conditions on species composition and abundance of zooplankton on the fishing grounds at Cape Navarin and their importance for the Russian pollock fishery in the Bering Sea // *Izv. TINRO*. — 2017. — Vol. 189. — P. 103–120.

Seasonal and interannual variability of zooplankton in the area at Cape Navarin are considered on the base of long-term surveys. This area is the main fishing grounds for Russian pollock fishery in the Bering Sea. Species composition of zooplankton changes cardinally during the feeding period: large-size copepods prevail in summer, but euphausiids, mainly the krill *Thysanoessa inermis* — in autumn. Year-to-year changes of the zooplankton abundance are species-specific and driven by different environmental factors. The water circulation is crucially important for such allochthonous species as krill by transporting them from the spawning areas. Advection either from the south, i.e. from the continental slope (till 2006), or from the east and west, i.e. from the shelf (in 2007–2014), was observed in the last two decades that corresponded to replacing of relatively warm oceanographic regime by relatively cold regime and could be traced by dynamics of the ice cover and the cold water pool area on the eastern Bering Sea shelf. The advection from the slope provides the krill transport to the area at Cape Navarin, but conditions of the cold regime limit the transport. From the other hand, the cold oceanographic regime is favorable for reproduction of many zooplankton species, including krill, because of higher primary productivity. As the result, the krill and some other mass zooplankton species have a bell-shape dependence of their abundance on water temperature: they have the maximal biomass in relatively warm years within the cold periods and in relatively cold years within the warm periods. In the years with severe winters, the pollock starts its back migration early, in August-September because of seasonal depletion of copepods and lack of krill, while the years with warm winters are also unfavorable for long feeding of pollock in the Navarin area because of low abundance of many zooplankton species. «Moderate» conditions are optimal for long feeding of pollock in this area, when the Russian fishery continues here longer, till November-December, with the annual landings > 500,000 t (as in 1996–1999, 2001, 2007–2008).

**Key words:** Bering Sea, Navarin fishing grounds, advection, zooplankton, copepod, krill, transport of plankton, walleye pollock, pollock fishery.

## Введение

Основной район российского промысла минтая в Беринговом море находится на шельфе и континентальном склоне у мыса Наварин, вблизи границы ИЭЗ. Промысел в этом районе ведется летом и осенью, зависит от нагульных подходов и определяется следующими основными факторами: состоянием запасов; распределением нагульного минтая (какая часть его заходит в наваринский район, насколько плотные скопления образует, как долго длится нагул), которое зависит от фоновых условий, прежде всего кормовой базы; промысловым усилием.

Наиболее изменчивым из этих факторов является распределение нагульного минтая в районах, доступных российскому промыслу. К настоящему времени сложилось довольно полное понимание процесса нагула минтая в наваринском районе, изложенное в научных статьях (Степаненко, Грицай, 2013, 2016) и оперативных изданиях. Суть его в том, что в конце весны — начале лета в этот район заходит для нагула 10–20 % восточноберингоморской популяции минтая, главным образом средневозрастных особей, которые нагуливаются здесь более или менее продолжительное время; в первом случае промысловые скопления в ИЭЗ России могут сохраняться до ноября, во втором — промысловая обстановка ухудшается уже в конце августа. Было высказано предположение (Степаненко, Грицай, 2013, 2016), что ранняя обратная миграция обусловлена снижением кормности наваринского района для минтая, однако пока не представлено убедительных доказательств этого. В то же время среди планктологов существует мнение о неизменно хорошей обеспеченности пищей нагульного минтая и других планктофагов в северо-западной части Берингова моря (Волков, 2014, 2016).

Очевидно, для понимания процессов формирования обстановки на промысле берингоморского минтая необходимо прежде всего разобраться в изменчивости кормовых условий конкретно в пределах промыслового района, что и является целью данного исследования.

## Материалы и методы

Основным материалом для исследования послужила база данных о видовом и количественном составе зоопланктона в Беринговом море, созданная в ТИНРО-центре при активном участии доктора биологических наук А.Ф. Волкова по результатам обработки проб зоопланктона, собранных научно-исследовательскими экспедициями ТИНРО в 1986–2014 гг. Пробы взяты из верхнего 200-метрового слоя моря (средняя глубина облова 80 м) планктонной сетью Джеди с ячейей 0,168 мм (Волков, 2016). Для изучения изменчивости зоопланктона в наваринском районе А.Ф. Волковым была любезно предоставлена выборка по биостатистическому району № 5 — результаты осреднения биомассы зоопланктона (рассчитанной с учетом уловистости планктонных сетей и выраженной в миллиграммах на кубический метр) в пробах, взятых в пределах района, раздельно по таксонам, времени суток (день/ночь), месяцам и годам, с указанием числа проб в осреднении (всего 81 набор величин биомассы для 16 таксонов). Район № 5 расположен в основном в области внешнего шельфа, а также частично захватывает свал глубин и глубоководную часть моря (рис. 1). На этот сравнительно небольшой по площади район приходится большая часть российского вылова минтая в Беринговом море.

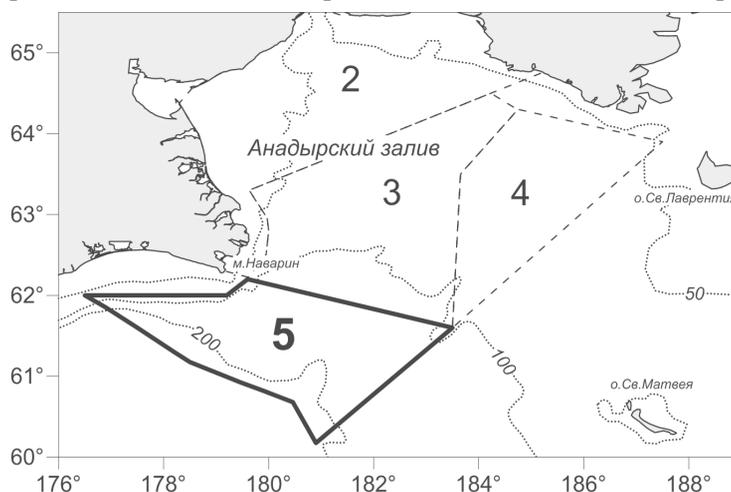


Рис. 1. Биостатистические районы северной части экономической зоны России в Беринговом море. Выделен район № 5, приблизительно соответствующий наваринскому промысловому району  
Fig. 1. Biostatistical areas in the northern part of the Russian EEZ in the Bering Sea. The area № 5 is highlighted corresponding approximately to the fishing grounds at Cape Navarin

Океанологические данные, использованные в исследовании, собраны в тех же комплексных экспедициях ТИНРО в северо-западной части Берингова моря. Аномалии температуры и солёности на глубине 50 м определены относительно средних климатических значений (Luchin et al., 2009) с учетом даты наблюдений. Аномалии температуры и солёности у дна моря определены относительно средних за 1980–2010 гг. значений, рассчитанных по данным экспедиций ТИНРО, выполненных в эти годы. Для построения временных рядов океанологические показатели на различных глубинах осредняли по выделенному району по месяцам. Кроме того, по данным каждой съемки рассчитывали площадь вод с температурой ниже 0 °C на глубине 50 м и в придонном слое в пределах экономической зоны России.

Данные по льду взяты с сервера <ftp://sidads.colorado.edu/DATASETS/NOAA/G02135/shapefiles> в виде шейп-файлов ежемесячных медианных контуров кромки морского льда для всей полярной области севернее 40° с.ш., совместимых с географическими информационными системами. Далее в программе QGIS эти файлы обрезали по контуру Берингова моря и рассчитывали месячные значения площади льда в пределах моря и «среднезимнюю» площадь льда как среднюю за январь-апрель. Под ледовитостью моря здесь понимается отношение площади льда в пределах Берингова моря к общей площади моря, принятой равной 2315 тыс. км<sup>2</sup>, выраженное в процентах.

Характер циркуляции вод в наваринском районе и его окрестностях определен для верхнего 30-метрового слоя моря с помощью онлайн реанализа OSCAR (версия 2009.f, разрешение 1/3 град.), доступного на сайте [http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/OSCAR\\_L4\\_OC\\_third-deg](http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/OSCAR_L4_OC_third-deg) для периода после 2000 г. Модель совмещает результаты расчета бароклинных и баротропных течений по данным спутниковых наблюдений приводного ветра, топографии поверхности моря и температуры на поверхности моря аналитического центра NASA PO.DAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center) (<http://dx.doi.org/10.5067/GHGMR-4FJ01>). Для оценки возможного вклада аллохтонного планктона в планктонное сообщество, обитающее в районе мыса Наварин, был применен лагранжев подход: рассчитаны траектории движения вод, формирующих океанологическую обстановку в наваринском районе в «критический» для промысла минтая период начала осени, что позволило определить направления адвекции планктона в этот район и его возможные источники.

Данные о промысле минтая в Западно-Беринговоморской зоне, основу которого обеспечивает наваринский промысловый район, заимствованы из оперативных изданий ТИНРО-центра, прежде всего путинных прогнозов «Беринговоморская минтаевая путина» за ряд последних лет (обзоры промысла подготовлены сотрудниками ТИНРО-центра М.А. Степаненко и Е.В. Грицай).

Основным методом анализа влияния океанологических условий на состав и обилие зоопланктона избран корреляционный анализ межгодовых изменений. Статистическую значимость регрессионных моделей оценивали путем статистической проверки нулевой гипотезы с помощью распределения Стьюдента. Важным элементом выполненного анализа явилась сезонная декомпозиция рядов биомассы планктона, поскольку в районе исследования очень велика сезонная изменчивость планктонного сообщества, но главным предметом исследования является не сезонная, а межгодовая изменчивость. Для сезонной декомпозиции вначале был рассчитан среднееголетний сезонный ход биомассы по видам и группам планктона, а затем среднееголетние величины были удалены из данных наблюдений, т.е. были рассчитаны ряды аномалий, которые и анализировались далее. Для зоопланктона наваринского района такая операция была проделана впервые.

Анализ всех изменений обилия зоопланктона выполнен с использованием логарифмической шкалы, учитывая мультипликативный характер всплеск его обилия. По этой причине для всех видов и групп зоопланктона медианные значения биомассы значительно ниже средних значений, что указывает на сильное отклонение от нормального распределения. Для приближения распределения к нормальному все исходные данные по зоопланктону были прологарифмированы по натуральному основанию, а с полученными логарифмами выполнены все последующие расчеты среднееголетнего сезонного хода, аномалий биомассы и параметров их изменчивости. Для наглядности среднееголетний сезонный ход определен также и без логарифмирования.

## Результаты и их обсуждение

### *Сезонные и межгодовые изменения состава и обилия зоопланктона*

По обобщенным за весь период наблюдений данным в летне-осеннем сообществе зоопланктона в районе мыса Наварин в массе представлены три таксономических группы (без учета желетелых): копеподы (основные виды *Neocalanus plumchrus*, *N. cristatus*, *Eucalanus bungii*, *Metridia pacifica*), суммарно составляющие в среднем 53 % биомассы, хетогнаты (преимущественно *Sagitta elegans*) — 24 % биомассы, эвфаузииды (в основном *Thysanoessa inermis*) — 19 % биомассы (рис. 2). При этом основной вклад в биомассу вносили 4 вида (*S. elegans*, *T. inermis*, *E. bungii*, *N. cristatus*), суммарная биомасса которых составляла в среднем около 60 % общей биомассы зоопланктона. Амплитуда изменений общей биомассы зоопланктона очень велика: по данным всех съемок она изменялась от 185 до 1976 мг/м<sup>3</sup>, т.е. на порядок. Значительная изменчивость, о которой можно судить по стандартному отклонению, характерна для всех массовых видов, а также для *Calanus glacialis* и *Thysanoessa raschii*, причем любой из видов зоопланктона мог практически полностью отсутствовать во время отдельных съемок.

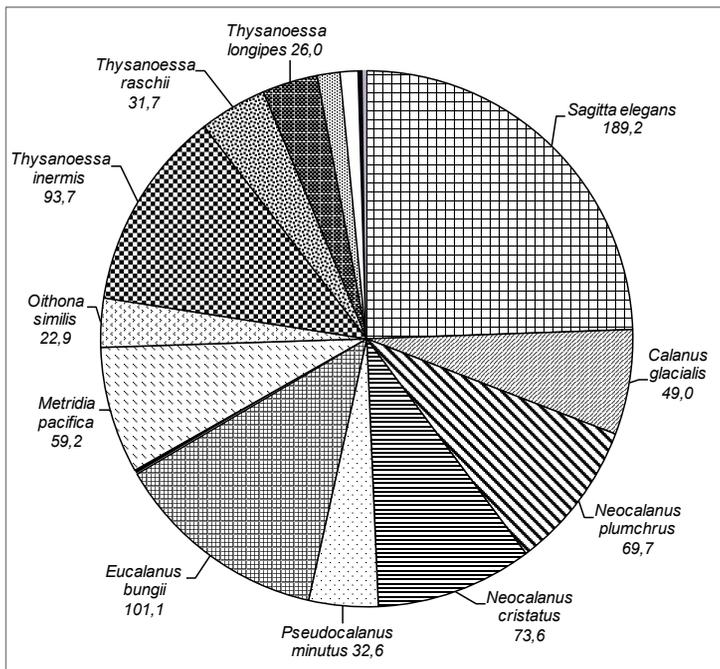


Рис. 2. Обобщенный за 1986–2014 гг. видовой состав летне-осеннего зоопланктона в биостатистическом районе № 5 Берингова моря. Указана биомасса массовых видов, мг/м<sup>3</sup>

Fig. 2. Averaged for 1986–2014 species composition of summer-fall zooplankton community in the biostatistical area № 5 in the Bering Sea. Mean biomass of mass species is shown, mg/m<sup>3</sup>

Основной вклад в изменчивость вносит сезонная динамика биомассы видов, которая обусловлена особенностями жизненных циклов, наблюдаемыми и в других районах дальневосточных морей. Так, все крупные копеподы, размножающиеся раз в год, достигают максимума биомассы в начале, середине или конце лета по мере активного роста новой генерации, после чего их обилие в облавливаемом слое моря быстро снижается вследствие ухода на глубину для размножения (рис. 3). Средне- и мелкоразмерные копеподы имеют более равномерное распределение обилия внутри года, иногда с несколькими «вспышками» (*M. pacifica*). Сагитты имеют характерные два максимума биомассы, образуемые одной генерацией (рис. 4): весной и в начале лета в массе представлена молодь этого вида, обилие которой быстро падает из-за высокой смертности, но выжившие особи быстро растут, и за счет соматического роста популяция достигает второго максимума биомассы в конце лета — осенью (особенности сезонной динамики биомассы сагитт подробно рассмотрены по данным частых наблюдений в Японском море (Зуенко и др., 2003)).

Сезонная динамика биомассы всех трех массовых видов эвфаузиид, наиболее многочисленным из которых является *T. inermis*, принципиально отличается от динамики других таксонов тем, что они в массе появляются в наваринском районе поздно, лишь осенью (рис. 4), хотя в более южных районах Берингова моря вспышка обилия эвфаузиид наблюдается уже летом. Можно предположить, что эвфаузииды, во всяком случае *T. inermis*, размножаются вне наваринского района, на значительном расстоянии от него, и наблюдаемое запаздывание их сезонной динамики обусловлено временем, необходимым для транспортировки новой генерации эвфаузиид из района воспроизводства в район мыса Наварин.

Кроме того, эвфаузииды отличаются от остальных видов зоопланктона тем, что практически отсутствуют в дневных пробах, во всяком случае данные дневных ловов не дают репрезентативного представления о сезонной динамике их обилия, поэтому в дальнейшем анализе использованы только данные ночных ловов. Известно, что в глубоководных районах эвфаузииды днем опускаются в глубинные слои моря, за пределы облавливаемого слоя, а на шельфе они концентрируются у самого дна, где могут быть

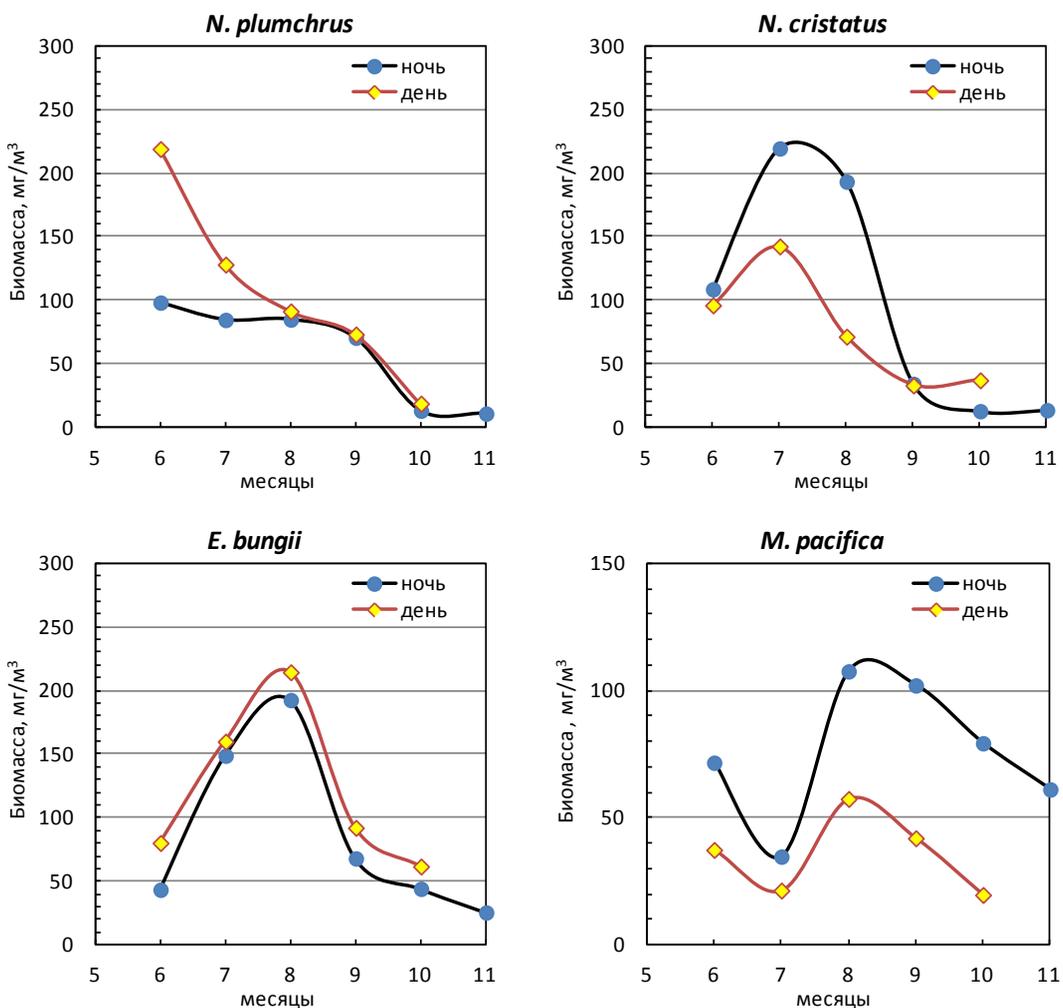


Рис. 3. Обобщённая за 1986–2014 гг. сезонная динамика биомассы массовых видов копепоид в биостатистическом районе № 5 (по средним месячным данным)

Fig. 3. Mean for 1986–2014 seasonal dynamics of biomass for mass Copepoda species in the biostatistical area № 5 in the Bering Sea

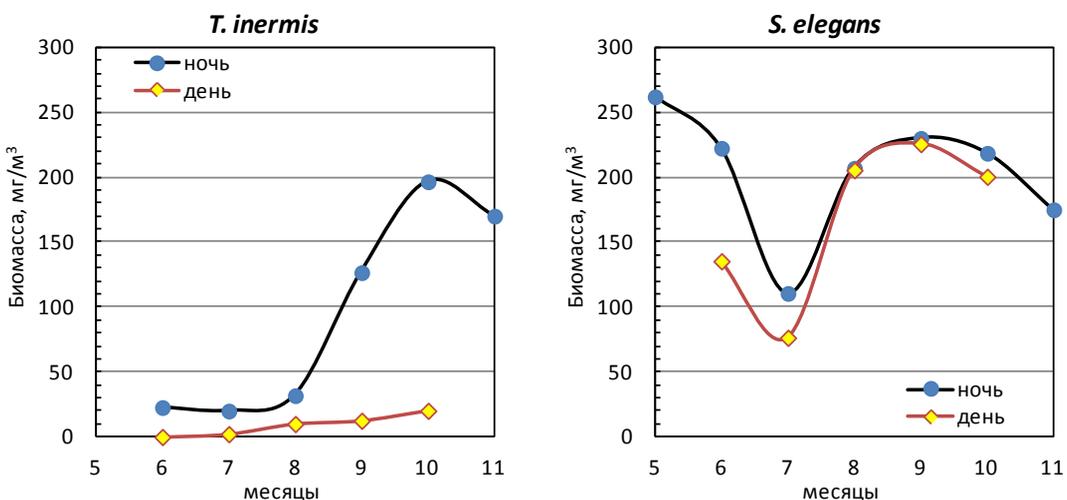


Рис. 4. Обобщённая за 1986–2014 гг. сезонная динамика биомассы эвфаузиид *T. inermis* и хетогнат *S. elegans* в биостатистическом районе № 5 (по средним месячным данным)

Fig. 4. Mean for 1986–2014 seasonal dynamics of biomass for the krill *T. inermis* and arrowworm *S. elegans* in the biostatistical area № 5 in the Bering Sea

обловлены лишь случайно (Coyle, Pinchuk, 2002). Для всех других массовых видов данные и ночных, и дневных ловов позволяют судить адекватно об изменениях их обилия, а для некоторых массовых видов (*E. bungii*, *Oithona similis*, *Pseudocalanus minutus*) изменения обилия по данным ночных и дневных ловов не различаются существенно не только качественно, но и количественно.

Межгодовая динамика обилия зоопланктона в наваринском районе, полученная после сезонной декомпозиции данных и осреднения аномалий биомассы внутри каждого года, оказалась различной для разных видов, что неудивительно (рис. 5). Неокалянусов было больше обычного в 1990–2000, в 2004–2009 гг. и с 2012 г., в эти же периоды были более обильны сагитты. В периоды снижения обилия неокалянусов в зоопланктоне возрастало значение других видов копепоид, но разных: в 1999–2007 гг. отмечались высокие биомассы *E. bungii* и *O. similis*, а в 2009–2014 гг. — *C. glacialis* и *M. pacifica*. Что же касается эвфаузиид, то на фоне значительной межгодовой изменчивости явно заметна тенденция к снижению биомассы их основного вида — *T. inermis* (рис. 6). Обилие конкурентных видов *Thysanoessa longipes* и *T. rachii*, напротив, растет, однако даже в сумме они не в состоянии заместить убыли *T. inermis*.

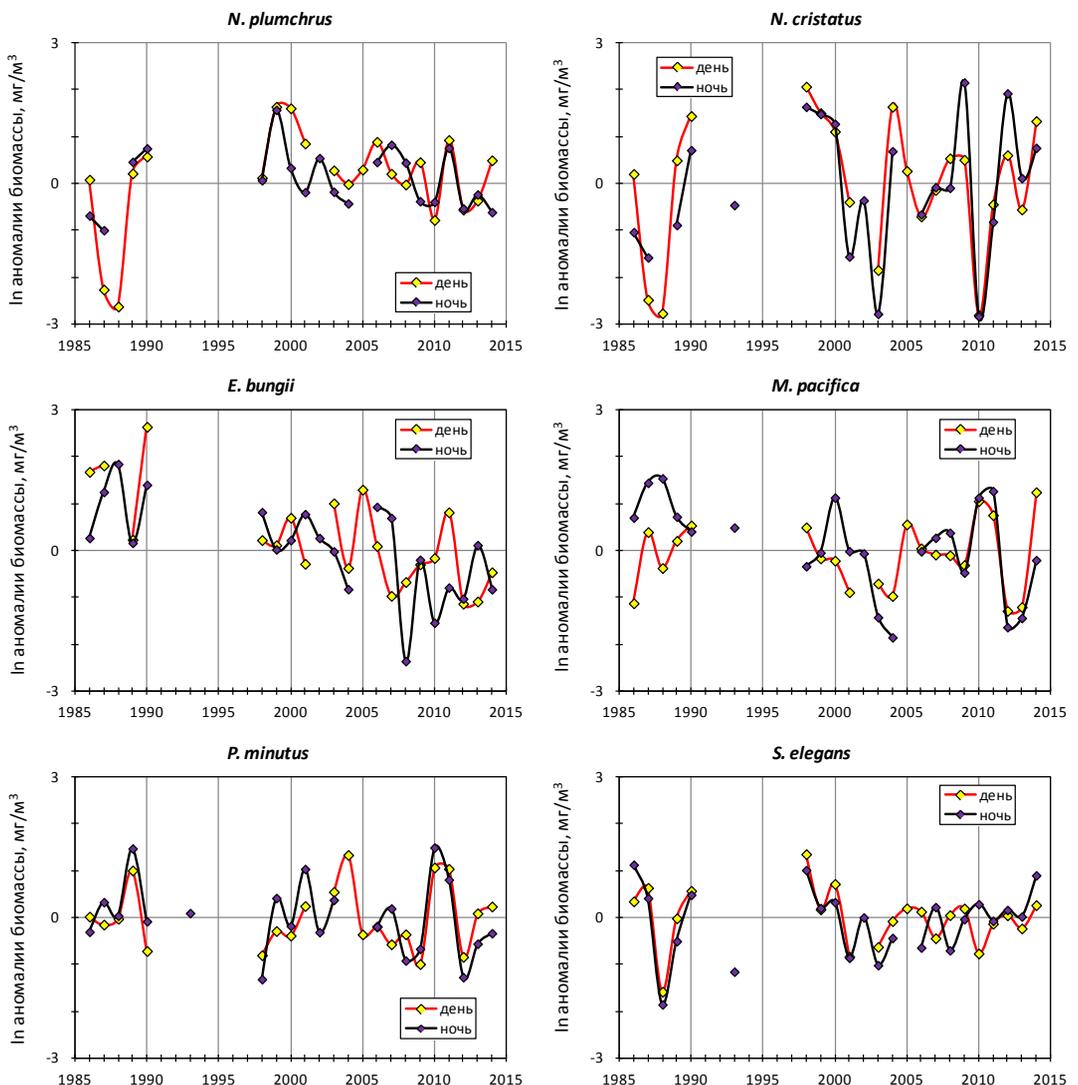


Рис. 5. Межгодовые изменения аномалий биомассы массовых видов копепоид и хетогнат в биостатистическом районе № 5 Берингова моря (логарифмическая шкала)

Fig. 5. Year-to-year changes of biomass anomalies for mass copepods and arrowworms in the biostatistical area № 5 in the Bering Sea (logarithmic scale)

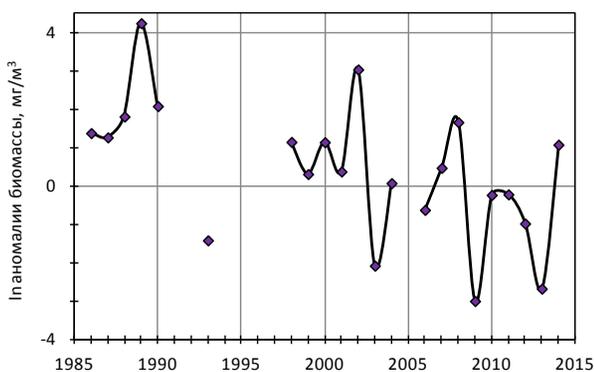


Рис. 6. Межгодовые изменения средних за лето-осень аномалий биомассы эвфаузиид *T. inermis* в биостатистическом районе № 5 Берингова моря (по данным только ночных ловов; логарифмическая шкала)

Fig. 6. Year-to-year changes of summer-fall biomass anomaly for the krill *T. inermis* in the biostatistical area № 5 in the Bering Sea (night samples only, logarithmic scale)

По сходству видового состава зоопланктона за годы непрерывных наблюдений (с 1998 г.) выделяются две группы лет: до 2008 г. в зоопланктоне доминировали *N. plumchrus* и эвфаузииды, в некоторые годы вместе с тепловодными копеподами *E. bungii*, а после 2008 г. — холодноводные копепоиды *N. cristatus* и *C. glacialis*, и лишь в самые последние годы обилие *N. plumchrus* и *E. bungii* вновь возрастает, но уже без эвфаузиид. Следовательно, во второй половине 2000-х гг. произошла качественная перестройка видового состава зоопланктона в районе у мыса Наварин. Наблюдаемые здесь изменения в планктоне в общих чертах соответствуют перестройкам в планктонном сообществе всей восточной части Берингова моря, которые обычно связываются со сменой термического режима (Волков, 2014; Eisner et al., 2015).

#### Особенности океанологических условий наваринского района и их изменчивости

Экспедицией Г.Е. Ратманова в начале 1930-х гг. (Плахотник, 1996) впервые было околонушено пятно холодных придонных вод с температурами до минус 1,7 °С, которое простиралось от Анадырского залива до о-вов Святого Матвея. Позднее выяснилось, что наличие пятна очень холодной воды у дна является постоянной особенностью северной части берингоморского шельфа, в англоязычной литературе оно получило наименование «Cold Pool» (Barnes, Thompson, 1938; Ohtani, 1973; Takenouti, Ohtani, 1974; Коучмен и др., 1979). Это подповерхностная водная масса пониженной солености с отрицательной температурой, формирующаяся на шельфе зимой в условиях конвекции при малом (из-за малых глубин) теплозапасе и сохраняющаяся в течение всего лета. Пояс наиболее холодных вод летом располагается, как правило, между изобатами 60–80 м, по вертикали минимальные температуры летом наблюдаются на глубинах 40–60 м. Ширина и протяженность области отрицательных температур на горизонтах 40–60 м больше, чем у дна, поэтому в области внешнего шельфа летом формируются придонные температурные инверсии с градиентом до 0,05 °С/м (Басюк, 2009).

Очертания холодного пятна в значительной степени формируются теплыми течениями, которые разрушают его. В районе мыса Наварин относительно теплые воды вторгаются на шельф и затем распространяются в направлении Берингова пролива, что известно как Наваринское течение (Kinder et al., 1986; Верхунов, 1995; Хен, 1999). Этот поток прорывает пояс холодных вод на шельфе и разделяет его на два «пятна», одно из которых прилегает к зал. Креста, а второе располагается на восточоберингоморском шельфе и потому обычно называется «Лаврентьевским холодным пятном» (ЛХП). Наваринский промысловый район находится на юго-западной периферии ЛХП, и океанологические условия в этом районе определяются прежде всего балансом между развитием ЛХП и интенсивностью адвекции вод из глубоководной части моря на шельф, разрушающей ЛХП. Наваринское течение имеет бароклинную компоненту, поскольку развивается на границе между ЛХП с относительно невысокой плотностью из-за пониженной солености и высокоплотной донной водной массой Анадырского залива, однако в значительной степени зависит

от ветровых условий. Выносимые Наваринским течением на шельф относительно теплые и соленые воды оконтуривают с запада ЛХП — именно в этом потоке в основном и нагуливается летом минтай.

Температура и соленость вод наваринского района хорошо коррелируют друг с другом: чем выше температура — тем выше соленость, что указывает на адвективный механизм изменений. В то же время обе эти величины хорошо коррелируют с ледовитостью, из чего становится ясной причина межгодовых изменений: в годы с суровыми зимами и высокой ледовитостью значительная часть района занята ЛХП, адвекция вод открытого моря в этот район ограничена — соответственно, летом здесь наблюдаются отрицательные аномалии температуры и солености; и наоборот, в годы с мягкими зимами и низкой ледовитостью большая часть района занята более теплыми и солеными водами, поступающими с юга, а ЛХП занимает лишь небольшой участок у его восточных границ либо вообще находится за его пределами, в американской зоне (рис. 7, 8). Следуя изменениям суровости зим, во всей толще вод наваринского района от 2000-х к 2010-м гг. наблюдалась тенденция к понижению температуры воды с резким сдвигом после 2005 г. (рис. 9).

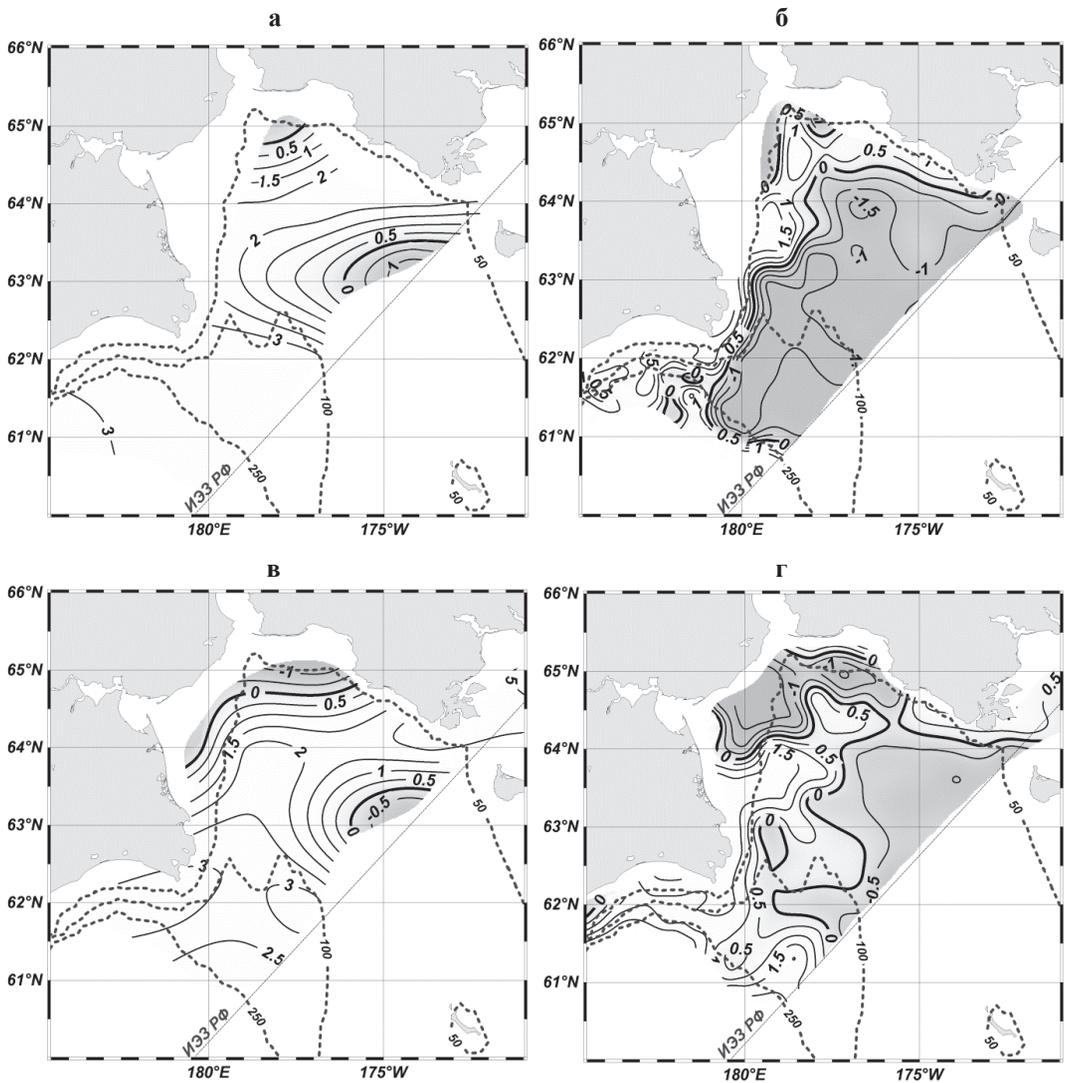


Рис. 7. Примеры распределения температуры на глубине 50 м (а, б) и у дна (в, г) в северо-западной части Берингова моря в августе после мягких (а, в — 2003 г.) и суровых (б, г — 2012 г.) зим. Затемнены области с отрицательной температурой воды

Fig. 7. Examples of the water temperature distribution at 50 m depth (а, б) and at the sea bottom (в, г) in the northwestern Bering Sea in August after warm (2003 — а, в) and severe (2012 — б, г) winters

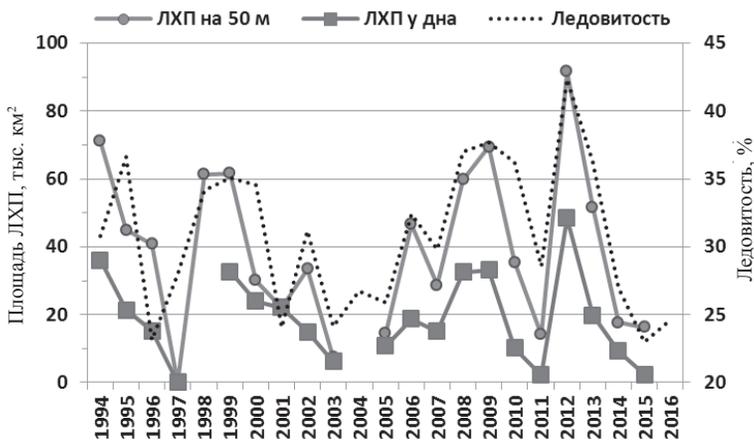


Рис. 8. Межгодовые изменения средней за январь-апрель ледовитости Берингова моря и площади вод Лаврентьевского холодного пятна с температурой менее 0 °С на глубине 50 м и у дна на наваринском шельфе в августе-сентябре

Fig. 8. Year-to-year changes of the Bering Sea ice cover averaged for January-April and the cold pool area within the Russian EEZ with water temperature below 0 °C at 50 m depth and at the sea bottom in August-September

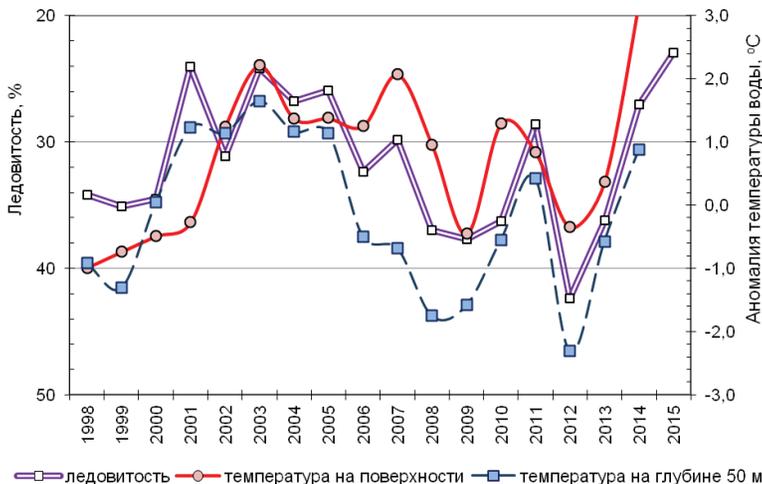


Рис. 9. Межгодовые изменения аномалий температуры на поверхности моря и на горизонте 50 м, осреднённых по биостатистическому району № 5, и средней за январь-апрель ледовитости Берингова моря (обратная шкала)

Fig. 9. Year-to-year changes of water temperature anomalies at the sea surface and at 50 m depth averaged within the biostatistical area № 5 and the Bering Sea ice cover averaged for January-April (inversed axis)

#### Анализ влияния межгодовых изменений океанологических условий на зоопланктон в наваринском районе

Несмотря на примерное совпадение сроков перестройки сообщества зоопланктона в наваринском районе со сдвигом в термическом режиме Берингова моря, линейной корреляции межгодовых изменений обилия большинства видов с факторами среды не наблюдается. Среди массовых видов исключение составляют только *N. cristatus*, более обильный в холодные, ледовитые годы, и *P. minutus*, для которого явно благоприятны относительно теплые условия в годы с малой ледовитостью (рис. 10). Обилие других массовых видов (кроме сагитт) связано с условиями среды нелинейно: корреляция меняет знак при переходе от «теплого» (1998–2006 гг.) к «холодному» (2007–2014 гг.) периоду следующим образом: в теплый период планктона больше в холодные годы, а в холодный — в теплые (рис. 11). При этом в пределах обоих периодов связи биомассы с температурой для большинства видов (кроме *E. bungii*) являются статистически значимыми, т.е. зависимость обилия видов от факторов среды все-таки существует, но

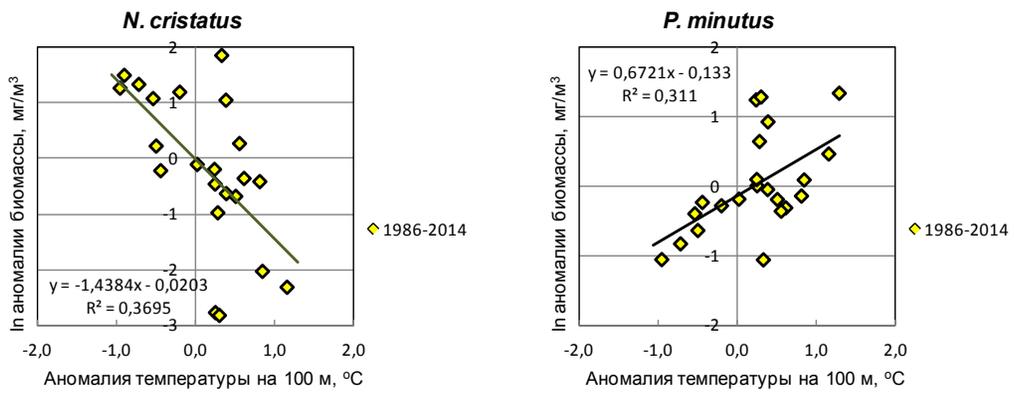


Рис. 10. Зависимость биомассы копепод *N. cristatus* и *P. minutus* в биостатистическом районе № 5 Берингова моря от температуры воды на горизонте 100 м (осреднённые по годам аномалии обоих показателей, для биомассы — логарифмическая шкала)

Fig. 10. The copepods *N. cristatus* and *P. minutus* biomass dependence on water temperature at 100 m depth (annual mean anomalies for both variables averaged within the biostatistical area № 5; logarithmic scale for the biomass)

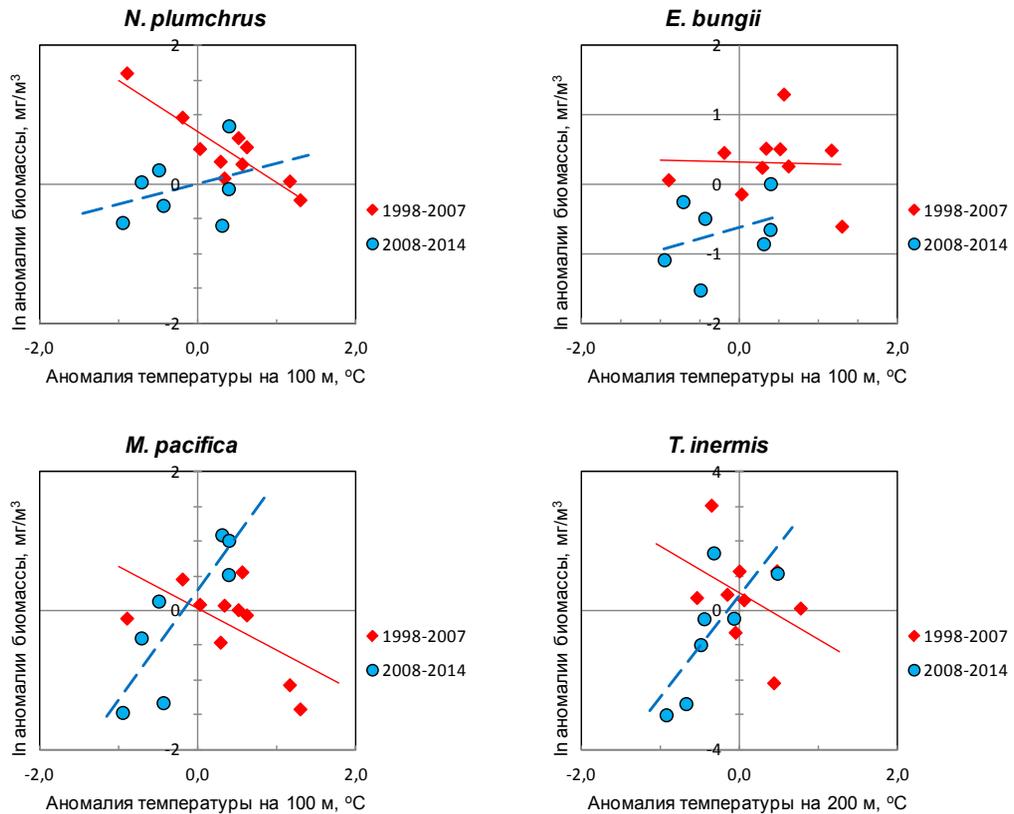


Рис. 11. Зависимость биомассы массовых видов копепод и эвфаузиид в биостатистическом районе № 5 Берингова моря от средней по району температуры, раздельно для периодов до и после 2007 г. (осреднённые по годам аномалии обоих показателей, для биомасс — логарифмическая шкала)

Fig. 11. Mass copepods and euphausiids biomass dependence on water temperature separately for the periods before and after 2007 (annual mean anomalies for all variables averaged within the biostatistical area № 5; logarithmic scale for the biomass)

для всего периода наблюдений в целом зависимость имеет вид нелинейной куполообразной функции: благоприятными являются некие средние условия, а в холодные годы «холодных» периодов и в теплые годы «теплых» периодов биомасса снижается.

Такая зависимость может быть интерпретирована с учетом транспорта зоопланктона в наваринский район извне. Континентальный склон в восточной части Берингова моря отличается высокой биопродуктивностью, из-за чего в англоязычной литературе получил название «Green Belt», т.е. «зеленый пояс» (Springer et al., 1996; Okkonen et al., 2004). Из этого высокопродуктивного района планктон может переноситься в наваринский район морским течением, известным среди океанологов как Берингоморское склоновое течение (Bering Slope Current: Kinder et al., 1975), или Центрально-Берингоморское течение (Маркина, Хен, 1990). В зависимости от режима ветра и плотностной структуры вод сила и направление этого потока, как и его продолжения — Наваринского течения, могут меняться, в результате чего в районе мыса Наварин формируются разные типы циркуляции вод (Overland et al., 1994; Фещенко, 2002). Район № 5 находится в самой нижней части склонового течения, и «в норме», когда ЛХП наблюдается на его северной периферии, в него с юга поступают теплые и соленые воды из глубоководной части моря, что обеспечивает вынос сюда эвфаузиид из района их основного воспроизводства в каньонах восточноберингоморского склона (Gibson et al., 2013) и другого зоопланктона. Однако, как показывают результаты реанализа течений, возможны и другие пути поступления вод в наваринский район — с востока и даже с запада (рис. 12, 13). Соответственно своему источнику поступающие воды различаются по температуре и солености, а также по составу переносимого ими зоопланктона. В относительно холодные годы (случай 2009 г. на рис. 12) в этот район поступают в основном холодные и малосоленые воды ЛХП с востока, небогатые планк-

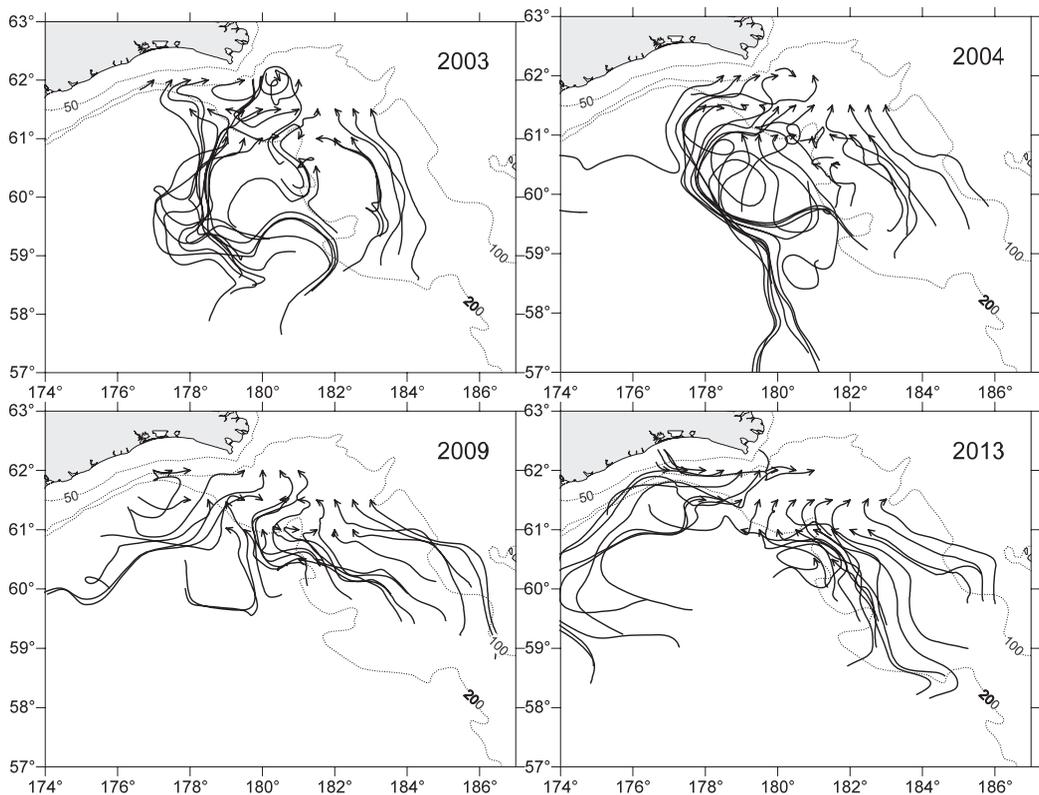
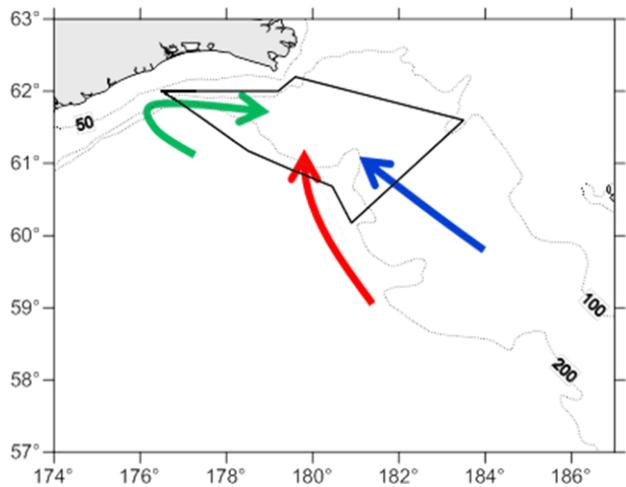


Рис. 12. Примеры траекторий поступления поверхностных вод в биостатистический район № 5 в течение 3 мес., предшествующих 1 сентября, по результатам онлайн-реанализа течений OSCAR. **Верхний ряд:** примеры адвекции с юга (из глубоководной части моря и с восточноберингоморского континентального склона), **нижний ряд:** примеры адвекции с востока и запада (с восточно- и западноберингоморского шельфов)

Fig. 12. Tracks examples of the water advection into the biostatistical area № 5 in the surface layer during 3 months before September 1, by results of OSCAR on-line reanalysis of currents. **Upper row:** examples of advection from the south (i.e. from the deep-water sea and continental slope), **lower row:** examples of advection from the east and west (i.e. from the shelf)

Рис. 13. Схема возможных путей поступления воды и планктона в пределы биостатистического района № 5 Берингова моря по данным реанализа поверхностных течений OSCAR

Fig. 13. Scheme of possible ways of water and plankton transport into the biostatistical area № 5 in the Bering Sea, by results of OSCAR on-line reanalysis of currents



тоном, а в относительно теплые годы (случаи 2003–2004 гг. на рис. 12) — более теплые и соленые воды с юга, переносящие крупных копепод и эвфаузиид, размножающихся в глубинных слоях моря. Адвекция с запада до последнего времени была нетипична для района мыса Наварин, поскольку для корякского побережья более характерен перенос на юго-запад (начало Камчатского течения), однако в последние годы под действием сильных южных ветров в летний сезон Камчатское течение неоднократно «поворачивало вспять». Судя по особенностям состава зоопланктона в эти годы, воды корякского шельфа также бедны планктоном, особенно эвфаузидами.

По результатам ежегодных расчетов, в течение 2000–2005 гг. преобладала адвекция в наваринский район вод с юга, наиболее благоприятная для транспорта в этот район крупных копепод и эвфаузиид. И действительно, в эти годы биомасса крупных видов, за исключением холодноводного *N. cristatus*, который, по-видимому, является обитателем ЛХП, была в среднем выше. Об адвекции в эти годы вод из глубоководной части моря свидетельствовала и устойчивая положительная аномалия солености (рис. 14). Для этого периода характерна обратная зависимость обилия глубоководных видов от температуры, что типично для субарктических вод, продуктивность которых обеспечивается зимним конвективным перемешиванием. Обилие *N. cristatus* тоже отрицательно связано с температурой, но по другой причине: понижение средней температуры означает расширение присутствия в районе вод ЛХП, в которых он обитает.

В последующие годы адвекция с юга уменьшилась, соленость в наваринском районе понизилась: большую часть акватории района стали занимать воды, поступившие с восточноберингоморского шельфа, а начиная с 2010 г. — и с корякского шельфа. В таких условиях средние по району показатели обилия аллохтонных видов зоопланктона зависят от степени проникновения в его пределы вод южного происхождения, что обеспечивает положительную зависимость их обилия от температуры. И наоборот, обилие холодноводного *N. cristatus* по-прежнему отрицательно связано с температурой.

Тесная зависимость солености воды в наваринском районе летом, как признака направления адвекции, от ледовитости Берингова моря (а выше показана зависимость от ледовитости и температуры воды в этом районе) указывает на то, что изменения летней циркуляции вод в этой части моря как-то связаны с изменениями суровости предшествующих зим. Из теоретических предпосылок можно предположить, что механизмом такой связи является антициклонический геострофический круговорот, образующийся вокруг ЛХП с пониженной соленостью: Склоновое и Наваринское течения по сути являются участками этого круговорота, и в зависимости от развитости ЛХП наваринский район может находиться либо внутри пятна (в таком случае адвекция в его пределы происходит с востока), либо вне пятна, в потоке Наваринского течения (в таком случае адвекция происходит с

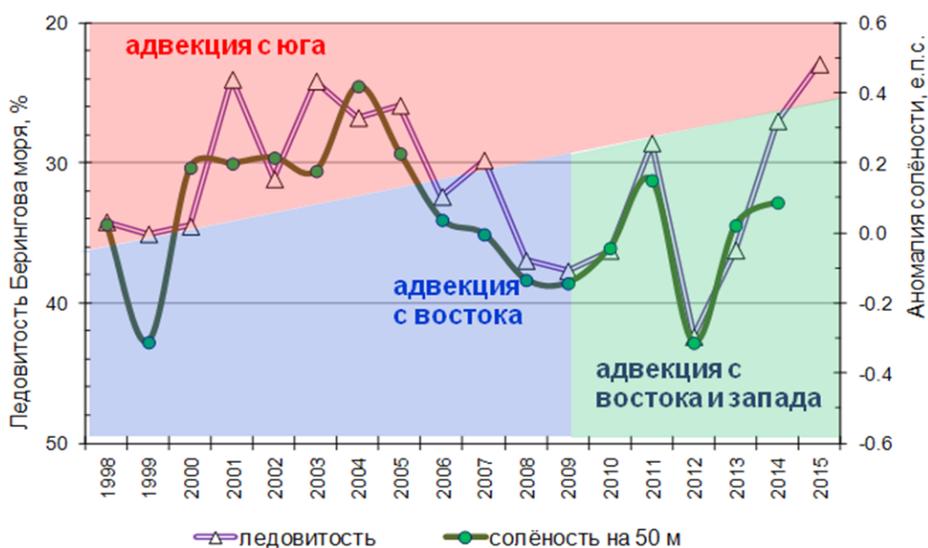


Рис. 14. Схема межгодовых изменений направления летней адвекции вод в наваринский район, показателем которого является средняя по району аномалия солёности на горизонте 50 м в летне-осенний сезон: высокие значения солёности — признак адвекции с юга. Показаны также межгодовые колебания ледовитости Берингова моря (обратная шкала) как показателя суровости зим

Fig. 14. Scheme of interannual changes of summer advection in the area at Cape Navarin in summer; the changes are indicated by dynamics of summer salinity at 50 m depth averaged within the biostatistical area № 5: high salinity is the sign of the advection from the south. The Bering Sea ice cover dynamics is shown, as well (inversed axis), as an indicator of winter severity

юга). Однако на рис. 14 видно, что простой количественной связи между ледовитостью и направлением адвекции нет: так, после относительно теплых зим 2011 и 2014 гг. (ледовитость < 30 %) адвекция с юга не возобновилась, в то время как после более холодной зимы 2000 г. (ледовитость 35 %) явно наблюдалась сильная адвекция с юга, обусловившая резкий рост солёности. Складывается впечатление, что в последнее время для восстановления Наваринского течения требуются все более и более мягкие зимы, что на рис. 14 схематически показано наклоном границы между областями диаграммы, соответствующими двум режимам циркуляции вод.

*Значение особенностей видового состава зоопланктона в наваринском районе для нагула минтая и доступности его запасов российскому промыслу*

Несмотря на весьма широкий спектр питания минтая, у этого вида есть определенные предпочтения в пище, зависящие от его размеров. Средневозрастной половозрелый минтай, массово мигрирующий летом в наваринский район для нагула, питается в основном эвфаузидами, гипериидами и крупными копеподами, т.е. спектр его питания не вполне соответствует составу планктона в этом районе (Волков, 2016). Среднепогодные сезонные изменения обеспеченности минтая планктонной пищей примерно соответствуют среднепогодному сезонному ходу общей биомассы зоопланктона, при этом высокие значения обоих показателей наблюдаются вплоть до октября (рис. 15). Но если рассмотреть сезонные изменения видового состава кормового планктона, то сразу видна его нестабильность: в летние месяцы он представлен преимущественно крупными копеподами, а в осенние — в основном эвфаузидами, поскольку численность крупных копепод резко снижается из-за особенностей их жизненных циклов. И если в среднепогодном плане такая замена ничуть не мешает успешному продолжению нагула минтая и в осенние месяцы, то в годы, когда транспорт эвфаузиид в наваринский район сокращается, это может привести к ухудшению кормовых условий нагула минтая и, естественно, вынудит его начать обратную миграцию. Такая ситуация

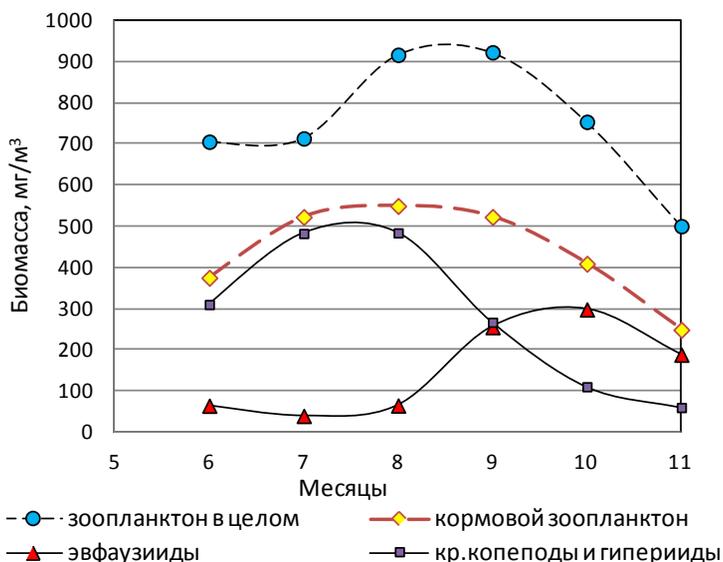


Рис. 15. Среднемноголетний сезонный ход общей биомассы зоопланктона и биомассы его некоторых групп в биостатистическом районе № 5 (по средним месячным данным)

Fig. 15. Mean seasonal changes of the total zooplankton biomass and the biomass of some its groups in the biostatistical area № 5 in the Bering Sea

была типичной для последнего десятилетия, о чем можно судить по динамике промысла: в некоторые годы уловы минтая в российских водах начинали снижаться уже в августе, в другие годы это происходило в сентябре, в итоге рентабельность работы российского флота в зоне России снижалась, и, не имея возможности преследовать минтай в американских водах, добытчики покидали промрайон раньше, чем это было в прошлые годы, а снижение промысловых усилий еще более ухудшало показатель годового вылова минтая.

Важно отметить, что миграции минтая и, соответственно, ход промысла в конкретных обстоятельствах наваринского района, ограниченного границей экономзоны, определяются не крупномасштабными факторами, как состояние запасов минтая или ресурсы зоопланктона в Беринговом море, а ситуацией конкретно в этом районе в конкретный критический момент времени, а именно: продолжительность берингово-морской минтаевой путины определяется возможностью транспорта эвфаузиид в наваринский район в осенние месяцы. Как ни удивительно, несмотря на множество иных факторов, воздействующих на оба показателя, между ними существует статистически значимая связь (рис. 16), причем для этого вида промысла именно продолжительность путины является главным фактором, определяющим годовой вылов.

### Заключение

В результате выполненного исследования выявлены статистические связи между разными компонентами системы «среда–планктон–рыба–промысел», что позволило разобраться в сложных механизмах ее функционирования. Полученные закономерности представлены в виде концептуальной модели, которая при необходимости может быть преобразована в математическую модель (рис. 17).

Океанологические условия в наваринском районе Берингова моря летом и осенью определяются особенностями циркуляции вод: температура и соленость во всех слоях моря зависят от направления адвекции вод в этот район, которое меняется год от года в соответствии с размерами и положением Лаврентьевского холодного пятна донных шельфовых вод, связанными с суровостью предшествующей зимы. После мягких зим в районе мыса Наварин формируется заток на шельф относительно теплых и соленых вод из глубоководной части моря, известный как Наваринское течение.

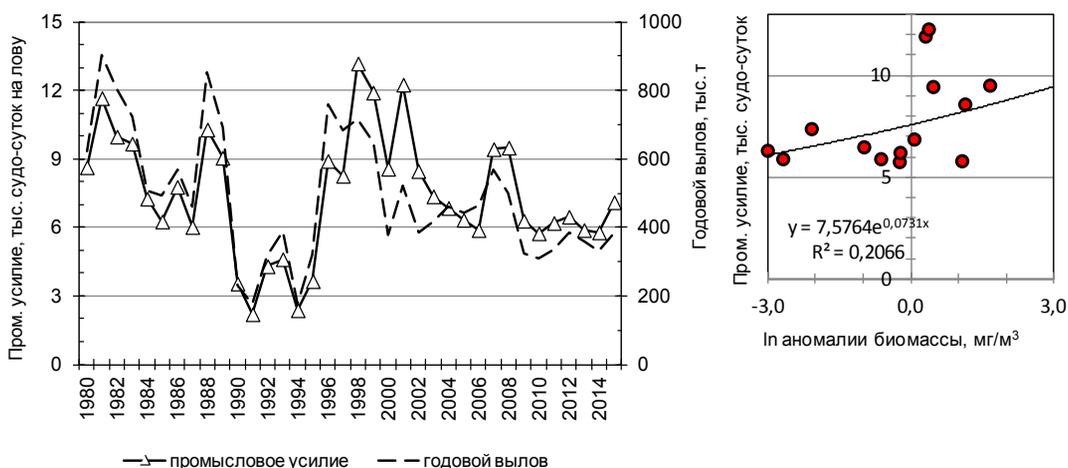


Рис. 16. Межгодовая динамика количества судо-суток работы крупнотоннажного флота на промысле минтая в Западно-Беринговоморской зоне и годового вылова минтая в этой зоне. На врезке: статистическая зависимость количества судо-суток на лову от средней биомассы эвфаузиид *T. inermis* в биостатистическом районе № 5 для периода с 1999 г. (логарифмическая шкала для биомассы)

Fig. 16. Year-to-year dynamics of fishing effort ( $10^3$  vessel-days with trawling) for the Russian pollock fishery in the Western Bering Sea fishery district and annual landings of walleye pollock in this district. Insert: Statistical relationship between the fishing effort and mean biomass of the krill *T. inermis* in the biostatistical area № 5 for the period since 1999 (logarithmic scale for the biomass)

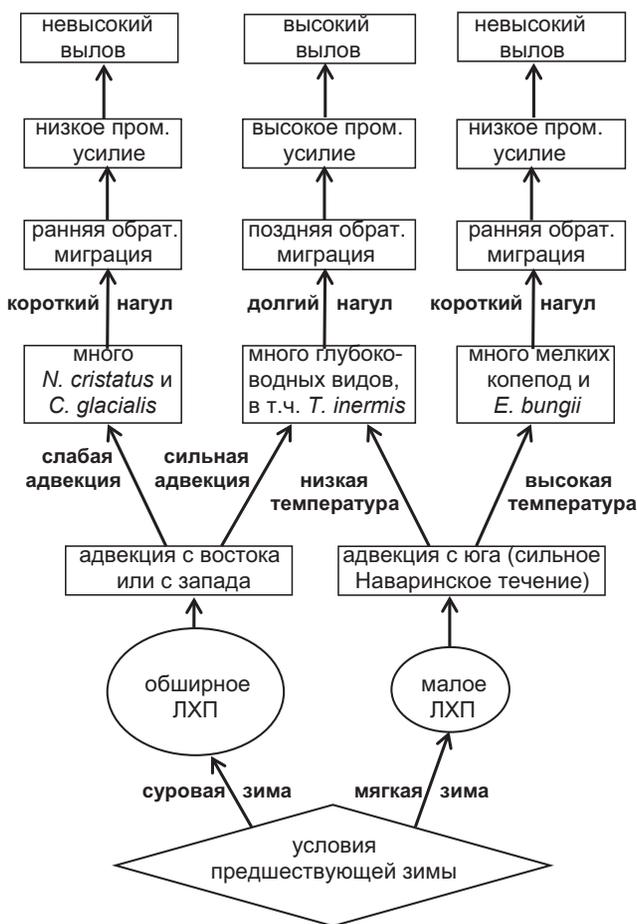


Рис. 17. Схема развития обстановки на промысле минтая в наваринском районе  
Fig. 17. Scheme of the pollock fishery conditions development in the Navarin area of the Bering Sea

Высокие биомассы зоопланктона в наваринском районе могут формироваться как после теплых, так и после холодных зим; для большинства массовых видов зоопланктона характерна куполообразная зависимость обилия от температуры: их биомасса высока в относительно холодные годы внутри «теплых» периодов и в относительно теплые годы внутри «холодных» периодов.

Продолжительность нагула минтая в наваринском районе в пределах зоны, доступной российскому промысловому флоту, и, соответственно, продолжительность минтаевого промысла определяются транспортом эвфаузиид *T. inermis* морским течением из районов их основного воспроизводства у восточноберингоморского континентального склона в наваринский район. Высокий годовой вылов минтая достигается только в годы с продолжительным нагулом, необходимым условием которого является вынос течением эвфаузиид в наваринский район в осенние месяцы, вне зависимости от состояния запасов минтая и общего состояния кормовой базы минтая в Беринговом море.

*Исследование, результаты которого изложены в статье, выполнено на основе данных о зоопланктоне, собранных, систематизированных и предоставленных для анализа ведущим научным сотрудником ТИНРО-центра д-ром биол. наук А.Ф. Волковым, за что авторы выражают ему благодарность. Мы благодарны также ведущему научному сотруднику ТИНРО-центра канд. биол. наук М.А. Степаненко за полезные консультации по вопросам промысла минтая в Беринговом море и критический анализ полученных нами результатов.*

### Список литературы

- Басюк Е.О.** Динамика вод и особенности сезонной и межгодовой трансформации низкотемпературных вод северо-западной части Берингова моря // Вопр. промысл. океанол. — 2009. — Вып. 6, № 1. — С. 222–238.
- Верхунов А.В.** Роль гидролого-гидрохимических процессов на шельфе Берингова моря в формировании биопродуктивности // Комплексные исследования экосистемы Берингова моря. — М.: ВНИРО, 1995. — С. 52–79.
- Волков А.Ф.** Состояние кормовой базы тихоокеанских лососей в Беринговом море в 2003–2012 гг. (по результатам работ международных экспедиций BASIS-1 и 2) // Изв. ТИНРО. — 2014. — Т. 179. — С. 250–271.
- Волков А.Ф.** Таблицы и графики по трофологии минтая западной части Берингова моря // Изв. ТИНРО. — 2016. — Т. 185. — С. 175–184.
- Зуенко Ю.И., Надточий В.В., Селина М.С.** Гидрологические процессы и сукцессия планктона в прибрежной зоне Японского моря в летний период // Изв. ТИНРО. — 2003. — Т. 135. — С. 144–177.
- Коучмен Л.К., Огорд К., Трипп Р.Б.** Берингов пролив: моногр. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 199 с.
- Маркина Н.П., Хен Г.В.** Основные элементы функционирования пелагических сообществ Берингова моря // Изв. ТИНРО. — 1990. — Т. 111. — С. 79–93.
- Плахотник А.Ф.** История изучения морей российскими учеными до середины XX века: моногр. — М.: Наука, 1996. — 161 с.
- Степаненко М.А., Грицай Е.В.** Состояние ресурсов, пространственная дифференциация и воспроизводство минтая в северной и восточной частях Берингова моря // Изв. ТИНРО. — 2016. — Т. 185. — С. 16–30.
- Степаненко М.А., Грицай Е.В.** Состояние ресурсов, условия обитания и промысел минтая в восточной и северо-западной частях Берингова моря в начале 2010-х годов // Вопр. рыб-ва. — 2013. — Т. 14, № 2(54). — С. 219–241.
- Фещенко О.Б.** О миграционной активности трески восточноберингоморской популяции // Изв. ТИНРО. — 2002. — Т. 130. — С. 921–928.
- Хен Г.В.** Пространственно-временная характеристика вод Анадырского залива и прилегающей области шельфа в летне-осенний период // Изв. ТИНРО. — 1999. — Т. 126. — С. 587–602.
- Barnes C.A., Thompson T.G.** Physical and chemical investigations in the Bering Sea and portions of the North Pacific Ocean // Univ. Wash. Publ. Oceanogr. — 1938. — Vol. 3, № 2. — P. 35–79.
- Coyle K.O., Pinchuk A.I.** Climate-related differences in zooplankton density and growth on the inner shelf of the southeastern Bering Sea // Progr. Oceanogr. — 2002. — Vol. 55. — P. 177–194.

**Eisner L.B., Siddon E.C., Strasburger W.W.** Spatial and temporal changes in assemblage structure of zooplankton and pelagic fish in the eastern Bering Sea across varying climate conditions // Изв. ТИНРО. — 2015. — Т. 181. — P. 141–160.

**Gibson G.A., Coyle K.O., Hedstrom K., Curchitser E.N.** A modeling study to explore on-shelf transport of oceanic zooplankton in the Eastern Bering Sea // J. Mar. Syst. — 2013. — Vol. 121. — P. 47–64.

**Kinder T.H., Chapman D.C., Whitehead J.A.** Westward intensification of the mean circulation on the Bering Sea Shelf // J. Phys. Oceanogr. — 1986. — Vol. 16. — P. 1217–1229.

**Kinder T.H., Coachman L.K., Galt J.A.** The Bering Slope current system // J. Phys. Oceanogr. — 1975. — Vol. 5. — P. 231–244.

**Luchin V., Kruts A., Sokolov O. et al.** Climatic Atlas of the North Pacific Seas 2009: Bering Sea, Sea of Okhotsk, and Sea of Japan / V. Akulichev, Yu. Volkov, V. Sapozhnikov, S. Levitus (eds) : NOAA Atlas NESDIS 67. — Wash. D.C. : U.S. Gov. Printing Office, 2009. — 329 p. (DVD).

**Ohtani K.** Oceanographic structure in the Bering Sea // Mem. Fac. Fish. Hokkaido Univ. — 1973. — № 21. — P. 65–106.

**Okkonen S.R., Schmidt G.M., Cokelet E.D., Stabeno P.J.** Satellite and hydrographic observations of the Bering Sea ‘GreenBelt’ // Deep-Sea Res. II. — 2004. — Vol. 51, Iss. 10–11. — P. 1033–1051.

**Overland J.E., Spillane M.C., Hurlburt H.E., Wallcraft A.J.** A numerical study of the circulation of the Bering Sea Basin and exchange with North Pacific Ocean // J. Phys. Oceanogr. — 1994. — Vol. 24, Iss. 4. — P. 736–758.

**Springer A.M., McRoy C.P., Flint M.V.** The Bering Sea Green Belt: shelf-edge processes and ecosystem production // Fish. Oceanogr. — 1996. — Vol. 5, Iss. 3–4. — P. 205–223.

**Takenouti A.Y., Ohtani K.** Currents and water masses in the Bering Sea: a review of Japanese works // Oceanography of the Bering Sea with emphasis on renewable resources. — Fairbanks, 1974. — P. 39–57.

*Поступила в редакцию 9.02.17 г.*

*Принята в печать 7.04.17 г.*