

УДК [574.583:551.465](265.54)

В.В. Надточий, Ю.И. Зуенко*

Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр,
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4**МЕХАНИЗМЫ ТРАНСПОРТА СУБТРОПИЧЕСКОГО
ПЛАНКТОНА В ПРИБРЕЖНЫЕ ВОДЫ ЮЖНОГО ПРИМОРЬЯ
НА ПРИМЕРЕ *PARACALANUS PARVUS***

Обобщены результаты многолетних исследований зоопланктона в Амурском заливе Японского моря. Отмечены две сезонных «волны» поступления в залив видов, не обитающих в нём постоянно, — в начале лета и в конце лета, причём вторая «волна» формируется субтропическими видами, по-видимому, приносимыми из южной части Японского моря. Наиболее массовый из них — *Paracalanus parvus*, который в ранне-осенний сезон может занимать доминирующее положение в прибрежном сообществе зоопланктона. С помощью эмпирической адвективной модели кросс-шельфового транспорта планктона в потоках сгонно-нагонной циркуляции вод исследовано влияние ветрового режима на обилие этого вида в Амурском заливе и установлено, что сильный летний муссон способствует формированию высокой численности вида в заливе, но в таких условиях его перенос к берегу осуществляется в компенсационном придонном потоке, развивающемся только после смены муссона, при сгонных ветрах, поэтому максимум численности наблюдается осенью, в сентябре-октябре. В годы со слабым летним муссоном значительные концентрации *P. parvus* в заливе формируются уже в августе благодаря переносу поверхностным течением, но после смены муссона его численность убывает, и максимумы численности в такие годы невысоки. Характер кросс-шельфового транспорта этого вида предположительно обусловлен глубиной расположения его концентраций. Происходившее в последние годы усиление летнего муссона способствовало росту обилия *P. parvus* осенью в прибрежной зоне, однако климатический тренд направлен на ослабление муссона, поэтому в ближайшей перспективе ожидается уменьшение его обилия у берегов южного Приморья.

Ключевые слова: зоопланктон, *Paracalanus parvus*, кросс-шельфовая циркуляция вод, летний муссон, дрейфовое течение, Амурский залив, климатические изменения.

Nadtochy V.V., Zuenko Yu.I. Mechanisms of subtropical plankton transport into the coastal waters of southern Primorye, a case of *Paracalanus parvus* // *Izv. TINRO.* — 2016. — Vol. 184. — P. 241–252.

Results of long-term studies of zooplankton species in the Amur Bay (Japan Sea) are analyzed. Two seasonal «waves» of the allochthonous species are defined: the first in the early summer that is formed mainly by inter-zonal copepods spawning in the deep layers (*Metridia pacifica*, *Neocalanus plumchrus*, *Calanus glacialis*) and the second in the late summer that is represented by warm-water copepods of subtropical origin (*Calanus pacificus* and *Paracalanus parvus*) obviously transported from the southern Japan Sea by currents. The latter species is

* Надточий Виктория Васильевна, научный сотрудник, e-mail: korvic@gmail.com; Зуенко Юрий Иванович, доктор географических наук, заведующий лабораторией, e-mail: zuenko_yury@hotmail.com.

Nadtochy Victoria V., researcher, e-mail: korvic@gmail.com; Zuenko Yury I., D.Sc., head of laboratory, e-mail: zuenko_yury@hotmail.com.

able to dominate in the zooplankton community of coastal waters in the early-autumn season. Variations of this mass species abundance in the Amur Bay under changes of wind-driven upwelling/downwelling circulation are investigated using an empirical advective model of its cross-shelf transport. There is found that strong summer southern on-shore winds (summer monsoon) are favourable for its high abundance but in these conditions it is transported toward the coast by the deep compensatory flow developed only after the summer monsoon change to the winter monsoon with opposite direction; that's why the high abundance is observed in autumn, in September-October. In the years with weak summer monsoon the species is transported to the bay in mass by the surface on-shore wind-driven flow earlier, in August, but its number decreases after the monsoon change, so the maximum of abundance is not high. Patterns of the transport by cross-shelf currents depend supposedly on the depth of plankton concentration. Recent strengthening of summer monsoon causes heightening of *P. parvus* abundance in the coastal waters at southern Primorye, up to extreme high values in 2013, but climatic trend of the summer monsoon intensity is negative, so decreasing of this species transport toward Primorye coast and its abundance in the coastal waters, as the Amur Bay, can be expected in the nearest future.

Key words: zooplankton, *Paracalanus parvus*, cross-shelf water circulation, summer monsoon, wind-driven current, Amur Bay, climate change.

Введение

В водах Приморья состав и обилие зоопланктона подвержены значительным сезонным изменениям, которые не могут быть объяснены только особенностями жизненных циклов видов. Более того, здесь, в прибрежных водах зал. Петра Великого, присутствуют виды, которые в принципе не могут проводить в этом районе весь жизненный цикл по причине либо суровости зимних условий, либо недостаточной глубины. При этом видовой состав зоопланктона значительно меняется год от года, настолько сильно, что это даже затрудняет биогеографическое районирование Японского моря. Так, К.А. Бродский (1981) в своей статье о зоопланктоне зал. Посыета отмечал, что в 1937 г. он работал в тропических водах, а экспедиция Зоологического института АН СССР в 1954, 1962, 1965, 1966 гг. — в водах умеренных широт, и все это в одном и том же районе Японского моря.

Планктон не может подобно nektonу самостоятельно мигрировать на большие расстояния, хотя способен к вертикальным миграциям, приспосабливаясь таким образом к сезонным изменениям среды обитания. Поэтому значительные изменения видового состава зоопланктона прибрежных вод Приморья (субарктических по своему режиму) и сам факт обнаружения в них глубоководных или тепловодных видов могут быть объяснены только пассивным транспортом планктона в потоках морских течений. В зал. Петра Великого нет постоянных течений, более того, воды залива и в поверхностном, и в подповерхностном слоях представлены особыми водными массами, отличными по своим характеристикам от вод открытого моря, от которых отделены гидрологическим фронтом (Зуенко, Юрасов, 1995). Тем не менее кросс-фронтальный и кросс-шельфовый обмен между глубоководной и прибрежной зонами существует. Он обеспечивается сгонно-нагонной циркуляцией, которая генерируется на шельфе Приморья во время зимнего и летнего муссонов (рис. 1).

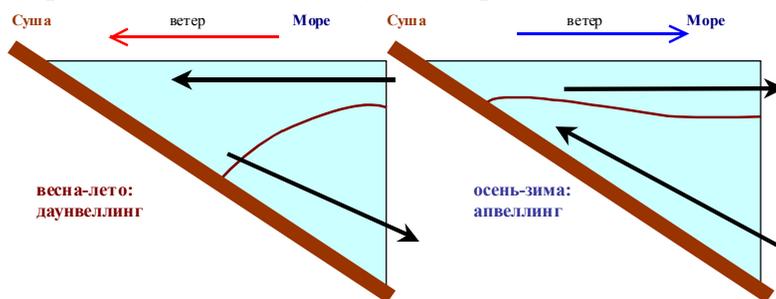


Рис. 1. Схема кросс-шельфовой сгонно-нагонной циркуляции в зал. Петра Великого
Fig. 1. Scheme of cross-shelf wind-driven circulation in Peter the Great Bay

Непосредственно наблюдать транспорт планктона течениями на современном уровне развития планктонологических методов невозможно, однако предпринимались попытки проследить за его перемещениями путём частых наблюдений и моделирования (Зуенко и др., 2004; Зуенко, Надточий, 2004; Zuenko, 2007), в результате чего установлено, что горизонтальный транспорт имеет определяющее значение для обилия в прибрежной зоне таких видов, как *Paracalanus parvus*, *Calanus pacificus*, *Metridia pacifica*, *Neocalanus plumchrus*, *Calanus glacialis*, *Sagitta* sp., большая часть которых поступает в прибрежную зону с началом летнего муссона, в апреле-мае. Отмечена зависимость обилия заносимых извне (глубоководных и тепловодных) видов в прибрежных водах от интенсивности летнего муссона: чем сильнее муссон — тем их больше (Zuenko et al., 2010), — это связано с тем, что на шельфе южного Приморья летний муссон генерирует нагонную кросс-шельфовую циркуляцию вод и в поверхностном нагонном потоке планктон переносится из открытого моря к берегу. Такой перенос характерен не только для мезо-, но и для макропланктона, в результате чего летом в некоторых бухтах южного Приморья скапливается большое количество субтропических медуз, принесённых туда из южных районов Японского моря и даже из Восточно-Китайского моря.

Помимо первой, весенней, «волны» поступления зоопланктона в прибрежную зону, представленной в основном холодноводными интерзональными копеподами (*M. pacifica*, *N. plumchrus*, *C. glacialis*), размножающимися на глубине, для зал. Петра Великого известна и вторая «волна», представленная субтропическими копеподами *P. parvus* и *C. pacificus*, особенно первым видом. *P. parvus* не имеет латентных яиц (Сажина, 1987) и не может зимовать в условиях северо-западной части Японского моря, поэтому отсутствует в прибрежной зоне зал. Петра Великого зимой, весной и на протяжении большей части летнего сезона. Но к концу лета он, вопреки своему названию (лат. *parvus* означает «слабый», рис. 2), преодолевает сотни километров благодаря адвекции вод из теплого сектора моря к берегам Приморья. Он появляется в таком массовом количестве, что становится субдоминантным по численности видом зоопланктона, из-за этого видовая структура местного зоопланктона меняется настолько, что в его сезонной сукцессии период с конца августа по начало октября выделяется в особый сезон (Надточий, Зуенко, 2001). Раннеосенняя «волна» транспорта зоопланктона извне важна для поддержания кормовой ценности прибрежной зоны для нагула рыб в этот сезон, когда численность местных видов снижается. Однако мощность этой «волны» непостоянна от года к году, вплоть до полного исчезновения субтропических видов в 1960-е гг., отмеченного К.А. Бродским (1981). Такие межгодовые изменения могут быть связаны с изменениями ветрового режима в результате перестроек барических полей над северной Пацификой. Однако пока неизвестно, как именно эти перестройки, в том числе происходящие в результате климатических изменений, влияют на транспорт субтропических видов планктона, непонятно даже, каким именно муссоном, летним или зимним, обусловлен этот транспорт, поскольку их массовый вынос в прибрежные воды Приморья происходит во время смены муссона, и максимальная численность субтропических видов, несмотря на их теплолюбивость, наблюдается в осенние месяцы, в условиях быстрого выхолаживания прибрежных вод.

Рис. 2. *Paracalanus parvus*
Fig. 2. *Paracalanus parvus*



Данное исследование межгодовых изменений адвекции в Амурский залив наиболее массового субтропического вида — *P. parvus* — выполнено с целью определить механизм осеннего выноса субтропических видов зоопланктона в прибрежную зону южного Приморья.

Материалы и методы

В работе использованы материалы океанологических и планктологических съемок, выполненных в южной части Амурского залива в июле-октябре 1999 и 2007–2014 гг., как правило с месячной дискретностью (типичная схема станций представлена на рис. 3). Сбор планктона осуществлялся сетью Джели (площадь входного отверстия 0,1 м², фильтрующий конус из капронового сита с ячейей размером 0,168 мм) от дна до поверхности моря (максимальная глубина Амурского залива — 53 м). Всего за 9 лет собрано и обработано 489 проб зоопланктона. Температуру и солёность измеряли зондами-профилометрами Sea-Bird SBE-19plus, Sea-Bird SBE-25, AST-1000, Hydrolab 4a, YSI-6600 и CTD Rinko, также от поверхности до дна на всех станциях. Условную плотность воды рассчитывали по температуре, солёности и давлению.

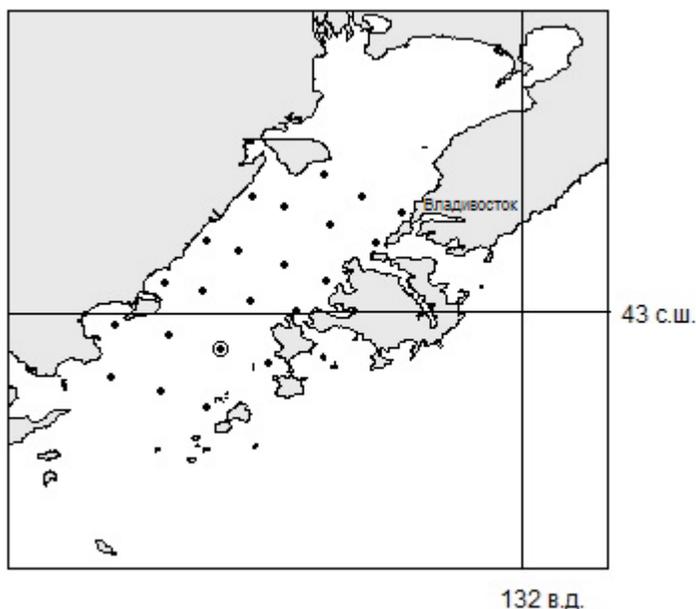


Рис. 3. Типичная схема отбора проб зоопланктона в южной части Амурского залива в 2007–2014 гг. Выделена станция, на которой пробы отбирались и в 1999 г.

Fig. 3. Typical scheme of sampling in the southern Amur Bay in 2007–2014. The station of zooplankton sampling in 1999 is marked

Обработку проб зоопланктона проводили по стандартным методикам, принятым в ТИПРО-центре (Инструкция ..., 1982; Рекомендации ..., 1984). Учитывая, что сеть Джели обладает селективностью, при расчетах показателей численности видов применяли эмпирические поправочные коэффициенты уловистости (Волков, 1996). Полученные в результате обработки постанционные данные о численности видов зоопланктона осредняли по всей акватории южной части Амурского залива для каждой съемки.

Поскольку основной причиной кросс-шельфовой циркуляции вод являются ветровые сгоны и нагоны, показатели её направленности и интенсивности рассчитаны по данным о приземном ветре на ГМС Владивосток. Дрейфовое течение на поверхности моря пропорционально скорости ветра и отклоняется вправо от его направления. В условиях зал. Петра Великого преобладающие летом муссонные ветры юго-восточной четверти вызывают нагон с поверхностным потоком, направленным к берегу, и компенсационным подповерхностным потоком в обратном направлении, а ветры северо-западной четверти, преобладающие осенью и зимой, — сгон и кросс-шельфовую циркуляцию противоположных направлений. Эта особенность местного режима вод позволяет использовать скорость ветра, с учётом его направления, в качестве показателя интенсивности поверхностного потока. В данном исследовании использованы ежедневные данные о скорости ветра на 0 час Гринвичского времени, т.е. до начала дневного бриза, южные направления считаются положительными, а северные — отрицательными.

Толщина верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) в прибрежной зоне, подверженной ветровым сгонам и нагонам, может служить индикатором этого процесса: она возрастает при нагонах и уменьшается при сгонах. Этот показатель определяли на каждой станции наблюдений (исключая мелководные) по вертикальному профилю условной плотности, считая нижней границей ВКС горизонт с вертикальным градиентом плотности $d\sigma_t/dz > 0,02$, но пренебрегая высокими приповерхностными градиентами плотности, обусловленными распреснением поверхности моря материковым стоком и осадками, и затем осредняли помесячно.

Для количественной характеристики состояния летней атмосферной циркуляции над северо-западной Пацификой использован Северотихоокеанский индекс (North Pacific Index, NPI), определяемый как среднее атмосферное давление на уровне моря в области $30-65^\circ$ с.ш. 160° в.д. — 140° з.д., ежемесячные данные о котором доступны на сайте NOAA (<http://www.beringclimate.noaa.gov/data/index.php>).

Год от года и интенсивность кросс-шельфовой циркуляции, и обеспечиваемый ею транспорт, и сроки смены её направления меняются в зависимости от силы и направления ветра, которые определяются особенностями распределения приземного атмосферного давления, прежде всего развитием центра высокого давления над северной частью Тихого океана. Для анализа механизмов транспорта *P. parvus* в Амурский залив этот процесс смоделирован адвективной балансовой моделью, в основе которой лежит представление, что этот вид не способен зимовать и размножаться в водах залива, а приносится сюда из-за его пределов потоками кросс-шельфовой циркуляции вод. Модель позволяет установить, в каком именно потоке осуществляется транспорт планктона и как его интенсивность зависит от параметров ветра. При этом использовано известное в океанологии эмпирическое соотношение скорости поверхностного дрейфового течения и скорости ветра (Шулейкин, 1968)

$$U = \frac{k}{\sqrt{\sin \varphi}} \cdot W, \quad (1)$$

где W — скорость ветра, φ — широта, k — эмпирический коэффициент. Поскольку ветровой сгон/нагон поверхностных вод компенсируется подповерхностным компенсационным потоком, можно предположить, что изменения скорости подповерхностного потока пропорциональны изменениям скорости поверхностного потока, т.е. также скорости ветра. В таком случае изменения концентрации вида, транспортируемого течением в прибрежную зону в процессе нагона, связаны с ветром зависимостью

$$\frac{dC_{\text{нриб}}}{dt} = C_{\text{злуб}} \cdot sW_S - C_{\text{нриб}} \cdot bW_S, \quad (2)$$

а в процессе сгона — зависимостью

$$\frac{dC_{\text{нриб}}}{dt} = C_{\text{злуб}} \cdot bW_N - C_{\text{нриб}} \cdot sW_N, \quad (3)$$

где $C_{\text{нриб}}$ и $C_{\text{злуб}}$ — концентрация вида в прибрежной зоне и за пределами залива; t — время; W_S , W_N — скорость ветра южных и северных румбов, м/с, a и b — эмпирические коэффициенты эффективности транспорта планктона в поверхностном и придонном слоях, зависящие от широты и других параметров циркуляции вод, но прежде всего — от степени захвата скоплений планктона поверхностным или придонным потоками, что определяется вертикальным распределением вида. Наблюдаемая в момент времени t численность вида в прибрежной зоне равна интегралу уравнений (2) и (3) за время, прошедшее с момента начала его поступления t_0 , с учётом реальной продолжительности нагонной и сгонной циркуляции:

$$C_{\text{нриб}} = \int_{t_0}^t (C_{\text{злуб}} \cdot sW_S - C_{\text{нриб}} \cdot bW_S + C_{\text{злуб}} \cdot bW_N - C_{\text{нриб}} \cdot sW_N) \cdot dt. \quad (4)$$

Уравнение (4) имеет три неизвестных — $C_{\text{злуб}}$, s и b , которые могут быть найдены путём решения систем таких уравнений для трёх и более сроков наблюдений, считая

все неизвестные постоянными в течение этих сроков (т.е. пренебрегая естественной динамикой численности вида, что вполне допустимо для сезона исследований, учитывая, что вид в районе исследования не воспроизводится, а его численность, как правило, возрастает с июля по октябрь, это означает, что адвекция превалирует над смертностью). Учитывая возможную межгодовую изменчивость $C_{глуб}$ и коэффициентов, такие системы были составлены отдельно для каждого года наблюдений.

Результаты и их обсуждение

На фоне климатической тенденции к понижению давления в северной Пацифике, обусловленной глобальным потеплением, наблюдаются колебания интенсивности гавайского антициклона декадного масштаба (рис. 4). По этой причине после периода слабого летнего муссона в середине 2000-х гг. происходит его усиление в последние годы. Межгодовые изменения ветровых условий в зал. Петра Великого ещё более разнообразны, поскольку реальный ветер — это не только муссон, обусловленный крупномасштабным распределением приземного давления, но и ветры, связанные с синоптическими образованиями, прежде всего с проходящими через район исследований циклонами. Выделяются годы с относительно слабыми и неустойчивыми южными ветрами в летний сезон — 2008 и 2014 — и год с сильными, устойчивыми южными ветрами — 2013 (рис. 5). Менялись от года к году и сроки смены муссонов: смена происходила либо во второй половине августа (2007, 2008, 2010, 2011, 2013 гг.), либо во второй половине сентября — начале октября (1999, 2009, 2012, 2014 гг.).

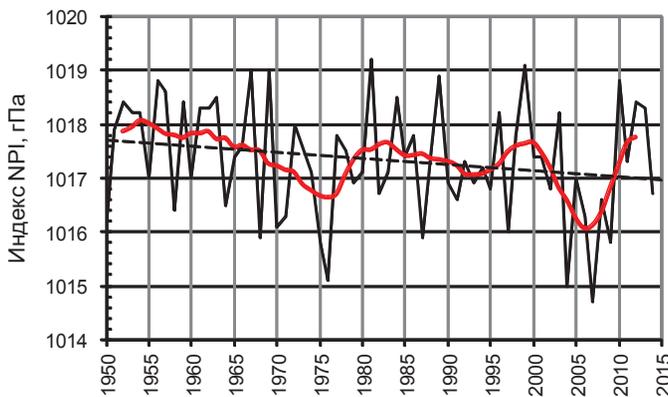


Рис. 4. Межгодовые изменения индекса NPI в июле. Показаны также линейный тренд индекса для периода после 1950 г. и результаты скользящего 5-летнего сглаживания

Fig. 4. Year-to-year change of North Pacific Index in July. Linear trend for the period after 1950 and results of 5-years running smoothing are shown

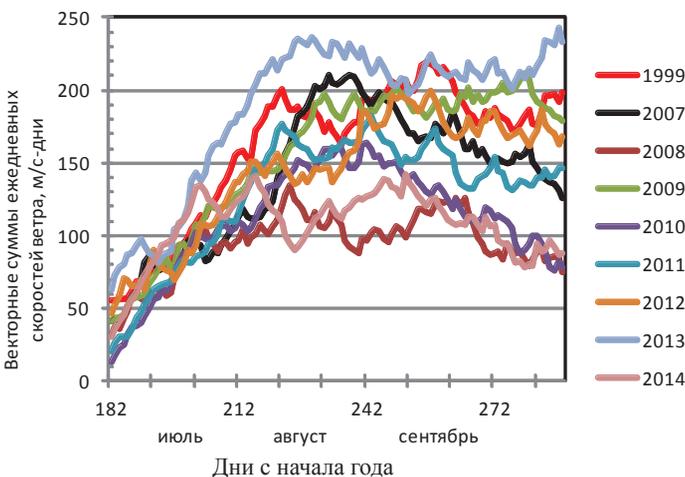


Рис. 5. Накопленные с 20 июня векторные суммы ежедневных скоростей ветра на ГМС Владивосток (по данным на 0 час Гринвичского времени) в разные годы исследований. Положительные значения соответствуют южным ветрам

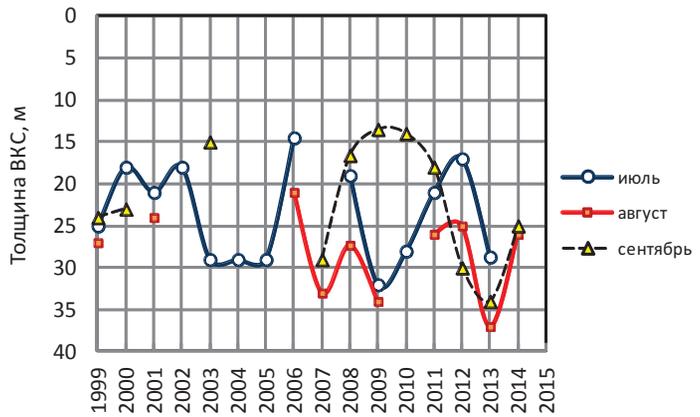
Fig. 5. Cumulative vector sum of daily wind rate from June 20 for meteorostation Vladivostok (GMT 0:00), by the years. Positive values correspond to southern winds; Julian dates by abscissa

В зависимости от изменений интенсивности летнего муссона менялась толщина ВКС в южной части Амурского залива: от почти полного вытеснения из залива подповерхностных вод в годы с сильным летним муссоном до мощных вторжений в придонный слой залива холодных и солёных подповерхностных вод в годы со слабым

муссоном (рис. 6). Несмотря на сильную межгодовую изменчивость, заметна тенденция к заглублению сезонного пикноклина в последние годы, соответствующая тенденции к усилению летнего муссона; наибольшая толщина ВКС наблюдалась в 2013 г. В северной мелководной части залива практически всегда в конце лета вся толща вод занята поверхностной водной массой.

Рис. 6. Межгодовые изменения средней толщины верхнего квазиоднородного слоя в южной части Амурского залива по месяцам

Fig. 6. Year-to-year changes of the mixed layer depth in the southern Amur Bay, by months



P. parvus появлялся в наших сборах в середине июля, вначале штучно в южной части Амурского залива, в августе во все годы исследований он наблюдался уже в массовом количестве, но также в основном в южной части залива, а в сентябре-октябре распространялся по всей акватории залива. Максимальная численность вида отмечалась обычно в сентябре-октябре, за исключением 1999, 2012 и 2014 гг., когда она была отмечена в августе (рис. 7).

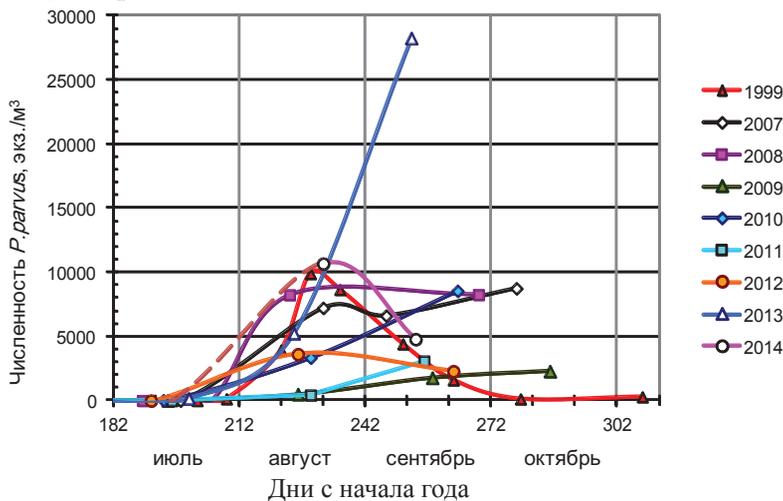


Рис. 7. Численность *P. parvus* в водах Амурского залива в разные годы исследований
Fig. 7. *P. parvus* abundance in the Amur Bay, by years. Julian dates by abscissa

Чтобы выяснить, как именно планктон из глубоководной зоны переносится в прибрежную зону, достаточно определить значения коэффициентов s и b в уравнении (4) по известным концентрациям $C_{приб}$ с учётом реальных сезонных изменений ветра. В ходе решения систем уравнений определены и неизвестные $C_{глуб}$ для каждого года исследований (см. таблицу). Как оказалось, максимум обилия *P. parvus* в прибрежной зоне зависит прежде всего от $C_{глуб}$, а особенности ветрового режима разных лет определяют внутрисезонные колебания его численности, причём в зависимости от соотношения коэффициентов s и b , которое различается между годами. В период исследований эффективность переноса придонным потоком в основном была выше ($b > s$). Это означает, что основные концентрации этого вида чаще располагаются глубже поверхностного дрейфового потока, по-видимому, в пикноклине. Но в отдельные

годы (2008, 2012) выше была эффективность поверхностного потока ($b < s$). Эти годы отличались слабым летним муссоном, когда в условиях слабого нагона в прибрежной зоне зал. Петра Великого формировался относительно тонкий верхний квазиоднородный слой, менее 20 м, из-за чего зоопланктон, обитавший в мелкозаглубленном пикноклине, подвергался действию поверхностного потока. Значительные величины коэффициентов s и b , рассчитанных по данным 1999 г., вероятно, обусловлены тем, что пробы планктона в этом году, в отличие от других лет, собирали только на одной станции, которая, по-видимому, оказалась более чувствительной к транспорту планктона в обоих направлениях, чем Амурский залив в целом.

Параметры адвективной модели, определённые по данным о ветре и численности *P. parvus* в прибрежной зоне в разные годы исследования
Parameters of the advective model determined by its fitting to observed data on wind and *P. parvus* abundance in the Amur Bay, by years

Год	$C_{глуб}$, тыс. экз./м ³	s , м ⁻¹	b , м ⁻¹
1999	3,17	0,067	0,250
2007	8,84	0,008	0,008
2008	8,43	0,028	0,027
2009	3,84	0,001	0,003
2010	7,10	0,010	0,029
2011	4,58	0,001	0,010
2012	4,50	0,049	0,017
2013	15,26	0,011	0,068
2014	5,74	0,021	0,073

С помощью адвективной модели можно проследить, как влияют на изменения численности *P. parvus* в прибрежной зоне любые перестройки в ветровом режиме, что невозможно сделать даже по данным ежемесячных съёмок. Рассмотрим два важнейших аспекта процесса транспортировки вида в прибрежную зону.

Появление *P. parvus* в прибрежной зоне. Как отмечено выше, *P. parvus* появляется в Амурском заливе в середине июля. Эта дата получена непосредственными наблюдениями: в течение 2007–2014 гг. съёмки выполнялись 8, 10, 13, 14, 15 (дважды), 17 и 19 июля, при этом ранее 13 июля вид ни разу не был отмечен в пробах даже штучно, а в существенном количестве он отмечен только 19 июля. В первые дни после появления вида у берегов Приморья из-за резкого различия в его концентрациях между глубоким морем и прибрежной зоной, как правило, происходит быстрое выравнивание концентраций, чему способствуют любые горизонтальные движения вод, как нагонного, так и сгонного характера. Исключением являются годы, когда скопления вида находятся практически полностью за пределами поверхностного слоя, т.е. коэффициент s близок к 0. Поскольку в июле абсолютно преобладают нагонные ветры, они не в состоянии транспортировать планктон в прибрежную зону в таких случаях, и в эти годы (2009, 2011) *P. parvus* может быть представлен в прибрежных водах в концентрациях существенно ниже $C_{глуб}$ вплоть до момента смены муссона, которая может наступить лишь в октябре, как это случилось в 2009 г., т.е. концентрация *P. parvus* на большой глубине не благоприятствует его обилию в прибрежной зоне даже в условиях нормальной интенсивности летнего муссона. В норме численность *P. parvus* в течение нескольких дней возрастает до значений, близких к $C_{глуб}$, и далее колеблется вокруг этих значений в зависимости от ветровых условий (рис. 8).

Величины $C_{глуб}$ в большинстве лет исследования различались гораздо меньше, чем $C_{приб}$ в эти же годы, находясь в пределах 3–9 тыс. экз./м³, исключение составил 2013 г. с существенно более высоким обилием *P. parvus* в обеих зонах. Эта аномалия может быть обусловлена и биологическими причинами, однако привлекает внимание тот факт, что 2013 г. также отличался наиболее сильным летним муссоном, из чего можно предположить, что сильный летний муссон благоприятствует выносу вида в северную часть Японского моря в потоках тёплых течений. Особенности ситуации

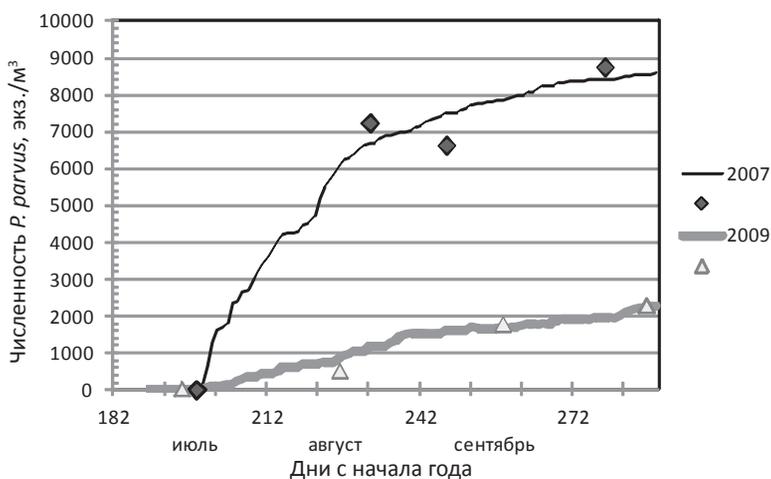


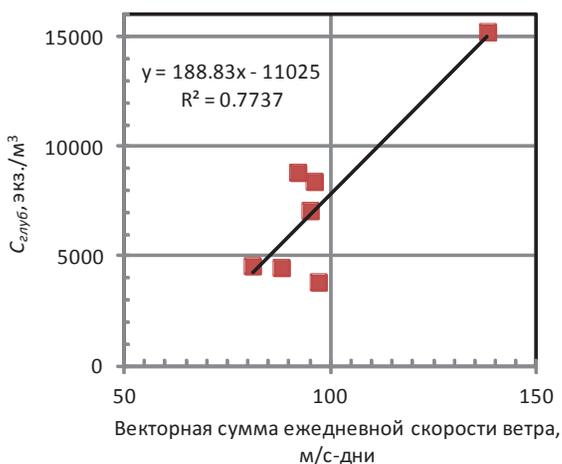
Рис. 8. Примеры сезонной динамики численности *P. parvus* в водах Амурского залива для лет с примерно равной интенсивностью летнего муссона, но разным заглублением зоопланктона по данным наблюдений (точки) и по результатам моделирования (линии)

Fig. 8. Examples for seasonal dynamics of *P. parvus* abundance in the Amur Bay for the years with approximately equal intensity of summer monsoon but different depth of zooplankton concentration. Dots — observed number; lines — modeled number

2013 г. обеспечивают высокую корреляцию межгодовых изменений $C_{злуб}$ и векторной суммы скоростей ветра на ГМС Владивосток за месяц, предшествующий появлению *P. parvus* у берегов Приморья ($r = 0,88$), однако эту связь нельзя признать статистически достоверной, поскольку её теснота обеспечивается резким отличием лишь одной пары значений от других (рис. 9).

Рис. 9. Зависимость $C_{злуб}$ от векторной суммы скоростей ветра на ГМС Владивосток за месяц, предшествующий появлению *P. parvus* у берегов Приморья (20 июня — 20 июля)

Fig. 9. Dependence of the advective model coefficient $C_{злуб}$ on vector sum of wind rate in the month preceding the appearance of *P. parvus* in the Amur Bay (June 20 — July 20)



Смена муссона. Реакция *P. parvus* на смену муссона определяется глубиной концентрации вида (рис. 10). При нормальном заглублении его скоплений ($b > s$) смена муссона способствует росту обилия паракальянуса в прибрежной зоне, так как придонный компенсационный поток в условиях сгонных северных ветров поворачивает в сторону берега. Поэтому при ранней (в августе) смене муссона осенью наблюдается увеличение численности *P. parvus* в водах Амурского залива вплоть до сверхвысоких концентраций, значительно превышающих $C_{злуб}$, как это наблюдалось в сентябре 2013 г. В отдельные годы, когда из-за малого заглубления концентраций эффективность транспорта *P. parvus* поверхностным потоком выше или примерно равна эффективности транспорта придонным потоком, максимум его обилия в Амурском заливе отмечен в августе, а осенью его численность снижается, так как он выносится оттуда сгонным поверхностным потоком. Привлекает внимание сильная изменчивость численности вида в

прибрежной зоне в годы с большими различиями коэффициентов b и s (как 2013) — это обусловлено большой чувствительностью его транспорта к смене направления ветра в синоптическом цикле, в то время как в годы с приблизительно равной эффективностью транспорта поверхностным и придонным потоком (как 2008) численность $P. parvus$ в Амурском заливе очень стабильна и близка к $C_{\text{глуб}}$, так как потоками кросс-шельфовой циркуляции зоопланктон заносится в залив и выносятся из него в равных количествах.

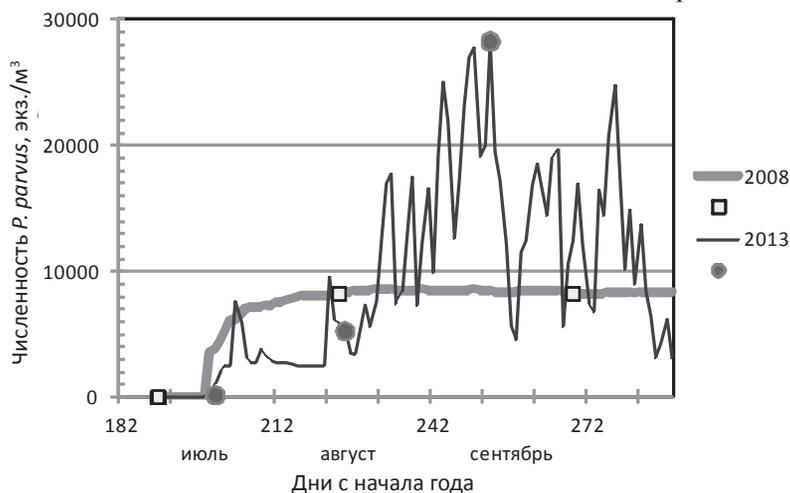


Рис. 10. Примеры сезонной динамики численности $P. parvus$ в водах Амурского залива для лет с одинаково ранней сменой муссона (12.08 в 2008 и 17.08 в 2013 гг.), но разным заглублением зоопланктона по данным наблюдений (точки) и по результатам моделирования (линии)

Fig. 10. Examples for seasonal dynamics of $P. parvus$ abundance in the Amur Bay for the years with early change of monsoon (August 12 in 2008, August 17 in 2013) but different depth of zooplankton concentration. Dots — observed number; lines — modeled number

Глубина концентрации $P. parvus$ и, следовательно, эффективность кросс-шельфового транспорта этого вида определяются силой летнего нагона, т.е. также ветром. Межгодовые изменения коэффициента b обнаруживают тесную связь с ветровыми условиями в течение месяца, предшествующего появлению $P. parvus$ в Амурском заливе: чем сильнее и устойчивее южные ветры, тем выше его значения, т.е. тем глубже располагаются скопления паракалануса и тем более они подвержены переносу в придонном компенсационном потоке. Коэффициент s демонстрирует не столь тесную отрицательную зависимость от ветровых условий в период после появления вида в Амурском заливе (рис. 11).

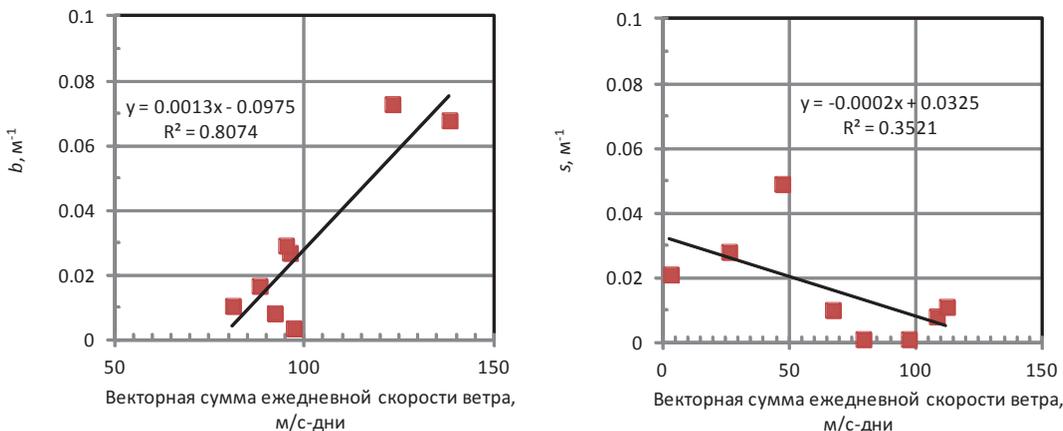


Рис. 11. Зависимость коэффициентов b и s от векторной суммы скоростей ветра на ГМС Владивосток соответственно за 20 июня — 20 июля и 20 июля — 20 августа

Fig. 11. Dependence of the advective model coefficients b and s on vector sum of wind rate in the periods June 20 — July 20 and July 20 — August 20

Таким образом, сильный летний муссон способствует появлению в северной части Японского моря значительных концентраций *P. parvus*, но не способствует интенсивному кросс-шельфовому переносу вида в прибрежную зону, однако сразу после смены муссона на зимний в такие годы его обилие в прибрежной зоне резко возрастает. Поэтому статистически максимальная численность *P. parvus* в Амурском заливе положительно связана как с кумулятивным показателем ветра во Владивостоке за июль, так и с июльским индексом NPI: сильный летний муссон в целом способствует высокому обилию вида в Амурском заливе. В годы со слабым летним муссоном значительные концентрации *P. parvus* могут сформироваться в прибрежной зоне уже в августе, но после смены муссона его численность убывает, и максимумы численности в такие годы невысоки.

Ранее при сравнении обилия *P. parvus* в зал. Петра Великого с термическими условиями по данным 1990-х гг. установлено, что этот вид более многочислен в годы с повышенной температурой в верхнем слое моря в конце лета (Надточий, Зуенко, 2000). Эта закономерность применима и к новым данным 2007–2014 гг.: в годы с сильным летним прогревом (2007–2008, 2010 и 2013) численность вида была высокой, причём в 2013 г. с самой высокой температурой на поверхности Амурского залива за весь период наблюдений — экстремально высокой, а в 2009 и 2011–2012 гг. с холодным летом численность вида была низкой. Учитывая, что речь идёт о привнесённом в залив виде, связь с местными условиями может показаться неестественной, однако следует иметь в виду, что температура прибрежных вод, особенно в придонном слое, также зависит от адвективного водообмена между прибрежной зоной и глубоким морем: нагон вызывает рост придонных температур, а при сгоне развиваются апвеллинги — подъём холодных глубинных вод и вторжение их в прибрежную зону. Наблюдаемая в последние годы тенденция к усилению летнего муссона способствует как росту температуры воды в прибрежной зоне южного Приморья, так и росту обилия в ней *P. parvus*.

Заключение

Численность субтропического вида *P. parvus* в Амурском заливе и её динамика в течение лета-осени обусловлена характером сгонно-нагонной кросс-шельфовой циркуляции вод, генерируемой преобладающими муссонными ветрами, и особенностями вертикального распределения вида, предположительно также зависящими от сгонно-нагонных процессов. Сильный летний муссон способствует формированию высокой численности вида в заливе, но в таких условиях его перенос к берегу более эффективно осуществляется в компенсационном придонном потоке, развивающемся при сгонных ветрах, поэтому максимум численности наблюдается осенью, в сентябре-октябре. В годы со слабым летним муссоном значительные концентрации *P. parvus* в заливе формируются уже в августе благодаря дрейфовому переносу в поверхностном слое, но после смены муссона его численность убывает, максимумы численности в такие годы невысоки. Поскольку эти процессы — общие для всего южного Приморья, можно предположить, что описанный механизм применим ко всему этому региону, во всяком случае ко всему зал. Петра Великого.

Полученные закономерности и предложенная на их основе адвективная модель обилия *P. parvus* в прибрежной зоне позволяют оценить последствия климатических изменений для прибрежной экосистемы в осенний сезон, когда этот вид является доминирующим в зоопланктоне. Наблюдаемая в последние годы тенденция к усилению летнего муссона способствовала росту обилия *P. parvus* в прибрежной зоне южного Приморья, и в сентябре 2013 г. была отмечена максимальная за все годы наблюдений его численность. Однако эта тенденция обусловлена междекадными флюктуациями области высокого давления над Тихим океаном, в то время как климатический тренд направлен на ослабление муссона. Поэтому уже в ближайшей перспективе следует ожидать уменьшения обилия *P. parvus* и других субтропических видов планктона в прибрежной зоне, вплоть до полного его исчезновения в отдельные годы.

Список литературы

Бродский К.А. Изменения видового состава копепод и кладоцер заливов Посыета и Амурского (Японское море) в связи с многолетними колебаниями температуры // Биол. моря. — 1981. — № 5. — С. 21–27.

Волков А.Ф. Зоопланктон эпипелагиали дальневосточных морей: состав сообществ, межгодовая динамика, значение в питании nekтона : автореф. дис... д-ра биол. наук. — Владивосток : ДВГУ, 1996. — 70 с.

Зуенко Ю.И., Надточий В.В. Исследование влияния апвеллинга на состав и обилие мезопланктона в прибрежной зоне Японского моря // Океанол. — 2004. — Т. 44, № 4. — С. 561–569.

Зуенко Ю.И., Надточий В.В., Селина М.С. Гидрологические процессы и сукцессия планктона в прибрежной зоне Японского моря в летний период // Изв. ТИНРО. — 2004. — Т. 135. — С. 144–177.

Зуенко Ю.И., Юрасов Г.И. Структура вод и водные массы северо-западной части Японского моря // Метеорол. и гидрол. — 1995. — № 8. — С. 50–57.

Инструкция по количественной обработке морского сетного планктона / сост. Е.П. Каредин. — Владивосток : ТИНРО, 1982. — 29 с.

Надточий В.В., Зуенко Ю.И. Межгодовая изменчивость весенне-летнего планктона в заливе Петра Великого // Изв. ТИНРО. — 2000. — Т. 127. — С. 281–300.

Надточий В.В., Зуенко Ю.И. Сезонные изменения в планктоне северо-западной части Японского моря // Гидробиол. журн. — 2001. — Т. 37, № 6. — С. 10–18.

Рекомендации по экспресс-обработке сетного планктона в море / сост. А.Ф. Волков. — Владивосток : ТИНРО, 1984. — 31 с.

Сажина Л.И. Размножение, рост, продукция морских веслоногих ракообразных : моногр. — Киев : Наук. думка, 1987. — 156 с.

Шулейкин В.В. Физика моря : моногр. — М. : Наука, 1968. — 1084 с.

Zuenko Y., Dolganova N., Nadtochy V. Forecasting of climate change influence on zooplankton in the Japan Sea // Pacific Oceanography. — 2010. — Vol. 5, № 1. — P. 6–19.

Zuenko Y.I. Application of a lower trophic level model to a coastal sea ecosystem // Ecological modeling. — 2007. — Vol. 202, № 1-2. — P. 132–143.

Поступила в редакцию 16.11.15 г.