

УДК 551.46.062.5(265.54)

**Ю.И. Зуенко, В.И. Рачков\***

Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр,  
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

### **КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ, СОЛЁНОСТИ И КОНЦЕНТРАЦИЙ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В АМУРСКОМ ЗАЛИВЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ**

Рассмотрены изменения климатического масштаба (> 30 лет) температуры воды, солёности и концентрации минерального фосфора, кремния и азота (нитриты и нитраты) за последние десятилетия в Амурском заливе, на берегах которого находится г. Владивосток. Определён среднемноголетний сезонный ход этих параметров для периодов 1980-х и 2000-х гг. Отмечены тенденции к росту летних температур на поверхности моря, к понижению осенних температур у дна и к снижению летних концентраций биогенных элементов в верхнем слое моря, за исключением нитратов. Проанализированы связи наблюдаемых изменений с внешними условиями, сделан вывод, что основной причиной наблюдаемых климатических изменений в региональном масштабе является ослабление летнего муссона, определяющего погодные условия в Приморье и кросс-шельфовый водообмен.

**Ключевые слова:** климатические изменения, летний муссон, температура воды, солёность, биогенные элементы, Амурский залив, Японское море.

**Zuenko Yu.I., Rachkov V.I.** Climatic changes of temperature, salinity and nutrients in the Amur Bay of the Japan Sea // *Izv. TINRO.* — 2015. — Vol. 183. — P. 186–199.

Recent climate-scale (> 3 decades) changes of water temperature, salinity, and concentration of inorganic phosphorus, silicon and nitrogen (nitrites and nitrates) are considered for the Amur Bay where Vladivostok is located ashore. Mean seasonal values of these parameters are determined for the 1980s and 2000s. In summer, the tendencies of climatic scale are noted of SST heightening, temperature at the sea bottom lowering, and nutrients depletion in the upper layer, except of nitrate. In general, the bay becomes more stratified and less productive, on the primary trophic level, but the nitrate income, presumably from atmosphere, prevents the productivity decreasing. Links of the changes with external conditions are analyzed, and the summer monsoon weakening is defined as their main reason that determines weather conditions over Primorye and cross-shelf exchange on its shelf. These processes related with the summer monsoon present the mechanism of large-scale climate changes downscaling to meso-scale level. Besides, there is concluded that the Amur Bay is more vulnerable to marine processes than to terrestrial ones, though it is subjected to the large river discharge.

**Key words:** climate change, summer monsoon, water temperature, salinity, nutrients, Amur Bay, Japan Sea.

---

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

Zuenko Yury I., D.Sc., head of laboratory, e-mail: [zuenko\\_yury@hotmail.com](mailto:zuenko_yury@hotmail.com); Rachkov Vladimir I., researcher, e-mail: [rachkov@tinro.ru](mailto:rachkov@tinro.ru).

## Введение

Прибрежная зона подвержена воздействию природных процессов, типичных как для глубокого моря (адвекция, апвеллинг, перемешивание вод), так и для суши (пресноводный и ионный сток), причём и те, и другие меняются в климатическом масштабе, что предопределяет климатические изменения в прибрежной зоне. Однако существует проблема даунскэйлинга — интерпретации крупномасштабных глобальных и региональных климатических изменений для среднего и мелкого масштабов, а также проблема взаимодействия разнонаправленных изменений, в данном случае изменений нескольких разных процессов на суше и на море, каждое из которых влияет на прибрежную зону по-своему. Насколько зависимы изменения климатического масштаба в небольшом районе от глобальных и региональных изменений, какие из внешних влияний оказывают определяющее воздействие на те или иные компоненты локальной экосистемы? Для решения этих вопросов было выполнено исследование климатических изменений в небольшом районе Японского моря — Амурском заливе, являющемся заливом второго порядка зал. Петра Великого.

Амурский залив находится в северо-западной части зал. Петра Великого, на его восточном побережье расположен г. Владивосток (рис. 1). Протяжённость Амурского

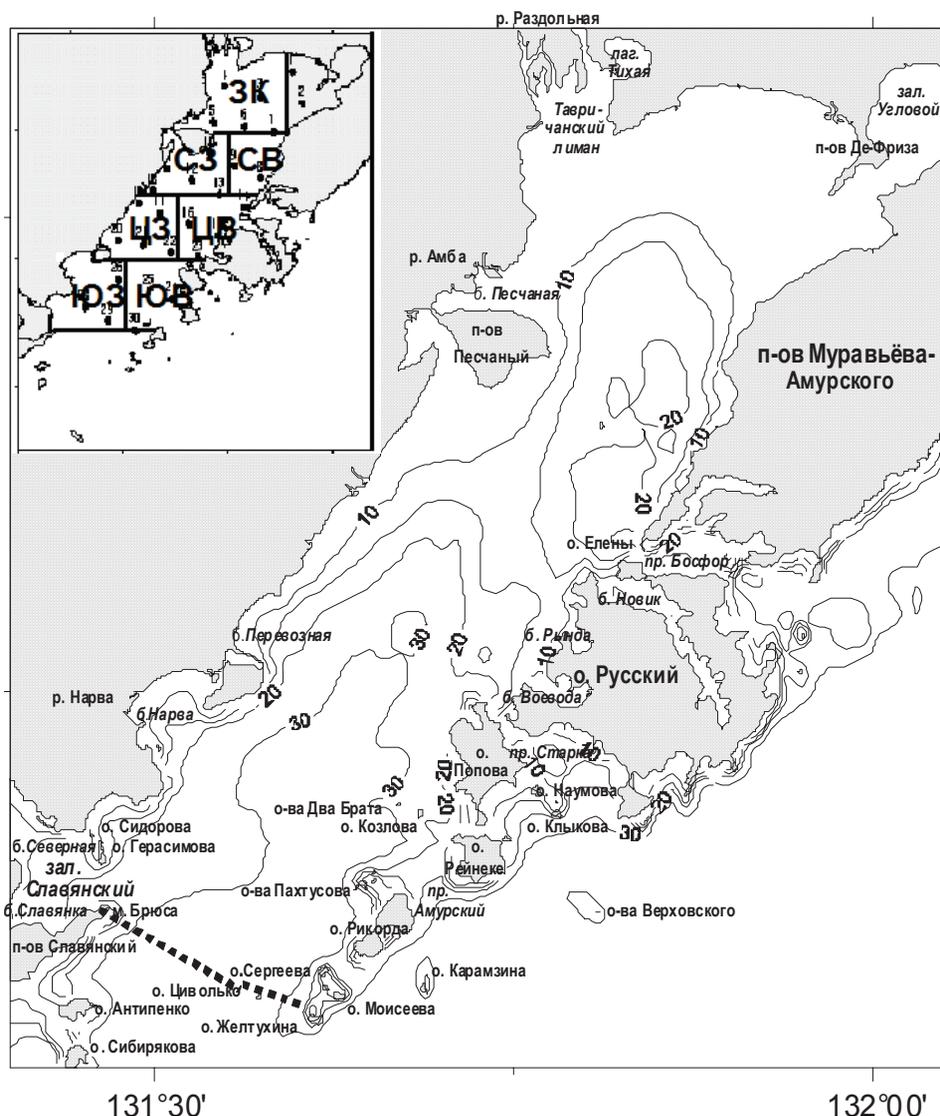


Рис. 1. Амурский залив. На врезке: схема пространственного осреднения данных  
Fig. 1. The Amur Bay and scheme of spatial averaging of data

залива в направлении с юго-запада на северо-восток составляет около 70 км при ширине 10–22 км (в среднем 15 км), площадь — 331 миля<sup>2</sup>, т.е. 1136 км<sup>2</sup> (Гомоюнов, 1927). На юге и юго-востоке Амурский залив соединяется с открытыми водами зал. Петра Великого 8 проливами общей шириной 20,8 км, которые обеспечивают водообмен залива с морем. На севере в Амурский залив впадает одна из крупнейших рек южного Приморья — р. Раздольная, сбрасывающая в него в среднем 2,1 км<sup>3</sup> пресной воды ежегодно; внешний эстуарий этой реки занимает почти всю северную треть залива.

### Материалы и методы

Для оценки современных климатических изменений в Амурском заливе использованы океанологические и гидрохимические данные, полученные на этой акватории в течение последних трёх десятилетий, т.е. начиная с 1980-х гг. В этот период в заливе сотрудниками ГИНРО были реализованы 4 крупных исследовательских проекта, сопровождавшихся океанологическими и гидрохимическими наблюдениями: программа исследования океанологических основ продуктивности прибрежных вод в 1980-е гг., программа исследования сезонной сукцессии планктонного сообщества и условий формирования промысловых скоплений тихоокеанского кальмара в 1990-е гг., эксперимент по изучению функционирования пелагической экосистемы прибрежных вод в 1998–2000 гг. и мониторинг сообществ ихтиопланктона, с разной интенсивностью выполнявшийся с начала 1990-х гг., а с 2007 г. по настоящее время реализуемый в виде регулярных комплексных съёмок всей акватории залива.

В результате этих усилий собран большой объём информации (тысячи станций), неупорядоченной как в пространстве, так как в разные годы съёмки проводились в разных частях залива, по разной сетке станций, так и во времени, так как в разные годы и сезоны интенсивность наблюдений была разной. Для упорядочивания временных рядов данные о температуре, солёности и концентрациях минеральных форм фосфора, кремния и азота разделены по участкам размером примерно 6 х 6 миль (рис. 1, врезка), пространственная изменчивость внутри которых считалась пренебрежимо малой (всего в Амурском заливе выделено 9 таких участков, из которых 2 оказались недостаточно обеспечены данными и были исключены из дальнейшего рассмотрения), и по годам и осреднены для каждого участка помесечно. Затем путём осреднения средних месячных значений за все годы, с учётом дат наблюдений в каждом году, построены графики среднемноголетнего годового хода (рис. 2–7), позволяющие определить среднемноголетние значения на любую дату, и выполнена сезонная декомпозиция всех данных с учётом дат наблюдений. Наконец, статистически оценено сходство межгодового хода полученных аномалий для соседних участков и месяцев, а данные для сходных районов и месяцев объединены в сводные ряды межгодовых изменений, которые анализировались отдельно для поверхностного слоя моря (горизонты 0 и 10 м) и для придонного слоя (горизонты 20 и 30 м). Среднемноголетний ход всех параметров рассчитан также отдельно для периодов 1980–1989 и 1998–2009 гг.

Современную климатическую изменчивость каждого параметра характеризовали знаками и величинами линейных трендов, рассчитанных для последнего 30-летнего периода, т.е. 1980–2013 гг., а также разницей между среднемноголетними величинами, рассчитанными по данным за первое (1980–1989 гг.) и последнее (1998–2009 гг.) десятилетия этого периода.

Для выяснения природы наблюдаемых изменений к анализу привлечены данные об осадках на ГМС Владивосток, полученные на сайте Метеорологического института Нидерландов (<http://climexp.knmi.nl/>), и климатические индексы SHI (индекс Сибирского антициклона: Panagiotopoulos et al., 2005, <http://www.beringclimate.noaa.gov/data/index.php>), NPI (Северо-Тихоокеанский индекс: <http://www.cdg.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.data.html#npmon/>) и Охотский индекс (Шатилина, Анжина, 2011).

В качестве меры статистических связей между рядами использовали коэффициенты линейной корреляции. Значимость трендов и регрессий оценивали путём статистической проверки нулевой гипотезы по распределению Стьюдента.

Рис. 2. Средний за 1980–2013 гг. годовой ход температуры воды на поверхности Амурского залива по участкам, обозначенным на рис. 1

Fig. 2. Mean for 1980–2013 seasonal changes of the sea surface temperature in the Amur Bay, by the areas shown at Fig. 1

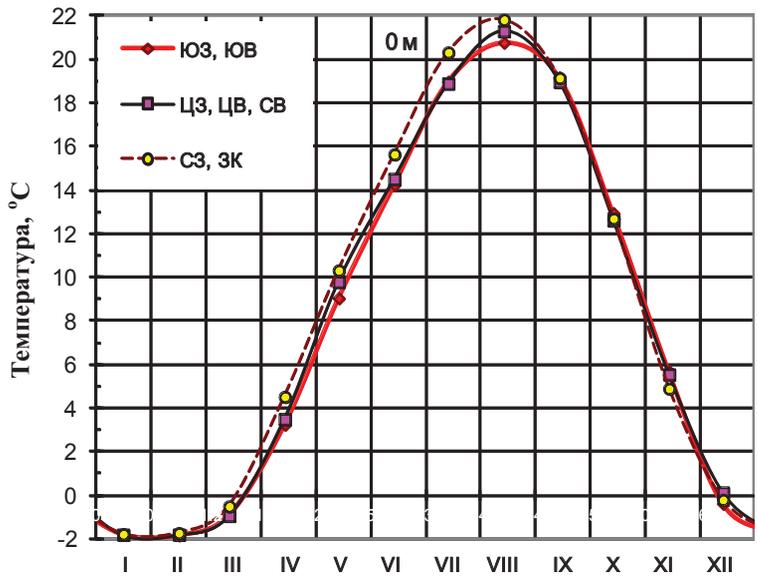


Рис. 3. Средний за 1980–2013 гг. годовой ход солёности на поверхности Амурского залива по участкам, обозначенным на рис. 1

Fig. 3. Mean for 1980–2013 seasonal changes of the sea surface salinity (psu) in the Amur Bay, by the areas shown at Fig. 1

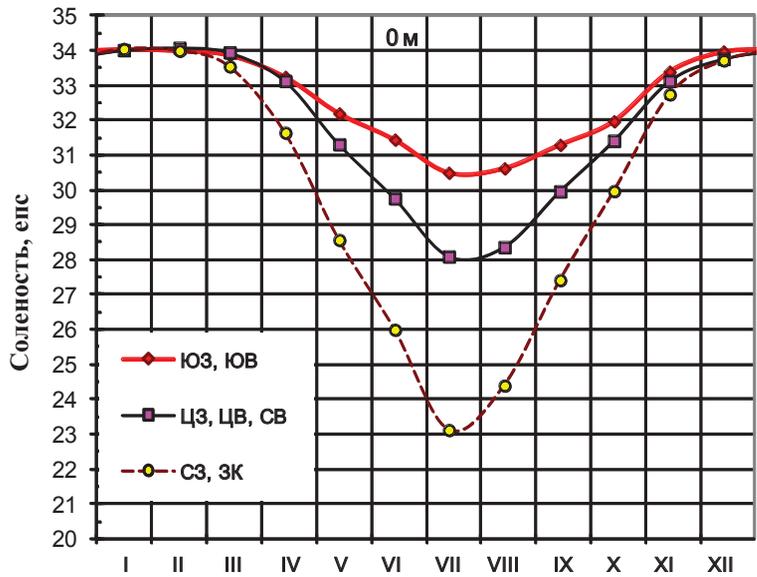
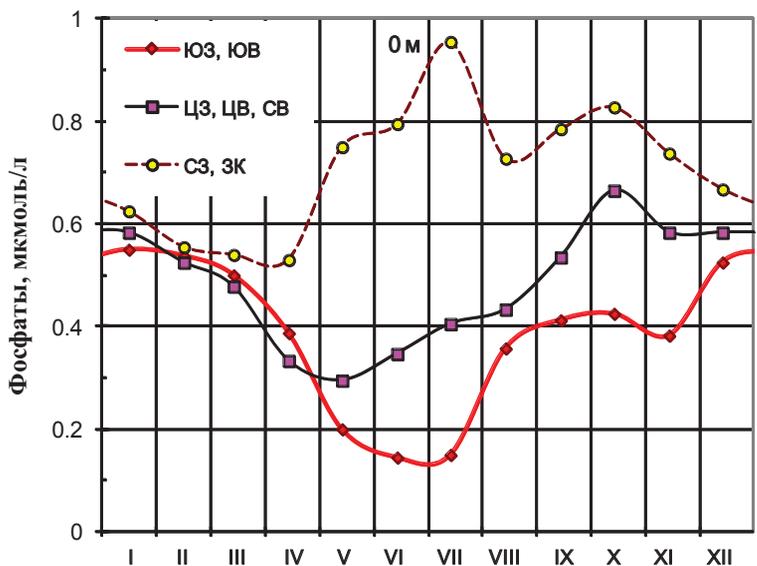


Рис. 4. Средний за 1980–2013 гг. годовой ход концентрации фосфатов на поверхности Амурского залива, осреднённой по участкам, обозначенным на рис. 1

Fig. 4. Mean for 1980–2013 seasonal changes of inorganic phosphorus ( $\mu\text{M/L}$ ) at the sea surface in the Amur Bay, averaged by the areas shown at Fig. 1



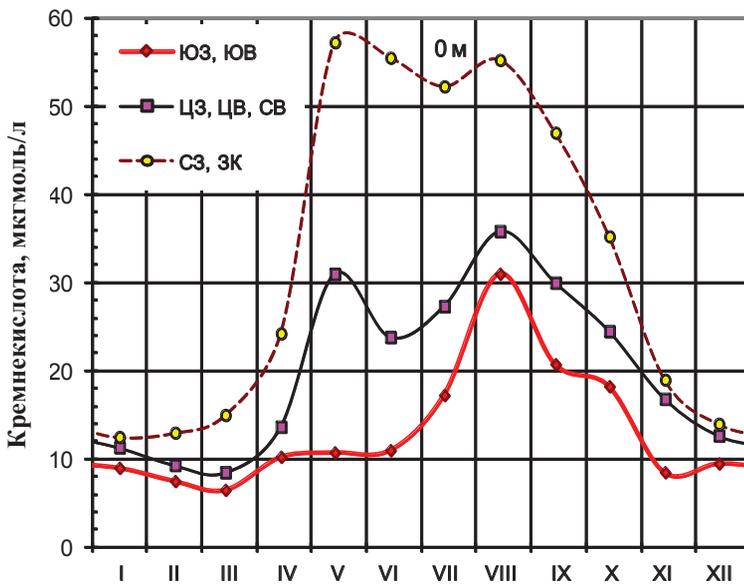


Рис. 5. Средний за 1980–2013 гг. годовой ход концентрации кремния на поверхности Амурского залива, осреднённой по участкам, обозначенным на рис. 1

Fig. 5. Mean for 1980–2013 seasonal changes of inorganic silicon ( $\mu\text{M/L}$ ) at the sea surface in the Amur Bay, averaged by the areas shown at Fig. 1

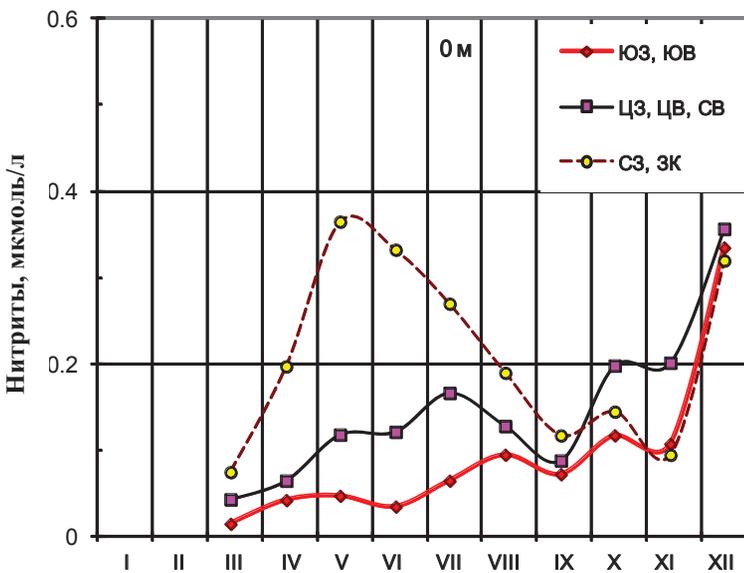


Рис. 6. Средний за 1980–2013 гг. годовой ход концентрации азота на поверхности Амурского залива, осреднённой по участкам, обозначенным на рис. 1

Fig. 6. Mean for 1980–2013 seasonal changes of inorganic nitrogen (nitrite,  $\mu\text{M/L}$ ) at the sea surface in the Amur Bay, averaged by the areas shown at Fig. 1

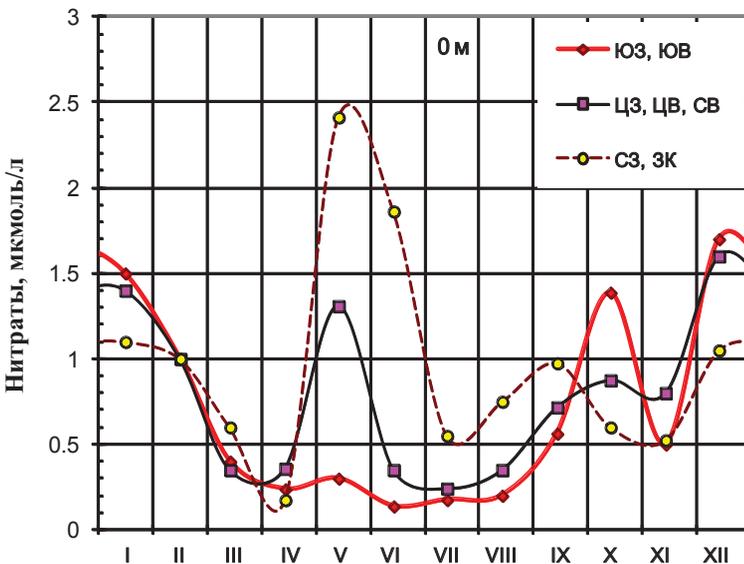


Рис. 7. Средний за 1980–2013 гг. годовой ход концентрации азота на поверхности Амурского залива, осреднённой по участкам, обозначенным на рис. 1

Fig. 7. Mean for 1980–2013 seasonal changes of inorganic nitrogen (nitrate,  $\mu\text{M/L}$ ) at the sea surface in the Amur Bay, averaged by the areas shown at Fig. 1

## Результаты и их обсуждение

### *Особенности сезонной изменчивости концентраций биогенных элементов*

Хотя сезонные изменения не являются основным объектом данного исследования, для корректного выделения межгодовых и климатических изменений их пришлось рассмотреть, а поскольку сезонные изменения концентраций биогенных элементов в Амурском заливе ранее не были представлены в научной литературе на столь обширном, многолетнем материале (в отличие от температуры и солёности), имеет смысл дать краткую характеристику их особенностей.

В поверхностном слое характер сезонных изменений концентраций всех биогенных элементов (см. рис. 4–7) принципиально отличается от изменений температуры и солёности (см. рис. 2–3) — графики сезонного хода имеют несколько максимумов и минимумов, что отражает сложную природу формирования концентраций. При этом сезонный ход на разных участках даже такой небольшой акватории, как Амурский залив, также существенно различен, прежде всего для лета: на одних, более мористых участках летом наблюдается истощение запаса биогенов в поверхностном слое (как это происходит и в открытом море), на других — наоборот, летом наблюдаются максимальные концентрации. Следовательно, выделяются два основных типа сезонного хода: первый характерен для мористых участков залива, особенно ЮВ, а второй свойственен эстуарной зоне р. Раздольной, которая занимает большую часть участка ЗК, и прилегающему к ней участку СЗ, а в центральной части залива проявляется эпизодически (участки СВ, ЦЗ, ЦВ), поэтому при многолетнем осреднении эти участки характеризуются промежуточными концентрациями между мористыми и эстуарными участками.

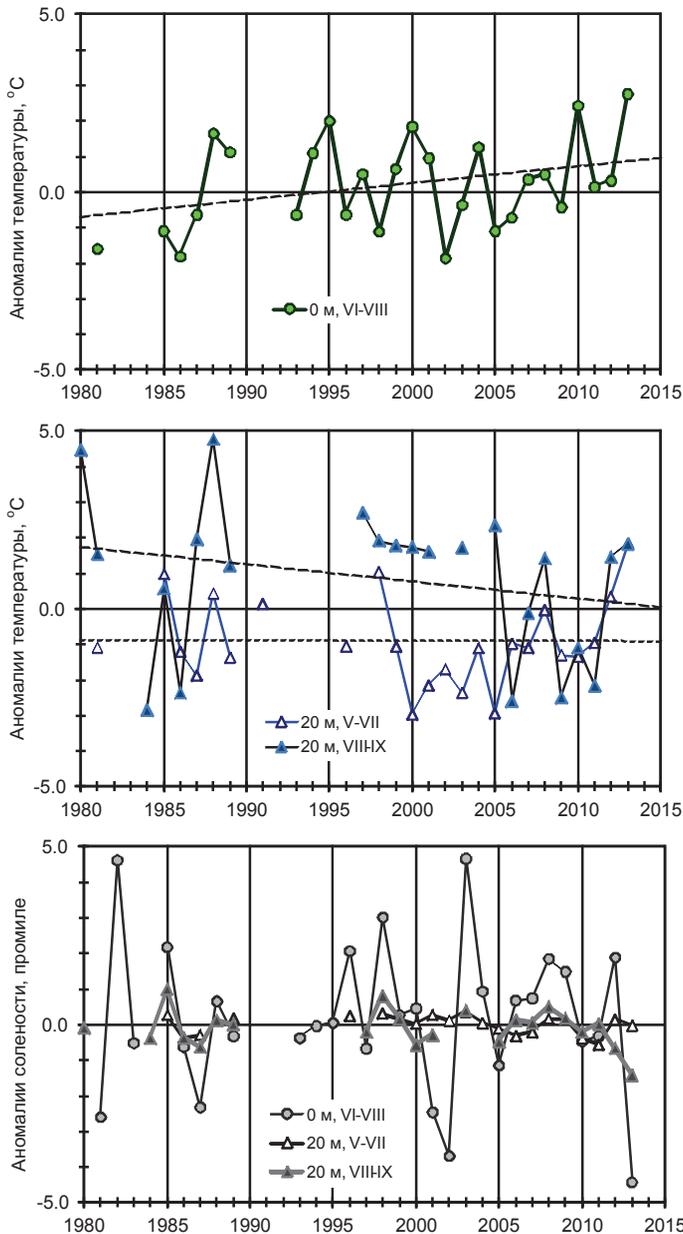
Сезонный ход концентраций биогенных элементов на поверхности мористых участков имеет зимний максимум в декабре-феврале (для кремния слабо выражен, для нитратов не показан из-за недостатка данных), летний минимум в мае-июле (для нитритов — с апреля по август), осенний максимум в августе-октябре (наиболее выражен для кремния) и небольшой осенний минимум в ноябре. От сезонного хода в открытых субполярных водах он отличается осенним ростом концентраций, обусловленным апвеллингами, и последующим их кратковременным снижением в ходе осеннего «цветения». Интересно, что осенний рост концентрации минерального кремния значительно превышает её зимний рост, что, по-видимому, указывает на сезонные различия в солевом составе глубинных шельфовых вод, поднимающихся к поверхности во время апвеллингов в конце лета — осенью и в ходе зимней конвекции. В течение года концентрации всех биогенных элементов на поверхности мористых участков Амурского залива, как правило, ниже, чем на остальных участках.

Сезонный ход концентраций биогенных элементов на поверхности эстуарных участков зимой и ранней весной примерно повторяет их сезонный ход на мористых участках, но начиная с мая концентрации всех элементов здесь резко возрастают и сохраняются на высоком уровне до осени (кремний, фосфор) либо в течение 2–3 мес. (азот). Локализация и время этого максимума однозначно указывают на его природу — это ионный материковый сток, прежде всего из р. Раздольной, воды которой богаты биогенными элементами, особенно кремнием (Важова, Зуенко, 2015). Снижение концентраций азота в середине лета, несмотря на продолжающееся поступление в залив речных вод, связано с развитием новой волны «цветения», характерной только для эстуарных и приэстуарных вод (Зуенко, 2012), при этом концентрации фосфора и кремния снижаются меньше за счет того, что поступление их с терригенным стоком несколько выше, чем потребление.

### *Климатические и межгодовые изменения температуры и солёности*

Только тёплый период года (с мая по сентябрь) обеспечен данными измерений температуры и солёности в достаточной степени, чтобы проследить климатическую и тем более межгодовую изменчивость. При сравнении изменчивости этих показателей в

разные месяцы выяснилось, что изменения происходят сходно на всех участках залива, причём в поверхностном слое моря — во все летние месяцы, а в придонном слое — сходно для мая-июля и августа-сентября. Очевидно, различия между маем-июлем и августом-сентябрём в придонном слое обусловлены принципиальным изменением кросшельфовой циркуляции вод в результате смены муссона, которая обычно происходит в августе: до смены муссона в прибрежной зоне наблюдается даунвеллинг, и температура и солёность в придонном слое в значительной степени зависят от их значений на поверхности моря, а после смены муссона в прибрежной зоне происходит апвеллинг, и температура и солёность в придонном слое зависят от его силы, а также от своих величин в глубинных шельфовых водах. Межгодовые изменения как температуры, так и солёности отличаются большой амплитудой, что не позволяет выделить какие-либо режимные сдвиги, как например, известный для открытых вод Японского моря сдвиг к потеплению в конце 1980-х гг. Однако ряды поверхностной температуры во всех районах имеют статистически значимые положительные тренды, наиболее сильный тренд отмечен для восточной, т.е. мористой, части залива, где он достигает  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$  (рис. 8). Сравнение среднемесячных температур на



поверхности моря, рассчитанных по данным 1980-х и 2000-х гг., также указывает на рост температуры во все месяцы, кроме марта, причём наибольшее потепление отмечено осенью (рис. 9). Напротив, придонные температуры имеют тенденцию к понижению, особенно в конце лета — начале осени, до начала разрушения летней стратификации (рис. 10).

Рис. 8. Межгодовые изменения средних по акватории Амурского залива аномалий температуры и солёности. Показаны линейные тренды для температуры

Fig. 8. Year-to-year changes of temperature and salinity averaged over the Amur Bay. Linear trends of the temperature are shown

Рис. 9. Разности средне-  
месячных значений темпера-  
туры на поверхности Амур-  
ского залива, рассчитанных за  
1980–1989 и 1998–2009 гг.

Fig. 9. Difference of mean  
monthly SST between 1980–1989  
and 1998–2009

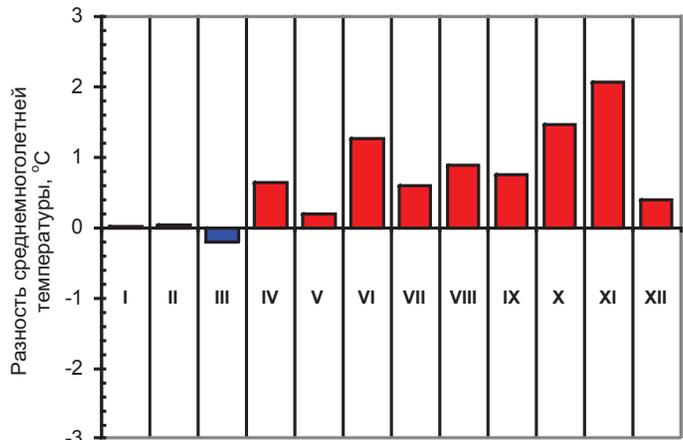
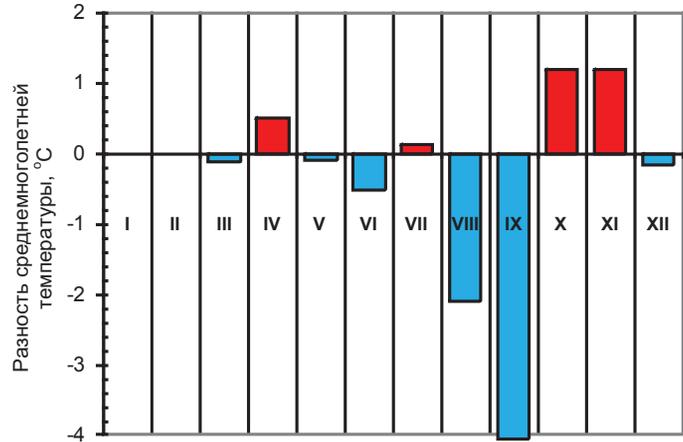


Рис. 10. Разности средне-  
месячных значений темпера-  
туры на глубине 20 м в Амур-  
ском заливе, рассчитанных за  
1980–1989 и 1998–2009 гг.

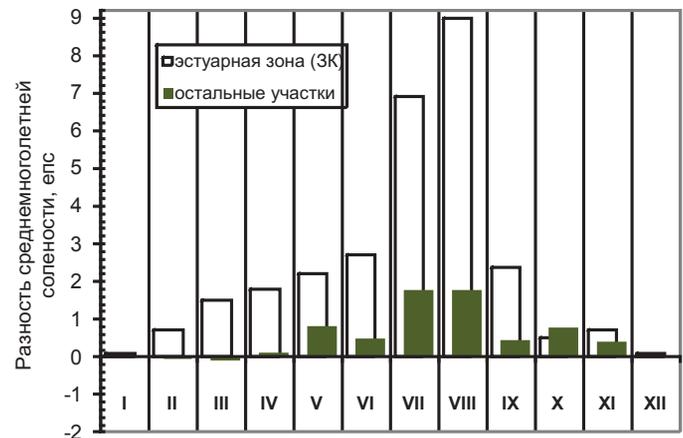
Fig. 10. Difference of mean  
monthly temperature at 20 m  
depth between 1980–1989 and  
1998–2009



Межгодовые изменения солёности на поверхности моря до последнего времени также характеризовались положительным трендом, однако в последние годы эта тенденция сменилась на обратную, что сделало тренд за весь период наблюдений статистически незначимым. Однако и без учёта последних лет рост солёности существенен только для эстуарной зоны (участок ЗК), а в остальной части залива проявляется в гораздо меньшей степени, в основном в летние месяцы (рис. 11). В придонном слое солёность практически не меняется в климатическом масштабе.

Рис. 11. Разности средне-  
месячных значений солёности  
на поверхности Амурского  
залива, рассчитанных за 1980–  
1989 и 1998–2009 гг.

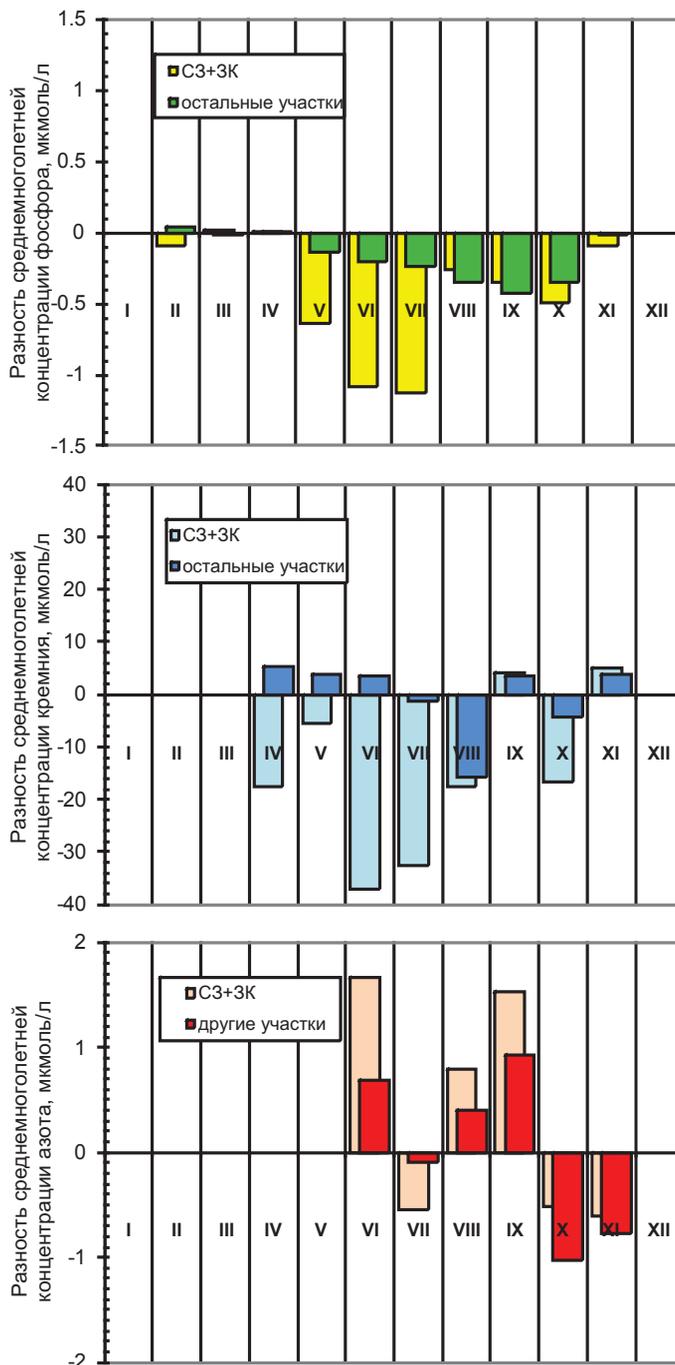
Fig. 11. Difference of mean  
monthly salinity at the sea sur-  
face between 1980–1989 and  
1998–2009



#### Климатические изменения концентрации биогенных элементов

Частые гидрохимические наблюдения в Амурском заливе производились лишь в 1980-е гг. и после 1998 г., что не позволяет рассмотреть межгодовые изменения концентрации биогенных элементов на всём протяжении 30-летнего периода, однако

есть возможность сравнить их среднегодовые концентрации в 1980-е и 2000-е гг. в качестве характеристики климатической изменчивости. Концентрации минерального фосфора, кремния и нитритной формы азота в поверхностном слое моря, где происходит их потребление при фотосинтезе, в последнее десятилетие в целом ниже, чем в 1980-е гг. (рис. 12), в основном за счёт участков, расположенных в эстуарной и



приэстуарной зонах, что означает снижение потенциальной биопродуктивности вод залива. Концентрации этих элементов снизились, хотя в меньшей степени, и в придонном слое залива, т.е. произошло общее уменьшение их оборота, соответствующее снижению продуктивности. Вместе с тем концентрации нитратного азота на поверхности моря в летний период возросли также особенно сильно в эстуарной зоне, что определило знак климатических изменений для азота в целом.

Рис. 12. Разности среднемесячных значений концентраций минерального фосфора (февраль-ноябрь), кремния (апрель-ноябрь) и азота (сумма нитритов и нитратов, июнь-ноябрь) на поверхности Амурского залива, рассчитанных за 1980–1989 и 1998–2009 гг.

Fig. 12. Difference of mean monthly concentration of mineral phosphate (February-November), silicon (April-November), and nitrogen (nitrite+nitrate, June-November) at the sea surface between 1980–1989 and 1998–2009

Наблюдаемая разнонаправленность изменений концентраций биогенных элементов, а точнее отличие тенденции в изменениях концентрации нитратов от тенденции на понижение, общей для всех остальных элементов, означает, что состав питательных солей меняется в климатическом масштабе. В Амурском заливе летом именно азот является элементом, лимитирующим фотосинтез. Поскольку фосфор и тем более кремний содержатся в водах залива в избытке, следует признать, что, несмотря на снижение

потенциальной продуктивности вод залива, наблюдаемые изменения ведут к лучшей сбалансированности состава питательных солей для удовлетворения.

*Механизмы наблюдаемых климатических изменений*

Наблюдаемые в Амурском заливе климатические изменения хорошо согласуются с изменениями климата, происходящими в последние десятилетия в Дальневосточном регионе и на планете вообще. Климат Дальнего Востока России — муссонный и отличается резкими различиями гидрометеорологических процессов в периоды зимнего и летнего муссонов, поэтому изменения следует рассматривать отдельно для зимы и лета, причём для летнего муссона следует различать начальную и конечную фазы, имеющие разную природу. Основные тенденции современных изменений климата в период зимнего муссона обусловлены ослаблением последнего вследствие ослабления Сибирского антициклона; тенденция к ослаблению характерна и для начальной фазы летнего муссона вследствие ослабления Охотского антициклона — эти процессы обусловлены увеличением теплоизолирующих свойств атмосферы («парниковым эффектом»). На фоне этих тенденций глобального масштаба наблюдаются междекадные (между десятилетиями) колебания мощности этих антициклонов (а в Приморье, соответственно, интенсивности зимнего муссона и летнего муссона в начальной фазе), предположительно обусловленные арктической осцилляцией (рис. 13). Интенсивность летнего муссона в конечной фазе определяется распределением атмосферного давления в системе Гавайского антициклона, который также имеет тенденцию к ослаблению и подвержен междекадным колебаниям (рис. 13).

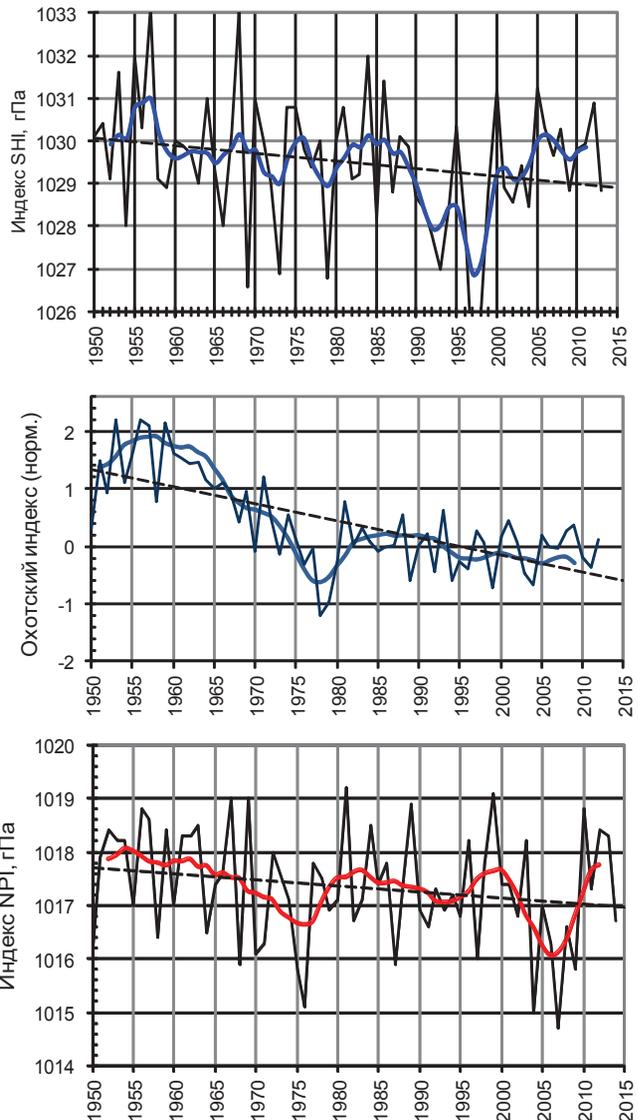


Рис. 13. Межгодовые и климатические изменения индексов интенсивности дальневосточных муссонов: индекса Сибирского антициклона (SHI) за декабрь-февраль, охотского индекса за июнь (нормированные значения, по: Шатилина, Анжина, 2011) и северо-тихоокеанского индекса (NPI) за июль. Показаны результаты 5-летнего скользящего сглаживания и линейные тренды для периода после 1950 г.

Fig. 13. Year-to-year and climatic changes of the indices for Far-Eastern monsoons: Siberian High Index (SHI, hPa) for December-February, Okhotsk Index for June (normalized, from Шатилина, Анжина, 2011), and North-Pacific Index (NPI, hPa) for July. Five-year smoothing and linear trends are shown

Ослабление и зимнего, и летнего муссонов обуславливает положительные тенденции в изменении температуры воздуха над Японским морем и Приморьем и ещё более ярко проявляется в росте температуры воды на поверхности моря летом, когда положительный эффект от ослабления ветра даже важнее, чем эффект от роста температуры воздуха. Сильный летний прогрев поверхностного слоя моря препятствует вертикальному теплообмену в толще воды и таким образом способствует сохранению низких температур в придонном слое, в результате чего формируется тенденция к понижению температуры этого слоя. Другим фактором, способствующим усилению летней стратификации вод, является ослабление муссонных ветров: при сильных нагонных ветрах вся толща вод в Амурском заливе к концу лета занята поверхностной водной массой, верхний бентический фронт находится на глубинах более 50 м, за пределами залива, но в условиях слабого летнего муссона в придонном слое залива на глубинах более 20–30 м сохраняется холодная и солёная глубинная шельфовая водная масса.

Годовое количество осадков в южном Приморье (основная часть которых выпадает летом) не имеет статистически значимого тренда (рис. 14), но в 1990–2000-е гг. наблюдалась тенденция к увеличению количества зимних осадков, что явилось естественным следствием ослабления зимнего муссона. Так, среднее количество осадков в январе-апреле в период 1998–2009 гг. превысило среднее количество осадков в тот же сезон 1980–1989 гг. в 1,3 раза. Однако эти изменения в количестве осадков не привели к снижению солёности в Амурском заливе, даже в приэстуарной зоне, более того — в летние месяцы наблюдается тенденция к её росту. Этот факт указывает на то, что даже в полузакрытой прибрежной акватории залива солёность не вполне определяется материковым стоком, на неё могут влиять и такие процессы, как испарение (которое усиливается с ростом температуры) и водообмен с открытым морем. В частности, можно предположить, что росту солёности способствовало большее, чем ранее, распространение солёных глубинных вод у дна в зал. Петра Великого, включая Амурский залив, в 2000-е гг., обусловленное слабым летним нагоном (Budaeva et al., 2013).

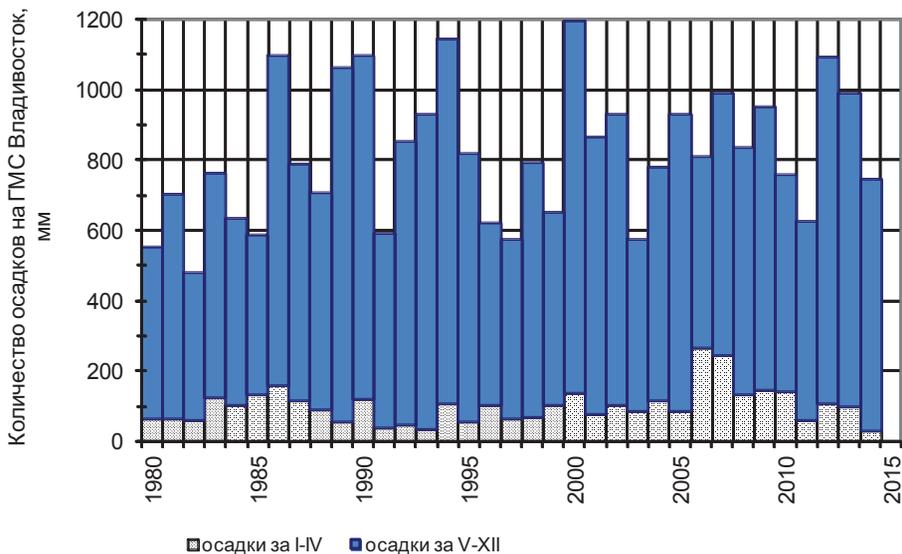


Рис. 14. Межгодовые изменения количества осадков на ГМС Владивосток в холодные и тёплые месяцы

Fig. 14. Year-to-year changes of precipitations in Vladivostok for cold and warm months

В условиях резкой летней стратификации вод не только ослабляется поток тепла с поверхности моря в глубинные слои, следствием чего стало понижение температуры у дна, но и затрудняется поступление биогенных элементов из глубинных слоёв моря в освещённый поверхностный слой, где они участвуют в процессе синтеза нового органического вещества. Именно этим можно объяснить

наблюдаемые тенденции к снижению летних концентраций биогенных элементов (кроме нитратов) в поверхностном слое Амурского залива, особенно для фосфатов, для которых вертикальный солеобмен является основным механизмом поставки в фотический слой. В эстуарной зоне на севере залива снижение концентраций биогенных веществ более заметно в начале лета, т.е. до начала летнего паводка, а в конце лета, когда возрастает вклад терригенного ионного стока, эта тенденция несущественна.

Наблюдаемый рост концентраций нитратов (а следовательно и обеспеченности фотосинтеза азотом в целом) явно не связан с обоими этими механизмами поставки питательных солей в фотический слой моря и обусловлен каким-то другим источником азота, значение которого для Амурского залива пока не исследовано. Можно предположить, что этот источник находится вне моря и суши, т.е. сред, в которых происходящие климатические изменения способствуют снижению, а не росту концентраций биогенных элементов, а именно — в атмосфере. В последние годы появились сообщения о значительном загрязнении атмосферы над Восточной Азией промышленными выбросами, в составе которых имеется и большое количество соединений азота. Попадая в море вместе с загрязнёнными осадками — «кислотными дождями», — они служат хорошим пополнением запасов азота. В загрязнённых районах поток азота из атмосферы в море сопоставим с традиционными источниками минерального азота — вертикальным водообменом и терригенным стоком. Так, для Восточно-Китайского моря с наиболее загрязнённой атмосферой вклад атмосферного источника нитратов в баланс минерального азота оценивается равным вкладу ионного стока крупнейшей реки — Янцзы, притом что воды Янцзы также весьма загрязнены (Nakamura et al., 2005). Поток нитратов, а также аммония из атмосферы в океан усиливается по мере промышленного развития стран Восточной Азии: за период с 1980 по 2003 г. этот поток в окраинные моря СЗТО вырос в 1,8–2,4 раза (Uno et al., 2007). В пределах Японского моря, согласно модельным расчётам (Onitsuka et al., 2009), больше всего нитратов поступает из атмосферы в прибрежные воды Японии и Южной Кореи ( $> 600 \text{ кг N/км}^2 \text{ год}$ ), однако их поступление в воды зал. Петра Великого оценивается также как значительное ( $300\text{--}400 \text{ кг N/км}^2 \text{ год}$ , т.е.  $1,1\text{--}1,4 \text{ мкмоль/л}$  в год), обеспечивающее порядка 10 % годовой первичной продукции. Ещё больше атмосферных нитратов поступает с осадками на территорию северо-восточных провинций Китая, где находится водосбор р. Раздольной. Поэтому неудивительно, что в Амурском заливе наибольший рост нитратов отмечен в его кустовой части, куда впадает эта река. Характерно также то, что рост концентрации нитратов в поверхностном слое Амурского залива наблюдается в летние месяцы, когда на акваторию залива поступают воздушные массы со стороны п-ова Корея и Японии.

Формирование нового крупного источника нитратов резко изменило соотношение между биогенными элементами в фотическом слое Амурского залива. Если раньше за пределами эстуарных зон в течение летнего сезона фотосинтез лимитировался недостатком азота, концентрации которого были близки к нулю, то в последние годы азот, в основном в форме нитритов, присутствует в фотическом слое постоянно (на рис. 7 представлена некая средняя ситуация). В результате соотношение молярных концентраций азота и фосфора возросло и, хотя в среднем оно по-прежнему ниже оптимального для фотосинтеза отношения  $16 : 1$ , локально может превосходить его (с учётом всех форм азота) не только зимой, когда большая часть азота восстанавливается за счет процессов окисления, а приток терригенных фосфатов ослабевает, но и в период летней межени (рис. 15). В этих случаях фотосинтез в водах залива уже не лимитируется недостатком азота. Примечательно, что в придонном слое залива характер сезонных изменений азот-фосфорного отношения не изменился, хотя азота тоже стало несколько больше, что ещё раз указывает на то, что наблюдаемый рост концентраций нитратов на поверхности моря не связан с круговоротом биогенных элементов в море, а имеет иную природу.

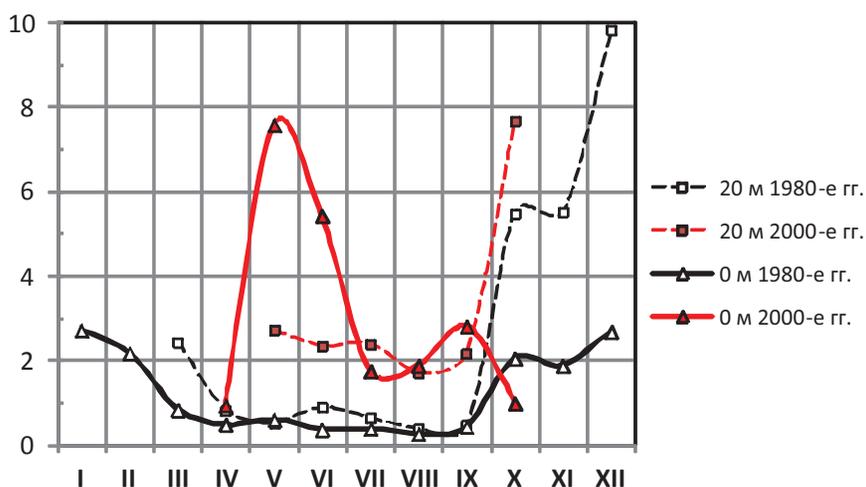


Рис. 15. Средние месячные соотношения молярных концентраций ионов  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{PO}_4^{3-}$  на поверхности моря и на глубине 20 м в Амурском заливе, осреднённые по всей акватории залива за период 1980–1989 и 1998–2009 гг.

Fig. 15. Mean monthly ratio of molar concentrations  $\text{NO}_3^-/\text{PO}_4^{3-}$  at the sea surface and at the depth 20 m averaged for the entire Amur Bay in the 1980–1989 and 1998–2009

### Заклучение

Современные климатические изменения в регионе Северо-Восточной Азии, для которых характерно ослабление зимнего и летнего муссонов, обуславливают изменения погодных условий в районе Амурского залива, способствующие росту температуры воды на поверхности моря, усилению летней стратификации вод, ослаблению летних нагонов и, следовательно, понижению температуры воды у дна залива из-за затруднения вертикального теплообмена и уменьшения толщины слоя поверхностных вод. При этом значимых тенденций в изменениях солёности вод Амурского залива в климатическом масштабе не наблюдается, хотя межгодовые изменения солёности на поверхности моря хорошо коррелируют с изменениями количества осадков. Предполагается, что некоторое усиление распреснения поверхностного слоя залива материковым стоком компенсируется ростом испарения и ростом солёности в придонном слое из-за ослабления летней кросс-шельфовой циркуляции вод. Однако эти физические естественные последствия климатических изменений для экосистемы залива уже на уровне гидрохимических основ продуктивности вод становятся неоднозначными. Усиление летней стратификации вод снижает продуктивность в летний период, поскольку препятствует поступлению биогенных элементов в фотический слой моря, но явное снижение концентраций в верхнем слое наблюдается только для фосфатов и нитритов, в то время как концентрации кремния снижаются не во все летние месяцы, что, вероятно, связано с усилением материкового стока, а концентрации нитратов, наоборот, растут, и причина этому видится в появлении нового значимого источника азота — атмосферы, загрязнённой промышленными выбросами. Вместе с тем именно недостаток азота лимитирует (во всяком случае, лимитировал раньше) фотосинтез за пределами эстуарных зон в летний сезон, т.е. улучшение обеспечения азотом более значимо для первичной продуктивности, чем ухудшение обеспечения другими биогенными элементами.

Таким образом, экосистема Амурского залива даже в своей абиотической части оказалась достаточно сложна, чтобы не реагировать однозначно на происходящие потенциально неблагоприятные для неё изменения летних условий, обусловленные потеплением климата. «Сигнал», генерируемый глобальными процессами, искажается, экосистема демпфирует влияние изменений климата таким образом, что их последствия отражают не столько характер внешнего воздействия, сколько характер внутрисистемных взаимодействий. Существенно также то, что экосистема Амурского залива не про-

являет сильной зависимости от процессов, связанных с сушей, таких как материковый сток, несмотря на то что этот залив полузакрытый и в него впадает крупная река.

Таким образом, пока нет оснований полагать, что современные изменения климата неблагоприятны для океанологических основ продуктивности вод Амурского залива, хотя они привели к существенному потеплению последних.

### Список литературы

**Важова А.С., Зуенко Ю.И.** Особенности распределения биогенных элементов вдоль градиента солёности в эстуариях рек Суходол и Раздольная (залив Петра Великого, Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2015. — Т. 180. — С. 226–235.

**Гомоюнов К.А.** Гидрологический очерк Амурского залива и реки Суйфун // Производительные силы Дальнего Востока. — Владивосток : Кн. дело, 1927. — Вып. 2. — С. 74–91.

**Зуенко Ю.И.** Сроки «цветения» в заливе Петра Великого (Японское море) // Вопр. про-мысл. океанологии. — 2012. — Вып. 9, № 1. — С. 153–170.

**Шатилина Т.А., Анжина Г.И.** Изменчивость интенсивности дальневосточного муссона в 1948–2010 гг. // Изв. ТИНРО. — 2011. — Т. 167. — С. 146–159.

**Budaeva V.D., Zuenko Y.I., Makarov V.G.** Water structure and dynamics in Peter the Great Bay in conditions of strong summer desalination (2008–2009) // Pacific Oceanography. — 2013. — Vol. 6, № 1. — P. 10–17.

**Nakamura T., Matsumoto K., Uematsu M.** Chemical characteristics of aerosols transported from Asia to the East China Sea: an evaluation of anthropogenic combined nitrogen deposition in autumn // Atmos. Environ. — 2005. — Vol. 39. — P. 1749–1758.

**Onitsuka G., Uno I., Yanagi T., Yoon J.-H.** Modelling the effects of atmospheric nitrogen input on biological production in the Japan Sea // J. Oceanography. — 2009. — Vol. 64. — P. 433–438.

**Panagiotopoulos F., Shahgedanova M., Hannachi A., Stephenson D.B.** Observed trends and teleconnections of the Siberian High: a recently declining center of action // J. Climate. — 2005. — Vol. 18, № 1. — С. 1411–1422.

**Uno I., Uematsu M., Hara Y. et al.** Numerical study of the atmospheric input of anthropogenic total nitrate to the marginal seas in the western North Pacific region // Geophys. Res. Lett. — 2007. — Vol. 34. — L. 17817.

*Поступила в редакцию 1.06.15 г.*