

Среда обитания
водных биологических ресурсов
Диагноз и прогноз условий среды обитания гидробионтов

УДК 574.583

**Основные особенности сезонной и многолетней
динамики сообщества зоопланктона Амурского
залива (залив Петра Великого, Японское море)**

Ю.И. Зуенко, В.В. Надточий

Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр (ФГБНУ «ТИНРО-Центр»),
г. Владивосток

E-mail: zuenko_yury@hotmail.com

По итогам двадцатилетнего (1994–2014 гг.) мониторинга рассмотрены видовой состав сообщества зоопланктона Амурского зал., особенности его пространственной структуры, закономерности сезонной, межгодовой и климатической изменчивости, характер влияния на зоопланктон изменений условий среды обитания и важнейшие аспекты функционирования сообщества. В пределах Амурского зал. выявлены две разные видовые группировки зоопланктона, примерно соответствующие эстуарным и прибрежным морским водам. Хотя мелкие копеподы составляют основу сообщества на всей акватории, среди них доминируют либо *Acartia aff. clausi* и *Oithona brevicornis* в приэстуарной зоне, либо *Oithona similis*, *Pseudocalanus newmani* и *Paracalanus parvus* в прибрежных морских водах. В годовом цикле сукцессии сообщества выделено девять гидробиологических сезонов, при смене которых оно кардинально меняет свой состав и биомассу. Тесные и однозначные связи межгодовых изменений состава и обилия зоопланктона с термическим состоянием и солёностью вод залива не обнаружены, но доля аллохтонных видов меняется в зависимости от интенсивности муссонов, что особенно проявляется в декадном масштабе. Транспорт глубоководного планктона в Амурский зал. (сагитт, крупных копепод *Neocalanus plumchrus*, *Calanus glacialis*, субтропических видов *Calanus pacificus*, *Paracalanus parvus* и др.) возможен как в поверхностных, так и в придонных потоках сгонно-нагонной циркуляции вод, в зависимости от видов планктона и расположения их агрегаций по глубине. В климатическом масштабе в современный период наблюдается тенденция к росту обилия зоопланктона в Амурском зал. за счёт местных неритических видов, чему способствует обособление высокопродуктивной прибрежной зоны от глубоководной части моря из-за ослабления кросс-шельфового транспорта.

Ключевые слова: зоопланктон, прибрежная зона, сукцессия планктона, транспорт планктона, сгонно-нагонная циркуляция вод, Амурский залив.

ВВЕДЕНИЕ

Амурский залив является вторичным заливом крупного зал. Петра Великого, расположенного на западном побережье Японского моря, на его берегах расположен г. Владиво-

сток. Среди других акваторий зал. Петра Великого Амурский зал. отличается большим распреснением, поскольку в его вершину впадает р. Раздольная с годовым стоком около 2,1 км³, с водосбором на территориях России и Китая

(китайское название Suifen). В период с 1994 по 2014 гг. силами ТИНРО проводился мониторинг зоопланктона в Амурском зал. с целью выяснения характера сезонной и межгодовой изменчивости кормовой базы рыб в прибрежных водах Приморья. Заключался он в ежемесячном либо более частом сборе проб планктона тотальными ловами сетью Джеди по всей акватории залива с их последующей полной разборкой в лабораторных условиях с определением численности и биомассы всех видов (рис. 1). Сбор проб сопровождался широким комплексом океанологических наблюдений. При этом были поставлены следующие задачи исследований:

- определить видовой состав зоопланктонного сообщества залива и общее обилие планктона;
- выявить на примере Амурского зал. закономерности сезонной и межгодовой изменчивости сообщества зоопланктона и в частности тенденции изменений, связанных с изменениями климата;
- определить основные механизмы, обуславливающие изменения видового состава и обилия зоопланктона в заливе, прежде всего те, которые действуют не локально.

В 2014 г. мониторинг зоопланктона в Амурском зал. был прекращён. Собранный обширный материал, который анализировался в течение всего двадцатилетнего периода мониторинга и продолжает анализироваться после его окончания, позволил установить видовой состав зоопланктонного сообщества и особенности его пространственной структуры, закономерности сезонной, межгодовой и климатической изменчивости состава и обилия зоопланктона, характер влияния на зоопланктон изменений условий среды обитания и важнейшие аспекты функционирования сообщества. На примере сообщества зоопланктона Амурского зал. становятся понятны основные принципы влияния океанологических процессов в условиях муссонного климата на функционирование прибрежных планктонных сообществ не только на исследованном участке, но и в других прибрежных районах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе 20-летнего мониторинга собраны данные о численности и биомассе зоопланктона по видам и о параметрах среды его обитания: температуре воды, солёности, плотно-

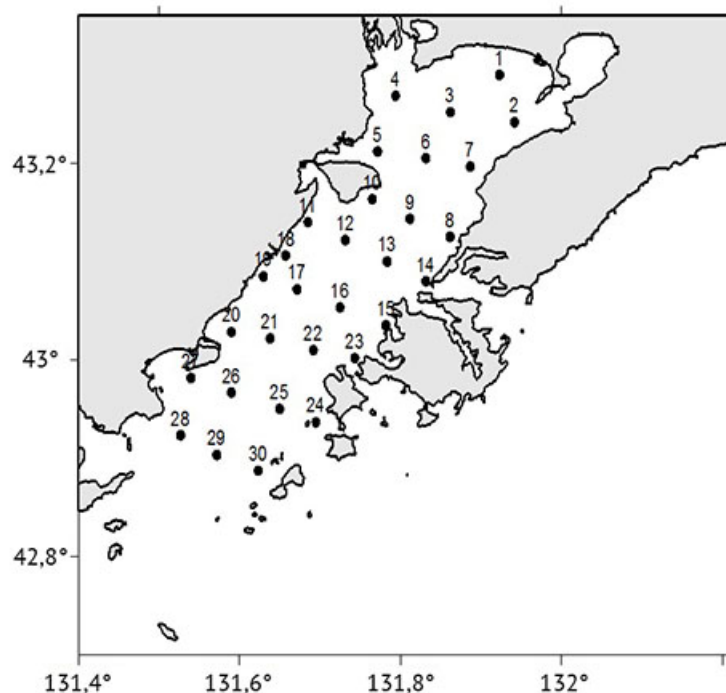


Рис. 1. Схема сбора проб планктона в последние годы мониторинга (координаты десятичные)

сти, содержании кислорода, концентрации биогенных элементов (фосфора, кремния и азота в 3 формах), а также pH и прозрачности воды. Для анализа изменений этих показателей привлечены также данные эпизодических наблюдений на этой же акватории в более ранние годы, данные о ветре на ГМС Владивосток и климатические индексы NPI [Climate Data Guide, 2018] и Охотский индекс [ТИНРО-Центр, 2018].

Используемые климатические индексы характеризуют интенсивность летнего муссона у побережья Приморья. При этом Охотский индекс, рассчитываемый как среднее приземное атмосферное давление над акваторией Охотского моря, характеризует летний муссон в начальной фазе, когда на Приморье выносятся холодные воздушные массы с Охотского моря и преобладают восточные, северо-восточные ветра. Северотихоокеанский индекс (North Pacific Index, NPI), рассчитываемый как среднее приземное атмосферное давление над областью 30–65° с. ш., 160° в. д. — 140° з. д., характеризует фазу развитого летнего муссона, когда на Приморье выносятся тёплые субтропические воздушные массы и преобладают южные, юго-восточные ветра. В обеих фазах летний муссон индуцирует нагонную циркуляцию вод на шельфе залива Петра Великого.

Обработка проб планктона, гидрохимических проб и показаний океанологических зондов проводилась по стандартным методикам, с учётом уловистости сети Джеди [Инструкция ..., 1982; Рекомендации ..., 1984]. При анализе данных наблюдений использованы в основном статистические методы, широко применяемые в морской биологии, прежде всего кластерный и корреляционный анализ, а также экосистемная модель NEMURO (Numeral Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography) в приложении для прибрежной зоны моря [Zuenko, 2007] и авторская балансовая модель транспорта зоопланктона [Надточий, Зуенко, 2016]. Обе модели применялись для количественной оценки транспорта зоопланктона сгонно-нагонными потоками, индуцируемыми на шельфе залива Петра Великого муссонными ветрами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На собранном материале получено очень много результатов, большинство из которых опубликованы в тематических научных статьях [Надточий, Зуенко, 2000; 2001; Зуенко, Надточий, 2004; Зуенко и др., 2004; Zuenko, 2007; Надточий, Зуенко, 2009; 2016; Zuenko et al., 2010; Надточий, 2012; Рачков, Надточий, 2013 и др.], но эти результаты не были обобщены с целью получения общего представления о состоянии и функционировании сообщества зоопланктона и экосистемы в целом. Поэтому в данном сообщении повторены основные принципиальные научные выводы, полученные в разное время, и на основе их обобщения обсуждаются наиболее общие черты динамики исследуемого сообщества.

Состав сообщества зоопланктона Амурского залива и его пространственная структура

Особенностью Амурского зал. является распространение на значительную его часть внешнего эстуария р. Раздольная. Поэтому в летний сезон, когда эстуарий хорошо развит, в заливе присутствуют две принципиально разные по видовому составу эстуарная и морская группировки зоопланктона (существует также область их смешения), расположение которых примерно совпадает с положением соответствующих водных масс поверхностного слоя моря (рис. 2). Хотя на всей акватории залива в зоопланктоне преобладают мелкие копеподы, в зависимости от степени влияния материкового стока среди них доминируют, соответственно, либо *Acartia aff. clausi* Giesbrecht, 1889 и *Oithona brevicornis* Giesbrecht, 1891, либо *O. similis* Claus, 1866, *Pseudocalanus newmani* Frost, 1989 и *Paracalanus parvus* Claus, 1863 (рис. 3), причём численность эстуарного вида *A. aff. clausi* обнаруживает тесную обратную связь с солёностью, а морские виды *O. similis*, *P. newmani* и *P. parvus* на большей части эстуария (зоны 1 и 2 на рис. 2) вообще не встречаются.

Сезоны в планктоне

В течение года видовой состав зоопланктона обеих вышеупомянутых группировок ради-

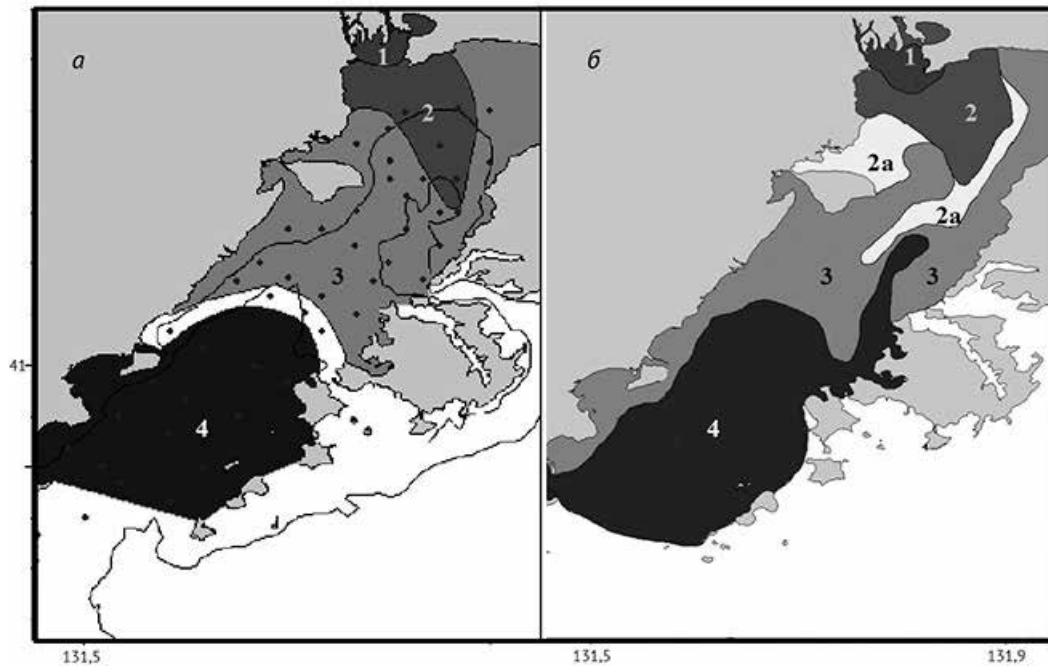


Рис. 2. Схема расположения зон различных типов структуры вод (а) и разных по видовому составу группировок зоопланктона (б) в июне 2007 г.

Структурные зоны: 1 — внутренний эстуарий, 2 — внешний эстуарий, 3 — приэстуарная зона, 4 — морская прибрежная зона. Группировки зоопланктона: 1 — внутреннего эстуария с преобладанием меропланктона, 2, 2а — внешнего эстуария с доминированием *A. aff. clausi*, 3 — смешанной приэстуарной зоны с доминированием *O. similis*, 4 — морской прибрежной зоны с доминированием *P. newmani*

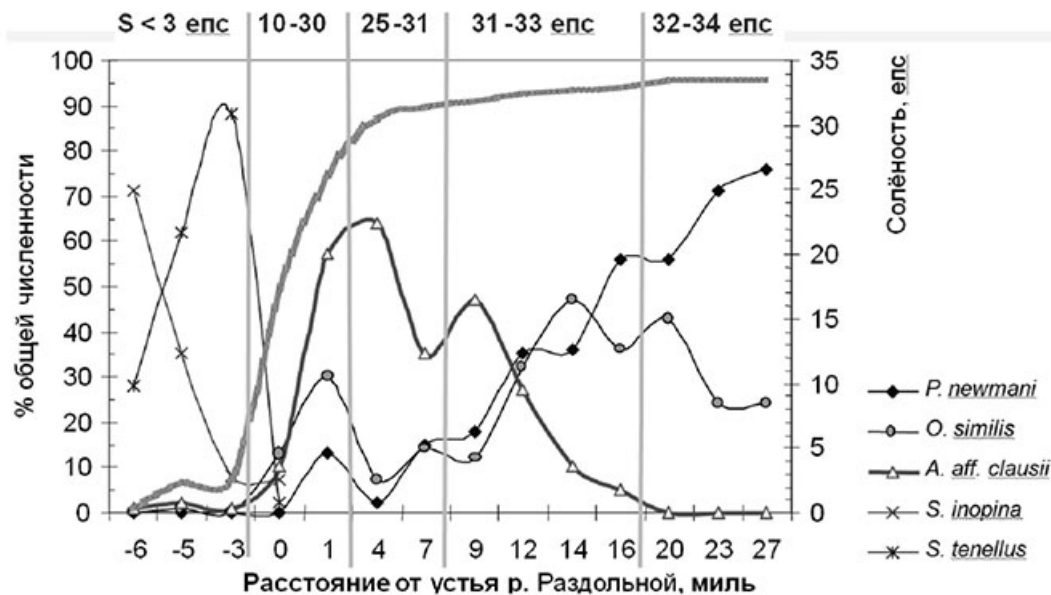


Рис. 3. Изменения относительного обилия массовых видов зоопланктона (%), линии со значками) в зависимости от солёности поверхностного слоя (промилле, жирная серая линия) на разрезе вдоль Амурского зал. в июне 2000 и 2003 гг.

кально меняется, что в основном обусловлено изменениями первичной продукции и приспособлением к ним жизненных циклов видов

(рис. 4). Но из года в год типичные сезонные особенности и их последовательность повторяются, хотя и не обязательно точно в те же сро-

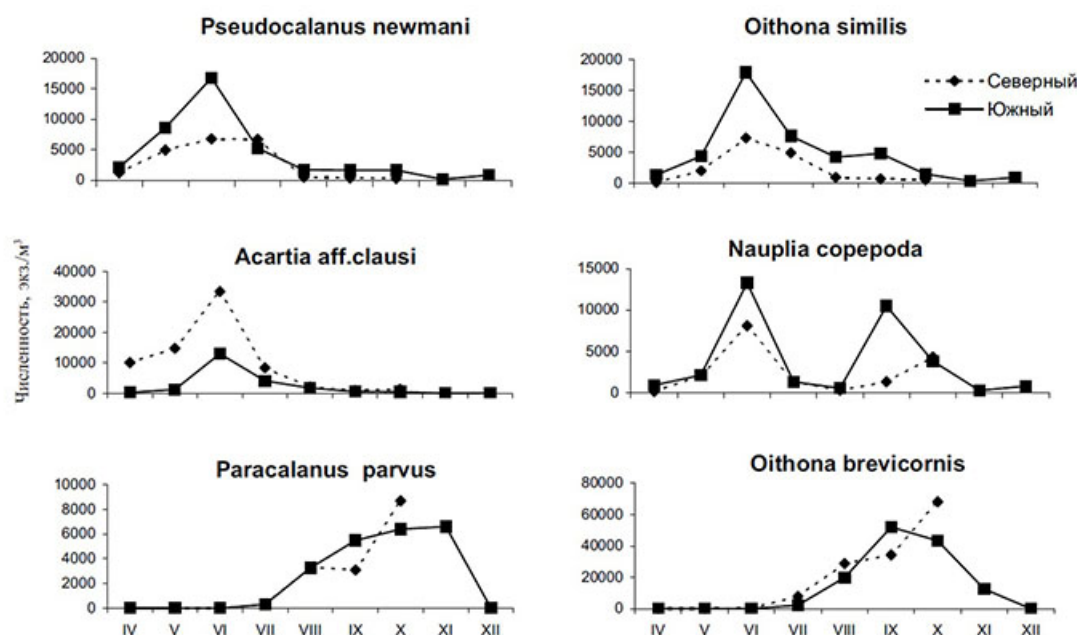


Рис. 4. Сезонные изменения численности массовых видов копепоид в северной и южной частях Амурского зал. по осреднённым данным за 2007–2011 гг. [Надточий, 2012]

ки. По данным частых (еженедельных) съёмок было отмечено, что особенности видового состава и обилия зоопланктона сохраняются в течение некоторого времени, а затем резко меняются и сообщество переходит в другое состояние. Эти процессы соответствуют известному в гидробиологии понятию сезонной сукцессии планктона, а временно устойчивые состояния можно определить как сезоны в планктоне. В Амурском зал. таких сезонов наблюдается девять (табл. 1): зимний, ранневесенний, весенний, поздневесенний, раннелетний, летний, позднелетний, раннеосенний и осенний, что несколько больше, чем в глубоководной субарктической зоне Японского моря, где их насчитывается семь [Надточий, Зуенко, 2001]. Продолжительность большинства сезонов составляет около месяца, наиболее короткий сезон — ранневесенний, который в некоторые годы может длиться лишь неделю в начале апреля, наиболее длинный сезон — зимний, длящийся до трёх месяцев.

Межгодовые и междекадные изменения зоопланктона

Год от года различаются как темпы сезонной сукцессии планктона, так и состав и обилие планктона в каждом сезоне. Первый аспект

Таблица 1. Сезонная сукцессия планктонного сообщества в Амурском зал. Японского моря

Сезон	Доминирующие группы планктона
Зимний	Низкое обилие всех видов и групп
Ранневесенний	Фитопланктон (весеннее «цветение»)
Весенний	Фитопланктон, молодь холодно-водных копепоид
Поздневесенний	Фитопланктон, сагитты, холодно-водные копепоиды
Раннелетний	Холодноводные копепоиды
Летний	Холодноводные копепоиды, меропланктон
Позднелетний	Тепловодные копепоиды, кладоцеры
Раннеосенний	Фитопланктон, тепловодные копепоиды
Осенний	Хетогнаты, тепловодные копепоиды

более заметен, благодаря ему состояние планктона в одни и те же даты разных лет может кардинально различаться. Межгодовые сдвиги сроков смены сезонов достигают полумесяца. Поскольку темпы сукцессии зависят от темпов прогрева/выхолаживания поверхности моря, смена сезонов происходит не по календарю,

а при достижении определённой температуры [Надточий, Зуенко, 2000] (рис. 5), поэтому в одни и те же даты разных лет составы зоопланктона бывают принципиально различны, так как планктонное сообщество может находиться на разных стадиях сукцессии, в разных сезонах. Напротив, внутри сезонов межгодовые вариации видового состава и обилия зоопланктона слабо связаны с изменениями термических условий, а также солёности. Отмечено лишь предпочтение *A. aff. clausi* условий пониженной солёности и *P. parvus* условий повышенной температуры [Надточий, Зуенко, 2000], причём в последнем случае связь не является функциональной, т. к. *P. parvus* — аллохтонный вид.

Более заметные изменения видового состава зоопланктона определённого сезона, особенно в мористой части залива, происходят не от года к году, а между продолжительными периодами масштаба десятилетий. Так, в 1980-е гг. в раннелетнем зоопланктоне Амурского зал. преобладали мелкие неритические копеподы, общая биомасса была довольно низкой — в среднем 1093 мг/м^3 . В 1990-е годы, напротив, преобладали крупные копеподы и сагитты, общая биомасса была очень высокой — в среднем 2311 мг/м^3 . А начиная с 1998 г., сообщество вновь вернулось к доминированию местных видов и последующие изменения происходили на относительно низком уровне биомассы (рис. 6). Такие изменения определяются сте-

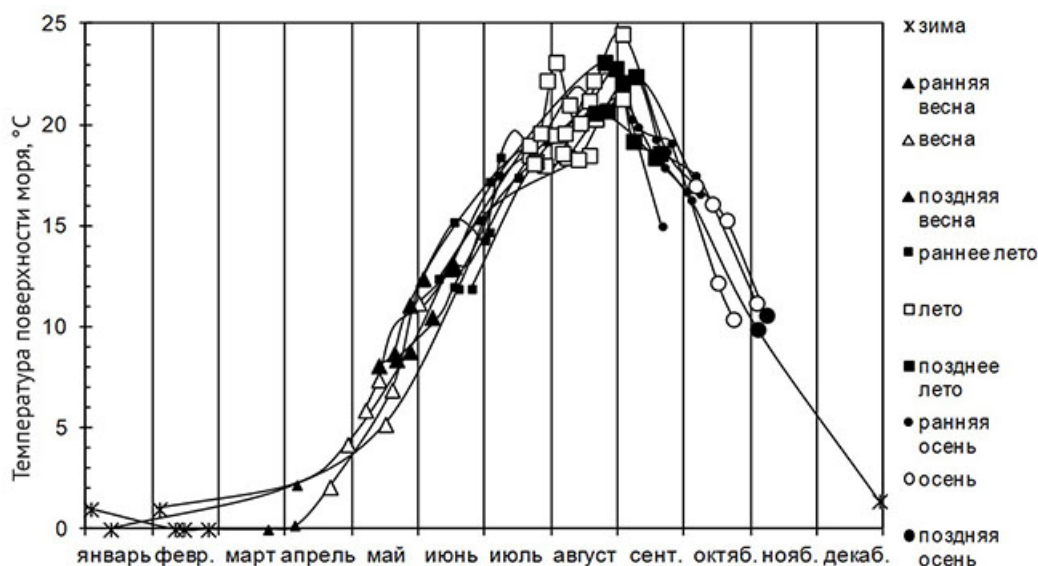


Рис. 5. Соответствие сезонов в планктоне южной части Амурского зал. сезонному ходу температуры воды на поверхности этого района в разные годы 90-х гг. Сроки измерения температуры обозначены символами наблюдаемых в это время сезонов в планктоне

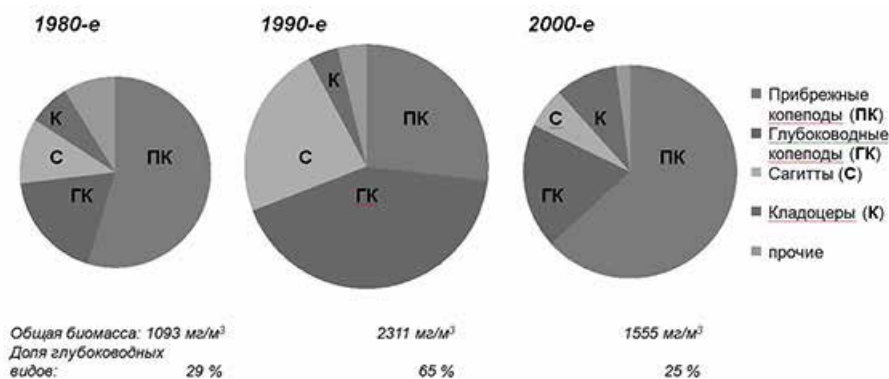


Рис. 6. Междесятилетние изменения состава раннелетнего зоопланктона в южной части Амурского зал.

пению экспансии в прибрежную зону аллохтонных глубоководных видов зоопланктона (сагитты *Sagitta elegans* Verrill, 1873, копеподы *Neocalanus plumchrus* (Marukawa, 1921), *Calanus glacialis* (Dana, 1852), *C. pacificus* Brodsky, 1948, *Metridia pacifica* Brodsky, 1950, *Oithona similis*, *O. brevicornis*, *P. parvus*, амфиподы *Themisto japonica* (Bovallius, 1887).

Поскольку планктон неспособен перемещаться самостоятельно, его транспорт из глубоководной зоны в прибрежную происходит в потоках кросс-шельфовой циркуляции, которая в зал. Петра Великого формируется преимущественно муссонными ветрами. Весной-летом преобладает нагонная циркуляция с течениями к берегу в поверхностном слое и компенсационным потоком в море в придонном слое, а осенью-зимой — сгонная циркуля-

ция обратной направленности. И дрейфовые, и компенсационные потоки могут переносить планктон (рис. 7). В целом, вклад глубоководных видов в зоопланктон Амурского зал. усиливается в периоды усиления летнего муссона, интенсивность которого в первой (раннелетней) фазе количественно отображается Охотским индексом, а во второй фазе — Северитихоокеанским индексом NPI (рис. 8, 9). Оба индекса фиксируют резкое ослабление летнего муссона на рубеже 1990-х и 2000-х гг., в начале XXI века муссон был слабым и вновь усилился лишь в самые последние годы.

Кросс-шельфовый транспорт зоопланктона

Значение адвекции глубоководных видов для сообщества зоопланктона Амурского зал.

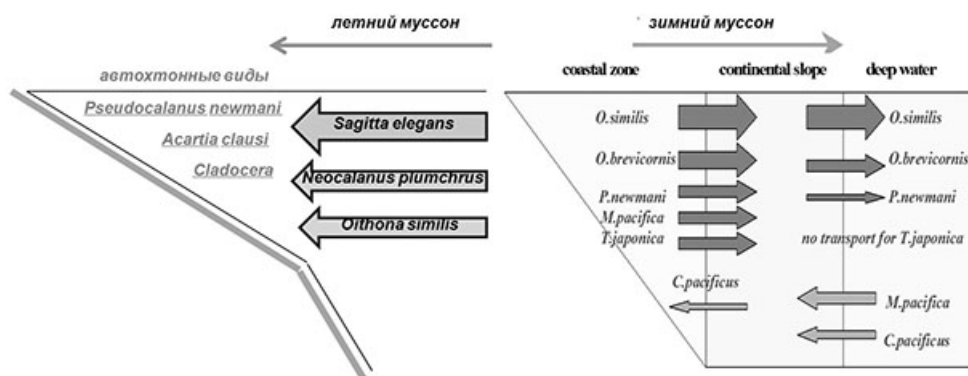


Рис. 7. Схема переноса массовых глубоководных видов зоопланктона между прибрежной зоной Амурского зал. и глубоководной частью Японского моря потоками нагонной и сгонной кросс-шельфовой циркуляции вод, индуцируемой летним и зимним муссоном

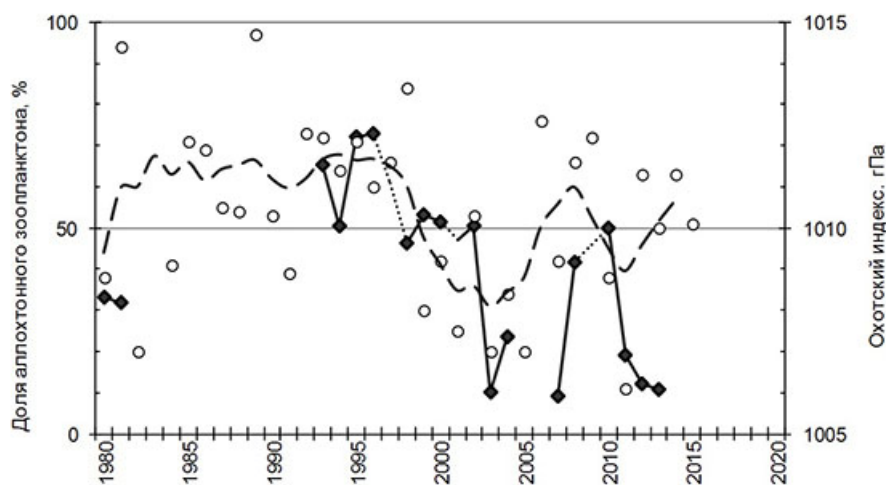


Рис. 8. Межгодовые изменения Охотского индекса в июне (светлыми точками показаны фактические значения Охотского индекса, пунктиром — результат скользящего 3-летнего осреднения) и доли аллохтонных видов зоопланктона в общей биомассе раннелетнего зоопланктона в южной части Амурского зал.

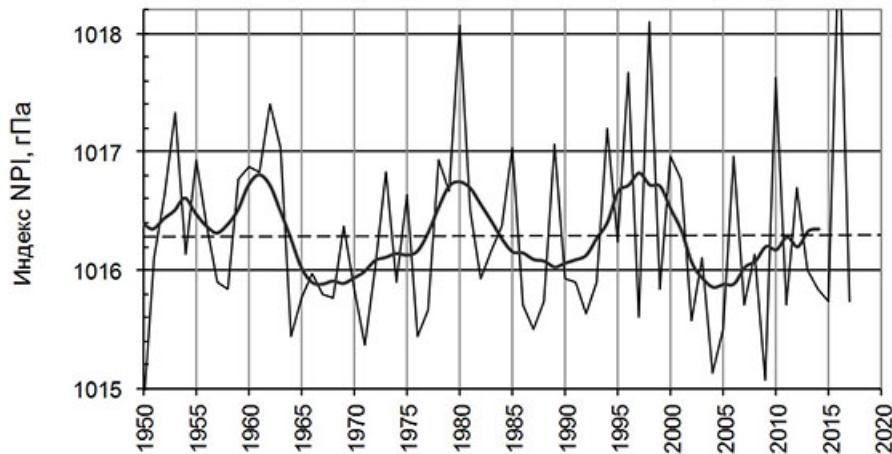


Рис. 9. Межгодовые изменения Северотихоокеанского индекса (NPI) в июне-августе (фактические и сглаженные значения, пунктиром — линейный тренд за период с 1950 г.)

количественно оценено с помощью экосистемной NPZD модели NEMURO, адаптированной к условиям зал. Петра Великого [Zuenko, 2007]. Модель верифицирована по данным мониторинга состава и обилия зоопланктона. Объёмные переносы воды в потоках кросс-шельфовой циркуляции приняты пропорциональными скорости и продолжительности действия ветра, следуя эмпирическим результатам В.В. Шулейкина [1968] и собственным [Zuenko, 2001]. Как показали расчёты, вклад транспорта в общую биомассу зоопланктона прибрежной зоны в течение всего тёплого периода года является положительным и достигает наибольших величин вес-

ной и осенью (при том, что направленность кросс-шельфовой циркуляции вод в эти сезоны противоположна), когда адвекция становится основным фактором роста обилия (рис. 10).

Разные глубоководные виды зоопланктона переносятся кросс-шельфовыми течениями по-разному. Так, молодёжь сагитт, доминирующая в прибрежной зоне в поздневесенний сезон, переносится сюда в поверхностном потоке нагонной циркуляции, а *P. parvus*, размножающийся далеко за пределами зал. Петра Великого, в субтропических водах, использует для этого компенсационный глубинный поток, развивающийся при сгоне. В некоторые годы (как 2013 г.) он заносится сюда в начале осени

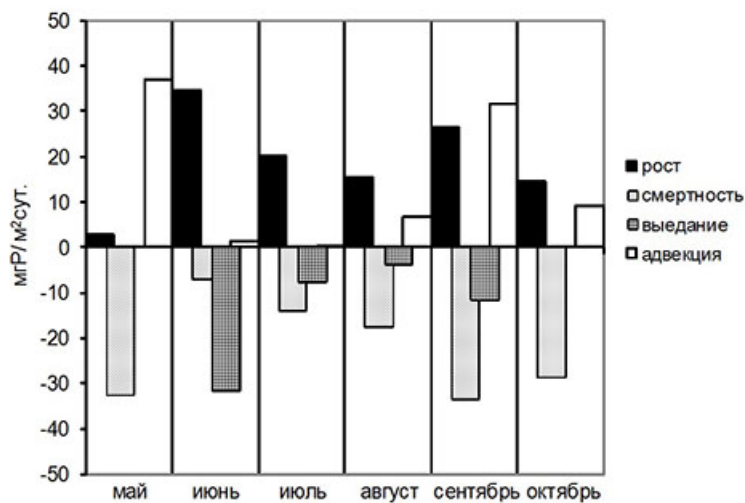


Рис. 10. Средние за 1998–1999 гг. оценки компонент баланса общей биомассы зоопланктона на станции в южной части Амурского залива, помесечно, в фосфорном эквиваленте [Zuenko, 2007]

в таком количестве, что становится доминирующим (рис. 11). Межгодовые изменения его обилия обнаруживают явную зависимость от ветровых условий. Сезонная и межгодовая динамика численности этого вида в южной части Амурского зал. была проанализирована с помощью балансовой модели:

$$C_{\text{приб}} = \int_{t_0}^t (C_{\text{зуб}} \cdot sW_S - C_{\text{приб}} \cdot bW_S + C_{\text{зуб}} \cdot bW_N - C_{\text{приб}} \cdot sW_N) dt,$$

где $C_{\text{приб}}$ и $C_{\text{зуб}}$ — концентрация вида в прибрежной зоне и за пределами залива; W_S , W_N — скорость ветра южных и северных румбов, м/с; s и b с размерностью м^{-1} — 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. В результате анализа с использованием данных об обилии *P. parvus* и ежедневных данных о направлении и скорости ветра на ГМС Владивосток сделан вывод, что массовый вынос *P. parvus* в Амурский зал. происходит в компенсационном глубинном потоке, развивающемся начиная со второй половины августа, после смены муссона на зимний [Над-

точий, Зуенко, 2016]. При этом численность транспортируемых этим потоком животных выше в годы с мощным летним муссоном, который очевидно способствует усилению адвекции поверхностных субтропических вод вместе с их населением в северную часть Японского моря в предшествующие летние месяцы.

С другой стороны, действие кросс-шельфовых потоков на зоопланктон в значительной степени зависит от глубины его концентрации (обычно соответствующей глубине залегания сезонного пикноклина), вплоть до того, что в зависимости от глубины концентрации зоопланктон может менять направление транспорта. На том же примере *P. parvus* показано [Надточий, Зуенко, 2016], что в некоторые годы (как 2007 г.) этот вид начинает проникать в прибрежную зону сразу же, как только появляется в северной части моря, то есть транспортируется к берегу не подповерхностными потоками сгонной циркуляции, как обычно, а поверхностным потоком нагонной циркуляции (рис. 12).

Климатические изменения

Сравнивая современное состояние зоопланктона в Амурском зал. с данными наблюдений в 1970–1980-е гг., можно видеть, что общая биомасса стала выше в основном за счёт местных мелких копепод, но понизилась биомасса наиболее массовой группы — хищных сагитт (рис. 13). Сагитты являются аллохтонным для

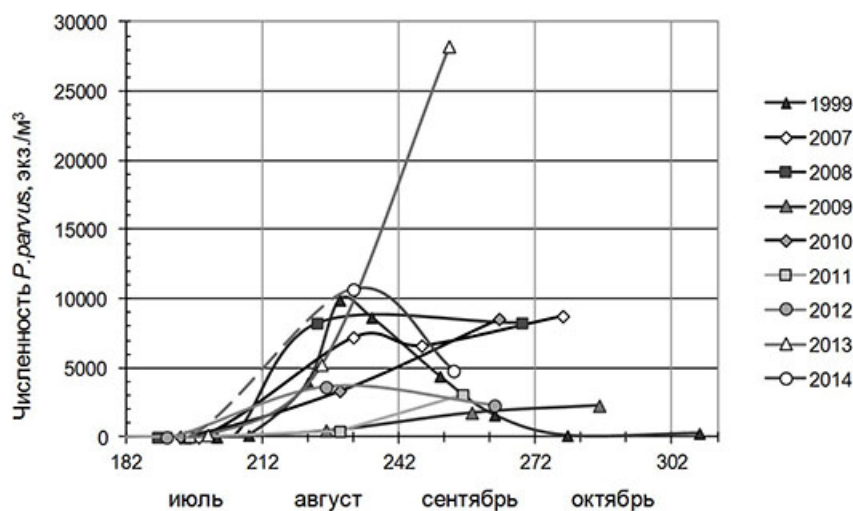


Рис. 11. Численность *P. parvus* в водах Амурского зал. в разные годы исследований.

По оси абсцисс — дни с начала года

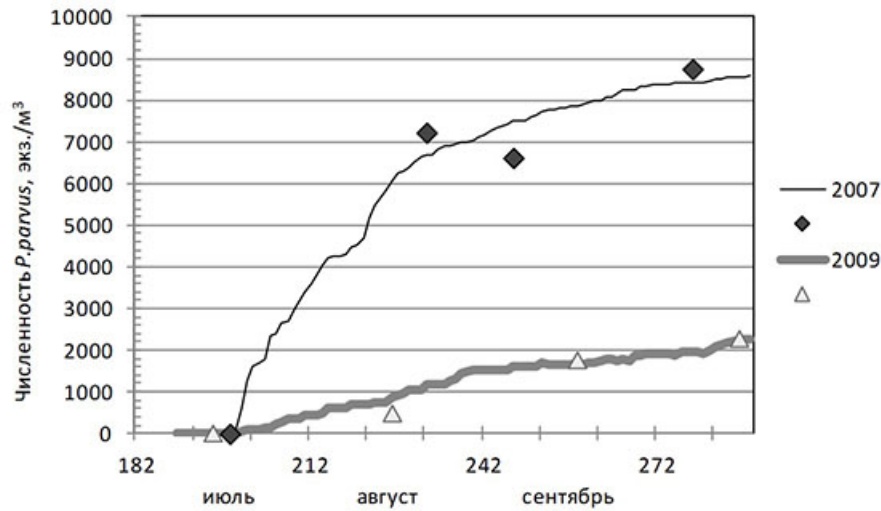


Рис. 12. Примеры сезонной динамики численности *P. parvus* в водах Амурского зал. для лет с примерно равной интенсивностью летнего муссона, но разным заглублением зоопланктона по данным наблюдений (точки) и по результатам моделирования (линии)

Амурского зал. видом, их обилие хорошо коррелирует с интенсивностью летнего муссона, поэтому снижение их биомассы является прямым следствием наблюдаемой климатической тенденции к ослаблению муссона. Напротив, рост обилия копепод с этой тенденцией не связан напрямую, а является следствием уменьшения их выедания сагиттами. Примечательно, что даже обилие крупных аллохтонных копе-

под (*P. plumchrus*) возросло, несмотря на ослабление их транспорта в прибрежную зону.

Тенденция к ослаблению муссона способствует также уменьшению биопродуктивности вод Амурского зал., насколько об этом можно судить по уменьшению концентрации биогенных элементов в поверхностном слое залива и по уменьшению биохимического потребления кислорода в его придонном слое [Зуенко,

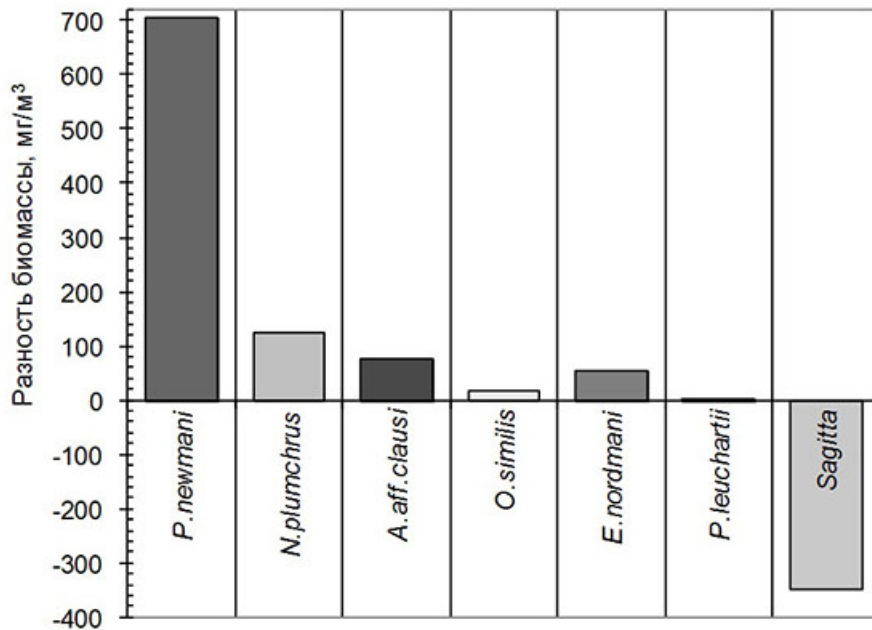


Рис. 13. Разности средних за 1980–1996 гг. и 1998–2012 гг. биомасс массовых видов раннелетнего зоопланктона в южной части Амурского зал.

Рачков, 2016]. Таким образом, происходящие в планктонном сообществе залива изменения климатического масштаба соответствуют ранее сформулированной авторами концепции современных климатических изменений в экосистеме Японского моря в направлении снижения продуктивности и повышения эффективности её функционирования. В случае Амурского зал. оказалось, что снижение продуктивности не влияет на состояние сообщества зоопланктона, очевидно потому, что первичная продукция вод залива избыточна. Однако усиливающееся обособление этого высокопродуктивного района от глубоководной части Японского моря способствует уменьшению хищничества внутри сообщества, и таким образом росту кормового потенциала Амурского зал. для рыб-планктофагов.

Выводы

1. В пределах Амурского зал. сосуществуют две разные видовые группировки зоопланктона, расположение которых примерно соответствует распространению эстуарных и прибрежных морских вод.
2. В годовом цикле планктонное сообщество Амурского зал. несколько раз кардинально меняет свой состав и общее обилие, всего выявлено девять гидробиологических сезонов.
3. Межгодовые изменения состава и обилия зоопланктона в Амурском зал. слабо связаны с термическим состоянием и солёностью его вод, но доля аллохтонных видов меняется в зависимости от интенсивности муссонов, что особенно проявляется в декадном масштабе.
4. Транспорт глубоководного зоопланктона в Амурский зал. возможен как в поверхностных, так и в придонных потоках кросс-шельфовой циркуляции вод, в зависимости от видов зоопланктона и расположения их агрегаций по глубине.
5. В климатическом масштабе в современный период наблюдается тенденция к росту обилия зоопланктона в Амурском зал., несмотря на снижение продуктивности вод, чему способствует обособление высокопродуктивной прибрежной зоны от глубоководной части моря из-за ослабления кросс-шельфового транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

- Зуенко Ю.И., Надточий В.В. 2004. Исследование влияния апвеллинга на состав и обилие мезопланктона в прибрежной зоне Японского моря // *Океанология*. Т. 44. № 4. С. 561–569.
- Зуенко Ю.И., Надточий В.В., Селина М.С. 2004. Гидрологические процессы и сукцессия планктона в прибрежной зоне Японского моря в летний период // *Известия ТИНРО*. Т. 135. С. 144–177.
- Зуенко Ю.И., Рачков В.И. 2015. Климатические изменения температуры, солёности и биогенных элементов в Амурском заливе Японского моря // *Известия ТИНРО*. Т. 183. С. 186–199.
- Инструкция по количественной обработке морского сетного планктона. 1982. Владивосток: ТИНРО. 29 с.
- Надточий В.В. 2012. Сезонная динамика планктона Амурского залива // *Известия ТИНРО*. Т. 169. С. 147–161.
- Надточий В.В., Зуенко Ю.И. 2000. Межгодовая изменчивость весенне-летнего планктона в заливе Петра Великого // *Известия ТИНРО*. Т. 127. С. 281–300.
- Надточий В.В., Зуенко Ю.И. 2001. Сезонные изменения в планктоне северо-западной части Японского моря // *Гидробиологический журнал*. Т. 37. № 6. С. 10–18.
- Надточий В.В., Зуенко Ю.И. 2009. Структура вод и сообщества зоопланктона в эстуариях Амурского и Уссурийского заливов // *Вопросы промысловой океанологии*. Вып. 6. № 1. С. 210–221.
- Надточий В.В., Зуенко Ю.И. 2016. Механизмы транспорта субтропического планктона в прибрежные воды южного Приморья на примере *Paracalanus parvus* // *Известия ТИНРО*. Т. 184. С. 241–252.
- Рачков В.И., Надточий В.В. 2013. Межгодовые изменения океанологических условий в Амурском заливе в тёплый период года и их влияние на зоопланктон // *Вестник ДВО РАН*. № 6. С. 140–148.
- Рекомендации по экспресс-обработке сетного планктона в море. 1984. Владивосток: ТИНРО. 31 с.
- ТИНРО-Центр. Доступно через: <http://www.tinro-center.ru/home/informacionnye-resursy/ohotskij-index>. 15.11.2018.
- Шулейкин В.В. 1968. Физика моря. М.: Наука. 1084 с.
- Climate Data Guide. Accessible via: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/north-pacific-np-index-trenberth-and-hurrell-monthly-and-winter>. 15.11.2018.
- Zuenko Y.I. 2001. Seasonal cycle of heat and salt balance in Peter the Great Bay (Japan Sea) // *Oceanography*

- of the Japan Sea / ed. Danchenkov M.A. Vladivostok: Dalnauka. P. 220–225.
- Zuenko Y.I. 2007. Application of a lower trophic level model to a coastal sea ecosystem // Ecological modeling. V. 202. № 1–2. P. 132–143.
- Zuenko Y.I., Dolganova N.T., Nadtochy V.V. 2010. Forecasting of climate change influence on zooplankton in the Japan Sea // Pacific Oceanography. V. 5. № 1. P. 6–18.

Поступила в редакцию 26.06.2018 г.
Принята после рецензии 09.09.2018 г.

Habitat of aquatic biological resources Diagnosis and forecasting of habitat conditions of hydrobio

General features of seasonal and interannual dynamics for the zooplankton community in the Amur Bay (Peter the Great Bay, Japan Sea)

Zuenko Y.I., Nadtochy V.V.

Pacific Research Fisheries Centre (FSBSI «TINRO-Centre»), Vladivostok

Species composition, spatial structure, and seasonal and long-term variability of the zooplankton community in the Amur Bay are considered on materials of its two-decade monitoring. Influence of the environments variations on zooplankton is analyzed and the principal aspects of the community functioning are discussed. Two different species groupings of zooplankton are distinguished within the bay, generally in the limits of the pre-estuarine and marine coastal water masses. Small-sized copepods compose the bulk of zooplankton community in both zones, but either *Acartia aff. clausi* and *Oithona brevicornis* (in the pre-estuarine waters) or *Oithona similis*, *Pseudocalanus newmani*, and *Paracalanus parvus* (in the marine coastal waters) dominate in dependence on salinity. Nine biological seasons are revealed within the annual cycle of zooplankton succession; species composition and total abundance of the community change crucially with the seasons change. Strong links of interannual variations of zooplankton with thermal or saline conditions are not found, but the portion of allochthonous species fluctuates in direct correlation with the summer monsoon intensity, that is better visible in decadal scale. The deep-water species (*Sagitta*, large-sized copepods as *Neocalanus plumchrus* and *Calanus glacialis*, subtropical species as *Calanus pacificus* and *Paracalanus parvus*, and some other species) could be transported into the Amur Bay with the wind-induced water circulation both at the sea surface and at the bottom, in dependence on the species and depth of their aggregations. In climate scale, a tendency to increasing of zooplankton abundance prevails recently due to local species, that is conditioned by separating of high-productive coastal waters from the deep-water sea caused by the cross-shelf exchange weakening with weakening of monsoon winds.

Keywords: zooplankton, coastal zone, plankton succession, transport of plankton, cross-shelf circulation, Amur Bay.

REFERENCES

- Zuenko Yu.I., Nadtochij V.V. 2004. Issledovanie vliyaniya apvellinga na sostav i obilie mezoplanktona v pribrezhnoj zone Yaponskogo morya [Study on the upwelling influence on species composition and abundance of mezoplankton in the coastal zone of the Japan Sea] // Okeanologiya. T. 44. № 4. S. 561–569.
- Zuenko Yu.I., Nadtochij V.V., Selina M.S. 2004. Gidrologicheskie protsessy i suksessiya planktona v pribrezhnoj zone Yaponskogo morya v letnij period [Oceanographic processes and plankton succession in the coastal zone of the Japan Sea in summer season] // Izvestiya TINRO. T. 135. S. 144–177.
- Zuenko Yu.I., Rachkov V.I. 2015. Klimaticheskie izmeneniya temperatury, solenosti i biogennykh ehlementov v Amurskom zalive Yaponskogo morya [Climatic changes of temperature, salinity and nutrients in the Amur Bay of the Japan Sea] // Izvestiya TINRO. T. 183. S. 186–199.
- Instruktsiya po kolichestvennoj obrabotke morskogo setnogo planktona [Instruction for quantitative processing of marine net plankton]. 1982. Vladivostok: TINRO. 29 s.
- Nadtochij V.V. 2012. Sezonnaya dinamika planktona Amurskogo zaliva [Seasonal dynamics of plankton in the Amur Bay] // Izvestiya TINRO. T. 169. S. 147–161.
- Nadtochij V.V., Zuenko Yu.I. 2000. Mezhsodovaya izmenchivost' vesenne-letnego planktona v zalive Petra Velikogo [Year-to-year variability of spring-summer plankton in Peter the Great Bay] // Izvestiya TINRO. T. 127. S. 281–300.
- Nadtochij V.V., Zuenko Yu.I. 2001. Sezonnye izmeneniya v planktone severo-zapadnoj chasti YAponskogo morya [Seasonal changes in plankton of the northwestern Japan Sea] // Gidrobiologicheskij zhurnal. T. 37. № 6. S. 10–18.
- Nadtochij V.V., Zuenko Yu.I. 2009. Struktura vod i soobshchestva zooplanktona v ehstuariyakh Amurskogo i Ussurijskogo zalivov [Water structure and zooplankton communities in the estuaries of the Amur and Ussuri Bays] // Voprosy promyslovoj okeanologii. Vyp. 6. № 1. S. 210–221.
- Nadtochij V.V., Zuenko Yu.I. 2016. Mekhanizmy transporta subtropicheskogo planktona v pribrezhnye vody yuzhnogo Primor'ya na primere *Paracalanus parvus* [Mechanisms of subtropical plankton transport into the coastal waters of southern Primorye, a case of *Paracalanus parvus*] // Izvestiya TINRO. T. 184. S. 241–252.
- Rachkov V.I., Nadtochij V.V. 2013. Mezhsodovye izmeneniya okeanologicheskikh uslovij v Amurskom zalive v teplyj period goda i ikh vliyanie na zooplankton [Interannual changes of oceanographic conditions in the Amur Bay in a warm season and their influence on zooplankton] // Vestnik DVO RAN. № 6. S. 140–148.
- Rekomendatsii po ehkspress-obrabotke setnogo planktona v more [Recommendations for express-processing of net plankton in the sea]. 1984. Vladivostok: TINRO. 31 s.
- TINRO-Center. Accessible via: <http://www.tinro-center.ru/home/informacionnye-resursy/ohotskij-indeks>. 15.11.2018.
- Shulejkin V.V. 1968. Fizika moray [Physics of the Sea]. M.: Nauka. 1084 s.
- Climate Data Guide. Accessible via: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/north-pacific-np-index-trenberth-and-hurrell-monthly-and-winter>. 15.11.2018.
- Zuenko Y.I. 2001. Seasonal cycle of heat and salt balance in Peter the Great Bay (Japan Sea) // Oceanography of the Japan Sea / ed. Danchenkov M.A. Vladivostok: Dalnauka. P. 220–225.
- Zuenko Y.I. 2007. Application of a lower trophic level model to a coastal sea ecosystem // Ecological modeling. V. 202. № 1–2. P. 132–143.
- Zuenko Y.I., Dolganova N.T., Nadtochy V.V. 2010. Forecasting of climate change influence on zooplankton in the Japan Sea // Pacific Oceanography. V. 5. № 1. P. 6–18.

TABLE CAPTIONS

Table 1. Seasonal succession of plankton community in the Amur Bay, Japan Sea

FIGURE CAPTIONS

Fig. 1. Scheme of zooplankton samplings in the last years of the monitoring (decimal coordinates)

Fig. 2. Scheme of the surface water masses (a) and zooplankton groupings with different species composition (b) in June, 2007. Water masses: 1 — fresh river water in the internal estuary; 2 — brackish estuarine water in the external estuary; 3 — low-saline water of the pre-estuarine zone; 4 — marine coastal water. Zooplankton groupings: 1 — zooplankton of the internal estuary (mostly merozooplankton); 2 and 2a — zooplankton of the external estuary with *A. aff. clausi* predominance; 3 — zooplankton of the pre-estuarine zone with *O. similis* predominance; 4 — zooplankton of the marine coastal zone with *P. newmani* predominance

Fig. 3. Changes of relative abundance for the mass zooplankton species (% of total abundance, lines with marks) in dependence on the surface layer salinity (psu, thick grey line) on the transect along the Amur Bay in June of 2002, 2003

Fig. 4. Seasonal changes of the mass Copepoda species abundance in the northern and southern Amur Bay, ind./m³, averaged data for 2007–2011 [Nadtochy, 2012]

Fig. 5. Correspondence between the seasons in plankton of the southern Amur Bay (symbols) and the sea surface temperature in the same area (lines, °C) in the 1990s

Fig. 6. Interdecadal changes of zooplankton in the southern Amur Bay in early-summer season

Fig. 7. Scheme of the mass deep-water zooplankton species transport between the coastal (Amur Bay) and deep sea with flows of the on-shore and off-shore circulation induced by summer and winter monsoons

Fig. 8. Interannual changes of the Okhotsk Sea Index in June (points — annual values, dotted line — result of running 3-year smoothing) and percentage of allochthonous species biomass in early-summer zooplankton of the Amur Bay

Fig. 9. Interannual changes of the North Pacific Index in June-August (year-to-year and smoothed fluctuations and linear trend since 1950)

Fig. 10. Mean for 1998–1999 balance of the total zooplankton biomass at station in the southern Amur Bay, by months, in phosphorous units mgP/m²day [Zuenko, 2007]

Fig. 11. *P. parvus* abundance in the Amur Bay, ind./m³, by years. Abscissa — Julian days

Fig. 12. Examples of seasonal dynamics for *P. parvus* in the Amur Bay for the years with similar intensity of summer monsoon but different depth of aggregations. Points — data of samplings; lines — results of modeling

Fig. 13. Difference of mean biomass in early-summer season between 1980–1989 and 1998–2009 for mass zooplankton species in the southern Amur Bay, mg/m³