

**Теоретический и прикладной  
научно-технический журнал**



ISSN 1694-5557

# **ИЗВЕСТИЯ**

**Кыргызского государственного технического  
университета им. И. Раззакова  
№ (46)**



**БИШКЕК 2018**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**  
**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**им. И. РАЗЗАКОВА**

**ISSN 1694-5557**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ**  
**ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. И. РАЗЗАКОВА**  
**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

**2018**

**№2 (46)**

**Бишкек**

**Издательский центр «Техник» 2018**

### SEASONAL MIXING REGIME OF EURASIAN LAKES: MAJOR DRIVERS AND CLIMATIC TRENDS.

*G. Kirillin, Leibniz-Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries, Berlin, Germany*  
*K. Sharshheeva, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan*  
*N. Israilova, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan*  
*S. Alymkulov, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan*  
*A. Kurbaniyazov, Yasawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan*  
*P. Zavitlov, Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

#### Annotation

We discuss and summarize recent findings from several lake regions of Eurasia to reveal the typical features of their mixing regime and major threats from the anthropogenic activities and global warming. The continental climate ensures high annual amplitudes in the heat supply; hence the majority of lakes, either in the Arctic or in the Central Asia, tend to dimictic behavior, being well mixed at least twice a year. However, salinization of arid lakes, trend to warmer winters in temperate regions, and deepening of Arctic lakes due to permafrost thaw can produce quick and drastic changes in the lake mixing regimes.

**Keywords:** Oligomictic lakes, meromictic lakes, global warming, melting of permafrost.

### СЕЗОННЫЙ СМЕШАННЫЙ РЕЖИМ ЕВРАЗИЙСКИХ ОЗЕР: ОСНОВНЫЕ ДРАЙВЕРЫ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ТЕНДЕНЦИИ.

*Кириллин Г., Институт пресноводной экологии и внутреннего рыболовства Лейбница, Берлин, Германия*  
*Шаршеева К., Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызстан*  
*Исраилова Н., Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызстан*  
*Алымкулов С., Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызстан*  
*Курбаниязов А., Международный казахстанско-турецкий университет им. Ясави, Туркестан, Казахстан*  
*Завьялов П., Институт океанологии им. С.М. Ширшова РАН, Москва, Россия*

#### Аннотация

Обсуждены новые результаты исследований в различных озерных регионах Евразии с целью выявить типичные черты их гидрофизического режима и основные угрозы связанные с антропогенной активностью и глобальным потеплением. Континентальный климат характеризуется большими сезонными амплитудами потоков тепла, вследствие чего большинство озер от Арктики до Средней Азии имеет димиктический сезонный режим, полностью перемешиваясь, как минимум дважды в год. Однако, засоление ардных озер, тенденция к теплым зимам в умеренных регионах и углубление термокарстовых озер Арктики в результате таяния мералоты — способны коренным образом и в короткое время изменить их гидрофизический режим.

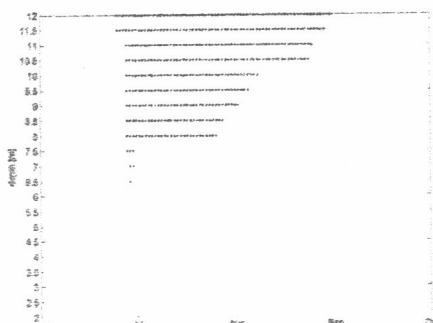
**Ключевые слова:** Олигомиктические озера, меромиктические озера, глобальное потепление, таяние вечной мералоты.

**Introduction.** The continent of Eurasia hosts several major lake systems. Their value for the regional and global climate, water resources, and sustainable ecosystem functioning can hardly be overestimated. While some of the lake systems—like the “European Great Lakes” Ladoga and Onega, the post-glacial lakes of Fennoscandia, Lake Baikal—are relatively well investigated, many key lake regions have attracted the attention only recently (e.g. the thermokarst lake landscapes of Siberian tundra), or lack systematic studies almost completely (e.g. the large lakes of arid climatic zone of Central Asia).

Being the largest of the continents, Eurasia is characterized by the continental climate and its subtypes, cold semi-Arid, cold Arid, and sub-Arctic climates. Therefore, the absolute majority of Eurasian lakes undergo strong seasonal variations in the heat exchange with the atmosphere, with typical surface temperatures varying in the range of tens of degrees Celsius within a year, and crossing the value of the maximum density for freshwater of  $\sim 4^{\circ}\text{C}$ . This fact determines the main feature of their physical regime: stable vertical stratification with respect to temperature during the most part of the year, interrupted by two complete mixing events (overturns) twice a year, when lake temperatures arrive at the maximum density value. Hence, the main distinctive feature of Eurasian lakes is *dimixis* in terms of Hutchinson’s classification [Hutchinson and Löffler 1956, Kirillin and Shatwell 2016]. Below, we analyze factors able to disrupt regular seasonal mixing of lakes and discuss possible ecological consequences of it.

**Thermokarst lakes: Probability of polymictic-dimictic transition.** Thermokarst lakes, i.e. those created by melting permafrost are inherent features of tundra landscape. Intense research on thermokarst lakes in the last several decades has been motivated by a potentially increasing role of melting permafrost in the global carbon cycle and release of greenhouse gases. Being very shallow, the lakes are supposed to be *polymictic*, well-mixed down to the bottom during the most part of the year. Observations from several small lakes in the delta of the Lena River [Boike et al. 2016] demonstrated that shallow thermokarst lakes can be stratified for several weeks in summer. Using these observations as a starting point, we investigated variations in the mixing regime driven by the potential deepening of lakes driven by the permafrost melting. Under equal climatic forcing, lake depth is the primary factor determining the duration of summer stratification (the second one being the water transparency, Kirillin and Shatwell, 2016). Sensitivity model runs with the lake depth varying in the range 2-12 m using the same meteorological input data demonstrated that lakes in this climatic zone with mean depths  $> 5$  m should have dimictic stratification regimes, i.e. develop continuous stratification in summer with duration of 1 month or longer (Figure 10). This also supports the observation of summer stratification in deeper ( $> 6$  m) Alaskan thermokarst lakes (Sepulveda-Jáuregui et al., 2015). In lakes of about 8 m depth or more, the summer stratification duration significantly increases since high thermal inertia prevents vertical mixing during the autumn cooling in August-September (Figure 11). Hence, even the thermokarst lakes of sub-Arctic and Arctic tundra gain enough heat in summer to develop stable thermal stratification, so that all lakes with mean depths  $> 5$  m are suggested to maintain continuous stratification for the largest part of the summer open water period [Boike et al. 2016]. The lack of the intense exchange of deep lake waters with the atmosphere during several months of stratification determines the biogeochemical processes in the lakes, which may have climatic effects on regional and global scales. The duration of the thermal stratification in summer affects the concentration and vertical distribution of dissolved oxygen: Longer summer stratification provokes deep anoxia and favors methanogenesis in the deep water column and upper sediment (Golosov et al., 2012). Lake sediments are thought to be one of the major sources of methane, having a strong influence on the greenhouse effect [Holgerson and Raymond 2016, Wik et al. 2016]. As stratification typically prevents oxidation of methane [McGinnis et al. 2015], the increase of lake depth due to thawing permafrost [Langer et al. 2016] may produce strong intensification of methane production and release to the atmosphere from the large areas of Siberian tundra. Thus, the transition of shallow *polymictic* (i.e. regularly mixed and oxidized to the bottom) lakes and ponds may play a significant role in the positive feedback

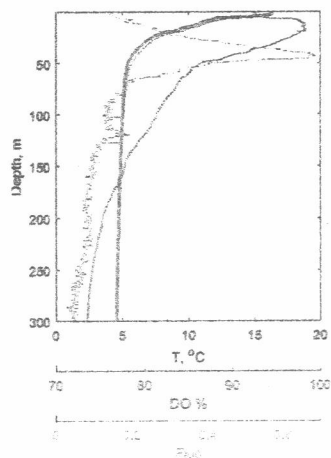
between warming in the Arctic and methane release.



**Figure 1. Duration of the summer stratification period vs. lake depth calculated with the FLake model for thermokarst lakes of Siberian tundra (Delta of the Lena River) Modified from (Boike et**

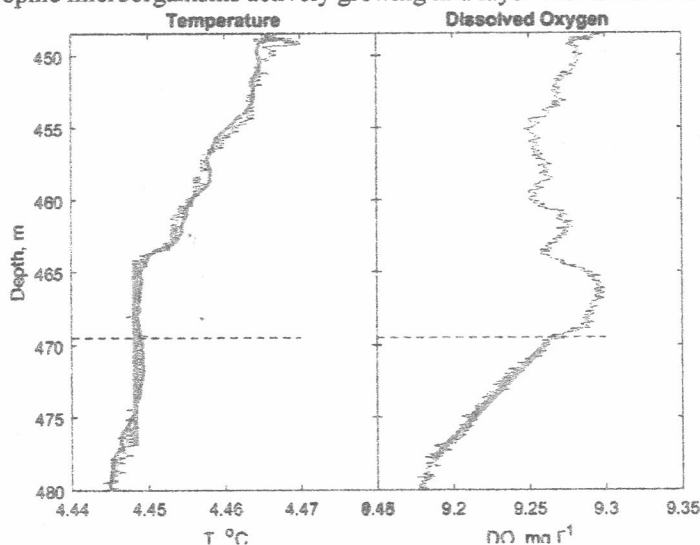
**Oligomictic and meromictic lakes of Central Asia.** The lakes of the arid and alpine regions of Eurasia, such as Central Asia and Tyan-Shan, are especially sensitive to the regional hydrological balance. Due to dry climatic conditions, many of these lakes are endorheic, having no outflows, and are therefore subject to salinization, with dissolved salts affecting the hydrophysical conditions, in particular, vertical mixing. The mixing regime of brackish and saline lakes, especially the deep ones, is often not dimictic but rather *oligomictic*, having retention times of several years or decades, or *meromictic*, with salt stratification preventing the exchange of waters between different layers completely.

Oligomictic lakes (such as Lake Baikal and Issyk-Kul) reveal complex mechanisms of the deep water renewal, which apparently include horizontal exchange between lakes areas with various mean water depth driven by differential cooling and heating, large-amplitude internal waves and inflows. Hence, the lake waters remain well oxidized down to several hundred meters. Still, the exact mechanisms of the deep water renewal are not completely understood and require investigation in order to estimate the potential impact of changes in the heat and water budget on the deep lakes. The major effect of the regular deep mixing consists in supply of the dissolved oxygen (DO), which ensures the high water quality and low trophic status of deep waters. Here we use recent observations on the oxygen concentrations in Lake Issyk-Kul to reveal major sources and sinks of the DO and to estimate the rate of vertical mixing in near-bottom waters of the lake. The dissolved oxygen soundings were performed in mid-June and made it possible to identify an exceptionally important phenomenon in the dynamics of the Issyk-Kul ecosystem: the presence of a deep maximum of dissolved oxygen associated with the production of micro- and picoplankton (photosynthesizing algae a few micrometers in size). Detailed oxygen profiles obtained with the help of a fast-response oxygen logger RINKO-I (manufactured by JFE Advantech, Japan) allowed determining the depth of occurrence of the maximum, as well as peak values of concentrations. With an average oxygen saturation of about 70% over the water column, the concentration of dissolved oxygen in the peak reaches 98% (Fig. 2).



**Figure 2. Vertical profiles of temperature (blue), fluorescence (green) and dissolved oxygen (red) in the central part of Lake Issyk-Kul**

The peak itself is located at depths of 25-40 m, which is approximately 2 times deeper than the Secchi (transparency) depth (Fig. 3). The maximum of oxygen does not always exactly coincide with the maximum of fluorescence (biomass of plankton): the latter lies 10-20 m deeper (Fig. 2). The most obvious reason for this discrepancy between the maximum of biomass and plankton production is the limiting factor of the underwater solar radiation: in highly transparent of Issyk-Kul waters, plankton is able to slowly accumulate significant biomass at great depths (up to 50 m), but the most active photosynthesis occurs on shallower horizons, directly under the thermocline (a layer of vertical temperature jump). These preliminary conclusions require however further justification, taking into account such factors as vertical stratification of different species of plankton, vertical oxygen transport by turbulence and internal waves, and increased oxygen consumption by heterotrophic microorganisms actively growing in a layer with a maximum biomass.



**Figure 3. (left) Temperature and (right) dissolved oxygen profiles near the bottom of Issyk-Kul.**

Detailed measurements of the oxygen distribution revealed another important aspect of the Issyk-Kul dynamics viz. the structure of the turbulent near-bottom boundary layer (BBL). Unlike

temperature, which remains nearly homogeneous in the several ten meters thick hypolimnion, the oxygen profile demonstrates an appreciable decline of concentrations near the lake bottom, produced by the biochemical oxygen consumption in the lake sediment (Fig. 4). The vertical extension of the oxygen gradient allowed us to estimate with a high accuracy the thickness of the BBL as amounting at ~10 m. The linear decrease in the concentration of oxygen with depth in this layer indicates a quasi-stationary mode of vertical exchange. A rough estimation of the near-bottom turbulence can be derived from the BBL thickness of  $10^1$  m and a seasonal time scale of  $10^2$  days. These values provide the vertical exchange coefficients of  $10^{-5}$   $m^2 s^{-1}$ , i.e. at least 1000 times the rate of diffusion transfer of oxygen in a non-turbulent medium. The evidence of strong near-boundary turbulence confirms the initial hypothesis of intense bottom circulation in Issyk-Kul. The question about the generation mechanisms of this circulation remains open. A plausible hypothesis was proposed by Peeters et al. (2003), who suggested the major role played in the deep water renewal of horizontal density currents. The latter are driven in winter by differential cooling of the deep central part of the lake and shallow coastal areas. However, the new results can be also interpreted as indicators of intense deep mixing during the warming season that in turn suggests presence of additional deep mixing mechanisms. Potentially important contributors to the bottom mixing are the basin-scale waves (seiches), whose role in the transport of wind energy to deep lake areas is well-known (). Seiche dynamics in Issyk-Kul has not been thoroughly investigated to date, though can be suggested to be very energetic, taking into account strong winds, large lake size, and a regular shape of the lake.

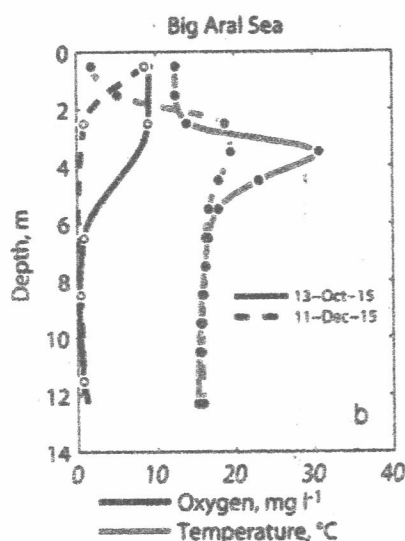


Fig 4. Vertical distribution of temperature and dissolved oxygen in the Big Aral Sea in October and December 2015.

The fact that anthropogenic alteration of the regional water budget may change completely the mixing regime of lakes is demonstrated by the notorious example of the Aral Sea. Formerly a brackish dimictic lake, the Aral Sea turned into a number of isolated water bodies with diverging characteristics, after losing about 80% of its water volume [Izhitskiy et al. 2016]. The second largest remaining basin, the *Small Aral*, is still dimictic, fed by the Syrdarya River and isolated by a man-made dam from the rest of the former water area. Yet, the largest remaining basin, the *Big Aral*, has lost completely the Amudarya inflow and became to a hypersaline meromictic lake revealing extraordinary physical conditions with acute effects on biogeochemical processes. The strong chemocline (halocline) persists in the lake at water depths of about 5 m. The origin of the chemocline is most probably endogenic, resulting from intrusion of water with different salinity from one of neighboring basins. However a biogenic contribution to the density gradient cannot be excluded: The epilimnion

waters above the halocline are densely populated by zooplankton typical for hypersaline lakes (*Artemia Salina*), while the dead biological material accumulates in the halocline, with high rates of degradation, characterized by a strong peak of turbidity and drop of the dissolved oxygen content to zero. The high transparency of the upper layer allows effective storage of solar radiation in the upper several meters of the water column, while the strong vertical stability due to salt gradient prevents upward release of heat. As a result, the Big Aral represents now a "solar trap", accumulating solar energy with a local temperature maximum forming at the chemocline. In

October, at the intense atmospheric cooling, the water temperatures in the chemocline exceeded 30°C, while surface temperatures were about 10°C, and the daily mean air temperatures were at 0°C (minimum values around -12°C). The thermal regime is unique for the Aral Sea; other hypersaline lakes, like the Dead Sea or Lake Urmia, do not undergo such strong seasonal variations in the surface heat fluxes. The newly formed meromictic regime implies consequences at the regional scales, in the biogeochemical regime, as the monimolimnion of the lake accumulates continuously increasing amount of methane during the last years, as well as in the regional climate, as lake represents in winter a warm spot on the surface, slowly releasing the accumulated heat onto the atmosphere.

**Transition from dimictic to warm monomictic regime: effect of winter warming due to climate change.** Changing of the seasonal mixing regime from dimictic to meromictic typically requires an anthropogenic intervention into the water budget, and endangers mostly the lakes of arid climate zone, where the hydrological regime is particularly vulnerable. There is however another potential threat for the lake mixing regimes, determined by the observed positive trend in surface lake temperatures. The latter is considered to be an indicator of global warming and is reported to be especially strong in northern temperate lakes in winter. The existing future climate scenarios predict that, if the warming trend persists for next several decades, dimictic lakes located in regions of Europe with mild temperate climate will never cool below the maximum density temperature, changing thus their mixing regime to *warm monomictic*, without a winter stratification period. The mixing regime transition will take place first in deeper lakes, while the shallower ones will possess the winter stratification for longer, i.e. the capacity to store heat throughout wintertime depends directly on the mean depth (Fig. 2). The consequences of the physical regime change for biogeochemistry of lakes may appear manifold. The absence of winter stratification suggests higher mixing rates and better oxygen supply to the hypolimnion in winter. On the other hand it also implies a stronger supply of nutrients to the epilimnion together with the better light conditions in an ice- and snow free lake, hence favoring phytoplankton development and eutrophication. Other potential negative effects of vanishing winter stratification are higher near-bottom temperatures in summer and a longer summer stratification period [Kirillin 2010]. Both factors favor bacterial activity in lake sediments, accelerate biodegradation of organic matter and, as a result, increase oxygen consumption and methane production. Deep anoxia in previously well-oxygenated lakes and a stronger contribution of these lakes to methane release may be hypothesized as possible global outcomes.

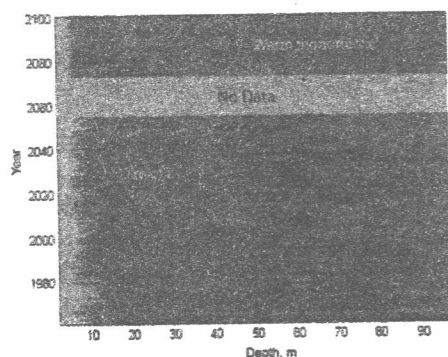


Fig. 5. Scenarios of the mixing regime transition in lakes of Western Europe after Kirillin [2010]

**Conclusions.** The above discussed recent findings demonstrate the fragility of the hydrophysical regime of Eurasian lakes. The continental climate ensures high annual amplitudes in the heat supply hence the majority of lakes, either in the Arctic or in the Central Asia, tend to dimictic behavior, being well mixed at least twice a year. Among the major threats to the seemingly stable seasonal mixing patterns of Eurasian lakes are anthropogenic salinization of arid lakes, trend to warmer winters in temperate regions, and deepening of Arctic lakes due to permafrost thaw.

**Acknowledgements.** This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 15-55-12378 NNIO\_a, German Research Foundation, project no. KI



## References

1. Boike J. и др. Thermal processes of thermokarst lakes in the continuous permafrost zone of northern Siberia - observations and modeling (Lena River Delta, Siberia) // Biogeosciences. 2015. Т. 12. № 20. С. 5941–5965.
2. Holgerson M.A., Raymond P.A. Large contribution to inland water CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from very small ponds // Nat. Geosci. 2016. Т. 9. № 3. С. 222–U150.
3. Hutchinson G. E., Löffler H. The thermal classification of lakes // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 1956. – Т. 42. – №. 2. – С. 84–86.
4. Izhitskiy A.S. и др. Present state of the Aral Sea: diverging physical and biological characteristics of the residual basins // Sci Rep. 2016. Т. 6. С. 23906.
5. Kirillin G. Modeling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes // Boreal Environ. Res. 2010. Т. 15. № 2. С. 279–293.
6. Kirillin G., Shatwell T. Generalized scaling of seasonal thermal stratification in lakes // Earth-Science Reviews. – 2016. – Т. 161. – С. 179–190.
7. Kirillin G., Terzhevik A. Thermal instability in freshwater lakes under ice: Effect of salt gradients or solar radiation? // Cold Regions Science and Technology. 2011. Т. 65. № 2. С. 184–190.
8. Langer M. и др. Rapid degradation of permafrost underneath waterbodies in tundra landscapes-Toward a representation of thermokarst in land surface models // J. Geophys. Res.-Earth Surf. 2016. Т. 121. № 12. С. 2446–2470.
9. McGinnis D. F. et al. Enhancing surface methane fluxes from an oligotrophic lake: exploring the microbubble hypothesis // Environmental science & technology. – 2015. – Т. 49. – №. 2. – С. 873–880.
10. O'Reilly C.M. и др. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // Geophys. Res. Lett. 2015. Т. 42. № 24. С. 2015GL066235.
11. Wik M. и др. Climate-sensitive northern lakes and ponds are critical components of methane release // Nat. Geosci. 2016. Т. 9. № 2. С. 99.

УДК: 681.5.01:004.02

### ЧИСЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СТАНДАРТНЫХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ В ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

*Конокбаева Айзада Конокбаевна, научный сотрудник, Институт автоматизации и информационных технологий Национальной академии наук Кыргызской Республики 720071, г. Бишкек, проспект Чуй 265, aizik2787@gmail.com*

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы параметрической оптимизации стандартных линейных законов управления. Вопрос является актуальным для локальных систем управления, которые могут быть как самостоятельными системами, так и системами нижнего уровня в составе пространственно-распределенных систем автоматизации (РСА). В РСА задача параметрической оптимизации локального алгоритма управления может решаться в автоматизированном режиме сервером пункта группового управления (ПГУ) или центрального пункта управления (ЦПУ), которые затем удаленно настраивают локальный регулятор. Расчет настроек регулятора также можно возложить на ПЛК локальной системы.

**Ключевые слова:** объект управления, передаточная функция, аппроксимация, алгоритм, интегральный квадратичный критерий, настройка, ПЛК, ПИД регулятор.

быть использованы для оценки устойчивости массива, а также о целесообразности применения разработанного нового способа [5] выемки запасов подкарьерной зоны при комбинированной разработке рудных месторождений.

**Список литературы:**

1. Алибаев А.П. Отработка подкарьерных запасов полезных ископаемых в условиях комбинированной разработки. А.П.Алибаев, Н.Т.Осмонова, К.Ж. Усенов// Известия ВУЗов, - Бишкек, 2012, №6, С.12-14.
2. Алибаев А.П. Способы отработки днищ карьеров при комбинированной разработке рудных месторождений А.П. Алибаев Вестник ЖаГУ, №5, -Жалалабат: 2005, - С.51-56.
3. Казикаев Д.М. Комбинированная разработка рудных месторождений Д.М. Казикаев -М: Горная книга. 2008 – 360 с.
4. Кожогулов К.Ч. Геомеханические основы и технология при комбинированной разработке крутопадающих месторождений. К.Ч. Кожогулов., К.Ж. Усенов., А.П. Алибаев. Бишкек, КГ-МИ, 1999, с.186.
5. Осмонова Н.Т., Отработка подкарьерных запасов полезных ископаемых в условиях комбинированной разработки. А.П.Алибаев, Н.Т. Осмонова, К.Ж. Усенов// Известия ВУЗов, - Бишкек, 2012, №6, С. 12-14.
6. Осмонова Н.Т., Применение средств информационных технологий при изучении напряженно-деформированного состояния подкарьерных массивов горных пород. Н.Т. Осмонова., З.А. Асилова., К.Ж. Усенов.
7. Осмонова Н.Т. Оценка напряженно-деформированного состояния массива горных пород при отработке подкарьерных запасов месторождения Тереккан. Н.Т. Осмонова Известия ВУЗов, - Бишкек, 2012, №5, С.41-44.
8. Осмонова Н.Т., Способ комбинированной разработки крутопадающих залежей полезных ископаемых Н.Т. Осмонова, А.П. Алибаев, К.Ж. Усенов- Изденис, Алма-Ата, 2012, №4, С.101-104.
9. Осмонова Н.Т., Краткая горно-геологическая характеристика и анализ физико-механических свойств месторождений Тереккан и Терек Н.Т. Осмонова Наука и новые технологии – Бишкек, 2012, №4, С.75-76.
10. Терметчиков М.Н. Физико-механические свойства горных пород месторождений Киргизии и их корреляционный анализ / М.Н.Терметчиков.- Фрунзе: Илим, 1979.- 136с.
11. Усманов С.Ф. Система моделирования напряженно-деформированного состояния горного массива и оценки устойчивости бортов карьеров Усманов С.Ф.- Бишкек, 2006.- 26 с.
12. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б.Фадеев – М.: Недра, 1987. – 221с.

УДК 551.521.17:547.979.7(282.255.6)

**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 66,2. 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*

*Sharsheeva 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 акваторию 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 квазигомогенного 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 применяются 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 (а <sub>000,440</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 нефтепроводов, 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.

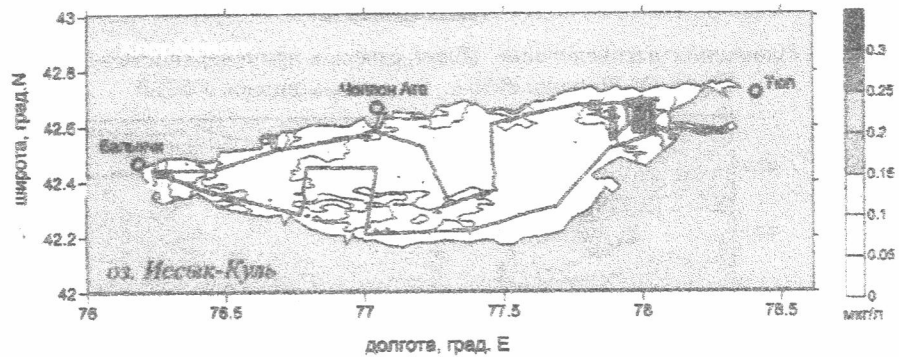


Рис. 2. Площадное распределение хлорофилла «а» в приповерхностном слое оз. Иссык-Куль, 23-26 июня 2015 г., по данным лидара УФЛ-9

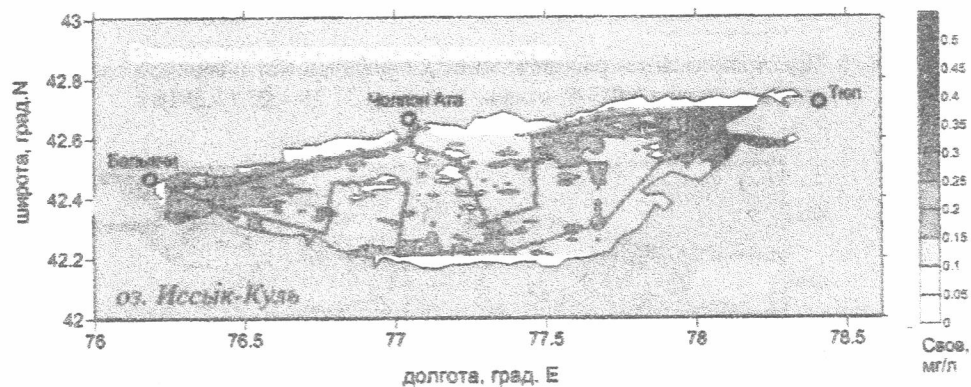


Рис. 3. Площадное распределение взвешенного органического вещества в приповерхностном слое оз. Иссык-Куль, 23-26 июня 2015 г., по данным лидара УФЛ-9

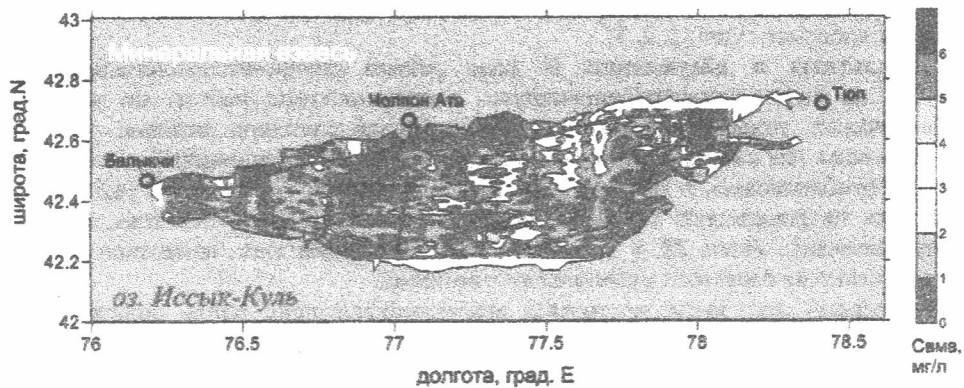


Рис. 4. Площадное распределение общей взвеси в приповерхностном слое оз. Иссык-Куль, 23-26 июня 2015 г., по данным лидара УФЛ-9

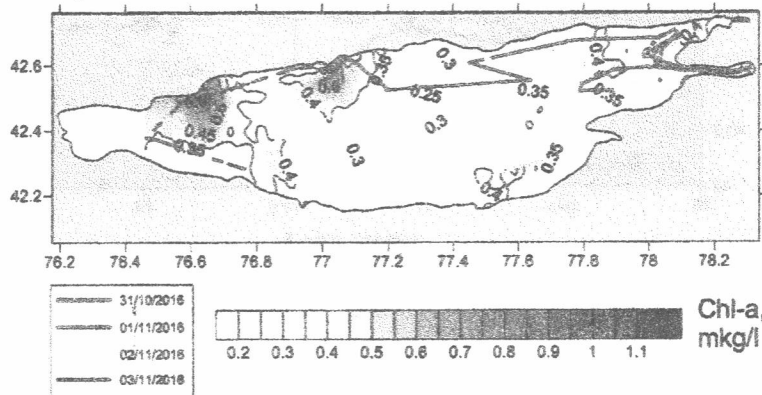


Рис. 5. Пространственное распределение хлорофилла «а» в верхнем слое озера по данным лидара УФЛ-9, съемка в период 31.10 – 03.11.2016 г

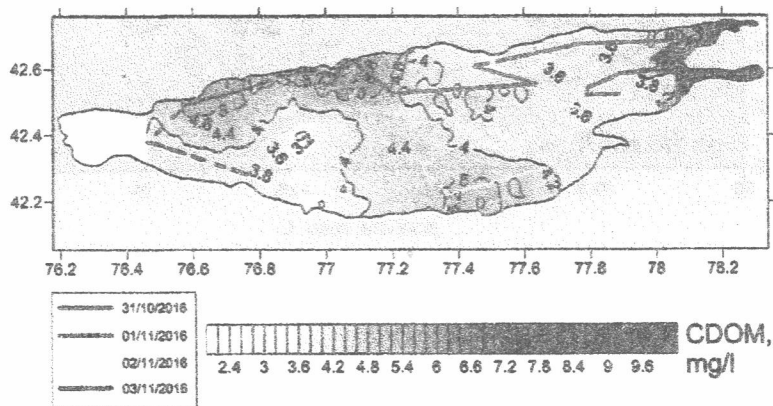


Рис. 6. Пространственное распределение окрашенного РОВ в верхнем слое озера по данным лидара УФЛ-9, съемка в период 31.10 – 03.11.2016 г

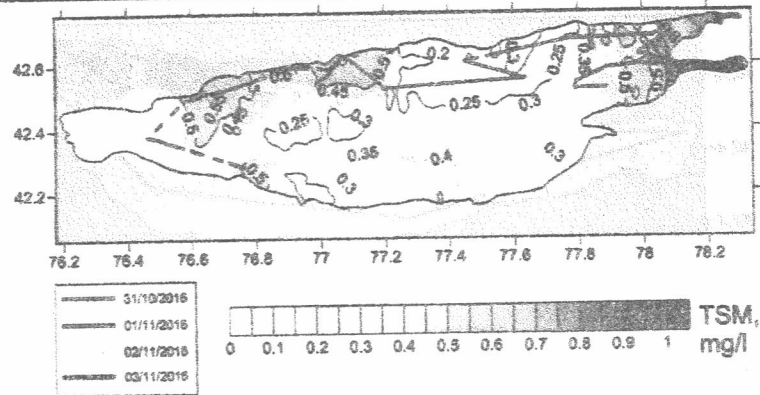


Рис. 7. Пространственное распределение общей взвеси в верхнем слое озера по данным лидара УФЛ-9, съемка в период 31.10 – 03.11.2016 г

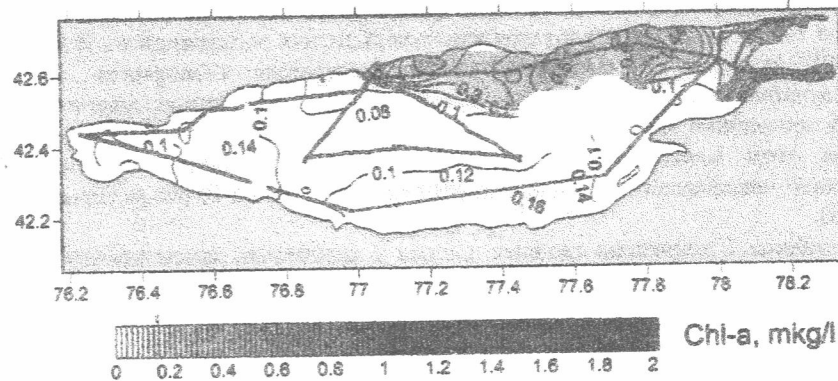


Рис. 8. Распределение концентраций хлорофилла «а» в приповерхностном слое озера Иссык-Куль по данным лидарного зондирования в период с 26 по 30 июня 2017 года

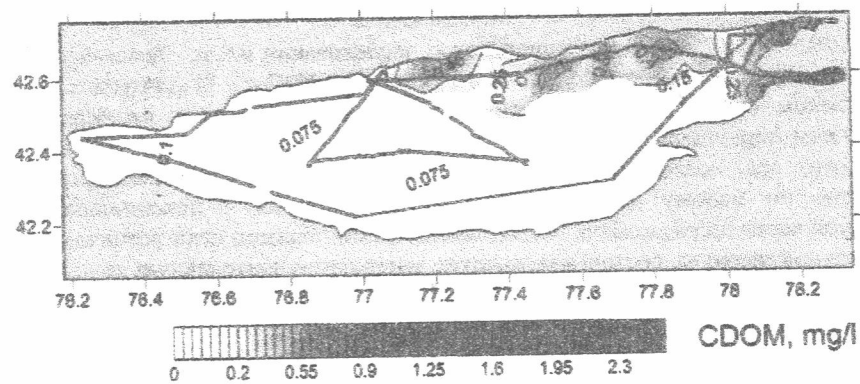


Рис. 9. Распределение концентраций окрашенного РОВ в приповерхностном слое озера Иссык-Куль по данным лидарного зондирования в период с 26 по 30 июня 2017 года



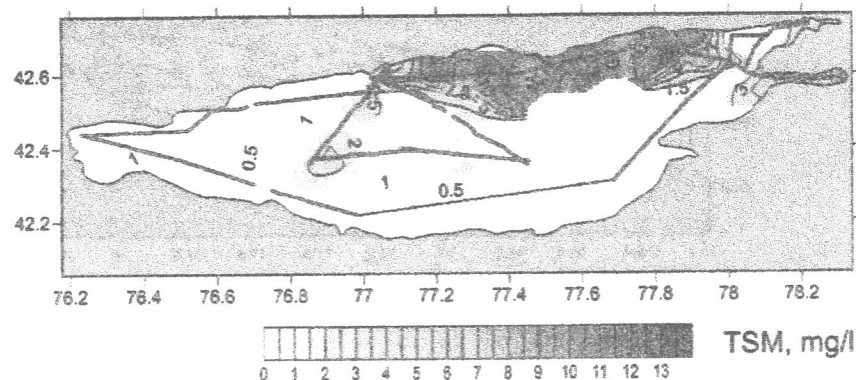


Рис. 10. Распределение концентраций общей взвеси в приповерхностном слое озера Иссык-Куль по данным лидарного зондирования в период с 26 по 30 июня 2017 года

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
Схл, мкг/л	0.004	1.48	0.17	1.7	0.03	0.03
Свов, мг/л	0.024	6.23	2.5	42	0.045	3.15
Свмв, мг/л	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
	Хл-а	Взвесь	Хл-а	Взвесь	Хл-а	Взвесь	Хл-а	Взвесь	Хл-а	Взвесь	Хл-а	Взвесь
	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.

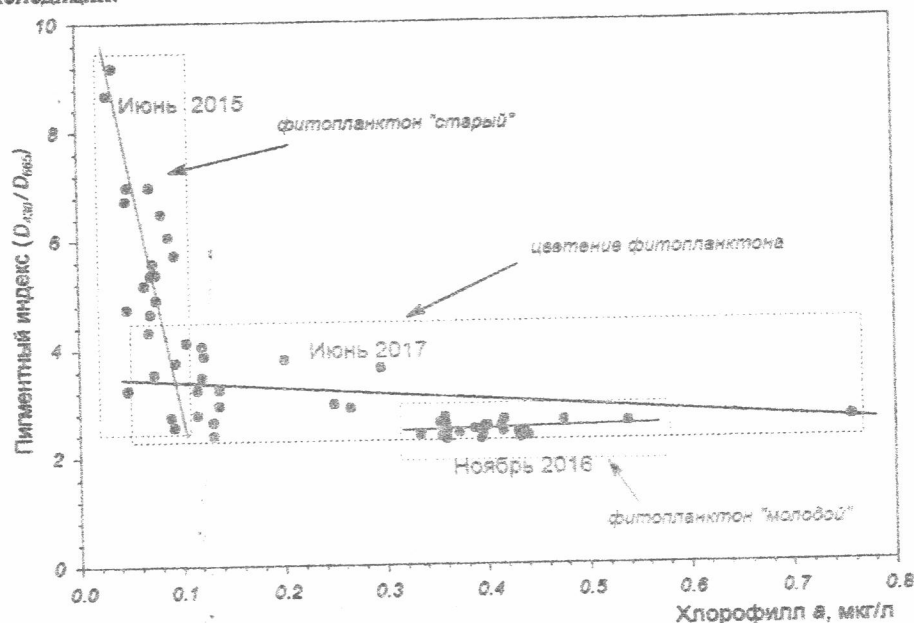


Рис. 11. Зависимость концентрации хлорофилла «а» и его пигментного индекса, для 2015, 2016 и 2017 гг.

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.

УДК 631.6. (575.2)

### УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ СКОРОСТИ ВОДЫ

*Пресняков Константин Александрович, д.т.н., с.н.с., Институт автоматики и информационных технологий НАН КР, 720071, г. Бишкек, пр. Чуй 265*  
*Керимкулова Гулсаат Кубатбековна, к.ф.-м.н., Институт автоматики и информационных технологий НАН КР, 720071, г. Бишкек, пр. Чуй 265, e-mail: [gulsaat@mail.ru](mailto:gulsaat@mail.ru)*

**Аннотация.** Предложено устройства для измерения поверхностной скорости воды, основанное на измерениях угла отклонения направляющей кулисы с поплавковым датчиком от вертикали в направлении динамической оси потока воды. Рассмотрена физическая схема сил, действующих на поплавковый датчик с направляющей кулисой в приповерхностном слое потока воды. Учтено, что подвижный поплавковый датчик участвует в сложном движении, состоящем из: 1 – отклонений поплавкового датчика вместе с направляющей кулисой от вертикали в направлении динамической оси потока, 2 – в перемещениях подвижного поплавкового датчика вдоль направляющей кулисы согласно изменениям наполнения водотока водой. С учетом указанных обстоятельств выведена формула для вычисления поверхностной скорости воды на основе результатов измерений угла отклонения поплавкового датчика с направляющей кулисой от вертикали в направлении динамической оси потока. Формула физически обоснована. Устройство для измерения поверхностной скорости воды достаточно просто в конструктивном исполнении и надежно.

**Ключевые слова:** угол отклонения, поплавковый датчик, поверхностная скорость воды.