

**ИССЛЕДОВАНИЯ БИООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЗ. ИССЫК-КУЛЬ  
УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ЛИДАРОМ**

*Пелевин В.В., Институт океанологии им. Ширшова РАН (РФ), email: vvpelevin@gmail.com;  
Шаршеева К.Т., ст.преп. каф. ИВТ КГТУ им. И. Раззакова, пр. Ч. Айтматова 66,г. Бишкек,  
тел. 0312545182, email: kunduz2000@mail.ru;  
Коновалов Б.В., Институт океанологии им. Ширшова РАН (РФ);  
Завьялов П.О. Институт океанологии им. Ширшова РАН (РФ);*

*Тентиева С.М., к.т.н., доц. каф ИВТ КГТУ им. И. Раззакова, пр. Ч. Айтматова 66,г. Бишкек, тел. 0312545182*

*Алымкулов С.А., д.т.н., проф. каф ИВТ КГТУ им. И. Раззакова, пр. Ч. Айтматова 66,г. Бишкек, тел. 0312545182*

**Аннотация.** Цель работы- исследование гидрофизических, гидрохимических и других аспектов состояния оз. Иссык-Куль, отбор проб воды для калибровки лидара на хлорофилл «а».

Для исследования биооптических характеристик оз. Иссык-Куль ежегодно проводятся экспедиционные работы, в результате которых каждый год строятся высокоразрешающие карты пространственного распределения следующих параметров: площадное распределение хлорофилла «а», распределение взвешенного органического вещества в верхнем и приповерхностном слоях оз. Иссык-Куль. На основе собранных данных построена зависимость концентрации хлорофилла «а» и его пигментного индекса, для 2015, 2016 и 2017гг.

**Ключевые слова:** лазерный лидар, биооптические характеристики, хлорофилл «а», пространственное распределение, концентрация взвеси.

#### **STUDIES OF BIO-OPTICAL CHARACTERISTICS OF LAKE ISSYK-KUL WITH ULTRAVIOLET FLUORESCENT LASER LIDAR**

*Pelevin V.V., Institute of Oceanology named after Shirshov of the Russian Academy of Sciences, email: vypelevin@gmail.com*

*Sharshheeva K.T., senior lecture, KSTU named after I. Razzakov, Ch. Aitmatov av.66, Tel.: 0312545182, email: kunduz2000@mail.ru*

*Konovalov B.V., Institute of Oceanology named after Shirshov of the Russian Academy of Sciences*

*Zavialov P.O. Institute of Oceanology named after Shirshov of the Russian Academy of Sciences*

*Tentieva S.M. associate professor, KSTU named after I. Razzakov, Ch. Aitmatov av.66*

*Alymkulov S.A. professor, KSTU named after I. Razzakov, Ch. Aitmatov av.66*

**Annotation.** The purpose of this work is to study the hydrophysical, hydrochemical and other aspects of the state of the lake. Issyk-Kul, water sampling for lidar calibration for chlorophyll "a".

Expeditionary work is carried out annually to study the bio-optical characteristics of the Issyk-Kul Lake, as a result of which high-resolution spatial distribution maps of the following parameters are constructed every year: the area distribution of chlorophyll "a", the distribution of suspended organic matter in the upper and near-surface layers of the lake. Issyk-Kul. On the basis of the collected data, the dependence of the concentration of chlorophyll "a" and its pigment index was constructed, for 2015, 2016 and 2017.

**Keywords:** laser lidar, biooptical characteristics, chlorophyll "a", spatial distribution, concentration of suspended matter.

**Введение.** Иссык-Куль, что в переводе с киргизского означает «горячее озеро», является одним из глубочайших высокогорных озер планеты. Оно располагается на высоте 1607 м над уровнем моря, пролегая с востока на запад на 182 км. Объем водных запасов озера составляет 1738 км<sup>3</sup>, а наибольшая глубина по разным данным от 668 до 702 м. По своим характеристикам, физическим, климатологическим и историко-культурным, его вполне можно считать «среднеазиатским морем». Также сложно переоценить его рекреационное значение, ведь на берегах Иссык-Куля уже много десятилетий процветает туристическая инфраструктура, а в ближайшие годы ее, по всей видимости, ожидает дальнейшее интенсивное развитие.

Изучение озера Иссык-Куль с участием Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук было начато в 2014 году в ходе пробной экспедиции в районе г. Чолпон-Ата. Начиная с 2015 года ежегодно организуется комплексная научная экспедиция на НИС «Молтур», охватывающая всю акватории озера. В ежегодных экспедициях в составе научной группы принимает участие отряд гидрооптических исследований.

В 2015 и 2017 годах работы проводились примерно в одно и то же время (конец июня – начало июля), что позволяет изучить межгодовую изменчивость биооптических параметров среды. В 2016 году работы проводились в ноябре.

**Материалы и методы.** Промежуточным звеном между спутниковым мониторингом морской поверхности и точечными контактными измерениями является техника дистанционного лазерного зондирования верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) водоема. Для обеспечения максимальной плотности измерений на ходу судна и на станциях был использован ультрафиолетовый флуоресцентный лидар УФЛ-9, работающий в квазинепрерывном режиме. Лидары серии УФЛ были разработаны в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН и успешно применяется для научных исследований различных акваторий по всему миру, к настоящему времени проведено более 40 экспедиций с его использованием.

Данный лазерный прибор служит для измерения концентраций таких важнейших компонентов водной среды, как хлорофилла «а», взвешенного и растворенного органического вещества и минеральной взвеси. Также разработанная методика позволяет оперативно обнаруживать загрязнения акваторий нефтяными углеводородами, фенолами, канализационными отходами, сельскохозяйственными стоковыми водами и другими органическими веществами, а также дистанционно измерять концентрации веществ органического происхождения, в том числе нефтепродуктов.

Лидар устанавливается на любом плавсредстве или монтируется стационарно на надводных конструкциях. Работает в автоматическом режиме, частота импульсов зондирования среды 2 Гц, что позволяет при использовании маломерного скоростного судна оперативно обследовать водоем на предмет загрязнений органического антропогенного характера, дать количественную оценку загрязнению, оконтурить зону распространения загрязнения, а также во многих случаях определить его источник.

Измерения производятся независимо от погодных условий и времени суток. Органические вещества, обнаруживаемые лидаром, в том числе нефтепродукты, могут находиться как в виде пленки на поверхности моря, так и в растворенном или эмульсированном состоянии в водной толще. Лидар способен измерить среднюю объемную концентрацию компонентов водной среды в поверхностном слое толщиной около 5 м (в открытых прозрачных водах) с полной погрешностью измерений не более 16% и с высокой чувствительностью.



Рис. 1. Лазерный лидар УФЛ-9 на борту НИС «Молтур».

Основные параметры лидара УФЛ-9:

- Длина волны лазера – 355, 532 нм;
- Частота зондирования – 2 Гц;
- Энергия зондирующего импульса (355 нм) – 1,5 мДж;
- Длительность зондирующего импульса – 6 нс;
- Входная апертура приемника – 140 мм;
- Диапазон дальностей работы – 2–30 м;
- Количество оптических каналов приемной системы – 4;
- Постоянные спектральные каналы – 355, 404, 440 нм;
- Сменные спектральные каналы приемника в турели – 385, 424, 460, 497, 550, 620, 651, 685 нм;
- Вес прибора, габариты – 35 кг, 700x500x230 мм;
- Работа лидара полностью автоматизирована, обслуживается одним оператором;
- GPS-привязка каждого лазерного импульса;
- Габариты позволяют использовать лидар как с надувной лодки, так и с борта океанского судна.

Диапазоны измеряемых величин лидаром УФЛ-9:

концентрация хлорофилла «а», мг/м <sup>3</sup>	0,01÷400;
концентрация общего органического углерода, мг/м <sup>3</sup>	0,1÷100;
окрашенное органическое вещество (a <sub>00В,440</sub> ), м <sup>-1</sup>	0,003÷10;
содержание взвеси, мг/л	0,1÷500;
толщина слоя зондирования, м	0,1–10.

Лидары УФЛ-серии применяются для решения следующих научных и экологических прикладных задач:

- Высокопроизводительное исследование приповерхностного слоя моря на предмет пространственной изменчивости концентраций хлорофилла «а», органических веществ в растворенном и взвешенном состоянии и минеральной взвеси.
- Мониторинг источников загрязнения моря и пресных акваторий, оперативное оконтуривание зоны загрязнения.
- Оперативный контроль с борта катера количества нефтепродуктов, остающихся на морской поверхности в процессе очистки акватории от нефтяного загрязнения.
- Обнаружение слабых утечек нефтепродуктов из трубопроводов, а также с нефтяных терминалов и буровых платформ при установке на них лидара или при работе с патрульного катера.
- Возможно использование лидара для контроля чистоты пляжей, а также других поверхностей суши для обнаружения малых утечек нефтепродуктов из нефтетрубопроводов, работа с борта низколетящих авианосителей.

Для получения итоговых высокоразрешающих карт пространственного распределения концентраций хлорофилла «а», взвеси (в основном минеральной) и веществ органического происхождения, а также оценки толщины пленки нефтепродуктов на поверхности, проводится калибровка лидара по данным обработки проб воды в текущих экспедиционных условиях. На данный момент проведена калибровка лидара во множестве соленых и пресноводных бассейнах по данным пробоотбора, при этом, как правило, получены удовлетворительные корреляционные зависимости. Измерения биооптических полей по флуоресценции и обратному рассеянию водной среды происходит *in situ*, неинвазивным образом, что увеличивает точность их определения. Применяемая методика обработки лидарных сигналов была разработана и апробирована в ходе десятков экспедиций Института

океанологии им. П.П. Ширшова РАН в различных акваториях Мирового океана и внутренних водоемах суши [1, 2, 3].

**Результаты и обсуждение.** В ходе рейсов научно-исследовательского судна «Молтур», на борту которого проводились экспедиционные работы по исследованию гидрофизических, гидрохимических и других аспектов состояния водоема, производился отбор проб воды для калибровки лидара на хлорофилл «а», органический углерод и общую взвесь, и обрабатывались в соответствии со стандартными методиками [4,5]. Измерения проводились на равномерно покрывавших всю акваторию озера станциях, общее число которых составляло около 20, в каждой экспедиции. Кроме того, измерения проводились непосредственно на переходах судна между станциями.

В каждый год были построены высокоразрешающие карты пространственного распределения указанных выше параметров. На рис. 2-10 приводятся некоторые из них.

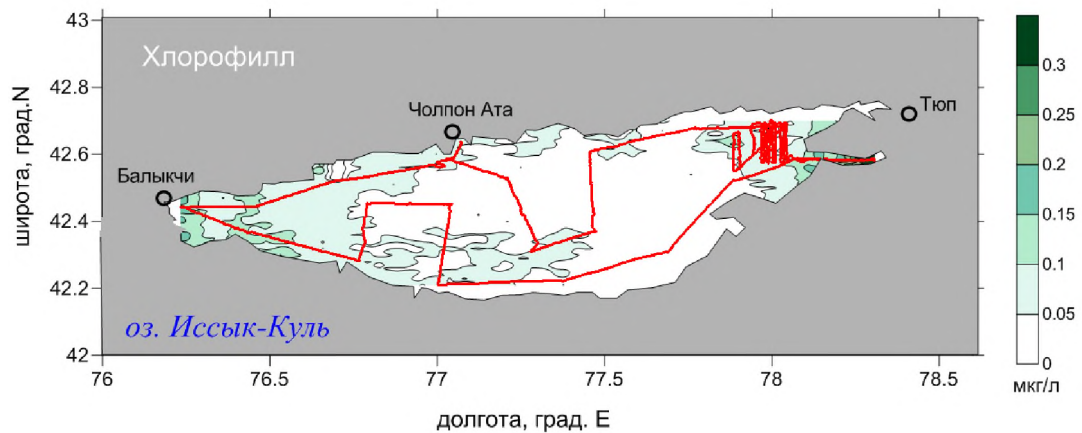


Рис. 2. Площадное распределение хлорофилла «а» в приповерхностном слое оз. Иссык-Куль, 23-26 июня 2015 г., по данным лидара УФЛ-9

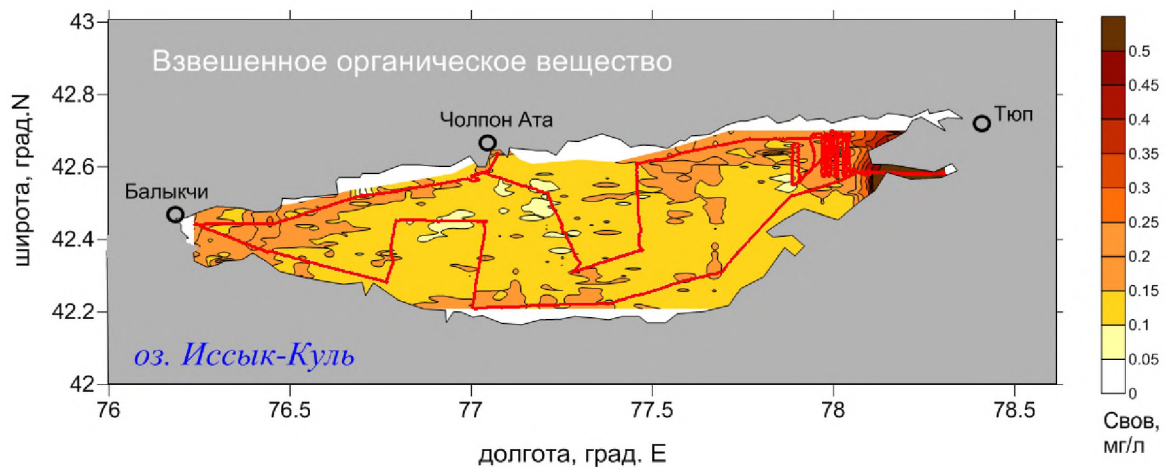


Рис. 3. Площадное распределение взвешенного органического вещества в приповерхностном слое оз. Иссык-Куль, 23-26 июня 2015 г., по данным лидара УФЛ-9

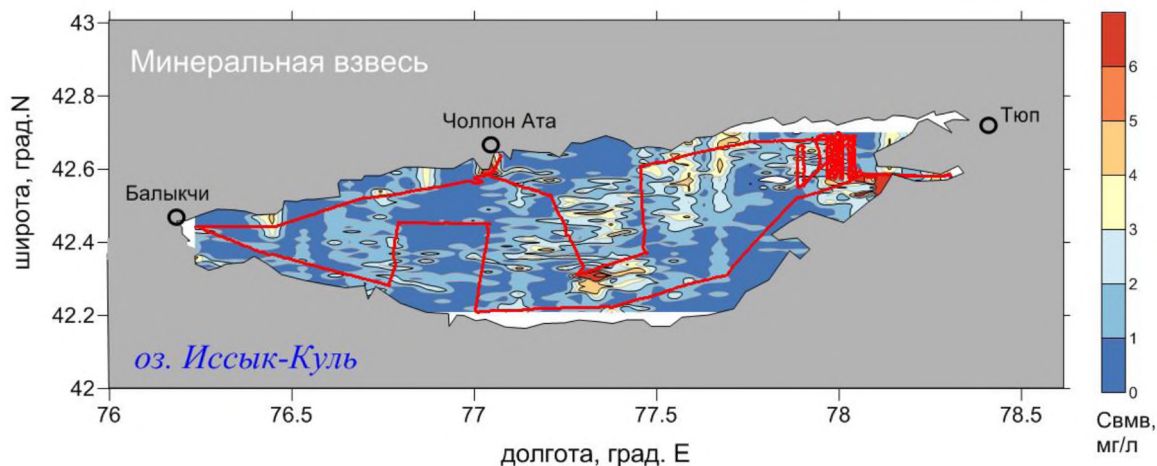


Рис. 4. Площадное распределение общей взвеси в приповерхностном слое оз. Иссык-Куль, 23-26 июня 2015 г., по данным лидара УФЛ-9

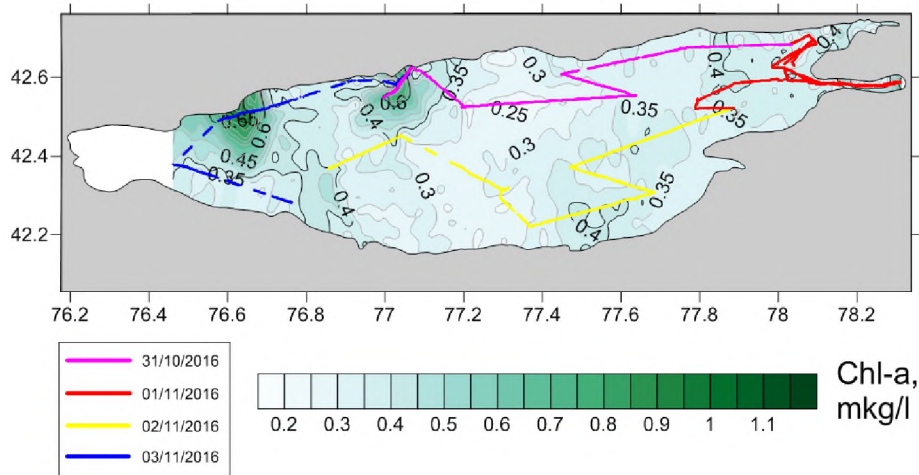


Рис. 5. Пространственное распределение хлорофилла «а» в верхнем слое озера по данным лидара УФЛ-9, съемка в период 31.10 – 03.11.2016 г

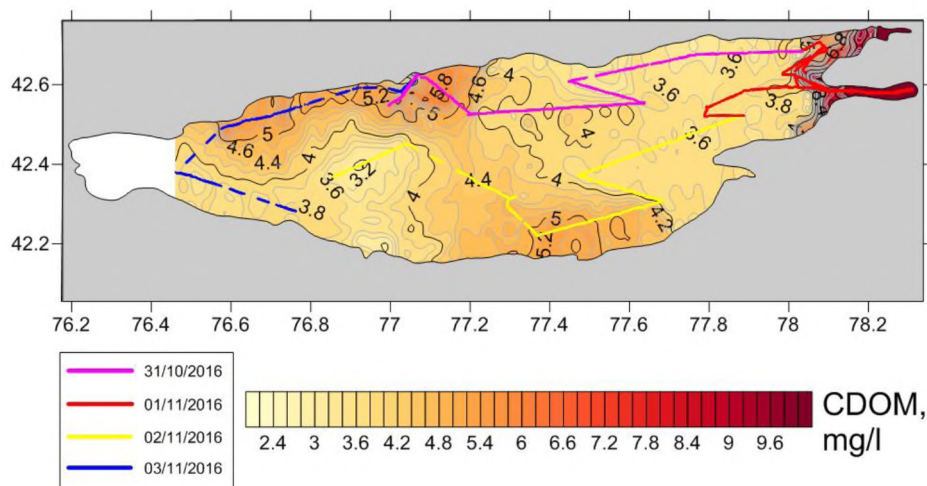


Рис. 6. Пространственное распределение окрашенного РОВ в верхнем слое озера по данным лидара УФЛ-9, съемка в период 31.10 – 03.11.2016 г

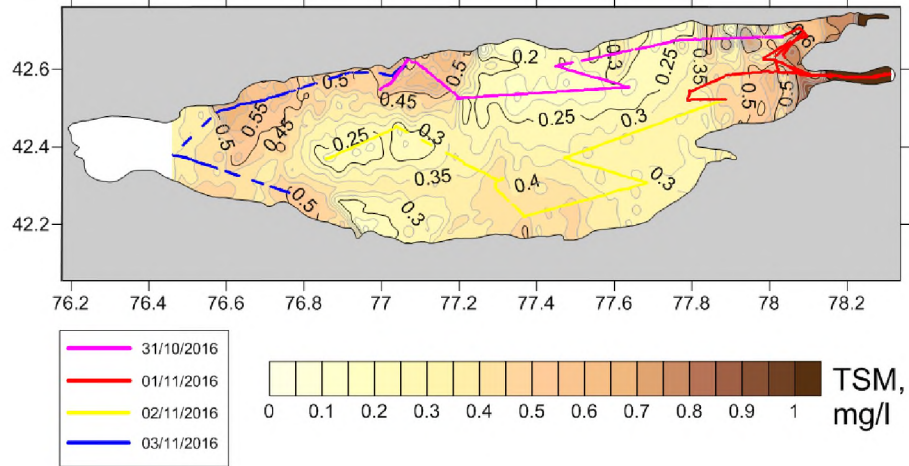


Рис. 7. Пространственное распределение общей взвеси в верхнем слое озера по данным лидара УФЛ-9, съемка в период 31.10 – 03.11.2016 г

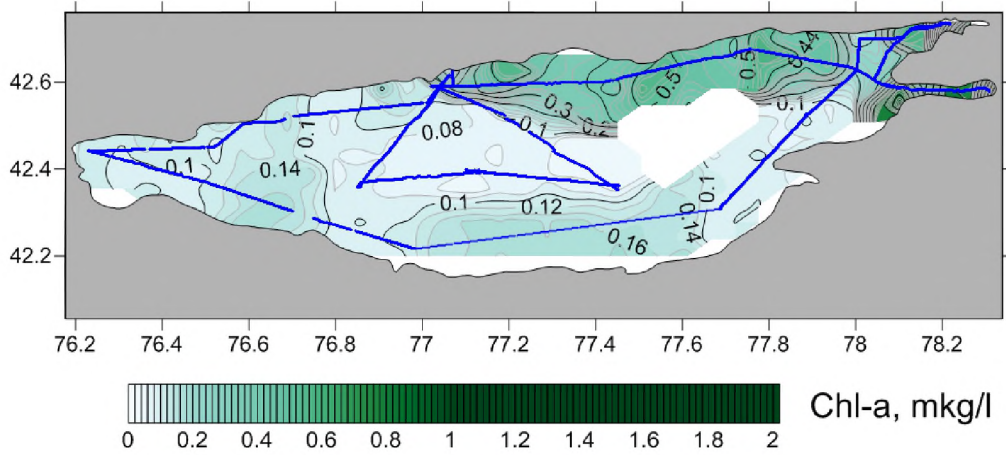


Рис. 8. Распределение концентраций хлорофилла «а» в приповерхностном слое озера Иссык-Куль по данным лидарного зондирования в период с 26 по 30 июня 2017 года

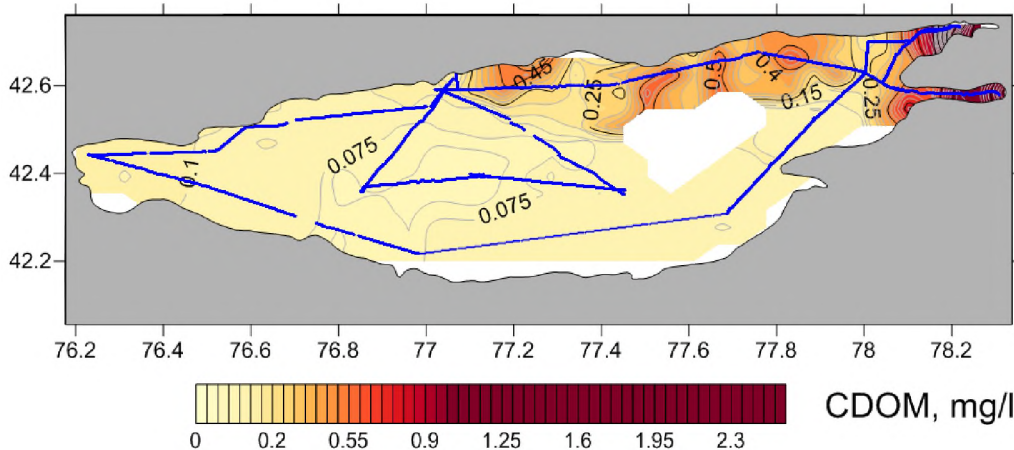


Рис. 9. Распределение концентраций окрашенного РОВ в приповерхностном слое озера Иссык-Куль по данным лидарного зондирования в период с 26 по 30 июня 2017 года

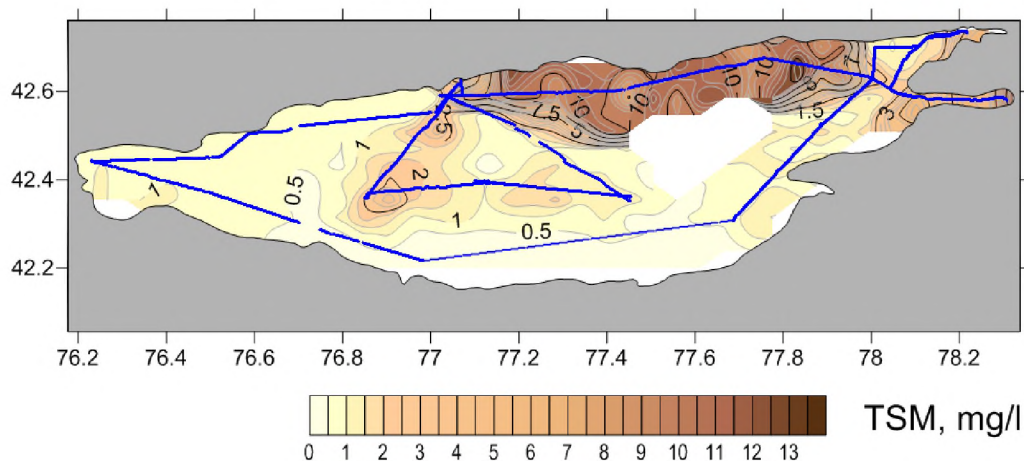


Рис. 10. Распределение концентраций общей взвеси в приповерхностном слое озера Иссык-Куль по данным лидарного зондирования в период с 26 по 30 июня 2017 года

При сопоставлении результатов измерений летних экспедиций на Иссык-Куль в 2015 и в 2017 гг. следует отметить, что концентрации хлорофилла «а» превышают соответствующие значения, полученные в 2015 году, взвешенное органическое вещество находится примерно в тех же пределах, а концентрации общей взвеси ниже, чем в июне 2015 года, при этом максимальное значение концентрации общей взвеси в 2015 году превосходило максимальное значение за 2017 год более чем в 10 раз (в устьях рек Каракол и Жыргалан).

В таблице 1 приведена сводные данные о диапазонах изменчивости за 2015, 2016 и 2017 гг.

Таблица 1

	06/2015 min	06/2015 max	11/2016 min	11/2016 max	06/2017 min	06/2017 max
<b>Схл, мкг/л</b>	0.004	1.48	0.17	1.7	0.03	0.03
<b>Свов, мг/л</b>	0.024	6.23	2.5	42	0.045	3.15
<b>Свмв, мг/л</b>	0.276	130.82	0.08	2.4	0.07	13

В 2015 и 2017 годах экспедиционные исследования на оз. Иссык-Куль проходили в одно и то же время (23-26 июня 2015 г. и 26-30 июня 2017 г.). Маршруты следования судна были в целом схожи, мы проходили на расстоянии 3-5 миль от берега вдоль него, направлением циркуляции по часовой стрелке, замыкая нашу траекторию в г. Чолпон-Ата. Кроме того, мы целенаправленно отклоняли маршрут или производили отдельную циркуляцию по малому радиусу для достижения точки с максимальной глубиной в центральной части озера, в обеих экспедициях. Таким образом, если условно разделить части маршрутов на северную, восточную, южную, западную и центральную, и усреднив значения концентраций измеряемых лидаром параметров в квазинепрерывном режиме, мы получим следующую таблицу 2:



	Северо-Запад						Северо-Восток					
	Среднее		Макс		Мин		Среднее		Макс		Мин	
2015	0.09	0.95	1.48	32.3	0.01	0.01	0.055	1.6	1.15	23.2	0.01	0.01
2016	0.41	0.44	1.72	8.05	0.04	0.02	0.28	0.37	1.1	15.8	0.03	0.01
2017	0.38	11.3	2.42	199	0.08	4.68	0.3	13.9	1.21	148	0.05	4.87
	<i>Хл-а</i>	<i>Взвесь</i>	<i>Хл-а</i>	<i>Взвесь</i>	<i>Хл-а</i>	<i>Взвесь</i>	<i>Хл-а</i>	<i>Взвесь</i>	<i>Хл-а</i>	<i>Взвесь</i>	<i>Хл-а</i>	<i>Взвесь</i>
	Юго-Запад						Юго-Восток					
	Среднее		Макс		Мин		Среднее		Макс		Мин	
2015	0.09	1.29	0.39	17.34	0.01	0.01	0.04	1.1	0.31	23.4	0.01	0.26
2016	0.34	0.41	0.75	7.76	0.05	0.03	0.38	0.34	0.68	5.25	0.01	0.02
2017	0.39	9.47	1.47	56.8	0.06	4.74	0.29	14.8	1.12	341	0.02	5.12

Также особый интерес представляет анализ данных о концентрациях хлорофилла «а» относительно пигментного индекса, измеренного на пробах воды и характеризующего фазу сукцессии (возраст) фитопланктона. На рис. 11 представлены соответствующие зависимости для трех экспедиций.

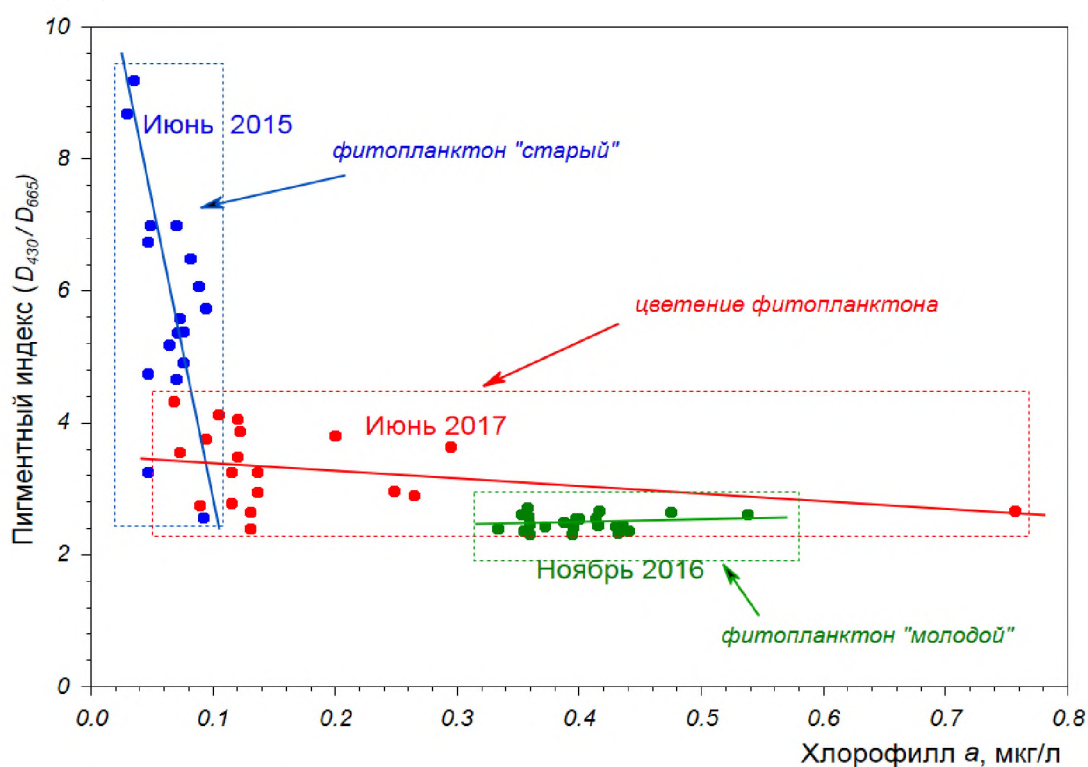


Рис. 11. Зависимость концентрации хлорофилла «а» и его пигментного индекса, для 2015, 2016 и 2017 гг.

Интерпретировать полученные зависимости можно исходя из предположения, что в 2015 году весеннее цветение фитопланктона началось раньше, чем в 2017, и к концу июня он уже "отцвел". В 2017 году мы, по-видимому, застали пик цветения, в самом начале его спада - пигментный индекс еще относительно небольшой, что соответствует ранней фазе сукцессии фитопланктона, но средние концентрации большие, и особенно большие пиковые значения. Для случая ноября 2016 года можно предполагать начало осеннего цветения, когда пигментный индекс находится на минимуме при достаточно больших концентрациях хлорофилла «а», но пик цветения еще впереди.

В качестве заключения хотелось бы отметить важность комплексных исследований озера Иссык-Куль на постоянной и регулярной основе, с использованием средств

оперативного дистанционного мониторинга водной экосистемы, в том числе лидарной техники и средств спутникового наблюдения. Совместные работы в рамках российско-киргизского научного сотрудничества будут продолжены в целях накопления и систематизации знаний об уникальной природной экосистеме Иссык-Куля для ее сохранения и защиты от множественных рисков антропогенного и природного генезиса.

### **Литература**

1. Palmer S.C., Pelevin V.V., Goncharenko I.V., Kovács A., Zlinszky A., Présing M., Horváth H., Nicolás-Perea V., Balzter H., Tóth V. Ultraviolet Fluorescence LiDAR (UFL) as a Measurement Tool for Water Quality Parameters in Turbid Lake Conditions // Remote Sensing. 2013. Vol. 5 (9). P. 4405-4422. <http://www.mdpi.com/2072-4292/5/9/4405/htm>.
2. Pelevin V., Zlinszky A., Khimchenko E., Toth V. Ground truth data on chlorophyll-a, chromophoric dissolved organic matter and suspended sediment concentrations in the upper water layer as obtained by LIF lidar at high spatial resolution // International Journal of Remote Sensing. 2017. Vol. 38. No. 7. P. 1967-1982.
3. Айбулатов Н.А., Завьялов П.О., Пелевин В.В. Особенности гидрофизического самоочищения российской прибрежной зоны Черного моря близ устьев рек // Геоэкология. 2008. № 4. С. 301-310.
4. ГОСТ 17.1.04.02-90. «Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а». Госкомитет СССР по охране природы. М.1990.16 С.
5. Коновалов Б.В., Кравчишина М.Д., Беляев Н.А., Новигатский А.Н. Определение концентрации минеральной взвеси и взвешенного органического вещества по их спектральному поглощению //Океанология, 2014. Т.54. №4. С.1-9.