

УДК 574.5.55

© С. П. Захарков\*, А. Ю. Лазарюк, Т. Н. Гордейчук, Е. А. Штрайхерт

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,

690041, ул. Балтийская, д. 43, г. Владивосток, Россия

\*e-mail: zakharkov@poi.dvo.ru

## ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ, СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЛЬДА И КОНЦЕНТРАЦИИ ФИТОПЛАНКТОНА НА ПОДЛЁДНУЮ ОСВЕЩЁННОСТЬ ВОД ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО ЯПОНСКОГО МОРЯ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ 2010–2016 ГГ.

Статья поступила в редакцию 04.09.2019, после доработки 17.04.2020

Получены и проанализированы данные по надледной и подледной освещенности почти в двухстах экспериментах, проведенных на 60 станциях в прибрежных районах залива Петра Великого (Японское море) во время устойчивого ледостава с января по март 2010–2016 гг. Измерения осуществляли со льда на гидрологических станциях с помощью автономного зондирующего комплекса SBE-19plus (Sea-Bird Electronics, Inc., США). Ослабление освещенности оценивали в двух двухметровых слоях по коэффициентам:  $K_{20}$  — (логарифм отношения  $\text{ФАР}_2/\text{ФАР}_0$  — «лёд+подледная вода») и  $K_{42}$  —  $\text{Lg}(\text{ФАР}_4/\text{ФАР}_2)$  — в слое воды между горизонтами 2 и 4 м. Было установлено влияние «эффекта лунки» на измерения подледной освещенности. Показано, что «эффект лунки» не проявлялся на глубинах ниже 2 м. Выявлена обратная зависимость подледной освещенности от толщины льда и снежного покрова на его поверхности. При проведении эксперимента в один день (нами было выбрано 11.03.2010 г.), ослабление освещенности было прямо пропорционально толщине льда. Коэффициент детерминации был положительным и значимым. В случае вычисления коэффициента детерминации между этими параметрами в течение всей зимы, он был недостоверным. Предполагается, а затем и подтверждается, что на связь освещенности и толщины льда накладываются другие факторы, в частности, концентрации фитопланктона в подледном слое. Использование дистанционных методов исследования позволило заключить, что средних по сезону значений освещенности в исследуемом регионе достаточно для развития фитопланктона подо льдом.

**Ключевые слова:** надледная освещенность, подледная освещенность, коэффициент ослабления освещенности, толщина льда, концентрация хлорофилла-*a*, дистанционные методы.

© S. P. Zakharkov\*, A. Yu. Lazaryuk, T. N. Gordeychuk, E. A. Shtraikhert

V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, 690041, Baltiyskaya Str., 43, Vladivostok, Russia

\*e-mail: zakharkov@poi.dvo.ru

## INFLUENCE OF THICKNESS, STATE OF THE ICE SURFACE AND CONCENTRATION OF PHYTOPLANKTON ON THE SUBGLACIAL ILLUMINATION OF PETER THE GREAT BAY OF THE SEA OF JAPAN ON OBSERVATION 2010–2016

Received 04.09.2019, in final form 17.04.2020

In the coastal areas of Peter the Great Bay (the Sea of Japan), the influence of ice thickness, snow cover on its surface, and the concentration of chlorophyll *a* in the layer under ice on the value of subglacial illumination at 60 hydrological stations from January to March 2010–2016 was studied. Deglacial illumination was determined using remote sensing methods, which allowed us to conclude that the seasonal averages of illumination in the studied region are sufficient for the development of phytoplankton under ice. The influence of a hole for measuring parameters under ice on subglacial illumination is estimated. It was shown that the “hole effect” did not appear at depths below 2 m. Measurements were performed from ice at hydrological stations using the autonomous probing system SBE-19plus (Sea-Bird Electronics, Inc., USA). The attenuation of illumination was evaluated in two two-meter layers by the coefficients:  $K_{20}$  — (logarithm of the ratio  $\text{PAR}_2/\text{PAR}_0$  — “ice+ice water”) and  $K_{42}$  —  $\text{Lg}(\text{PAR}_4/\text{PAR}_2)$  — in the water layer between horizons of 2 and 4 m. A direct relationship was established between the weakening of the

Ссылка для цитирования: Захарков С.П., Лазарюк А.Ю., Гордейчук Т.Н., Штрайхерт Е.А. Влияние толщины, состояния поверхности льда и концентрации фитопланктона на подледную освещённость вод залива Петра Великого Японского моря по наблюдениям 2010–2016 гг. // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 2. С. 5–15. doi: 10.7868/S207366732002001X

For citation: Zakharkov S.P., Lazaryuk A. Yu., Gordeychuk T.N., Shtraikhert E.A. Influence of thickness, state of the ice surface and concentration of phytoplankton on the subglacial illumination of Peter the Great Bay of the Sea of Japan on observation 2010–2016. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2020, 13, 2, 5–15. doi: 10.7868/S207366732002001X

illumination and the thickness of the ice in the case of an experiment in one day (03.11.2010). The coefficient of determination was positive and significant. If we compare these parameters throughout the winter period, a meaningful relationship could not be established. Presumably, other factors are superimposed on the relationship between illumination and ice thickness. We have confirmed that one of these factors is the concentration of chlorophyll-*a* in the subglacial layer of water. The daytime interval was also revealed when the subglacial illumination does not feel much dependence on the deglacial illumination.

**Key words:** deglacial illumination, subglacial illumination, light attenuation coefficient, ice thickness, chlorophyll-*a* concentration, remote sensing methods.

## 1. Введение

Несмотря на большие трудности зимних наблюдений, в последние годы активно исследуются процессы, происходящие в Арктике и Антарктике. Растущий интерес к необходимости исследования морского льда связан с тем, что он играет важную роль в регулировании климата Земли, в частности, как ключевой фактор глобального потепления, субстанция поверхностного излучения и его влияние на глобальную термохалинную циркуляцию [1]. Исследования затухания коротковолнового излучения (400–800 нм) в морском льду проводятся, начиная с 1960-х гг. Коэффициенты объемного ослабления, описывающие общее количество коротковолнового излучения, поглощенного льдом, были измерены как в Арктике, так и в Антарктике [2–6]. Наблюдаемые значения этого параметра изменялись в узком интервале от 1.1 до 1.5 м<sup>-1</sup>.

Поверхностную отражательную способность морского льда (альбедо) значительно легче измерить, чем коэффициенты ослабления, поэтому этот параметр регулярно наблюдается как часть большинства полевых программ, выполняемых над поверхностью льда. Обширные данные по альбедо арктического льда приводятся в работах [7, 4, 8]. Приведенные значения альбедо изменяются от 0.20 для некоторых поверхностных проталин до 0.75 над белым льдом; типичные значения для таяния белого льда 0.60–0.65.

Поскольку полярный снег может претерпевать такие большие изменения во внутренней структуре, его оптические свойства охватывают гораздо более широкий диапазон значений, чем свойства морского льда. Например, полевые измерения коэффициента объемного ослабления варьируются от 4.3 м<sup>-1</sup> в плотном снегу Антарктики [5] до 40.1 м<sup>-1</sup> на свежем снегу [3]. Альбедо колеблется от 0.50 для таяния старого снега до значений, превышающих 0.95 для свежего снега, хотя более типичные значения лежат в диапазоне 0.70–0.85. Вышеприведенные данные приведены в исследовании [9].

Изменение характеристик ледяного покрова влечет за собой корректировки в подледных водах, относящиеся, в частности, к развитию микроводорослей [10–13]. Недавние исследования в Чукотском море дали неожиданные результаты: под полутораметровой толщей льда зарегистрирована вспышка роста фитопланктона. Предположительно, рост фитопланктона стал возможен из-за увеличения прозрачности льда и из-за образования на его поверхности снежицы. Эти явления опосредованы потеплением климата в северных широтах и изменением характеристик ледяного покрова [14].

Фитопланктон зал. Петра Великого и сопредельных вод Японского моря у берегов Приморья зимой характеризуется вспышкой биомассы (3.1–6.7 г/м<sup>3</sup>), зачастую самой значительной за год. Наибольших величин она достигает в эвтрофируемых участках (20–30 г/м<sup>3</sup>, Амурский залив) [15, 16]. Этому в основном способствуют такие факторы, как усиление конвективного перемешивания водной толщи, адвекция вод глубокого моря, вызываемая зимними сгонными ветрами, обилие биогенов, а также малые глубины, в результате чего водоросли постоянно находятся в слое фотосинтеза [16, 17]. При активном развитии фитопланктона в зимний период на утилизацию образовавшегося органического вещества затрачивается дополнительный кислород, что, в условиях отсутствия поступления кислорода из атмосферы из-за ледяного покрова, будет приводить к ускоренному истощению запасов кислорода в водоемах.

Считается, что интенсивность развития микроводорослей зимой напрямую связана с толщиной льда и снежного покрова на его поверхности через освещенность, которая наряду с гидрологическими и гидрохимическими факторами оказывает определяющее влияние на «цветение» фитопланктона [10, 18, 19]. Доля радиации, проникающей через лед при наличии снежного покрова незначительна: менее 10 % при максимальной высоте Солнца, также она мала в утренние и вечерние часы; свет в этом случае является лимитирующим фактором формирования первичной продукции [12]. Надледная освещенность определяется высотой Солнца над горизонтом и прозрачностью атмосферы; она хорошо определяется спутниковыми средствами наблюдения. Подледная освещенность зависит от толщины, прозрачности и состояния поверхности льда, а также прозрачности подледной воды.

Основная цель работы заключалась в изучении влияния лимитирующих факторов на подледную освещенность прибрежных вод зал. Петра Великого Японского моря, а именно — толщины льда и снежного

покрова на его поверхности, а также концентрации фитопланктона (в соответствии с содержанием хлорофилла-*a* (ХЛ)) и времени наблюдения. При этом оценивался «эффект лунки» во льду при измерении параметров подо льдом на гидрологических станциях. Ранее работы по изучению связи этих параметров на данной акватории не проводились.

## 2. Материал и методы

Экспериментальные работы по исследованию факторов, влияющих на подлёдную освещённость, были выполнены в прибрежных районах залива Петра Великого во время устойчивого ледостава с января по март 2010–2016 гг. (табл. 1). В табл. 1 «гидрологическая станция» — это точка на льду с определенными географическими координатами, где проводились экспериментальные работы; регулярная гидрологическая станция — это станция, где наблюдения осуществлялись на протяжении всего периода ледостава с интервалом 10–20 дней, эксперимент — серия из последовательных зондирований через одну и ту же лунку, выполненных в течение указанного периода времени. Натурные измерения в 2010–2012 гг. проводились в северной части Амурского залива, а с 2013 по 2016 гг. в качестве основного полигона использовалась бухта Новик (о. Русский, зал. Петра Великого). Оба района исследований, представленные в статье, расположены в Амурском заливе (часть залива Петра Великого), расстояние между которыми не превышает 20 км. Формирование льда в этой части Японского моря происходит в период зимнего муссона, который характеризуется отсутствием обильных осадков. По наблюдениям авторов, во все годы выполненных исследований, образование льда происходило при практическом отсутствии снега, а сам лед во время измерений представлял собой тонкий однолетний/белый лед [20]. Ослабление освещенности оценивали в двух двухметровых слоях по коэффициентам:  $K_{20}$  — (логарифм отношения  $\Phi_{AP2}/\Phi_{AP0}$ , где  $\Phi_{AP2}$  освещенность на глубине 2 м от поверхности льда, а  $\Phi_{AP0}$  на поверхности льда) и  $K_{42}$  —  $Lg(\Phi_{AP4}/\Phi_{AP2})$  — в слое воды между горизонтами 2 и 4 м.

Измерения осуществляли со льда на гидрологических станциях с помощью автономного зондирующего комплекса SBE-19plus (Sea-Bird Electronics Inc., США). В состав комплекса помимо стандартных гидрологических датчиков, предназначенных для определения глубины, температуры и солёности воды входили: измеритель фотосинтетически активной радиации (ФАР) фирмы LiCor (США) и флюориметр концентрации ХЛ WETStar компании WET Labs (США). Для выполнения зондирований подлёдной водной толщи во льду вырубались лунки размером 0.5×0.5 м. Толщину льда на гидрологических станциях измеряли мерной линейкой с точностью ±0.5 см. Другие характеристики льда и снежного покрова, влияющие на их оптические свойства, при работах на льду не измерялись.

Координаты гидрологических станций определялись по навигатору Garmin eTrex. В работе использовались данные метеостанции WMO\_ID=31960 (Владивосток-гора, архив Приморского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. <http://rp5.ru>). Спутниковые данные поверхностной освещенности были получены со спутника MODIS-Aqua, спутниковые данные использовались усреднённые по всему району исследования. В основном, использовались данные уровня L2 и, дополнительно, для ряда измерений — данные уровня L1, из которых, после обработки программным обеспечением SeaDAS7.4., были получены собственные значения уровня L2 для ФАР.

Таблица 1

**Распределение по годам экспериментов по исследованию подводной освещённости, выполненных зондом SBE-19plus с поверхности льда на гидрологических станциях в Амурском заливе и бухте Новик зал. Петра Великого**

**Distribution by years of experiments on the study of underwater illumination performed by the SBE-19plus probe from the ice surface at hydrological stations in the Amursky Bay and Novik Bay of Peter the Great Bay**

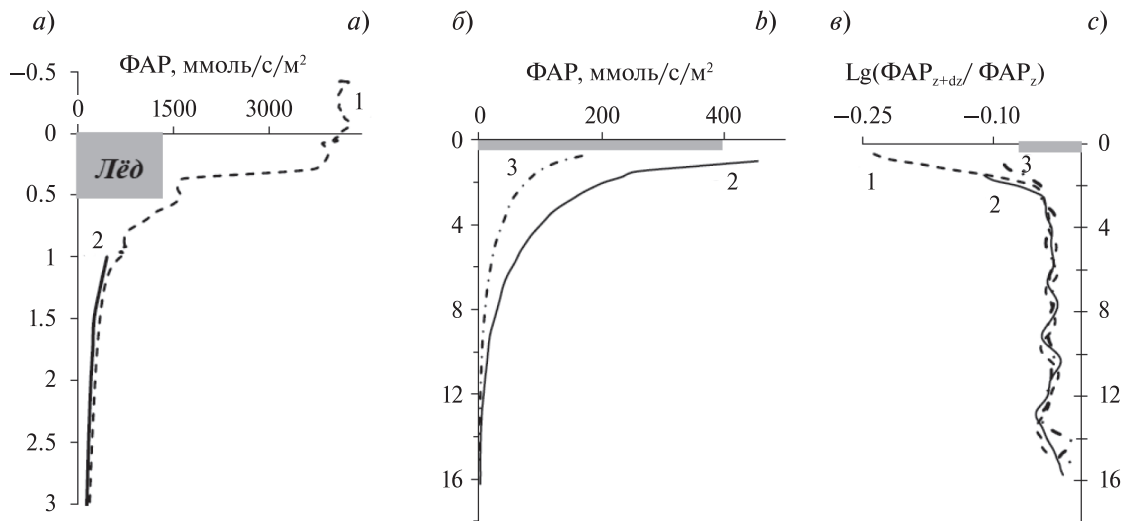
Год	Гидрологические станции		Количество экспериментов
	Всего	Регулярные	
2010	6	4	25
2011	12	12	9
2012	1	1	6
2013	10	2	16
2014	13	4	37
2015	15	6	72
2016	15	2	43

### 3. Результаты и обсуждение

Значения освещенности, полученные по спутниковым данным за период наблюдения, показали высокую изменчивость от 0.14 до 44.38 энштейн/м<sup>2</sup> в день. Максимальные значения освещенности наблюдались в исследуемом районе в декабре — 15.28 (6.12.2010 г), в январе — 15.41 (7.01.2011 г), в феврале — 17.04 (16.02.2010 г), в марте — 44.38 (31.03.2011 г) энштейн/м<sup>2</sup> в день. Несмотря на высокую вариативность надледной освещенности, средние значения ее были высокими и не лимитировали развитие подледного фитопланктона, о чем указывает зимний максимум его биомассы [15, 16].

Использование лунки во льду на гидрологических станциях для измерения нарушало параметры подледного светового поля. В этой связи для того, чтобы оценить «эффект лунки» были проанализированы несколько серий профилей распределения освещенности с глубиной, полученных в разное время суток в экспериментах 2010 г. Было установлено, что световой поток, проникающий через лунку 0.5×0.5 м практически не оказывает влияния на фоновые параметры освещенности, начиная приблизительно с глубины 2 м. Влияние лунки на подледную освещенность демонстрируют профили, представленные на рис. 1, а, которые были получены 6 февраля 2010 г. в начале эксперимента на станции L2 (Амурский залив) при погружении зонда в лунку при толщине льда 0.5 м. Первые два зондирования были проведены с интервалом 12 мин., при этом значительное уменьшение амплитуд вариаций освещенности наблюдалось на горизонтах более 1.5 м. В этом эксперименте, который длился около 3 ч, с 14:13 до 17:00, выполнена серия из 25 зондирований (без извлечения прибора на поверхность). Это позволило оценить изменения в распределениях ФАР (рис. 1, б), обусловленные положением высоты Солнца над горизонтом.

В течение периода наблюдений зимой 2010 г. на станции L2, которая располагалась в Амурском заливе на расстоянии около 3 км от берега п-ва Муравьева-Амурского на глубине 16 м в точке с координатами: 43°12' с.ш. и 131°52.9' в.д. (см. рис. 4), наблюдались минимальные изменения толщины льда от 0.5 м (6 февраля) до 0.55 м (19 марта). Изменения коэффициента ослабления света в слое льда (0.5 м) и подледном слое воды (1.5 м), рассчитанные по результатам наблюдений на станции L2 в 2010 г. представлены в табл. 2. При измерении в интервале времени с 11:20 до 16:45 ФАР на поверхности варьировала от 2233 до 4000 ммоль/с/м<sup>2</sup>, а коэффициент ослабления менялся от -1.1 до -2.1 (после выпадения снега), за исключением эксперимента, когда измерения проводились в вечернее время. Из-за существенного изменения спектрального состава



**Рис. 1.** а, б — профили освещенности ФАР(z), измеренные SBE-19plus в Амурском заливе на станции L2 (43°12' с. ш.; 131°52.9' в. д.) 6 февраля 2010 г., в — коэффициенты ослабления света  $Lg(\text{ФАР}_{z+dz}/\text{ФАР}_z)$ , рассчитанные с шагом по глубине  $dz = 0.25$  м. Профиль (1) получен в начале эксперимента в 14:13, (2) — в 14:25 и (3) — в 17:00.

**Fig. 1.** а, б — profiles of illumination PAR(z) measured by SBE-19plus in the Amur Bay at station L2 (43°12' N; 131°52.9' E) on February 6, 2010, and в — the light attenuation coefficients  $Lg(\text{PAR}_{z+dz}/\text{PAR}_z)$  calculated with a depth step of  $dz = 0.25$  m. Profile (1) was obtained at the beginning of the experiment at 14:13, (2) at 14:25 and (3) at 17:00.

Таблица 2

Значения ФАР (ФАР0, ФАР2, ФАР4 — соответственно, над поверхностью льда и на горизонтах 2 и 4 м), концентрации ХЛ в подлёдном слое, измеренные зондом SBE-19plus, и рассчитанные коэффициенты ослабления света в двухметровых слоях:  $K_{20} = \text{Lg}(\text{ФАР2}/\text{ФАР0})$  — «лёд+подлёдная вода» и  $K_{42} = \text{Lg}(\text{ФАР4}/\text{ФАР2})$  — в слое воды между горизонтами 2 и 4 м на станции L2 в 2010 г.

PAR values (PAR0, PAR2, PAR4 — respectively, above the ice surface and at horizons of 2 and 4 m), the *Chl* concentration in the ice layer and the calculated light attenuation coefficients in two-meter layers:  $K_{20} = \text{Lg}(\text{PAR2}/\text{PAR0})$  — “ice+ice water” and  $K_{42} = \text{Lg}(\text{PAR4}/\text{PAR2})$  — in the water layer between horizons of 2 and 4 m at station L2 in 2010

День	Время	ФАР0, ммоль/с/м <sup>2</sup>	ФАР2, ммоль/с/м <sup>2</sup>	ФАР4, ммоль/с/м <sup>2</sup>	$K_{20}$	$K_{42}$	ХЛ* мг/м <sup>3</sup>
06.02	14:32	4200	250	118	-1.2	-0.33	3.5
06.02	16:55	2100	77	38	-1.4	-0.31	8.3
09.02	13:50	3225	250	124	-1.1	-0.30	2.5
09.02	15:00	3045	168	87	-1.3	-0.29	1.9
11.02	16:20	3000	126	90	-1.4	-0.15	0.7
11.02	16:40	2233	103	71	-1.3	-0.16	0.9
13.02	16:45	2600	93	61	-1.4	-0.18	2.7
13.02	18:34	22	4	2.6	-0.7	-0.19	2.1
16.02	16:00	3420	164	113	-1.3	-0.16	0.6
16.02	16:30	3500	157	109	-1.3	-0.16	0.5
25.02 — осадки 8 мм** (месячная норма — 18 мм)							
03.03	14:10	4000	138	108	-1.5	-0.11	0.2
05.03 — осадки 5 мм (месячная норма — 33 мм)							
08.03	17:30	1710	36	25	-1.7	-0.16	0.3
08.03	18:00	1440	31	20	-1.7	-0.18	0.7
11.03	11:20	3300	164	119	-1.3	-0.14	0.1
11.03	12:00	3900	197	136	-1.3	-0.16	0.1
11.03	17:40	1200	41	29	-1.5	-0.16	0.5
11.03	17:55	350	22	15	-1.2	-0.17	0.4
15.03 — осадки 41 мм (месячная норма — 33 мм)							
17.03	15:20	4250	41	14	-2.0	-0.48	2.4
17.03	15:40	4500	39	13	-2.1	-0.48	2.1
19.03	16:10	2200	26	11	-1.9	-0.37	1.3
19.03	16:40	2100	28	11	-1.9	-0.39	1.2

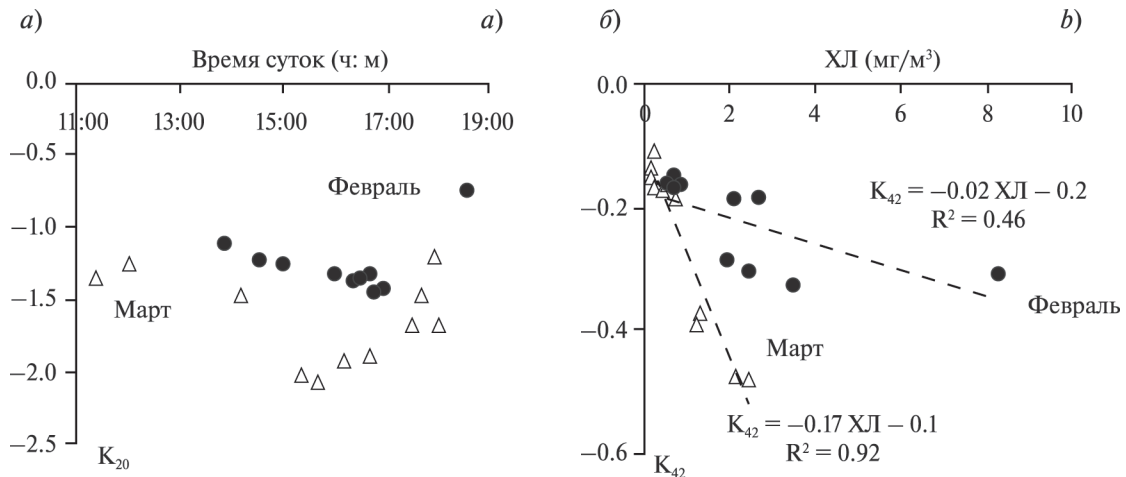
ХЛ\* — средняя величина концентрации хлорофилла-а в слое между горизонтами 2 и 4 м.

25.02 — осадки 8 мм\*\* — дата и количество выпавших осадков (архив <http://www.rp5.ru>).

света и его интенсивности коэффициент ослабления в 18:34 снижался до  $-0.7$ . Поэтому в дальнейшем мы выбирали измерения, выполненные в январе-феврале в интервале 11:00–16:00, а в марте, в связи с изменением продолжительности светового дня, до 18:00.

Изменение коэффициента ослабления в течение светового дня рассмотрено на рис. 2, а. Как в феврале, так и в марте его наиболее сильное уменьшение происходило в конце светового дня. В феврале и марте наблюдалась различная зависимость коэффициента ослабления от концентрации ХЛ в столбе воды (рис. 2, б). Вероятно, это объясняется выпадением снега в конце февраля, что вызвало в марте уменьшение подледной освещенности.

Судя по уравнению регрессии, с уменьшением освещенности в марте месяце выросло поглощение света на единицу ХЛ в 8.5 раз. Увеличился и коэффициент детерминации с 0.46 в феврале до 0.92 в марте и стал значимым при  $\gamma = 0.001$  для данной выборки (рис. 2, б) [21]. Можно полагать, что ослабление освещенности в марте приводило к адаптации фитопланктона к изменившимся условиям, вплоть до изменения его видового и размерного состава клеток одного и того же вида, что ранее было отмечено для подледного



**Рис. 2.** Распределение коэффициента ослабления света в двухметровом слое «лёд + подлёдная вода» в зависимости от времени суток (а) и коэффициента ослабления света в слое подлёдной воды между горизонтами 2 и 4 м в зависимости от усреднённых по слою концентраций ХЛ (б). Большие темные точки — значения в феврале, треугольники — в марте.

**Fig. 2.** Distribution of the light attenuation coefficient in a two-meter layer of “ice + ice-water” depending on the time of day (a) and the coefficient of light attenuation in the under-ice water layer between 2 and 4 m depending on the Chl concentrations averaged over the layer (b). Large dark dots are values in February, triangles — in March.

фитопланктона зал. Петра Великого [17]. При этом, как известно, меняются гидрооптические характеристики микроводорослей, в том числе выход флуоресценции на единицу ХЛ; зависимость этого показателя от видового состава нами была выявлена для разных районов Японского моря [22]. Возможно, на увеличение коэффициента поглощения света водой в марте влияло и увеличение мутности воды.

Для определения влияния толщины льда на ослабление света были проведены несколько серий экспериментов в различные годы в условиях отсутствия и наличия снежного покрова. Результаты эксперимента, выполненного 11.03.2010 г. на полигоне в Амурском заливе и в течение зимних месяцев 2016 г. в бух. Новик (о. Русский) при минимальной толщине снежного покрова, представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Толщина льда (h) и значения ФАР (ФАР0, ФАР2 — соответственно, над поверхностью льда и на горизонте 2 м подо льдом), измеренные на гидрологических станциях в Амурском заливе и бухте Новик**

**Ice thickness (h) and PAR values (PAR0, PAR2, respectively, above the ice surface and 2 m below the ice), measured at hydrological stations in the Amursky Bay and Novik Bay**

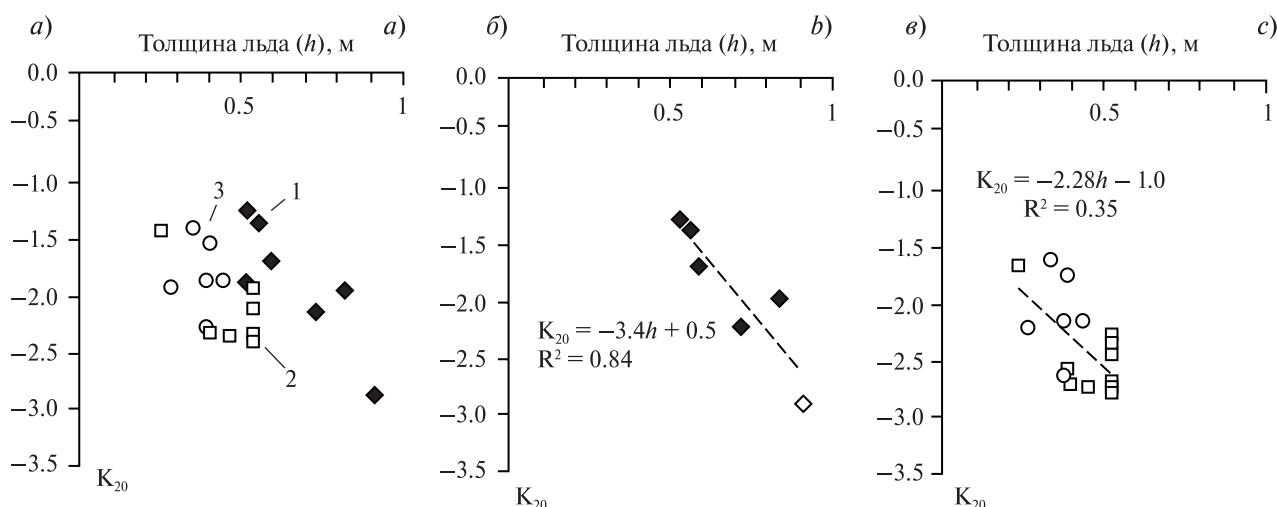
Год	День	Время	ФАР0	ФАР2	K <sub>20</sub>	h, м	Широта	Долгота
2010	11.03	10:55	3620	167	-1.3	0.55	43° 12.2	131° 54.9
(1*)	11.03	12:00	3910	217	-1.3	0.52	43° 12.0	131° 52.9
	11.03	13:10	4300	90	-1.7	0.59	43° 11.6	131° 50.0
	11.03	14:00	5400	40	-2.1	0.73	43° 12.2	131° 47.1
	11.03	15:35	4700	55	-1.9	0.83	43° 14.0	131° 48.8
	11.03	16:15	3700	5	-2.9	0.91	43° 16.4	131° 48.6
2016	15.01	14:30	3060	116	-1.4	0.25	43° 0.6	131° 53.0
(2)	19.01 — осадки 12 мм							
	27.01	15:15	2900	14	-2.3	0.41	43° 0.6	131° 53.0
	30.01	13:40	4100	22	-2.3	0.40	43° 0.6	131° 53.0
	03.02	15:15	3100	14	-2.3	0.46	43° 0.6	131° 53.0
	09.02 — осадки 8 мм							
	10.02	15:30	2500	10	-2.4	0.54	43° 0.6	131° 53.0

Год	День	Время	ФАР0	ФАР2	$K_{20}$	$h$ , м	Широта	Долгота
13.02 — осадки 9 мм								
	18.02	15:30	3300	25	-2.1	0.54	43° 0.6	131° 53.0
	24.02	16:00	3000	14	-2.3	0.54	43° 0.6	131° 53.0
28.02 — осадки 4 мм								
	02.03	15:50	2000	22	-2.0	0.54	43° 0.6	131° 53.0
2016	30.01	12:10	4800	60	-1.9	0.28	43° 3.3	131° 50.2
(3)	03.02	10:50	4200	170	-1.4	0.35	43° 3.3	131° 50.2
	10.02	11:30	4600	25	-2.3	0.39	43° 3.3	131° 50.2
	18.02	11:05	3600	51	-1.8	0.39	43° 3.3	131° 50.2
	24.02	11:45	5000	152	-1.5	0.40	43° 3.3	131° 50.2
	02.03	11:55	4250	60	-1.9	0.45	43° 3.3	131° 50.2

(1\*) — номер ряда данных  $K_{20}$ , представленных на рис. 3.

Данные таблицы показывают зависимость толщины льда на ослабление ФАР на горизонте 2 м. подо льдом, при этом видно, что для разных экспериментов связь для вышеуказанных параметров различна. Для изучения связи мы построили графики (рис. 3), где на рис. 3, а изображены данные всех зимних экспериментов из табл. 3. В случае выполнения эксперимента в один день (11.03.2010 г.), когда условия на полигоне мало меняются (рис. 3, б), наблюдалась высокая связь между толщиной льда и ослаблением света, коэффициент детерминации  $R^2 = 0.84$ . Когда эксперимент проводился в течение всего зимнего периода (рис. 3, в), коэффициент детерминации  $R^2 = 0.35$ . Такое снижение значимости коэффициента связано с тем, что при наблюдении в течение всего зимнего периода большую роль играют и другие факторы, такие как толщина снежного покрова, прозрачность льда, связанная с внутриледяным цветением фитопланктона, состоянием поверхности льда и др.

Для более подробного изучения связи коэффициента ослабления света в двухметровом слое «лёд+подлёдная вода» в зависимости от толщины льда нами было проведено 9 экспериментов в течение всего периода



**Рис. 3.** Распределения коэффициента ослабления света в двухметровом слое «лёд+подлёдная вода» в зависимости от толщины льда в экспериментах, выполненных 11 марта 2010 г. на полигоне в Амурском заливе (1) и в течение зимы 2016 г. в бух. Новик на гидрологических станциях, расположенных в её центральной (3) и кутовой (2) частях (а). б — распределение данных (1) с уравнением регрессии, в — распределение данных (2 и 3) с уравнением регрессии.  $K_{20}$  — коэффициент ослабления света в водной толще 0–2 м.

**Fig. 3.** Distributions of the light attenuation coefficient in a two-meter layer of “ice+ice water” depending on the ice thickness in the experiments implemented on March 11, 2010 at the training ground in the Amursky Bay (1) and during of the winter of 2016 in Novik Bay at hydrological stations located in its central (3) and inner (2) parts (a). b — data distribution (1) with the regression equation, c — data distribution (2 and 3) with the regression equation.  $K_{20}$  — light attenuation coefficient in the water column from 0 to 2 m.

ледостава в 2011 г. с 22 января по 17 марта. В табл. 4 и 5 представлены результаты по изменению этих параметров на разрезах, выполненных вдоль трассы мыс Красный — бух. Песчаная в северной части Амурского залива (рис. 4). Каждый разрез выполнялся в течение одного дня. Несмотря на это, коэффициенты корреляции и коэффициенты, связывающие толщину льда и показатель подводной освещенности, существенно менялись: для коэффициента  $a$  от 0.72 до 7.18; коэффициента  $b$  от 0.06 до 1.6;  $R$  — от 0.23 до 0.93 (полужирным шрифтом в таблице выделены достоверные значения при доверительном интервале  $\gamma = 0.05$ ) (табл. 4).

Таблица 4

**Результаты эксперимента, проведённого в 2011 г.: параметры уравнений, связывающие толщину льда с подледной освещенностью на глубине 2 м и коэффициенты детерминации и корреляции этих уравнений**

**The results of an experiment implemented in 2011: the parameters of the equations relating the ice thickness to the under-ice illumination at a depth of 2 m and the coefficients of determination and correlation of these equations**

Дата	n	R <sup>2</sup>	-a	b	R
22.01	6	0.78	7.18	1.6	<b>0.88</b>
23.01	5	0.12	2.93	1.31	0.35
01.02	7	0.49	5.10	0.90	0.70
02.02	7	0.62	2.93	0.06	<b>0.79</b>
10.02	7	0.86	4.97	0.90	<b>0.93</b>
13.02	7	0.73	4.05	0.50	<b>0.86</b>
16.02	9	0.51	1.88	0.32	<b>0.72</b>
14.03	9	0.05	0.72	0.99	0.23
17.03	9	0.33	2.51	0.35	0.57

Таблица 5

**Толщина льда ( $h$ ), концентрация хлорофилла- $a$  (ХЛ) и значения логарифма отношения ФАР над поверхностью льда к горизонту 2 м ( $lg$ ), измеренные на разрезе мыс Красный — бух. Песчаная в Амурском заливе в 2011 г. в точках Т.**

**В скобках к обозначениям точек Т приводится расстояние, на котором осуществлялся замер в километрах от мыса Красного до бух. Песчаной**

**Ice thickness ( $h$ ), concentration of chlorophyll- $a$  ( $Chl$ ) and the logarithm of the PAR ratio above the ice surface to the horizon of 2 m ( $lg$ ), measured at the Cape Krasnoye—Peschanaya Bay section in the Amursky Bay in 2011 at points T. In parentheses at the designation of points T the distance at which measurements were made is given in kilometers from from Cape Krasnoye to Peschanaya Bay**

Дата	Параметр	T1 (0.5)	T9 (1.3)	T12 (2)	T16 (3.1)	T19 (4.3)	T23 (5.7)	T26 (7)	T28 (8)	T30 (9.1)	T32 (10)	T34 (11)
22.01	$h$ , м	0.52	0.45	0.45	0.42	0.45	0.39					
	$lg$	-2.3	-1.6	-1.5	-1.4	-1.4	-1.4					
	ХЛ, мг/м <sup>3</sup>	4.52	3.38	3.81	2.50	3.47	3.50					
23.01	$h$ , м	0.51	0.51	0.42	0.42	0.45	0.34					
	$lg$	-2.1	-1.5	-1.3	-1.4	-1.4	-1.4					
	ХЛ, мг/м <sup>3</sup>	5.29	3.62	4.52	3.46	3.95	5.07					
01.02	$h$ , м	0.59	0.53		0.49		0.44	0.41		0.41		0.56
	$lg$	-2.9	-1.5		-1.6		-1.5	1.3		-1		-1.3
	ХЛ, мг/м <sup>3</sup>	8.24	8.22		6.56		5.49	2.93		2.14		1.73
02.02	$h$ , м	0.59	0.53		0.49		0.41	0.41		0.41		0.56
	$lg$	-2.3	-1.6		-1.0		-1.2	-1.2		1.2		-1.5
	ХЛ, мг/м <sup>3</sup>	8.94	8.72		6.85		3.06	2.97		1.8		1.81
10.02	$h$ , м	0.56	0.41		0.41		0.44	0.48		0.53		0.56
	$lg$	-1.7	-1.0		-1.1		-1.5	-1.5		-1.6		-2.3
	ХЛ, мг/м <sup>3</sup>	4.27	0.21		0.23		2.18	6.19		4.36		0.1
13.02	$h$ , м	0.55	0.42		0.42		0.44	0.51		0.53		0.55
	$lg$	-2	-1.2		-1.1		-1.4	-1.4		-1.4		-2
	ХЛ, мг/м <sup>3</sup>	1.87	0.42		0.42		2.35	3.13		2.93		5.31



Дата	Параметр	T1 (0.5)	T9 (1.3)	T12 (2)	T16 (3.1)	T19 (4.3)	T23 (5.7)	T26 (7)	T28 (8)	T30 (9.1)	T32 (10)	T34 (11)
16.02	$h$ , м			0.42		0.63	0.42	0.41	0.45	0.42	0.55	0.50
	$lg$			-1		-1.4	-1.1	-1.0	-1.3	-1.0	-1.3	-1.1
	ХЛ, мг/м <sup>3</sup>			1.16		1.12	1.6	0.43	6.62	0.95	2.87	3.56
14.03	$h$ , м	0.61	0.46	0.47	0.48	0.5	0.46	0.46		0.52		0.58
	$lg$	-1.3	-1.2	-1.5	-1.6	-1.4	-1.3	1.2		-1.1		-1.6
	ХЛ, мг/м <sup>3</sup>	0.28	0.13	0.43	0.62	0.25	0.13	0.16		0.22		0.21
17.03	$h$ , м	0.64	0.46	0.47	0.47	0.49	0.48	0.45		0.55		0.54
	$lg$	-2.0	-1.3	-1.6	-2	-1.8	-1.2	-1.4		-1.6		-1.5
	ХЛ, мг/м <sup>3</sup>	1.03	0.27	0.29	4.11	0.49	0.17	0.13		0.31		0.22

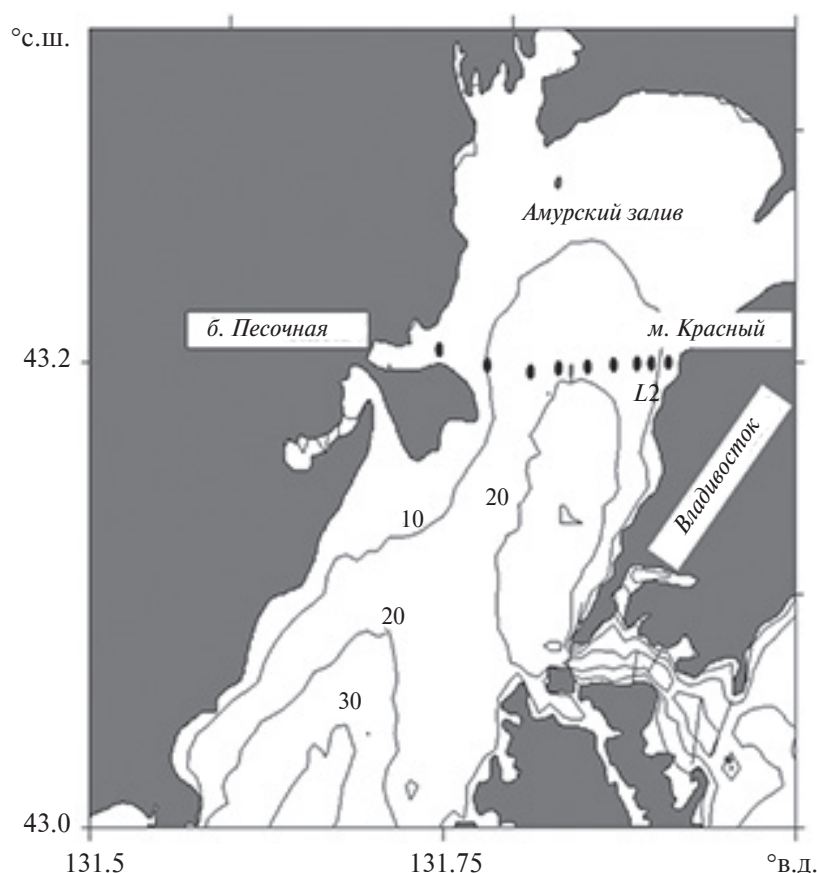


Рис. 4. Схема расположения гидрологических станций в Амурском заливе, выполненных с поверхности льда в 2011 г.

Fig. 4. Scheme of hydrological stations performed from the ice surface at the Amursky Bay in 2011.

Наиболее значимыми коэффициенты корреляции, связывающие толщину льда с подледной освещенностью на глубине 2 м., были в феврале месяце (табл. 4). С наступлением весны связь становилась менее значимой. Так, 14 марта коэффициент корреляции между толщиной льда и логарифмом отношения освещенности на глубине 2 м к надледной освещенности был наименьшим и составлял 0.23. При этом из данных табл. 5 видно, что при приблизительно равной толщине льда (ст. T9 и T16) содержание ХЛ на этих станциях существенно различалось. Становится понятным, что подледная освещенность зависит не только от толщины льда, но и других факторов, в частности концентрации ХЛ. Для того, чтобы в первом приближении оценить влияние

пигмента фитопланктона на ослабление света мы составили уравнение, описывающее связь логарифма ослабления света с толщиной льда и концентрацией ХЛ подо льдом: (толщина льда + (2 м — толщина льда) \* К, где К — коэффициент, учитывающий влияние ХЛ на ослабление света. При учете влияния содержания ХЛ на подводную освещенность мы получили коэффициент корреляции, равный 0.79 в случае, если съемка проводилась в интервале времени 13:15–19:36 (рекомендуемое время для марта: 11–18:00). Если считать коэффициент корреляции по данным съемки в рекомендуемое время, показатель возрастал до 0.92.

#### 4. Заключение

Таким образом, на экспериментальном материале показано влияние толщины льда, снежного покрова, времени суток и содержания ХЛ на подледную освещенность на акватории зал. Петра Великого. Значения освещенности, полученные по спутниковым данным за период наблюдения, показали высокую изменчивость, но, несмотря на это, средних по сезону значений этого параметра было достаточно для развития фитопланктона подо льдом.

#### 5. Финансирование

Работа выполнена по госбюджетным темам АААА-А17-1170301100330 и АААА-А17-117030110042-2.

#### Литература

1. *Eicken H., Bluhm B.A., Collins R.E., Gradinger R.R.* et al. Field Techniques in Sea-Ice Research in Cold Regions // Science and Marine Technology, [Ed. H. Shen], in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Paris, France, 2014. URL: <http://www.eolss.net>.
2. *Untersteiner N.* On the mass and heat budget of Arctic sea ice // Archiv fur Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie. 1961. Ser. A, Bd. 12, Ht. 2. P. 151–182.
3. *Thomas C.W.* On the transfer of visible radiation through sea ice and snow // Journal of Glaciology. 1963. V. 4, N34. P. 481–484.
4. *Черниговский Н.Т.* Радиационные свойства ледяного покрова центральной Арктики // Труды Арктического и Антарктического научно-исследовательского института. 1963. Т. 253. С. 249–260.
5. *Weller G.E.* Radiation diffusion in Antarctic ice media // Nature. 1969. V. 221, N5178. P. 355–356.
6. *Weller G.E., Schwerdtfeger P.* Radiation penetration in Antarctic plateau and sea ice // Polar meteorology. World Meteorological Organization Technical Note. 1967. N87. P. 120–141.
7. *Маришнуова М.С.* Основные закономерности радиационного баланса подстилающей поверхности и атмосферы в Арктике // Труды Арктического и Антарктического научно-исследовательского института. 1961. Т. 229. С. 5–53.
8. *Брызгин Н.Н., Коптев А.П.* О спектральном альбедо снежно-ледяного покрова // Проблемы Арктики и Антарктики. 1969. Т. 31. С. 79–83.
9. *Grenfell T.C., Maykut G.A.* The optical properties of ice and snow in the Arctic Basin // Journal of Glaciology. 1977. V. 18, N 80. P. 445–463.
10. *Ривьер И.К.* Особенности планктоценозов озер в разные экологические периоды (подледный и открытой воды) // Труды ИБВВ РАН. 2016. Т. 77, вып. 74. С. 59–75.
11. *Ерина О.Н., Пуклаков В.В., Соколов Д.И., Гончаров А.В.* Подледное цветение фитопланктона в Можайском водохранилище // Экологический сборник 7: Труды молодых ученых. Всероссийская (с международным участием) молодежная научная конференция. 2019. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podlednoe-tsvetenie-fitoplanktona-v-mozhayskom-vodohranilische> (дата обращения: 07.08.2019). КиберЛенинка: <https://cyberleninka.ru/article/n/podlednoe-tsvetenie-fitoplanktona-v-mozhayskom-vodohranilische>.
12. *Звалинский В.И., Марьяш А.А., Стоник И.В., Швецова М.Г., Сагалаев С.Г., Бегун А.А., Тищенко П.Я.* Продукционные и гидрохимические характеристики льда, подледной воды и донных осадков эстуария реки Раздольной (Амурский залив, Японское море) в период ледостава // Биология моря. 2010. Т. 36, № 3. С. 186–195.
13. *Orlova T.Y., Efimova K.V., Stonik I.V.* Morphology and molecular phylogeny of *Pseudohaptolina sorokinii* sp. nov. (Prymnesiales, Haptophyta) from the Sea of Japan. Russia // Phycologia. 2016. V. 55, N5. P. 506–514. doi: 10.2216/15–107.1
14. *Kevin R.A., Perovich D.K., Pickart R.S.* et al. Massive Phytoplankton Blooms Under Arctic Sea Ice // Science. 2012. V. 336. P. 1408.
15. *Стоник И.В.* Фитопланктон Амурского залива (Японское море) в условиях евтрофирования: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Владивосток: ИБМ ДВО РАН, 1999. 26 с.
16. *Паутова Л.А., Силкин В.А.* Зимний фитопланктон северо-западной части Японского моря. Некоторые закономерности формирования структуры фитоплена в прибрежном мелководье // Океанология. 2000. Т. 40, № 4. С. 553–561.
17. *Захарков С.П., Лобанов В.Б., Гордейчук Т.Н., Морозова Т.В., Штрайхерт Е.А.* Пространственная изменчивость хлорофилла «а» и видового состава фитопланктона в северо-западной части Японского моря в зимний период // Океанология. 2012. Т. 52, № 3. С. 381–391.

18. Рубин А.Б. Биофизика фотосинтеза и методы экологического мониторинга // Технология живых систем. 2005. Т. 2. С. 47.
19. Ильяш Л.В., Запара Е.В. Конкуренция двух морских диатомовых водорослей за азот мочевины и нитратов при трех уровнях освещенности // Журн. общ. биол. 2006. Т. 67, № 6. С. 464–475.
20. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов. Л.: Гидрометеиздат, 1984.
21. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы обработки данных. М.: Мир, 1980. 510 с.
22. Захарков С.П., Шамбарова Ю.В., Гордейчук Т.Н., Стоник И.В., Штрайхерт Е.А. Возможность использования данных зонда SBE для калибровки спутниковых данных концентрации хлорофилла А в Японском море // Известия ТИНРО. 2014. Т. 177. С. 209–218.

## References

1. Eicken H., Bluhm B.A., Collins R.E., Gradinger R.R. et al. Field Techniques in Sea-Ice Research in Cold Regions. *Science and Marine Technology* [Ed. H. Shen], in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Paris, France, 2014. URL: <http://www.eolss.net>.
2. Untersteiner N. On the mass and heat budget of Arctic sea ice. *Archiv fur Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*. 1961, Ser. A, Bd. 12, Ht. 2, 151–182.
3. Thomas C.W. On the transfer of visible radiation through sea ice and snow. *Journal of Glaciology*. 1963, 4, 34, 481–484.
4. Chernigovskiy N.T. Radiational properties of the ice cover of the Central Arctic. *Proceedings of the Arctic and Antarctic Research*. 1963, 253, 249–260 (in Russian).
5. Weller G.E. Radiation diffusion in Antarctic ice media. *Nature*. 1969, 221, 5178, 355–356.
6. Weller G.E., Schwerdtfeger P. Radiation penetration in Antarctic plateau and sea ice. Polar meteorology. *World Meteorological Organization Technical Note*. 1967, 87, 120–141.
7. Marshunova M.S. Principal characteristics of the radiation balance of the underlying surface and of the atmosphere in the Arctic. *Proceedings of the Arctic and Antarctic Research*. 1961, 229, 5–53 (in Russian).
8. Bryazgin N.N., Koptev A.P. Spectral albedo of snow — ice cover. *Problems of the Arctic and Antarctic*. 1969, 31, 79–83 (in Russian).
9. Grenfell T.C., Maykut G.A. The optical properties of ice and snow in the Arctic Basin. *Journal of Glaciology*. 1977, 18, 80, 445–463.
10. Riviere I.K. Peculiarities of planktocenoses of lakes in different ecological periods (under-ice and open water). *Transactions of IBVV RAS*. 2016, 74, 77, 59–75 (in Russian).
11. Erina O.N., Puklakov V.V., Sokolov D.I., Goncharov A.V. Ice flowering of phytoplankton in the Mozhaisk reservoir. *Ecological collection 7: Proceedings of young scientists. All-Russian (with international participation) youth scientific conference*. 2019, 1, URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podlednoe-tsvetenie-fitoplanktona-v-mozhayskom-vodohranilische> (date of access: 08.07.2019). CyberLeninka: <https://cyberleninka.ru/article/n/podlednoe-tsvetenie-fitoplanktona-v-mozhayskom-vodohranilische> (in Russian).
12. Zvalinsky V.I., Maryash A.A., Stonik I.V., Shvetsova M.G., Sagalaev S.G., Begun A.A., Tishchenko P.Ya. Production and hydrochemical characteristics of ice, subglacial water and bottom sediments of the estuary of the Razdolnaya river (Amur Bay, Sea of Japan) during the period of freezing. *Sea Biology*. 2010, 36, 3, 186–195 (in Russian).
13. Orlova T.Y., Efimova K.V., Stonik I.V. Morphology and molecular phylogeny of Pseudohaptolina sorokinii sp. nov. (Prymnesiales, Haptophyta) from the Sea of Japan. Russia. *Phycologia*. 2016, 55, 5, 506–514. doi: 10.2216/15–107.1
14. Kevin R.A., Perovich D.K., Pickart R.S. et al. Massive Phytoplankton Blooms Under Arctic Sea Ice. *Science*. 2012, 336, 1408.
15. Stonik I.V. Phytoplankton of the Amur Bay (Sea of Japan) under eutrophication: Abstract. dis. cand. biol. sciences. *Vladivostok, IBM FEB RAS*, 1999. 26 p (in Russian).
16. Pautova L.A., Silkin V.A. Winter phytoplankton of the northwestern part of the Sea of Japan. Some regularities of the formation of the phytocene structure in shallow coastal water. *Oceanology*. 2000, 40, 4, 553–561 (in Russian).
17. Zakharkov S.P., Lobanov V.B., Gordeychuk T.N., Morozova T.V., Shtraikhert E.A. Spatial variability of the chlorophyll *a* and the specific structure of the phytoplankton in the northwestern part of the Sea of Japan during the winter period. *Oceanology*. 2012, 52, 3, 354–363.
18. Rubin A.B. Biophysics of photosynthesis and environmental monitoring methods. *Tekhnologii Zhivyykh Sistem*. 2005, 2, 47 (in Russian).
19. Ilyash L.V., Zapara E.V. Competition of two marine diatoms for urea nitrogen and nitrates at three levels of illumination. *Zhurnal Obshchey Biologii*. 2006, 67, 6, 464–475 (in Russian).
20. International symbols for sea ice charts and nomenclature of sea ice. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 1984 (in Russian).
21. Johnson N., Lyon F. Statistics and experimental design in engineering and science: Data processing methods. *Moscow, Mir*, 1980. 510 p (in Russian).
22. Zakharkov S.P., Shambarova Yu.V., Gordeychuk T.N., Stonik I.V., Shtraikhert E.A. The possibility of using SBE probe data for calibration of satellite data on the concentration of chlorophyll A in the Sea of Japan. *Izvestiya TINRO*. 2014, 177, 209–218 (in Russian).