

**ФИЗИКА МАТЕМАТИКА ИЛИМДЕРИ**  
**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**  
**PHYSICO-MATHEMATICAL SCIENCE**

*Алибаева Г.К., Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д.*

**ИЧКИ КӨЛМӨЛӨРДҮН (ЫССЫК-КӨЛ КӨЛҮ) СПУТНИКТЕН АРАЛЫКТАН  
 БАЙКАШТЫРУУНУН ЫКМАСЫ**

*Алибаева Г.К., Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д.*

**МЕТОДИКА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СО СПУТНИКОВ ВО  
 ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМАХ (ОЗЕРО ИССЫК-КУЛЬ)**

*G.K. Alibaeva, K.A. Karimova, R.D. Gainutdinova*

**METHODS OF SATELLITE REMOTE SENSING IN INLAND  
 WATERS (ISSYK-KUL LAKE)**

УДК: 556.332.5 (282.255.6)

*Бул иште сигналдарды иштеп чыгуунун атайын алгоритмдеринин спутниктеги аралыктан байкаштыруунун тескери жайылуусунун берилген коэффициентти боюнча толук талдоо жүргүзүлөт. Суунун температурасынын деңиз жана океандарга ыңгайлашкан спутниктик альтиметри аркылуу жана айкын жер үстүндөгү гидрологиялык өлчөөлөрдү салыштыруу жүргүзүлөт.*

**Негизги сөздөр:** спутник альтиметри, жер үстүндөгү өлчөө, ички көлмө, Ыссык-Көл көлү.

*В работе делается детальный анализ специальных алгоритмов обработки сигналов (ретрекинга) по данным коэффициента обратного рассеяния спутникового дистанционного зондирования. Также приводятся сравнения спутниковой альтиметрии адаптированной для морей и океанов, а также внутренних водоемов с конкретными наземными гидрологическими измерениями температуры воды.*

**Ключевые слова:** спутниковая альтиметрия, натурные измерения, внутренний водоем, озеро Иссык-Куль

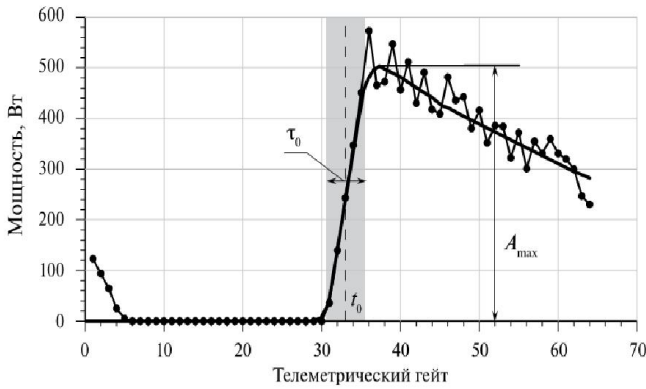
*The summary considers detailed analysis of the specific algorithms of signal processing (retreking) according to the backscattering coefficient of satellite remote sensing. Also given comparison of satellite altimetry adapted for seas and oceans, as well as inland waters with specific in-situ hydrological measurements of water temperature.*

**Key words:** satellite altimetry, in-situ measurements, inland water, Issyk-Kul lake.

**Введение.** Эффективное применение космических средств дистанционного зондирования Земли в существенней степени зависит от наличия адекватных моделей, связывающих характеристики применяемых приборов (альтиметров) с параметрами морской поверхности. Первоначально спутниковая альтиметрия рассчитывалась на использование в решение классических задач геодезии, таких как расчет формы Земли и ее параметров. При этом точность альтиметрических измерений в геодезии достигла нескольких сантиметров. По мере внедрения новых методов обработки формы отраженных импульсов отмечается переход к исследованию мирового океана и проблемам внутренних и окраинных морей, крупных озер, водохранилищ и даже рек.

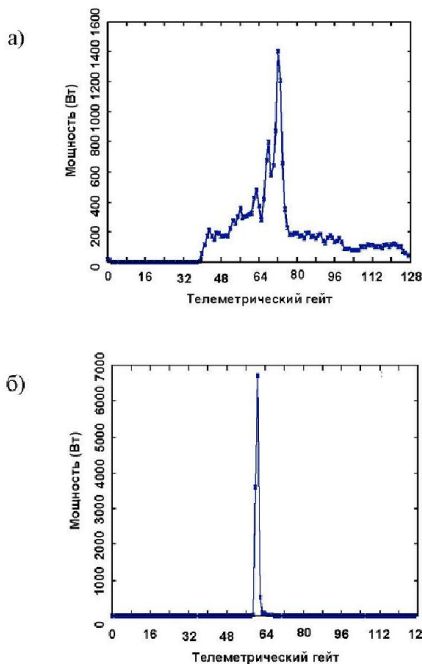
Спутниковая альтиметрия стала неизменным инструментом в изучении климатических изменений уровня температуры мирового океана, внутренних водоемов, ледников Арктики и Антарктиды. В последние годы широкое применение получили радиолокационные съемки в оптическом диапазоне с использованием спектрорадиометров. По сравнению с радиофизическими методами, оптические методы дают уникальную возможность получать изображение с высоким пространственным разрешением, до нескольких метров и в широком поле обзора, независимо от времени суток, года и облачного покрова. Радиоальтиметр или спектрорадиометр установленный на спутнике широко используется для решения ряда конкретных задач в геофизике, где для каждого случая к ним подбираются свои алгоритмы ретрекинга.

Рассмотрим методические вопросы измерений альтиметром установленном на спутнике и обработки формы отраженных импульсов с использованием конкретных алгоритмов вычисления. Начнем с рассмотрения формы импульсов отраженного от безграничной подстилающей поверхности океана [1]. На рисунке 1 приведена эта форма идеального импульса, отраженного от безграничной отражающей поверхности. Путем аппроксимации формы отраженного импульса, известной формулой Брауна, в рамках соответствующих алгоритмов ретрекинга определяются его основные параметры:  $\tau_0$  - ширина переднего фронта;  $t_1 = \tau_0 + \tau_0/2$  - среднее время задержки импульса, отраженного от подстилающей поверхности;  $A_{max}$  - максимальное значение его мощности и  $S$  - средняя высота шероховатости подстилающей поверхности. Знание всех этих параметров позволяет найти соответственно высоту спутника над поверхностью воды  $h + t_0 c/2$ , сечение обратного рассеяния  $\sigma$ , которое в случае морской поверхности, зависит в основном от скорости приводного ветра и значимой высоты волны  $h = 2\sigma$



**Рис. 1.** Форма импульса, отраженного от безграничной подстилающей поверхности, аппроксимированная по формуле Брауна (сплошная линия) и осредненная за 1 с. Форма отраженного альтиметрического импульса приводится для условий открытого океана (маркеры). Серой областью выделена ширина переднего фронта отраженного импульса

Далее рассмотрим особенности альтиметрии для внутренних водоемов. В прибрежной зоне форма телеметрических импульсов, принимаемых антенной альтиметра, существенно отличаются от импульсов, формирующих в открытом океане. Это связано с влиянием отражения от суши и береговой границы. На рисунке 2. а. показан пример телеметрического импульса, формирующего за счет совместного отражения от суши и воды (рис. 2.а.), квазизеркального или когерентного отражения от глади воды (рис.2.б.) и других сильно отражающих объектов (прибрежных строений, сликов большой площади и т.п.) – см. рис. 2.в.



**Рис. 2.** Формы импульсов в прибрежной зоне и внутреннем водоеме: а-совместное отражение от суши и воды, б-квазизеркальное или когерентное отражение воды в устьях и гаванях, в- наличие нескольких сильно отражающих объектов.

При наличии дополнительных пиков форма импульса плохо аппроксимируется формулой Брауна, что приводит к ошибке в определении положения переднего фронта импульса, а следовательно, к неправильному нахождению высоты спутника над поверхностью воды, уровня водной поверхности и соответственно температуры водной поверхности. При этом с высокой погрешностью определяются и другие величины, как скорость ветра, высота волнения, температура воды и др.

В связи с этим в последние годы активно развиваются специальные алгоритмы, применимые для обработки альтиметрической информации в прибрежной зоне внутренних водоемах, на крупных реках и озерах. Однако до настоящего времени не создано единая методика, позволяющая использовать дистанционное зондирование Земли для успешного нахождения вышеуказанных характеристик в условиях, когда отражение от суши существенно влияет на формы принимаемых телеметрических импульсов. Для этого существуют различные алгоритмы ретрекинга, применяемые для определения времени прихода отраженного импульса, например, пороговый ретрекинг,  $\beta$  - ретрекинг, Ocean 1/2 , Ice-1/2 [2].

Далее рассмотрим величину площади сегмента отражения от водной поверхности и суши. В силу сферичности формы фронта зондирующего импульса, его отражение от зеркальной поверхности происходит с сегмента, имеющего форму круга, максимальный диаметр которого  $D_s$  определяется как:

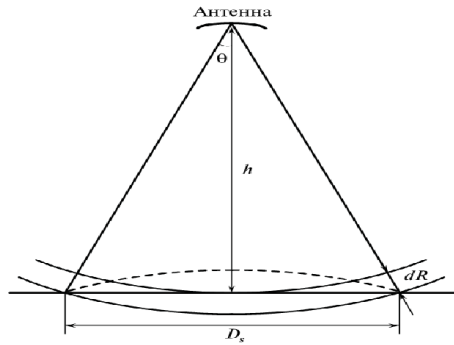
$$D_s = 2h \sin \theta$$

где  $\theta$  – угловое разрешение антенны альтиметра. Величина  $\sin \theta$  зависит от диаметра антенны альтиметра ( $D_a$ ) и длины волны радиопульса ( $\lambda$ ) и определяется как:

$$\sin \theta = 1,22 \frac{\lambda}{D_a}$$

Таким образом, максимальный диаметр сегмента подстилающей поверхности можно определить из выражения:

$$D_s = 2,44h \frac{\lambda}{D_a}$$



**Рис. 3.** Схема зондирования подстилающей поверхности импульсами альтиметра:  $h$  – высота спутника над подстилающей поверхностью;  $\theta$  – угловое разрешение антенны альтиметра;  $D_s$  – диаметр сегмента отражающей поверхности;  $dR$  – расстояние между передним и задним фронтами зондирующего импульса. Штриховой линией показан передний фронт отраженного радиоимпульса

Для рабочей частоты 13,5 ГГц и если длина волны составляет  $\lambda = 2,2$  см, а диаметр антенны  $D_a = 1,5$  м, следовательно, максимальный диаметр сегмента, с которого отражается одиночный импульс, не превышает  $D_s = 48,1$  км. Как видно при всех раскладах радиофизические характеристики альтиметров даже при  $\lambda$  изменяющихся от 2 см до 500 нм, и диаметре антенны от 3 м до 15 м и в угловом разрешении  $\theta = 1^\circ$ , высоте спутника порядка 1000 км, то диаметр сегмента отражающей поверхности изменяется от 48 км до 100 км.

Для альтиметров установленных на спутнике длительность зондирующего импульса, как правило, составляет  $\tau = 3,3$  нс. В соответствии с вышеприведенными условиями, диаметр сегмента подстилающей поверхности, от которого происходит отражение радиоимпульса, получается равным  $D_s = 228$  м. Его площадь для одиночного импульса соответственно составляет 716,9 м<sup>2</sup>. Для уменьшения всех вышеперечисленных разбросов и ошибок разработчики альтиметра, работающие в радиофизическом диапазоне перешли в оптический диапазон радиоволн от 0,405 мкм до 14,38 мкм, где разрешение составляет от 250 м от 1,0 км. Комплекс бортовой аппаратуры всех современных спутников, проводящих измерения в оптическом, а также в инфракрасном диапазоне от 8-13 мкм и называется спектро радиометром. В него включен многоканальный спектро радиометр, включающий 36 спектральных каналов от 0,4 до 14,38 мкм.

В настоящее время по данным спектро радиометра разработан алгоритм расчета модуля скорости ветра, температуры и других параметров водной поверхности вида:

$$U = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i T b_i$$

где  $a_i$  – коэффициент для  $i$ -й частоты радиометра;  $T b_i$  – радиояркостная температура поверхности воды на данной частоте [1, 2]. Через радиояркостную температуру отраженного от сигнала водной поверхности из закона Стефана-Больцмана можно вычислить температуру отражающей поверхности –  $T$ . Если обозначим радио яркостную температуру водной поверхности в оптическом излучении величиной  $B$  то она является суммой трех величин:

$$B = B_1 + B_2 + B_3$$

$B_1$  – яркость отражения от морской поверхности  
 $B_2$  – яркость отражения от подповерхностного слоя воды

$B_3$  – яркость отражения от морского дна

$B_1$  – отраженный прямой свет от воды называется бликом. Все три составляющие существенно зависят от условий освещенности. Яркость  $B_1$  равна яркости падающего излучения, умноженного на коэффициент отражения. Она во много раз превосходит яркости моря вне зона блика. Наличие на морской поверхности поверхностных волн, приводит к блокированию направлений отраженного сигнала. В зоне солнечного блика участок воды с меньшими волнениями будет иметь большую яркость и наоборот.

$B_2$  – интенсивность излучения подповерхностного слоя. Глубина с которого поступает рассеянное излучения в толще воды, определяется коэффициентом вертикального ослабления. Поскольку вода содержит органические и неорганические примеси, то на оптические свойства воды влияют и взвешенные частицы. Примеси можно разделить на три группы. Первая группа – это если происходит отражение от органического вещества то она имеет желтый цвет. Это главный фактор определяющий поглощение света морской воды в коротковолновой части спектра. Вторая – это поглощения взвешенными воде частицами такими, как глина, песок и другие минералы. Эти частицы обуславливают сильное рассеяние света в воде. Это так называемый показатель рассеяния назад взвешенными частицами. Этот параметр надежно рассчитывается по данным сканеров цвета.

Третья группа – это отражение от фитопланктоны, благодаря наличию в нем хлорофилла дающие сильное поглощение в голубой 0,44 мкм и красной 0,65 мкм частях спектра излучения. Влияние концентрации хлорофилла на поглощение при спутниковых наблюдениях может быть изучено для конкретных морских систем с учетом атмосферных характеристик.

Наконец, третий член  $B_3$  – яркость излучения, отражаемая морским дном. Эта величина определяется условием освещения, глубиной и прозрачностью воды и отражательной способностью грунта на дне воды. Нужно сказать, что в большинстве случаев грунт на дне озера Иссык-Куль – это среднего

размера кварцевые песчинки, обладающие высокой отражательной способностью.

Все эти три параметра определяют радиояркую характеристику излучения морской поверхности то есть величину  $V$ . Возвращаясь к фитопланктону, видно, что его распределение в теплый сезон вдоль побережья озера Иссык-Куль, следует что наибольшая концентрация фитопланктона присутствует вдоль северо-восточного побережья озера Иссык-Куль [3].

Говоря о результатах замера прозрачности воды озера Иссык-Куль, то они были проведены летом 2014 года специалистами Института Океанологии РАН с использованием лазерного сканирующего прибора, ультрафиолетового лидара [5]. Лидар УФЛ-9 разработан в ИО РАН и предназначен для экспрессного обнаружения общего загрязнения прибрежной акватории озера Иссык-Куль. Лидар размещается на борту судна, а зондирующий луч направлен на поверхность воды под углом  $5-45^\circ$  к вертикали. Вошедший в воду лазерный импульс (355, 532 нм) вызывает флуоресценцию органики. Флуоресцентное излучение проявляется в спектральном диапазоне 400-700 нм, принимается и анализируется в спектрофотометрической блоке лидара. Уровень принятого сигнала флуоресценции, пропорциональный концентрации органических загрязняющих веществ. Сигнал обратного рассеяния, а также реперный сигнал комбинационного рассеяния воды регистрируются, запоминаются и анализируются с помощью портативного персонального компьютера. Лидар работает в автоматическом режиме (частота импульсов зондирования среды 2 Гц), что позволяет при использовании маломерного судна оперативно обследовать акватории и получить карты распределения концентраций растворенных органических веществ, взвеси хлорофилла с очень высоким пространственным разрешением. В результате экспедиционных работ получены новые данные о распределениях гидрофизических полей в прибрежной акватории в районе поселка Чолпон-Ата.

На озере Иссык-Куль концентрации хлорофилла относительно низкие и не превышают 0.4 мкг/л, а концентрации общей взвеси относительно низкие, в среднем чуть более 0.7 мг/л. В связи с этим вода очень прозрачная - глубина видимости в прибрежной зоне достигает 16-20м. Концентрация взвешенных минеральных веществ превышает концентрацию органической взвеси примерно в 5 раз. Содержание растворенной в воде органики повышается вблизи берегов, особенно в заливах поблизости от курорт-

ной инфраструктуры и водотоков. Это указывает на ощутимый, небольшой антропогенный эффект [4].

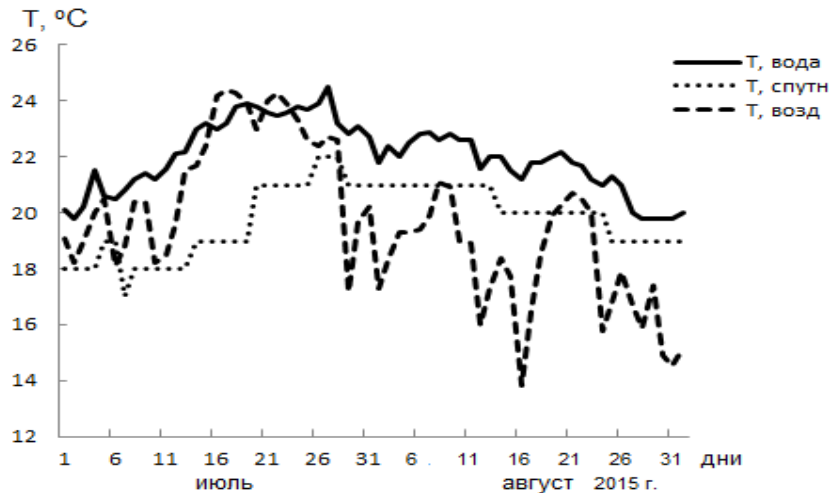
В этой связи подытоживая выше приведенные данные следует отметить, что при работе спутника MODIS/TERRA в ИК диаопзонах «в окнах прозрачности» атмосферы в интервалах длин волн от 3-5 и 8-13  $\mu\text{м}$  можно проводить исследования основных параметров океанической и водной поверхности.

Во втором окне прозрачности отраженная солнечная радиация практически отсутствует и тепловые измерения в ИК диапазоне не зависят от условий освещенность солнцем поверхности суши и воды. Прозрачность атмосферы в этих окнах прозрачности относительно высокая. При более точных измерениях температуры необходимо учитывать передаточную функцию атмосферы и соответственно вертикальное распределение температуры, влажность воздуха, а также распределение аэрозоля. Следует отметить, что заявленная разработчикам MODIS/TERRA ошибка измерения температуры ИК радиометре составляет  $\sigma T = 0,3-0,5^\circ\text{C}$  [3]. Нами были проведены и сопоставлены фактические измерения температуры по наземным измерениям, как на гидрологических постах озера Иссык-Куль, со спутниковыми данными полученный от спутника MODIS/TERRA в период с 2000 по 2013 года.

Анализ применимости использования данных дистанционного зондирования Земли, в частности данных MODIS/TERRA, для исследования температуры поверхности озера Иссык-Куль показал, что средние значения температуры поверхностной воды озера Иссык-Куль по всем четырем станциям Чолпон-Ата, Тамга, Балыкчи, Кой-Сары изменяются от  $0,2^\circ\text{C}-1,9^\circ\text{C}$ .

Во всех четырех случаях при измерениях и сопоставлениях спутниковых и натуральных измерениях средние значения и экстремальные значения температуры поверхностной воды озера Иссык-Куль по спутниковым измерениям превышают средние значения температуры по натурным измерениям также и их экстремальные значения по тем же натурным измерениям. Такое расхождение температур по спутниковым и натурным измерениям указывает на систематическую погрешность в сторону завышения спутниковых измерений относительно натуральных. Причем, эта погрешность в среднем составляет  $\sigma T = 1,5^\circ\text{C} - 1,9^\circ\text{C}$  и не соответствуют заявленной [5].

Рассмотрим результаты сравнительных измерений проведенных в озере Иссык-Куль в июле-августе 2015 году в период действия на территории Кыргызстана такого явления как Эль-Ниньо.



**Рис. 3.** Вариации поверхностной температуры воды оз. Иссык-Куль в июле-августе 2015 г. по данным наземных (непрерывная линия) и спутниковых (точки) измерений, а также приземной температуры воздуха (пунктир) по ст. Чолпон-Ата.

На рисунке 3 приведены данные спутниковых измерений поверхностной температуры воды в озере Иссык-Куль по станции Чолпон-Ата. Данные из рисунка 3 наземных измерений (непрерывная линия) получены в гидрологическом посту Чолпон-Ата, а спутниковые данные (точки) представлены в Интернете в режиме «онлайн». Как видно из сравнения двух рисунков как натуральных, так и спутниковых расхождения оказалось более существенным и их изменения составляет от 1,5 -4,0<sup>0</sup>С. Как видим, что в первом эксперименте, так и во втором эксперименте расхождения в различные годы относительно значимые и могут достигать до 25-30%

Это говорит о необходимости проведения дополнительных корректировок методов дистанционного зондирования и их верификаций по наземным данным во внутренних водоемах радиометрическими методами. К примеру озеро Иссык-Куль каким на наш взгляд является внутренним водоемом.

**Заключение.**

1. Проанализированы методические вопросы альтиметрических измерений поверхностной температуры озера Иссык-Куль, установленных на спутнике. Рассмотрены и сопоставлены сигналы альтиметрических измерений отраженные от безграничной поверхности, как океан, так и с закрытых водоемов, как озеро Иссык-Куль.

2. Показаны, что площадь отраженного сегмента от водной поверхности и суши в радиофизическом диапазоне радиоволн изменяется от 48 км до 100 км. В этом случае сигнал отражается как от водной поверхности, так и береговой полосы суши и будет иметь сложную форму, не поддающуюся описанию стандартных выражений по формуле Брауна. Это соответственно вносит в спутниковые измерения систематическую погрешность в сторону завышения. Как показывают сравнительные измерения по озеру Иссык-Куль, эти расхождения достигают 20%.

3. Более строгими являются измерения альтиметров в оптическом диапазоне волн, точнее в инфракрасном диапазоне от 8 до 10 мкм. Для этих спектрорадиометров разрешение составляет до 1 км. Измерения радио яркостной температуры спектро-радиометром от водной поверхности определяется не только яркостью отраженного сигнала от моря, но и яркостью отражения от подповерхностного слоя, плюс к этому добавляются отраженные сигналы от морского дна. Отражения от подповерхностного слоя подразумевает отражение от хлорофилла в водной поверхности, который особенно интенсивен в летний период на севере-востоке озера Иссык-Куль.

4. Все эти вышеперечисленные параметры вносят дополнительную погрешность в измерения, различные в разные сезоны года. Прозрачность воды в прибрежной зоне Иссык-Куля достигает 16м, при наличии на дне песочно-кварцевого грунта с хорошей отражательной способностью, этот фактор вносит дополнительную погрешность в спутниковые наблюдения в измерение радиояркостной температуры от водной поверхности и может достигать 10-15%.

5. Сравнения натуральных и спутниковых измерений на MODIS/TERRA показывает, что систематическая погрешность спутниковых измерений в абсолютных величинах достигает 1,5-2<sup>0</sup>С от измеряемой величины, что в процентном отношении составляют 15-20%.

6. В целом исходя из данных спутниковых измерений температуры водной поверхности озера Иссык-Куль его можно отнести в закрытому внутреннему водоему.

**Литература:**

1. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А, Митягина М.И., Гинзбург А. И., Шермет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. - Москва, 2011.  
 2. Троицкая Ю.И., Рыбушкина Г.В., Соустова И.А., Балан-

- дина Г.Н., Костяной А. Г., Лебедев С.А., Панютин А.А., Филина Л.В. спутниковая альтиметрия внутренних водоемов. - Таруса, 15-20 февраль, 2011.
3. Шабунин Г.Д., Шабунин А.Г. Современный режим поверхностной температуры озера Иссык-Куль по данным MODIS/TERRA.// ТРУДЫ 2-го международного симпозиума по наблюдению Земли для засушливых и полузасушливых зон «Центральная Азия: взгляд из космос». - Иссык-Куль, 9-12-сентября, 2014г.
  4. Жумалиев К.М., Каримов К.А., Завьялов П.О. Исследование изменчивости гидрофизических и гидрохимических полей прибрежной зоны озера Иссык-Куль в районе города Чолпон-Ата. - ДАН Кыргызстана, Бишкек №1, 2015.
  5. Жумалиев К.М., Каримов К.А., Алибаева Г.К. Сравнительный анализ спутниковых и натурных измерений поверхностной температуры воды в озере Иссык-Куль. - Физика 2015, №1.
  6. Ашымканов К.Ш., Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В. Применение универсального опорного спектра для восстановления искаженных изображений. - Физика 2015, №2.

**Рецензент: д.т.н., профессор Жумалиев К.М.**

---