

УДК 551.464.797.9(265.54)

А.Д. Жарова<sup>1</sup>, Ю.И. Зуенко<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет,  
195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98;

<sup>2</sup> Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр,  
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

### СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХЛОРОФИЛЛА *a* В АМУРСКОМ ЗАЛИВЕ (ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

С помощью океанологического зонда-профилометра, оснащенного флюориметром, прослежены изменения профилей хлорофилла *a* на всей акватории Амурского залива в течение мая-октября 2017 г. Выявлено два принципиально разных типа вертикального распределения хлорофилла *a*, обусловленных разными механизмами продуктивности вод: в северной части залива, занятой эстуарными водами, концентрация хлорофилла *a* максимальна в приповерхностном слое и убывает с глубиной, а в южной части залива, свободно сообщаемой с открытым морем, максимальные концентрации хлорофилла *a* наблюдаются ниже сезонного пикноклина. Наибольшие величины концентраций в зоне эстуарного типа отмечены в июле-августе, во время летнего муссонного паводка на реках Приморья, а в области морского типа — в сентябре, что обусловлено развитием прибрежного апвеллинга после смены муссона. Сравнение полученных результатов с оценками концентрации хлорофилла *a*, полученными по данным спутниковых цветных сканеров, показало, что за пределами эстуарных зон спутниковые оценки не отражают обилие хлорофилла *a* в подповерхностном слое моря и его сезонные изменения, поэтому их использование может приводить к недооценке реальной продуктивности и трофности акваторий.

**Ключевые слова:** хлорофилл, вертикальный профиль, эстуарий, пикноклин, сезонная изменчивость, муссонный паводок, прибрежный апвеллинг, Амурский залив.  
DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-183-189.

**Zharova A.D., Zuenko Yu.I.** Seasonal changes of vertical profiles of chlorophyll *a* in the Amur Bay (Japan Sea) // *Izv. TINRO*. — 2018. — Vol. 193. — P. 183–189.

Seasonal changes of chlorophyll *a* profiles are traced over the Amur Bay (Peter the Great Bay, Japan Sea) in May-October, 2017 by means of oceanographic sonde-profiler equipped with fluorometer. Two principally different types of the vertical profiles are revealed, which were formed by different mechanisms of productivity: i) Chl *a* concentration had the maximum at the sea surface and decreased with the depth in the internal part of the bay occupied by the estuarine waters, and ii) Chl *a* concentration had the maximum below the seasonal pycnocline in the external part of the bay connected with the open sea. The highest Chl *a* concentration was observed in July-August for the estuarine type because of summer monsoon flood on the rivers, but in September for the marine type because of the

---

\* Жарова Александра Дмитриевна, студентка, e-mail: zharovasasha94n@yandex.ru;  
Зуенко Юрий Иванович, доктор географических наук, заведующий лабораторией, e-mail: zuenko\_yury@hotmail.com.

Zharova Alexandra D., student, e-mail: zharovasasha94n@yandex.ru; Zuenko Yury I., D.Sc., head of laboratory, e-mail: zuenko\_yury@hotmail.com.

coastal upwelling induced by monsoon winds change. Comparing these results with estimations of Chl *a* concentration made with the satellite data, insufficient correspondence is concluded for the external part of the bay, outside the estuarine zone, because the satellite data don't reflect well the chlorophyll *a* in the subsurface layer and its seasonal variations. Thus, underestimation of real productivity and feeding ability of marine areas is available with the satellite data on chlorophyll *a*.

**Key words:** chlorophyll, vertical profile, estuary, pycnocline, seasonal variability, monsoon flood, coastal upwelling, Amur Bay.

## Введение

Хлорофилл *a* — основной фотосинтезирующий пигмент зеленых растений, в том числе одноклеточных водорослей (фитопланктона). По данным о концентрации хлорофилла *a* и ее изменчивости во времени можно судить о биомассе фитопланктона и его продукции, о трофности водоема, а также о приемной емкости водоема, т.е. возможности его использования для марикультуры (Гаврилова, Кучерявенко, 2011). В настоящее время концентрации хлорофилла *a* все чаще оценивают с помощью спутниковых данных, однако эти данные применимы только к приповерхностному слою моря, а характер вертикального распределения хлорофилла для большинства акваторий, включая Японское море, исследован недостаточно.

Целью работы было определение закономерностей сезонных изменений вертикальной структуры концентраций хлорофилла *a* в Амурском заливе Японского моря, где они ранее не исследовались. Для Амурского залива такие исследования актуальны еще и потому, что в этой эвтрофной акватории избытки фитопланктона, которые не потреблены фитофагами, оседают на дно, и активное окисление накапливающегося у дна органического вещества приводит к гипоксии в придонном слое моря в летний период (Тищенко и др., 2011). В перспективе на основе полученных результатов по мере накопления рядов данных может быть определена эмпирическая зависимость общего обилия фитопланктона от его концентрации на поверхности моря, с помощью которой данные о хлорофилле *a*, получаемые со спутников, могут быть интерпретированы для практического применения в морской экологии.

## Материалы и методы

Данные для анализа собраны в серии морских экспедиций с помощью зонда-профилометра Rinko-Profilier ASTD102 (Япония). Измерения выполнялись ежемесячно с мая по октябрь 2017 г. на всей акватории Амурского залива на 16 станциях, расположение которых представлено на рис. 1.

Показания флюориметра зонда пересчитывали в реальные концентрации хлорофилла *a* с помощью калибровочного уравнения. Это уравнение линейной регрессии статистического соотношения между средними в верхнем 0,5-метровом слое концентрациями хлорофилла *a*, измеренными флюориметром зонда, и концентрациями хлорофилла *a* в пробах воды, отобранных с поверхности моря на тех же станциях, где проводилось зондирование. Определение концентраций хлорофилла *a* в пробах выполнено в лабораторных условиях стандартным методом по ГОСТ 17.1.4.02-90. Коэффициент детерминации линейной аппроксимации связи составил  $r^2 = 0,82$ .

При анализе характера вертикального распределения хлорофилла *a* вертикальные профили его концентрации, измеренные с высокой дискретностью, предварительно сглаживали скользящим осреднением с целью удаления микрофлюктуаций с масштабом менее 1 м, которые не являлись предметом исследования.

Для характеристики концентраций хлорофилла *a* в поверхностном слое моря использованы композитные 8-дневные спутниковые снимки с пространственным разрешением 4 км для квадрата с десятичными координатами 42,8125–42,9375° с.ш. 131,4792–131,8952° в.д., соответствующего южной части Амурского залива, за период с 15 апреля по 24 октября 2017 г., полученные на сайте [http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com\\_csw&view=details&product\\_id=OCEANC-](http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=OCEANC-)

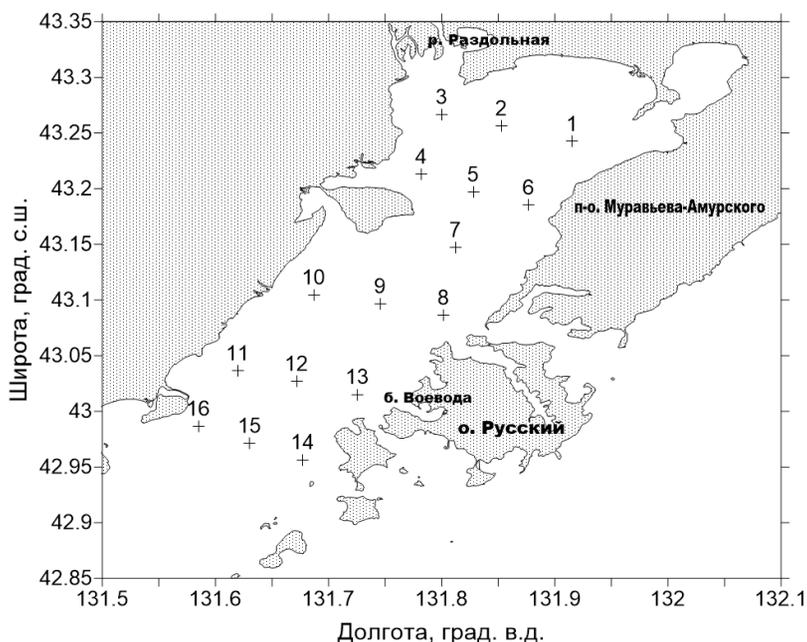


Рис. 1. Схема расположения станций съемки в Амурском заливе  
 Fig. 1. Scheme of the surveys stations in the Amur Bay

OLOUR\_GLO\_CHL\_L4\_NRT\_OBSERVATIONS\_009\_033. К сожалению, для северной части Амурского залива не удалось получить данные спутниковых наблюдений в количестве, пригодном для анализа, по-видимому, из-за частых туманов на этой акватории.

### Результаты и их обсуждение

По данным измерений обнаружилось, что вертикальные профили хлорофилла *a* в пределах исследованного района весьма разнообразны. Тем не менее по сходству мезомасштабных особенностей профилей удалось выявить два основных типа его вертикального распределения (рис. 2, 3). Для первого типа характерно наличие поверхностного либо приповерхностного максимума концентрации хлорофилла *a* и в целом убывание его концентрации с глубиной, иногда с небольшим локальным максимумом в слое скачка плотности. Для второго типа характерно отсутствие поверхностного максимума и рост концентрации хлорофилла *a* с глубиной, при этом максимум концентрации располагается ниже скачка плотности. В чистом виде эти типы наблюдаются соответственно в северной части Амурского залива, занятой эстуарными водами, и в южной его части, свободно сообщаемой с открытым морем, поэтому их можно определить как эстуарный и морской типы. Между участками с ярко выраженными основными типами располагается переходная зона, которая может занимать большую часть Амурского залива. Для нее характерна тенденция убывания концентраций хлорофилла *a* с глубиной, но поверхностный максимум отсутствует, а наблюдаются один или несколько локальных максимумов выше пикноклина, в пикноклине и ниже пикноклина.

Формирование двух различных типов вертикальной структуры хлорофилла *a* в Амурском заливе обусловлено принципиально разной их природой. Первый тип формируется во внешнем эстуарии р. Раздольной, которая выносит в море пресную воду, богатую биогенными элементами. Смешиваясь с морской водой, речной сток образует тонкий приповерхностный слой низкой солености, в котором и образуется максимум концентраций хлорофилла *a*, либо у самой поверхности моря, либо на нижней границе приповерхностного слоя, куда содержащиеся хлорофилл клетки оседают под действием силы тяжести. Глубина расположения этого максимума определяется толщиной при-

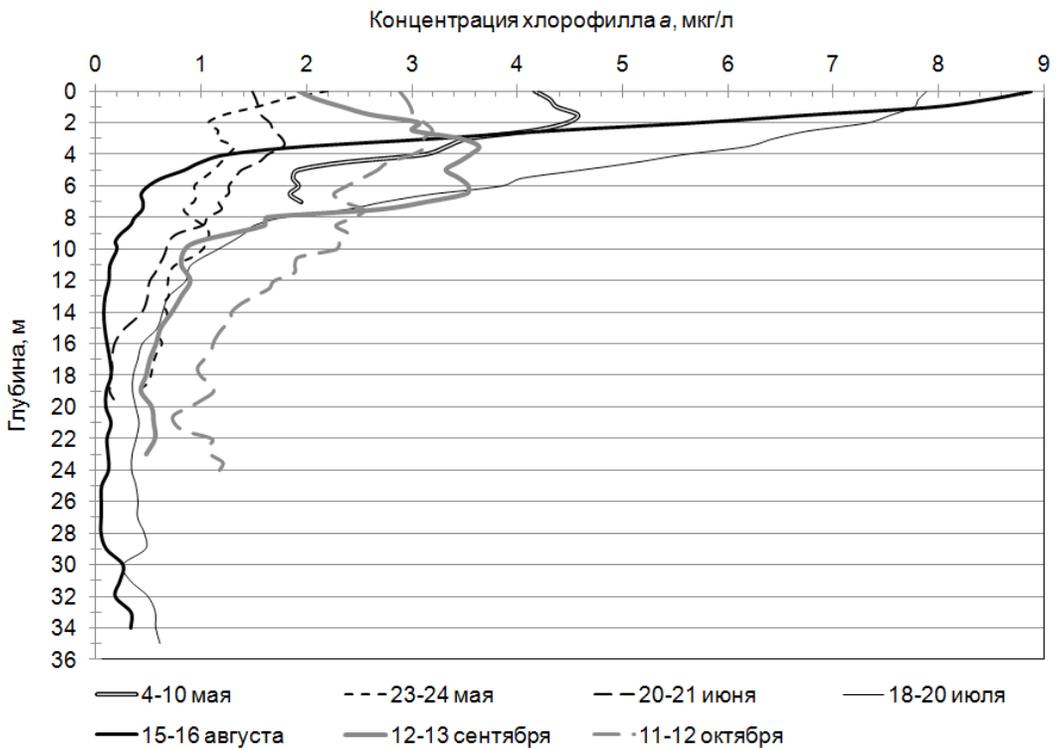


Рис. 2. Средние по съемкам вертикальные профили концентрации хлорофилла *a* эстуарного типа, наблюдаемые в северной части Амурского залива в мае-октябре 2017 г.

Fig. 2. Vertical Chl *a* profiles of the estuarine type observed in the northern Amur Bay, averaged by surveys from May to October, 2017

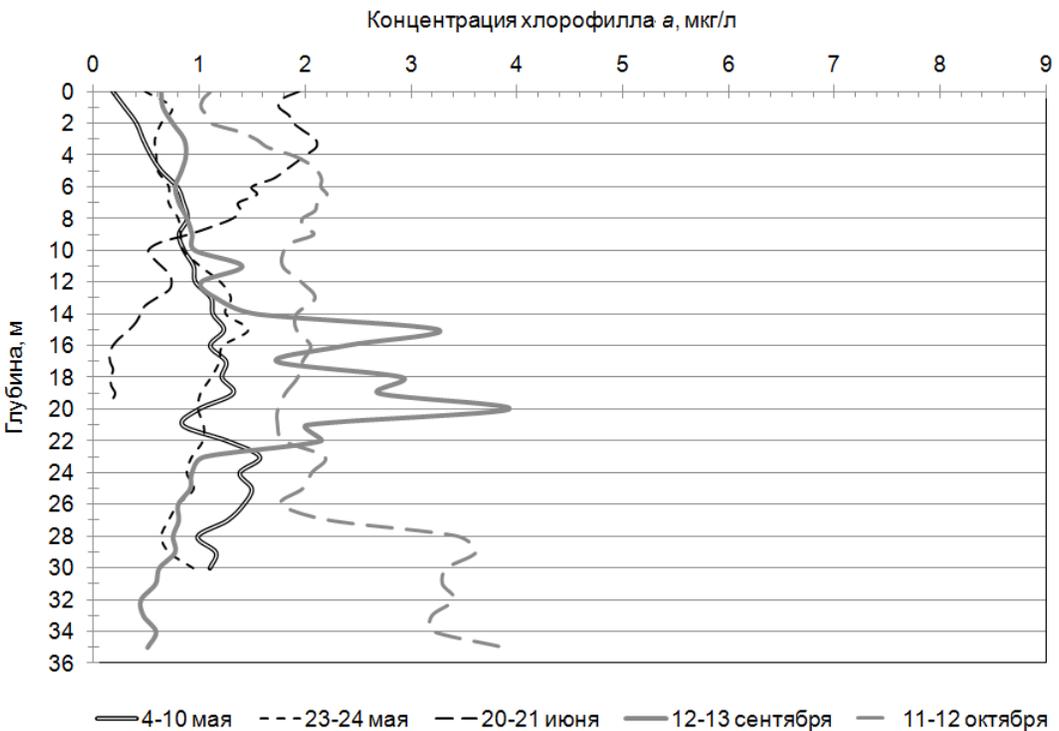


Рис. 3. Средние по съемкам вертикальные профили концентрации хлорофилла *a* морского типа, наблюдаемые в южной части Амурского залива в мае-октябре 2017 г.

Fig. 3. Vertical Chl *a* profiles of the marine type observed in the southern Amur Bay, averaged by surveys from May to October, 2017

поверхностного слоя и может достигать 2–4 м. Второй тип формируется в открытой части залива и, по-видимому, характерен для открытого моря, где обеспечение фотосинтеза биогенными элементами происходит снизу, за счет обменных процессов через пикноклин. Поэтому наиболее благоприятные условия для развития фитопланктона в зоне второго типа складываются в нижней части пикноклина.

Области распространения обоих типов вертикального распределения хлорофилла *a* неустойчивы. Эстуарный тип постоянно наблюдается только вблизи устья р. Раздольной (см. рис. 1, станции 1–3). От весны к середине лета происходит расширение области эстуарного типа практически на всю акваторию Амурского залива (в июле-августе морской тип в пределах съемки не отмечен), а с началом осени граница его распространения отступает назад на север.

Величины концентрации хлорофилла *a* в эстуарной зоне очень изменчивы. Летом, по мере увеличения стока р. Раздольной, которая питается в основном муссонными дождями, происходит рост глубины расположения максимума концентрации хлорофилла *a* и увеличение самих максимальных значений. Соответствие глубины максимальной концентрации толщине распресненного приповерхностного слоя хорошо видно при рассмотрении сезонных изменений вертикальных профилей удельной плотности воды в этой зоне (рис. 4). За пределами эстуарной зоны значения концентрации хлорофилла *a* меняются гораздо меньше, причем с глубиной изменчивость уменьшается. Основные изменения профиля хлорофилла *a* здесь связаны с изменением глубины максимальной концентрации. Так, в начале мая максимальная концентрация хлорофилла *a* отмечена на глубине 19 м, в конце мая — 15 м, а в июне — 26 м. Сопоставление изменений положения максимума концентрации хлорофилла *a* в этой зоне с изменениями вертикального профиля плотности показало, что глубина максимальной концентрации соответствует глубине максимального градиента плотности в сезонном пикноклине (рис. 4).

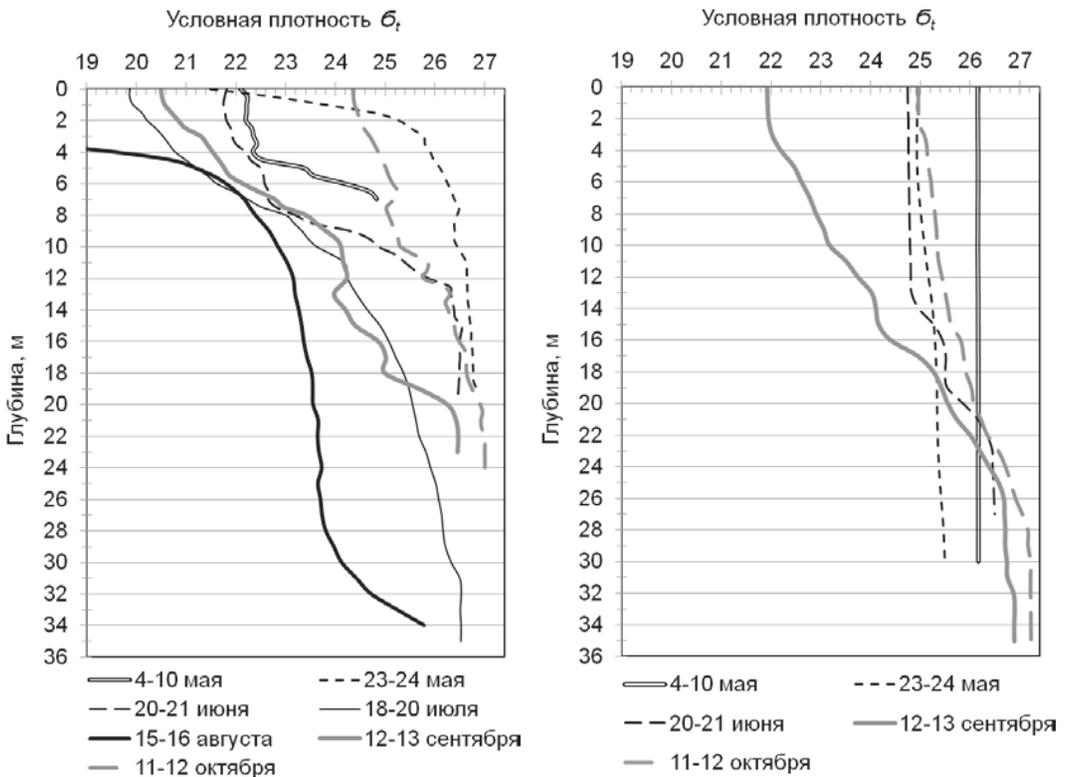


Рис. 4. Вертикальные профили условной плотности вод Амурского залива в мае-октябре 2017 г., осредненные по зонам эстуарного (слева) и морского (справа) типов вертикального распределения хлорофилла *a*

Fig. 4. Vertical profiles of the water specific density in the Amur Bay, averaged by surveys from May to October, 2017 and by zones of the estuarine (left) and marine (right) types of Chl *a* profiles

Характер сезонных изменений концентраций хлорофилла *a* принципиально различен для разных типов его вертикального распределения (рис. 5). В эстуарной зоне сезонный ход концентрации хлорофилла *a* обусловлен изменениями в стоке р. Раздольной, поэтому для него характерны весенний и летний максимумы, обусловленные таянием снегов и муссонными дождями. Напротив, в открытых водах Амурского залива «цветение» в летний период отсутствует и возникает лишь в начале осени, после смены муссона. Поскольку раннеосеннее «цветение» происходит в подповерхностном слое, на глубине, недоступной для спутниковых наблюдений, рост концентраций хлорофилла *a* в это время не отражается спутниковыми данными. Лишь в октябре, когда «цветение» охватывает всю толщу прибрежных вод, оно проявляется и на спутниковых снимках.

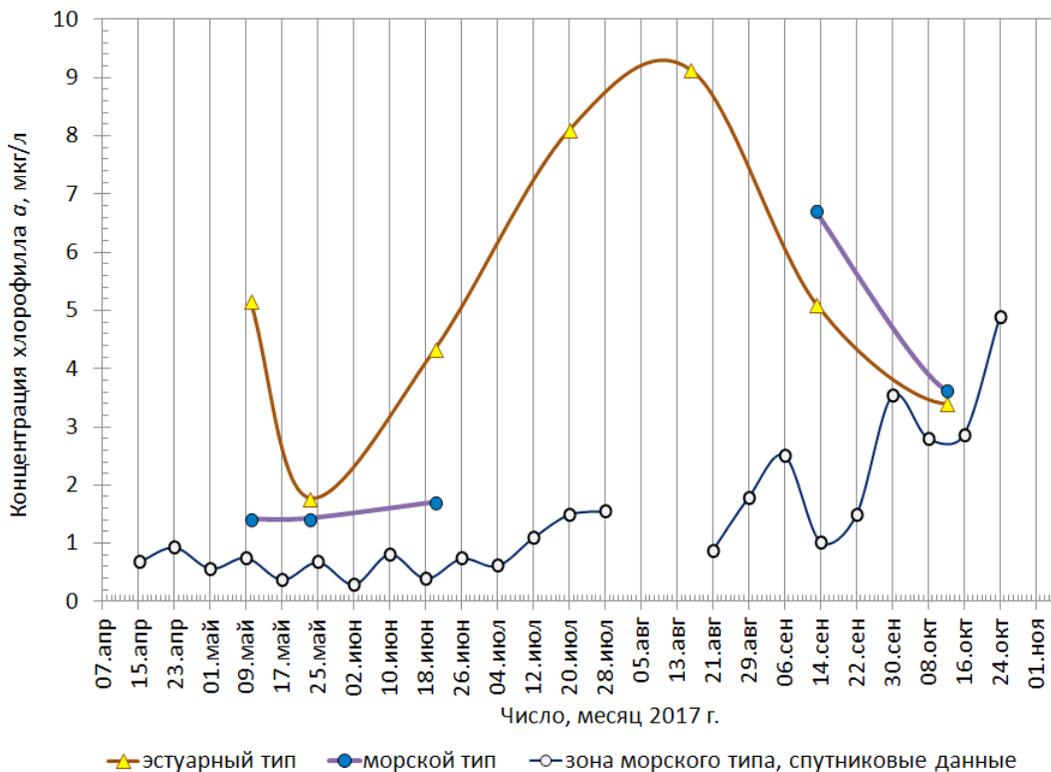


Рис. 5. Сезонные изменения максимальных концентраций хлорофилла *a* в Амурском заливе в течение мая-октября 2017 г., осредненных по зонам разных типов его вертикального распределения (безотносительно глубины их наблюдения)

Fig. 5. Seasonal changes of the maximum Chl *a* concentration in the Amur Bay in May-October, 2017, averaged by the types of its vertical profiles (irrespective the depth of observation)

Полученные данные о характере вертикального распределения хлорофилла *a* подтверждают сведения, известные для других акваторий, как эстуарных, для которых типичен приповерхностный максимум (Обская губа, см. Суханова и др., 2010), так и открытых вод субарктических морей, где в летнее время максимум хлорофилла *a* обычно наблюдается в слое пикноклина (Черное море, см. Финенко и др., 2005). Летний подповерхностный максимум хлорофилла *a* отмечен ранее и в Амурском заливе (Тищенко и др., 2011). Сезонные изменения вертикальных профилей хлорофилла *a* рассмотрены впервые, выявленные закономерности изменчивости его максимальных концентраций были известны лишь отчасти. В частности, феномен летнего «цветения» эстуарных вод Амурского залива хорошо известен по данным об изменениях обилия и состава планктона и по спутниковым данным о динамике концентраций хлорофилла *a*, поскольку максимальная концентрация хлорофилла в этой зоне находится у поверхности моря (Надточий, Зуенко, 2001; Zuenko et al., 2006; Зуенко, 2012). Но о раннеосеннем «цветении» в прибрежной зоне зал. Петра Великого ранее было известно лишь по

косвенным данным о смене видового состава планктона, а по спутниковым данным о концентрации хлорофилла *a* оно не отмечалось. Механизм раннеосеннего «цветения» вполне понятен: сразу же после смены муссона, которая происходит обычно в начале сентября, северо-западные ветры вызывают в зал. Петра Великого прибрежный апвеллинг, который обеспечивает подъем пикноклина и приток биогенных элементов в эвфотический слой (Зуенко и др., 2003). В этих относительно холодных, богатых питательными веществами водах, поднявшихся на освещенные горизонты, происходит бурное развитие фитопланктона, что на вертикальных профилях хлорофилла *a* в южной части Амурского залива проявляется как рост концентрации на глубине 16–20 м. Позднее, по мере усиления процессов вертикального перемешивания, концентрация хлорофилла *a* повышается и в поверхностном слое, что известно как осеннее «цветение», типичное для всех субполярных вод.

### Выводы

В Амурском заливе выявлено два типа вертикального распределения хлорофилла *a*: эстуарный тип, для которого характерно наличие приповерхностного максимума и в целом убывание концентрации с глубиной, и морской тип, для которого характерен рост концентрации хлорофилла *a* с глубиной с максимумом ниже слоя скачка плотности.

Механизмы формирования двух типов вертикального распределения хлорофилла *a* различны: первый тип формируется в эстуарной зоне, где развитие фитопланктона обеспечивается биогенными элементами, поступающими с материковым стоком, а второй — в открытой части залива, где биогенные элементы поступают в фотический слой снизу благодаря процессам перемешивания и апвеллинга.

Вследствие разной природы формирования высоких концентраций хлорофилла *a* сезонные изменения его концентрации также различны между разными частями Амурского залива: помимо периодов весеннего и осеннего «цветения», наблюдающихся повсеместно, для северной эстуарной зоны залива характерен летний максимум хлорофилла *a* с максимальными концентрациями у поверхности моря, а для южной, морской зоны — раннеосенний максимум с максимальными концентрациями под сезонным пикноклином.

Спутниковые данные о концентрации хлорофилла *a* не отражают ее реальную динамику в толще воды, что за пределами эстуарных зон может приводить к заниженным оценкам содержания фитопланктона и трофности акваторий.

### Список литературы

- Гаврилова Г.С., Кучерявенко А.В. Продуктивность плантаций двустворчатых моллюсков в Приморье : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2011. — 112 с.
- Зуенко Ю.И. Сроки «цветения» в заливе Петра Великого (Японское море) // *Вопр. промысл. океанологии*. — 2012. — Вып. 9, № 1. — С. 153–170.
- Зуенко Ю.И., Надточий В.В., Селина М.С. Гидрологические процессы и сукцессия планктона в прибрежной зоне Японского моря в летний период // *Изв. ТИНРО*. — 2003. — Т. 135. — С. 144–177.
- Надточий В.В., Зуенко Ю.И. Сезонные изменения в планктоне северо-западной части Японского моря // *Гидробиол. журн.* — 2001. — Т. 37, № 6. — С. 10–18.
- Суханова И.Н., Флинт М.В., Мошаров С.А., Сергеева В.М. Структура сообществ фитопланктона и первичная продукция в Обском эстуарии и на прилежащем Карском шельфе // *Океанол.* — 2010. — Т. 50, № 5. — С. 785–800.
- Тищенко П.Я., Лобанов В.Б., Звалинский В.И. и др. Сезонная гипоксия Амурского залива (Японское море) // *Изв. ТИНРО*. — 2011. — Т. 165. — С. 136–157.
- Финенко З.З., Чурилова Т.Я., Ли Р.И. Вертикальное распределение хлорофилла и флуоресценции в Черном море // *Мор. экол. журн.* — 2005. — Т. 4, № 1. — С. 15–45.
- Zuenko Y., Selina M., Stonik I. On conditions of phytoplankton blooms in the coastal waters of the north-western Japan/East Sea // *J. Ocean Sci.* — 2006. — Vol. 41, № 1. — P. 31–41.

*Поступила в редакцию 30.03.18 г.*

*Принята в печать 12.04.18 г.*