

С.П. ЗАХАРКОВ, Е.В. ЛЕПСКАЯ, О.Б. ТЕПНИН,
Е.А. ШТРАЙХЕРТ, Т.Н. ГОРДЕЙЧУК

Первичная продукция Авачинской бухты летом 2017 г.

Приводятся результаты исследования пространственно-временной изменчивости первичной продукции фитопланктона (ПП) в Авачинской бухте Тихого океана в летний период 2017 г. Впервые публикуются данные измерений ПП радиоуглеродным методом, преимущественно в приповерхностном слое воды, проведенных один раз в месяц. ПП в столбе воды вычисляли по формулам, предложенным М. Беренфельдом и П. Фальковски. Предполагается, что уровень ПП летом определяется следующими факторами: поступлением биогенных элементов с речным стоком, мутностью и температурой в фотическом слое. Значения ПП и средние концентрации хлорофилла-а (Хл-а) позволяют отнести бухту к эвтрофным водоемам.

Одновременно проводили сравнение значений концентрации Хл-а, полученных инструментальным и дистанционным методами. Выявлена необходимость коррекции дистанционных данных.

Ключевые слова: Авачинская бухта, первичная продукция, речной сток, хлорофилл-а, дистанционное зондирование.

Primary production of the Avacha Bay in summer 2017. S.P. ZAKHARKOV¹, E.V. LEPSKAYA², O.B. TEPNIN², E.A. SHTRAIKHERT¹, T.N. GORDEICHUK¹ (¹V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, ²KamchatNIRO, Petropavlovsk-Kamchatsky).

The paper presents the results of a study of the spatial and temporal variability of the primary production of phytoplankton (PP) in the Avacha Bay of the Pacific Ocean in summer 2017. For the first time, measurements of PP by the radiocarbon method, mainly in the near-surface layer of water, conducted once a month, are published. Primary production in the water column was calculated by the formulas proposed by M. Behrenfeld and P. Falkovski. It is assumed that the level of PP in this season is determined by the following factors: the input of biogenic elements with a river runoff, turbidity and water temperature in the photic layer. The values of PP and the average concentrations of chlorophyll-a (Chl-a) allow us to attribute the bay to eutrophic water bodies.

At the same time, the Chl-a concentration values obtained by instrumental and remote sensing were compared. The need for remote data correction was identified.

Key words: the Avacha Bay, primary production, river flow, chlorophyll-a, remote sensing.

Введение

Авачинская бухта расположена на юго-восточном побережье Камчатки, представляет собой обширный глубоководный замкнутый залив округлой формы, соединяющийся с Тихим океаном сравнительно узким, шириной 3 км, проливом. Площадь бухты около 238 км², длина 24 км, глубина до 28 м. В нее впадают реки Авача и Паратунка. Берега изрезаны многочисленными мелкими бухтами второго порядка (Тарья, Тихая, Раковая,

*ЗАХАРКОВ Сергей Петрович – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, ШТРАЙХЕРТ Елена Аркадьевна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, ГОРДЕЙЧУК Татьяна Николаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток); ЛЕПСКАЯ Екатерина Владимировна – кандидат биологических наук, заведующая лабораторией, ТЕПНИН Олег Борисович – заведующий сектором (Камчатский филиал ВНИРО (КамчатНИРО), Петропавловск-Камчатский). *E-mail: zakharkov@mail.ru

Бабия, Петропавловская, Сероглазка, Моховая и др.) [9]. На берегу Авачинской бухты находятся административный центр Камчатского края г. Петропавловск-Камчатский и порт, и в настоящее время она испытывает огромную антропогенную нагрузку в виде поступающих с суши и морских судов стоков различной степени и характера загрязнения. Несмотря на важное рекреационное и рыбохозяйственное значение Авачинской бухты, экологические исследования данного водоема за всю историю его освоения проводили эпизодически и бессистемно, за исключением нескольких последних лет [8]. Первые измерения первичной продукции фитопланктона в бухте были проведены летом 2015 г., однако их результаты не были опубликованы. Настоящая работа направлена на устранение этих пробелов в гидробиологических исследованиях данной акватории.

Материалы и методы

Судовые наблюдения в рейсах МРТК «Инженер Мартынов» в Авачинской бухте проводились 21.06.2017 г. на 8 станциях, 21.07.2017 г. на 7 станциях и 15.08.2017 г. на 7 станциях (рис. 1). Станции пронумерованы так же, как в работе [8]. Пробы морской воды отбирали батометром Ван-Дорна из оргстекла объемом 2,5 л с глубины, равной $\frac{1}{2}$ видимости диска Секки, что соответствует 46 % поверхностной освещенности [12]. Исключение составила станция № 2, где пробы взяли с 12 горизонтов. Глубину видимости диска Секки измеряли на всех станциях.

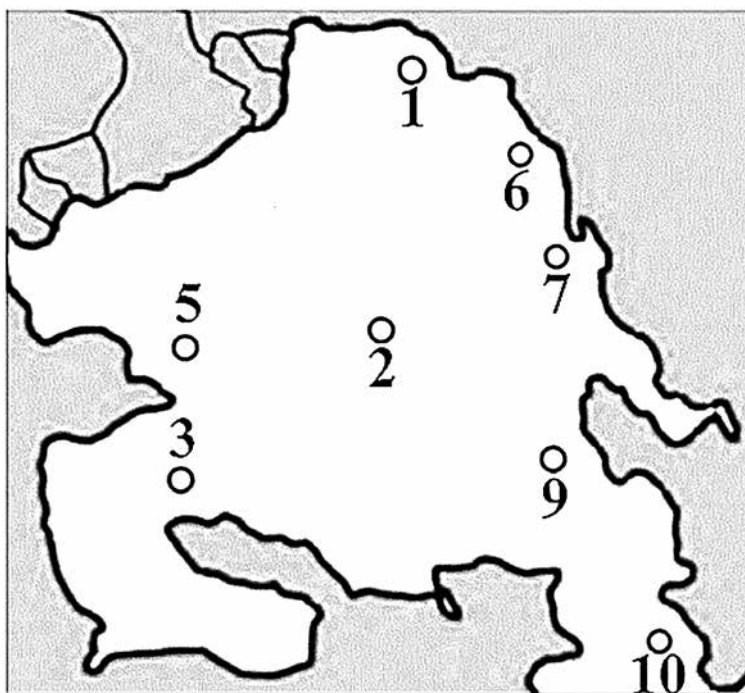


Рис. 1. Схема станций в период определения первичной продукции фитопланктона Авачинской губы в июне–августе 2017 г.

Определение величины первичной продукции (ПП) проводили с использованием радиоуглеродной модификации скляночного метода [3]. Пробы для определения разливали по склянкам объемом от 0,25 до 0,5 л (по 2 светлых и 1 темной на каждом горизонте станции), вносили ^{14}C (NaHCO_3). После окончания экспозиции пробы фиксировали раствором Люголя (0,3–0,5 мл), затем содержимое склянок отфильтровывали под вакуумом через мембранные фильтры «Vladisart» с размером пор 0,45 мкм, которые после

фильтрации промывали сначала 3 мл 1%-го раствора HCl от остатков реактива с ^{14}C , затем 30 мл фильтрованной морской воды для удаления следов соляной кислоты. Фильтры высушивали на фильтровальной бумаге в течение 1 ч и упаковывали для хранения при температуре $-18\text{ }^\circ\text{C}$ для дальнейшего определения в лаборатории. Пробы экспонировали при освещенности, равной $\frac{1}{2}$ от максимальной поверхностной освещенности, весь световой день. Температура на станциях в зоне основного приповерхностного отбора варьировала, как правило, в пределах $4\text{ }^\circ\text{C}$ (см. таблицу), поэтому пробы экспонировали при температуре, равной средней между максимальной и минимальной температурами с точностью $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$. На станции № 2, где отбор проб для измерения ПП проводили с 12 горизонтов, температура воды нижних слоев существенно отличалась от поверхностной. Для учета влияния температуры на величину ПП использовали температурный коэффициент Q10 [2]. Радиоактивность фитопланктона, сконцентрированного после экспозиции на мембранные фильтры, измеряли по стандартной методике на жидкостно-сцинтилляционном счетчике Tri-Carb 2800 TR фирмы PerkinElmer/Packard (США), при этом использовали сцинтилляционный коктейль ULTIMA GOLD AB той же фирмы. Работу проводили после 2-часовой экспозиции флаконов с образцами в темноте в лаборатории инструментальных и радиоизотопных методов анализа ТИБОХ ДВО РАН [6]. Величину первичной продукции в столбе воды вычисляли по формуле, предложенной М. Беренфельдом и П. Фальковски [11]:

$$\text{ПП} = 0,85 \cdot \text{АЧ} \cdot \text{Сх} \cdot \text{Zф} \cdot \text{Тэф}, \quad (1)$$

где ПП – первичная продукция ($\text{мг С/сут} \cdot \text{м}^2$), АЧ и Сх – средние значения ассимиляционного числа ($\text{мг С/мг Хл-а} \cdot \text{ч}$) и содержания Хл-а в слое фотосинтеза (мг/м^3) соответственно, Zф – толщина эвфотической зоны, определяемая как тройная величина видимости диска Секки (м), Тэф – эффективный фотопериод (ч). Если АЧ определялось только на одном горизонте, то оно использовалось для расчетов в качестве среднего значения АЧ эвфотической зоны. Формула (1) соответствует предложенному ранее эмпирическому уравнению для расчета ПП в столбе воды [11]. Применимость данного уравнения для расчета ПП в дальневосточных морях была показана в работах [4, 5]. В связи с тем, что пробы экспонировались в течение целого светового дня, оно было нами модифицировано:

$$\text{ПП} = 0,85 \cdot \text{ДАЧ} \cdot \text{Схл} \cdot \text{Zф}, \quad (2)$$

где ДАЧ – среднее значение ассимиляционного числа за 1 сут ($\text{АЧ} \cdot \text{Tд}$, где Tд – длительность светового дня), Схл – среднее значение Хл-а (мг/м^3). При расчете ПП на станции № 2 (июль) мы вынуждены были скорректировать формулу (2). Поскольку отсутствовали значения Хл-а по глубине, но имелись данные о ПП по горизонтам и средней ПП эвфотической зоны ($\text{ППср} = \text{ДАЧ} \cdot \text{Схл}$), то величину ПП с 1 м^2 акватории вычисляли как

$$\text{ПП} = 0,85 \cdot \text{ППср} \cdot \text{Zф}.$$

Концентрацию пигментов определяли стандартным спектрофотометрическим методом [7]. Пробу воды объемом около 1 л пропускали через фильтры ФМАЦ $0,65\text{ мкм}$, которые замораживали и хранили при температуре $-18\text{ }^\circ\text{C}$ для дальнейшей обработки в лабораторных условиях на берегу. Для вычисления абсолютных концентраций суммы Хл-а и феофитина-а использовали формулу [7]:

$$C_{\Sigma} = \frac{100 \cdot C_a^1}{0,59 \cdot C_{\text{ф}}^{\text{отн}} + C_a^{\text{отн}}},$$

где C_{Σ} – суммарное содержание Хл-а и феофитина-а (мг/м^3), C_a^1 – содержание Хл-а (мг/м^3), полученное по формуле стандартного метода, $C_{\text{ф}}^{\text{отн}}$ и $C_a^{\text{отн}}$ – содержания феофитина-а и Хл-а (% от их суммы). Также учитывалось, что оптическая плотность экстракта при длине волны 665 нм понижается в 1,7 раза за счет превращения Хл-а в феофитин-а [1].

Гидробиологические и гидрологические характеристики Авачинской бухты летом 2017 г.

№ станции	Н, м			Соленость, ‰			Хл-а, мг/м ³			Среднее содержание Хл-а в эвфотической зоне, мг/м ³			ППП						ДАЧ, мг С/(мг Хл-а · ч)		
	VI	VII	VIII	VI	VII	VIII	VI	VII	VIII	VI	VII	VIII	мг С/(сут · м ³)			г С/(сут · м ²)			VI	VII	VIII
													VI	VII	VIII	VI	VII	VIII			
1	1	1,5	1,5	21,3	11,2	9,4	18,6	н.д.	9,37	12,5	5,9	14	320	н.д.	118	1,1	н.д.	2,23	17,25	н.д.	20,9
	0,5	0,5	0,5	8,1	12,1	13,5	7,7	н.д.*	12	14,3*	н.д.*	9,6*	107	122	109	1,79*	0,81*	0,78*	21,12	н.д.*	7,95
2	1	1	1	9,6	17,3	13,5	13,8	11,6	9,92				346	73	69				18,29		8,84
	2	2	2	18,5	18,6	14,3	23,8	9,92					173	138	81				14,58		6,96
3	4	4	4	29,4	27,4	28,5	13,1	6,45				148	82	38				13,34		12,6	
	6	6	6	30,6	29,1	30,2	21,6	20,4				117	136	54				6,88		1,87	
5	8	8	8	31,3	30,4	31,4	7,5	7,63				78	21	107				15,61		7,1	
	10	10	10	31,7	31,2	31,7	11,2	9,44				44	36	91				6,97		11,3	
6	12	12	12	32,1	31,4	31,8	4,1	3,04				40	9	31				10,97		29,9	
	14	14	14	32,1	31,6	31,9	3,3	2,16				21	30	15				12,36		14,3	
7	16	16	16	32,1	31,8	32,1	1,8	2,51				18	28	16				11,8		5,99	
	18	18	18	32,2	31,9	32,1	2,2	1,28				25	4	12				8,19		12,1	
8	20	20	20	32,2	32,1	32,1	2,4	1,65				183	76	88				10,42		7,01	
	1	1,5	2	23,3	19,9	23,6	18,4	7,6	1,95	14,3	7,2	9,9	316	145	247	1,06	0,71	3,31	14,57	13	32,8
9	1	1,5	2	24,5	15,1	17,1	16,3	8,4	8,01	11,4	5	14,7	159	233	96	2,97	0,89	4,28	27,72	23	28,6
	1	2	1,5	18,8	23,9	12,4	16,7	10,3	11,7	14,6	5,6	13,8	200	213	167	0,8	1,47	0,86	10,82	25,5	8,2
10	1	1,5	1,5	19,5	22,9	18,7	18,7	11,5	8,3	11,8	6,6	13,2	111	52	104	0,67	0,94	2,04	11,1	18,6	20,2
	1,5	2	1,5	16,8	23,3	19,6	15,6	3,5	8,3	11,1	4,3	17,1	84	30	70	0,6	0,49	1,64	7,1	11,2	12,6
В среднем	1,5	2,5	1,5	27,1	29,7	27,9	6,1	2,7	8,2	4	2,9	9,5	193	123	124	0,42	0,94	0,63	13,68	12,8	8,58
	1,2	1,8	1,7	19,9	20,2	17,9	16,4	7,3	8,2	11,8	5,4	12,7	118	123	124	1,18	0,89	1,97	15,0	17,4	17,4

* Результат для всего столба воды, поэтому данные для конкретных горизонтов станции № 2 не указаны.

Примечание. Н – глубина отбора проб, равна (кроме станции № 2) половине глубины видимости диска Секки; Хл-а – содержание хлорофилла-а; ППП – первичная продукция; ДАЧ – дневное ассимиляционное число; VI, VII, VIII – месяц проведения съемки; н.д. – нет данных.

Для станции № 2 полужирным шрифтом указаны величины, использованные при вычислении средних значений.

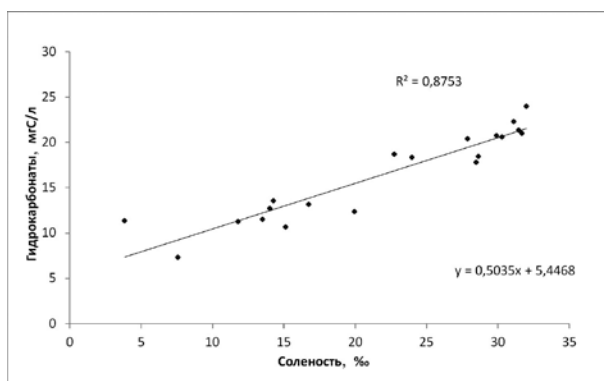


Рис. 2. Связь между соленостью (ось абсцисс) и гидрокарбонатами (ось ординат) в Авачинской бухте в летний период 2015, 2017 гг.

Неорганический углерод, используемый для расчета ПП в Авачинской бухте, определяли в летний период в 2015 и 2017 гг. Для 22 пар определений была показана тесная связь между соленостью и концентрацией гидрокарбонатов (рис. 2). Коэффициент детерминации составил 0,87, что позволило нам в дальнейшем использовать полученную закономерность и определять неорганический углерод по солености для расчетов ПП. В связи с отсутствием данных зонда 21.07.2017 г. на станции № 2 за средние значения принимались показания предыдущей и последующей съемок по солености.

Для возможности использования в дальнейших исследованиях данных по Хл-а, полученных дистанционно, нами было проведено сравнение натуральных и спутниковых значений этого параметра. Спутниковая информация предоставлена Центром хранения и обработки спутниковой информации NASA-GSFC (Goddard Space Flight Center – www.oceancolor.gsfc.nasa.gov). Данные по Хл-а были получены по алгоритму ОСЗ с использованием программного обеспечения SeaDAS версии 6.4. Спутниковые данные по Хл-а, по поглощению света при длинах волн 412 и 443 нм, по глубине эвфотической зоны отбирали по всем доступным дням с июня по август 2017 г.

Результаты и обсуждение

Гидрологические и гидробиологические данные, полученные во время летних съемок на станциях (рис. 1), представлены в таблице.

В июне наивысших своих значений в приповерхностных слоях бухты первичная продукция достигала на станциях № 1 и 5, расположенных в районе стока рек. Известно, что наряду с освещенностью одним из определяющих факторов для развития фитопланктона и производства первичной продукции является достаточное количество биогенных элементов. Наличие их в Авачинской бухте обусловлено стоком рек Авача и Паратунка, при этом на долю р. Авача приходится до 80 % годового стока в бухту [10]. Июнь – время активного половодья рек, несущих с суши большое количество неорганических веществ, необходимых для развития фитопланктона. Группа вторых по величине показателей первичной продукции была зафиксирована на станциях, приближенных к суше (№ 7, 3, 6; здесь и далее станции расположены по мере убывания величины ПП). Здесь, вероятно, по мере усиления летнего прогрева водной толщи активизируются процессы разложения органического вещества, захороненного в донных отложениях на прибрежных станциях. Станции № 5 и 6 расположены вблизи берега и равно удалены от центральной части бухты и устьев рек, однако уровень первичной продукции на станции № 5 был в 2 раза выше, чем на станции № 6. Возможно, это объясняется тем, что вода рек Авача и Паратунка стекает в залив в основном вдоль юго-западного берега бухты [10]. Наименьшие значения

первичной продукции в июне наблюдались на станциях, наиболее удаленных от стока рек – на выходе из бухты (№ 9, 10). В столбе воды распределение первичной продукции было аналогичным таковому в приповерхностном слое, что указывает на хорошее перемешивание вод.

Съемка, выполненная в июле, показала иное, по сравнению с предыдущим месяцем, пространственное распределение первичной продукции. Ее величина существенно снижалась в приповерхностных слоях в 1,8 раза, в столбе воды в 1,3 раза. Это можно частично объяснить смещением максимумов генерации первичной продукции с приповерхностных горизонтов на более глубокие. Подтверждением тому служат наблюдения на станции № 2, где отбор проб проводился с 12 горизонтов. Здесь уровень ПП на горизонте 1 м был равен 115, а на глубине 4 м – 138 мг С/сут · м³. В поверхностных горизонтах максимумы ПП отмечены на станциях № 6, 7, 5, затем на № 2 и 3. Наиболее низкие значения ПП наблюдались на станциях № 9, 10. В столбе воды максимум первичной продукции в июле регистрировался на станциях № 6, 7 и 10, минимум – на станциях № 9 и 3. То есть наиболее интенсивное производство в этом месяце отмечалось на станциях в прибрежных районах бухты, которые, как правило, богаче биогенами, нежели расположенные мористее.

В августе среднее значение первичной продукции в приповерхностных горизонтах мало отличалось от июльского (123 и 124 мг С/сут · м³ соответственно). Наибольшей первичная продукция была на станциях прибрежной зоны – № 5, 7 и 1. Возможно, такие изменения вызваны увеличением осадков в интервале наблюдений с 21.07 до 15.08 по сравнению с интервалом 21.06–21.07, предшествующим июльской съемке (99,7 и 51,3 мм соответственно; метеорологическая информация об осадках получена через сайт <http://gr5.ru>). В связи с исчерпанием биогенных элементов и невозможностью их с береговым стоком расположенные вдали от берега станции показали минимальные значения первичной продукции. В столбе воды увеличение уровня ПП также наблюдалось на станциях прибрежной зоны – № 5, 3, 1, снижаясь далее следующим образом: станции № 7, 9, 6, 2, 10. Минимальными были значения на станциях, приближенных к открытым водам.

Средняя величина первичной продукции фитопланктона с 1 м² в сутки в Авачинской бухте в июне, июле и августе равна соответственно 1,18, 0,89 и 1,97 г С. Вынос терригенной взвеси в июне приводил к уменьшению глубины эвфотической зоны, среднее значение видимости глубины диска Секки составило 2,4 м, тогда как в июле – 3,5, в августе – 3,4 м. При этом среднее значение Хл-а в эвфотической зоне максимальным было в августе. К осени, по данным Е.В. Лепской с соавторами [8], происходит повышение содержания биогенных элементов. Их концентрация, за исключением кремния, достигает максимальных годовых значений. Достаточно высокие концентрации биогенных элементов в толще воды, ее прозрачность и высокое содержание измеренного нами Хл-а являются факторами, объясняющими наибольшие значения первичной продукции с 1 м² поверхности в августе. Вероятно, образование первичной продукции в этом случае определяется и другими причинами, нежели в первые два летних месяца. Одной из них может служить увеличение температуры в столбе воды, приводящее к повышению скорости фотосинтеза.

Средние значения ДАЧ в течение летнего сезона изменялись незначительно, хотя на отдельных станциях наблюдались разнонаправленные изменения его значений. Это, вероятно, связано с тем, что водная система Авачинской бухты носит очень динамичный характер и водообмен проходит неравномерно: поверхностные слои обмениваются водой более интенсивно, чем придонные [10].

Для определения соответствия концентраций Хл-а, вычисленных со спутников и полученных натурными измерениями, усредняли концентрацию хлорофилла, измеренную инструментальными методами, по глубине от поверхности до глубины видимости диска Секки. Выявили положительные значения корреляции между спутниковыми и инструментальными методами: 0,461 в июне для 8 пар измерений, 0,669 в июле для 5 пар, 0,528 в августе для 4 пар.

Заключение

Известно, что процессы первичного продуцирования зависят от специфических условий, сложившихся в регионе. Измерения первичной продукции в Авачинской бухте в летний сезон в поверхностных водах (преимущественно в первые два месяца) выявили ее тесную связь с речным стоком, максимум которого наблюдался в июне [10]. Тогда уровень ПП в поверхностных водах почти вдвое был выше, чем в последующие месяцы. Таким образом, в июне происходит активное потребление биогенных элементов фитопланктоном с затуханием продукционных процессов в июле и в августе. При этом в столбе воды максимум первичной продукции, рассчитанный с применением формул, зафиксирован в августе. По-видимому, в этом месяце на величину ПП влияет, наряду с концентрацией биогенов, такой фактор, как температура воды.

Измеренные радиоуглеродным методом значения первичной продукции и средние концентрации Хл-а позволяют отнести бухту к эвтрофным водоемам. Общая продуктивность фитопланктона по всей акватории составила за летний период 2017 г. около $30 \cdot 10^9$ г органического углерода.

Невысокие значения коэффициентов корреляции между спутниковыми и инструментальными измерениями Хл-а, вероятно, показывают влияние аллохтонного органического вещества и взвеси на точность спутниковых измерений. Разработка локальных алгоритмов определения концентрации пигментов для данного региона требует дополнительных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ведерников В.И., Коновалов Б.В., Кобленц-Мишке О.И. Результаты применения спектрофотометрического метода определения феофитина-а в пробах морской воды // Тр. ИОАН СССР. 1973. Т. 95. С. 138–146.
2. Винберг Г.Г. Некоторые итоги практики применения продукционно-гидробиологических методов // Продукция популяций и сообществ водных организмов и методы ее изучения / под ред. Г.Г. Винберга и М.И. Ярушиной. Свердловск: УрНЦ АН СССР, 1985. С. 3–18.
3. Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН СССР, 1960. 329 с.
4. Захарков С.П., Штрайхерт Е.А., Шамбарова Ю.В., Гордейчук Т.Н., Ши С. Определение концентрации хлорофилла «а» в Японском море с использованием зондирующего и проточного флуориметров // Океанология. 2016. Т. 56, № 3. С. 482–490.
5. Захарков С.П., Штрайхерт Е.А., Гордейчук Т.Н., Ванин Н.С. Первичная продукция западной части Охотского моря в весенний период // Дальневосточные моря России. Кн. 2. Исследование морских экосистем и биоресурсов. М.: Наука, 2007. С. 463–482.
6. Звалинский В.И., Лобанов В.Б., Захарков С.П., Тищенко П.Я. Хлорофилл, замедленная флуоресценция и первичная продукция в северо-западной части Японского моря осенью 2000 г. // Океанология. 2006. Т. 46, № 1. С. 27–37.
7. Кобленц-Мишке О.И. Экстрактный и безэкстрактный методы определения фотосинтетических пигментов в пробе // Современные методы количественной оценки распределения морского планктона / под ред. М.Е. Виноградова. М.: Наука, 1983. С. 114–121.
8. Лепская Е.В., Тепнин О.Б., Коломейцев В.В. и др. Исторический обзор исследований и основные результаты комплексного экологического мониторинга Авачинской губы в 2013 г. // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2014. Вып. 34. С. 5–21.
9. Национальный атлас России: в 4 т. Т. 1. Общая характеристика территории / под ред. А.Н. Краюхина. М.: Роскартография, 2004. 495 с.
10. Потапов В.В. Гидрологическая характеристика Авачинской губы // Фундаментальные исследования. 2014. № 9-10. С. 2227–2231.
11. Behrenfeld M.J., Falkowski P.G. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models // *Limnology and oceanography*. 1997. Vol. 42. P. 1479–1491.
12. Pilgrim D.A. Measurement and estimation of the extinction coefficient in turbid estuarine waters // *Cont. Shelf Res.* 1987. Vol. 7. P. 1425–1428.