

Каримов К.А., Алибаева Г.К.

К МЕТОДИКЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗАКРЫТЫХ ВОДОЕМОВ С РАДИОМЕТРОМ, УСТАНОВЛЕННОМ НА СПУТНИКЕ

К.А. Karimov, G.K. Alibaeva

TO THE METHOD OF REMOTE SENSING OF THE CLOSED BASINS WITH A RADIOMETER MOUNTED ON THE SATELLITE

УДК 556.332.5(282.255.6)

В работе приводится детальный анализ специальных алгоритмов обработки сигналов (ретрекинга) по данным коэффициента обратного рассеяния спутникового дистанционного зондирования. Приводятся сравнения спутниковой альтиметрии адаптированной для морей и океанов с конкретными наземными гидрологическими измерениями температуры воды.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, натурное измерение, внутренний водоем, озеро Иссык-Куль.

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

Негизги сөздөр: спутникалык альтиметрия, гидрологиялык өлчөө, ички суу сактагыч, Ыссык-Куль.

The summary considers detailed analysis of the specific algorithms of signal processing (retreking) according to the backscattering coefficient of satellite remote sensing. Given comparisons of satellite altimetry adapted for the seas and oceans with specific in-situ hydrological measurements of water temperature.

Key words: satellite altimetry, in situ measurement, internal reservoir, lake Issyk-Kul.

Введение. Эффективное применение космических средств дистанционного зондирования Земли в большей мере зависит от наличия адекватных моделей, связывающих характеристики применяемых приборов (альтиметров) с конкретными параметрами морской поверхности и атмосферы над ней. Первоначально спутниковая альтиметрия рассчитывалась на использование в решение классических задач геодезии, как расчет формы Земли и ее параметров. При этом точность альтиметрических измерений в геодезии достигла нескольких сантиметров. По мере внедрения новых методов обработки (ретрекинга) формы отраженных импульсов наблюдается переход к исследованию мирового океана и проблемы внутренних и окраинных морей, крупных озер, водохранилищ и даже рек. Спутниковая альтиметрия стала неизменным инструментом в изучении климатических изменений уровня температуры мирового океана, внутренних морей, ледников Арктики и Антарктиды. Появилась новая область применения спутниковой альтиметрии - ландшафтоведение. В последние годы широкое применение получили радиолокационные съемки к примеру в оптическом диапазонах - спектра-

диометра. По сравнению с радиофизическими методами оптические являются уникальной возможностью получать изображение с высоким пространственным разрешением до нескольких метров в широком поле обзора независимо от времени суток, года и облачного покрова. Радиоальтиметр или спектрометр установленный на спутнике широко используется для решения рода конкретных задач в геофизике, 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 формулой Брауна в рамках соответствующих алгоритмов ретрекинга определяются его основные параметры: τ_0 - ширина переднего фронта; $t_1 = t_0 + \tau_0/2$ - 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 σ , которое в случае морской поверхности, зависит в основном от скорости приводного ветра и значимую высоту волн $H_{swH} - 2s$

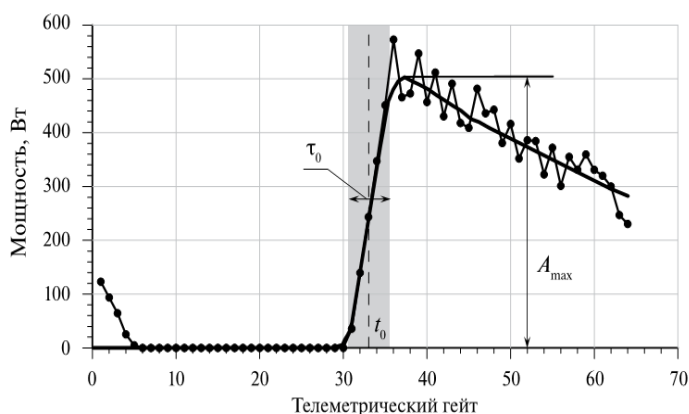


Рис. 1. Форма импульса, отраженного от безграничной подстилающей поверхности, аппроксимированная по фор-

муле Брауна (сплошная линия) и осредненная за 1 с; форма отраженного альтиметрического импульса для условий открытого океана (маркеры). Серой областью выделена ширина переднего фронта отраженного импульса

Далее рассмотрим особенности альтиметрии внутренних водоемов. В прибрежной зоне формы телеметрических импульсов, принимаемых антенной альтиметра, существенно отличаются от импульсов, формирующих в открытом океане. Это связано с влиянием отражения от суши. На рисунке 2.а. показан пример телеметрического импульса, формирующего за счет совместного отражения от суши и воды, 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.

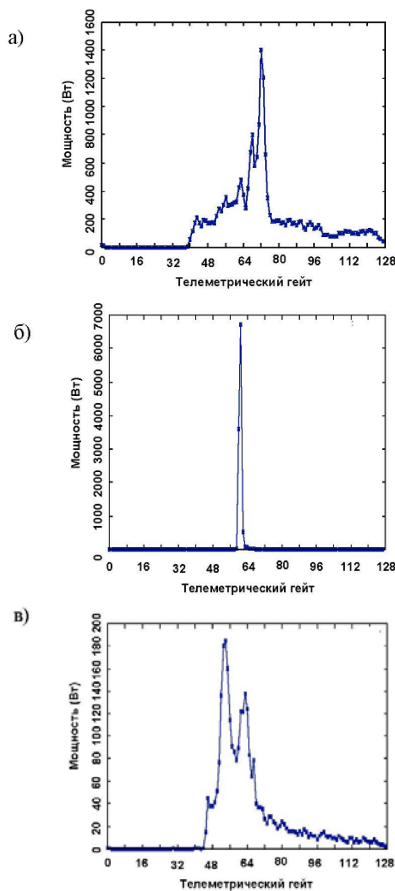


Рис.2. Формы импульсов в прибрежной зоне и внутреннем водоеме: а-совместное отражение от суши и воды, б-квазизеркальное или когерентное отражение воды в устьях и гаванях, в-наличие нескольких сильно отражающих объектов (Троицкая и др., 2010)

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 температуры водной поверхности. При этом неверно определяются и другие величины, например

скорость ветра и 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, на крупных реках и озерах, однако, до настоящего времени не создано единая регулярная методика, позволяющая использовать ДЗЗ для успешного нахождения уровня воды в других характеристик в условиях, когда отражение от суши существенно влияет на формы принимаемых телеметрических импульсов. Для этого существуют различные алгоритмы ретрекинга, применяемый для определения времени прихода отраженного импульса, например пороговый ретрекинг, β - ретрекинг, Ocean 1/2 , Ice-1/2.

Далее рассмотрим величину площади сегмента отражения от водной поверхности и суши. Площадь сегмента отражения. 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 θ – угловое разрешение антенны альтиметра.

Величина $\sin \theta$ зависит от диаметра антенны альтиметра (D_a) и длины волны радиоимпульса (λ) определяется как:

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

Таким образом, максимальный диаметр сегмента подстилающей поверхности можно определить следующим образом:

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

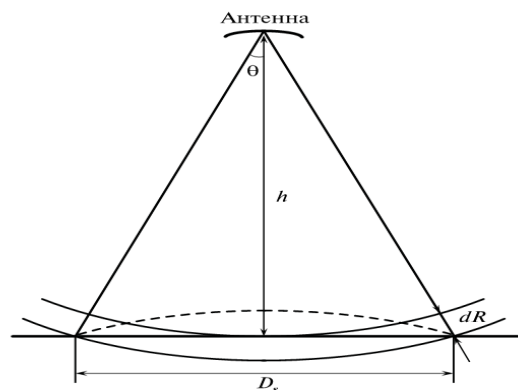


Рис. 3. Схема зондирования подстилающей поверхности импульсами:

h – высота спутника над подстилающей поверхностью; θ – 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 длина волны составляет $\lambda = 2,2$ см, а диаметр антенны – $D_a = 1,5$ м. Следовательно, максимальный диаметр сегмента, с которого отражается одиночный импульс, в соответствии с вышеуказанной формулой не превышает $D_s = 48,1$ км. При $\lambda = 550$ нм и угловое разрешение $\theta = 1^{\circ}$, $D_s = 100$ км

Как видно при всех раскладах радиофизические характеристики альтиметров даже при λ изменяющихся от 2 см до 500 нм, диаметр антенны от 3 м до 15 м и в угловом разрешении $\theta = 1^{\circ}$, высота спутника порядка 1000 км, диаметр сегмента отражающей поверхности изменяется от 48 км до 100 км.

Практически зондирование подстилающей поверхности производится импульсом с длительностью τ . Поэтому размеры сегмента подстилающей поверхности, от которого отражается радиоимпульс, определяются не только расстоянием от спутника до поверхности, но и временем t_0 , когда передний фронт зондирующего импульса касается поверхности, и временем $t_0 + \tau$, когда его задний фронт достигает поверхности (рис. 3). В этом случае диаметр D_s сегмента отражающей поверхности определяется как, учитывая, что величина $dR^2 \ll h^2$, в итоге получаем:

$$D_s = 2\sqrt{2hdR} = 2\sqrt{2hct}$$

После касания зондирующим импульсом подстилающей поверхности в момент времени t_0 происходит расширение сферического сегмента, с которого происходит отражение, с последующим вырождением его до кольца. Именно по этой причине на практике площадь сегмента отражающей поверхности определяется по времени, соответствующему половине амплитуды отраженного сигнала. В случае зеркального отражения оно равно $t_0 + \tau/2$. Это время и считается временем отражения зондирующего импульса от подстилающей поверхности. Таким образом, предшествующее выражение принимает вид:

$$D_s = 2\sqrt{hct}$$

Для альтиметров установленных на спутнике длительность зондирующего импульса, как правило, составляет $\tau = 3,3$ нс. В соответствии с вышеуказанным выражением, диаметр сегмента подстилающей поверхности, от которого происходит отражение радиоимпульса, получается равным $D_s = 228,2$ м. Его площадь для одиночного импульса соответственно составляет 716,9 м², что значительно меньше максимальной величины, определяемой предыдущими соотношениями, т. е. конструкцией

самого альтиметра. Для уменьшения всех вышеперечисленных разбросов и ошибок разработчики альтиметра работающие в оптическом диапазоне радиоволн от 0,405 μ км до 14,38 μ км с разрешением от 250 м от 1,0 км.

В связи с тем в комплексе бортовой аппаратуры всех современных спутников, проводящих альтиметрические измерения, в оптическом диапазоне, а точнее в инфракрасном диапазоне от 8-13 μ км и называемом спектро радиометром включен многоканальный спектро радиометр, включающий 36 спектральный каналов от 0,4 до 14,38 μ км. В настоящее время разработан алгоритм расчета модуля скорости ветра, температуры и других параметров по данным спектро радиометра такого типа:

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

где a_i – коэффициент для i -й частоты радиометра; $T b_i$ – радиояркость температура поверхности воды на данной частоте [1,2]. Совместное использование результатов расчета по данным радиометрии и альтиметрических измерений позволит повысить точность определения модуля скорости приповерхностного ветра и поверхностной температуры воды. Через радиояркость температуру отраженного от сигнала водной поверхности из закона Стефана-Больцмана можно вычислить температуру отражающей поверхности - T . Яркость оптического излучения моря величина B является суммой трех характеристик

$$B = B_1 + B_2 + B_3$$

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 излучение в толще воды, определяется коэффициентом вертикального ослабления. Поскольку вода соержит органические и неорганические примеси, то на оптические свойства воды влияют и

взвешенные частицы. Примеси можно разделить на три группы. Первое отражение от органического вещества имеет желтый цвет. Это главный фактор определяющий поглощение света морской воды в коротковолновой части спектра. Второе по значимости поглощения - взвешенные частицы 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 – фитопланктоны, благодаря наличию в нем хлорофилла дает сильное поглощение в голубой – 0,44 мкм и красной 0,65 мкм частях спектра излучения. Концентрация хлорофилла может быть изучена для конкретных систем спутниковыми наблюдениями. При этом всегда предварительно проводится атмосферная характеристика.

Наконец, третий член B_3 – яркость излучения, отраженного морским дном которая определяется условием освещения, глубиной и прозрачностью воды и отражательной способностью грунта на дне воды. Нужно сказать, что в большинстве случаев грунт на дне – это среднего размера кварцевые песчинки, обладающие высокой отражательной способностью. Все эти три параметра определяют яркостное излучение морской поверхности – величину B .



Рис.4. Цветение фитопланктона в озере Иссык-Куль.

К примеру на рис.4. приведено распределение фитопланктона в теплый сезон вдоль побережья озера Иссык-Куль, из которого следует что наибольшая концентрация фитопланктона присутствует вдоль северо-восточного побережья озера Иссык-Куль. 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 .

Лидар УФЛ-9 разработан в ИО РАН и предназначен для экспрессного обнаружения загрязнений акваторий нефтепродуктами, фенолами, канализационными отходами, сельскохозяйственными стоковыми водами и антропогенными органическими

веществами иного происхождения. Лидар размещается на борту судна (катера) в его носовой части либо стационарно на береговых конструкциях; зондирующий луч направлен на поверхность воды под углом 5-45° к вертикали. Вошедший в воду лазерный импульс (355, 532 нм) вызывает флуоресценцию органики, находящейся на поверхности (например, нефтяная пленка) и органики, растворенной или взвешенной в толще воды, а также хлорофилла фитопланктона. Флуоресцентное излучение, проявляющееся в спектральном диапазоне 400-700 нм, принимается и анализируется в спектрофотометрическом 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 (в том числе загрязнителей), взвеси и хлорофилла с очень высоким (от единиц м) пространственным разрешением.

В результате выполненных экспедиционных работ получены новые данные о распределениях гидрофизических и гидробиооптических полей в прибрежной акватории в районе курорта Чолпан-Ата.

Озеро Иссык-Куль ультра-олиготрофно, концентрации хлорофилла низкие, не превышают 0.4 мкг/л. Концентрации общей взвеси также относительно низкие, в среднем чуть более 0.7 мг/л.

В связи с этим вода очень прозрачна - **глубина видимости в прибрежной зоне достигает 16 м**. Концентрация взвешенных минеральных веществ превышает концентрацию органической взвеси примерно в 5 раз. Тем не менее, содержание растворенной в воде органики повышается вблизи берегов, особенно в заливах поблизости от курортной инфраструктуры и водотоков. Это указывает на ощутимый, хотя и не очень значительный антропогенный эффект [5]. В этой связи подытоживая выше приведенные данные следует отметить, что при работе спутника MODIS (Terra and Aqua) в ИК диапазонах “в окнах прозрачности” атмосферы в интервалах длин волн 3-5 и 8-13 мкм и только в этом диапазоне можно проводить исследование океанической и водной поверхности, как температура, так и других параметров.

Во втором окне прозрачности отраженная солнечная радиация практически отсутствует и тепловые измерения в ИК диапазоне не зависят от условий освещенности поверхности суши и воды Солнцем. Прозрачность атмосферы в этих окнах высокая. При точных измерениях температуры

необходимо учитывать передаточную функцию атмосферы и соответственно нужно знать вертикальное распределение температуры и влажность воздуха, а также распределение аэрозоля. При всем этом заявленная разработчикам MODIS ошибка измерения температуры ИК радиометре составляет $\sigma T = 0,3-0,5^{\circ}\text{C}$. Нами были приведены и сопоставлены фактические измерения температуры по наземным измерениям, как на гидрологических постах на озере Иссык-Куль, со спутниковыми данными полученными от MODIS(Terra) в период с 2000 по 2013 г.

Анализ применимости использования данных дистанционного зондирования Земли, в частности данных MODIS (Terra) и натурных измерений, для исследования температурных характеристик поверхности озера Иссык-Куль показал что средние значения температуры поверхностной воды озера Иссык-Куль по станции Чолпон-Ата составляет $\Delta T=0,2^{\circ}\text{C}$. А между экстремальными значениями за 2006 год, составляет также $\Delta T=0,2^{\circ}\text{C}$. Разницы средних значений температуры поверхностной воды озера Иссык-Куль по станции Тамга составляет $\Delta T=1,8^{\circ}\text{C}$, а между экстремальными значениями за 2008 год, составляет $\Delta T=1,1^{\circ}\text{C}$. По станции Балыкчи средние значения температуры поверхностной воды озера Иссык-Куль составляет $\Delta T=1,9^{\circ}\text{C}$, экстремальные значения за 2008 год, составляет $\Delta T=1,6^{\circ}\text{C}$. Разность средних значений температуры поверхностной воды по станции Кой-Сары составляет $\Delta T=1,5^{\circ}\text{C}$, экстремальные значения за 2006 год, составляет также $\Delta T=1,5^{\circ}\text{C}$.

Во всех четырех случаях средние значения и экстремальные значения температуры поверхностной воды озера Иссык-Куль по спутниковым измерениям превышают средние значения температуры и экстремальные значения по натурным измерениям. Такое расхождение температур по спутниковым и натурным измерениям указывает на систематическую погрешность спутниковых измерений относительно натурных. Причем, эта погрешность в среднем составляет $1,5^{\circ}\text{C}-1,9^{\circ}\text{C}$, с исключением данных по станции Чолпон-Ата [4].

Это говорит о необходимости методов дистанционного зондирования с проведением дополнительных корректировок и верификаций по наземным данным в закрытых водоемах как озеро Иссык-Куль.

Заключение.

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

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 и береговой полосы суши и будет иметь

сложную форму, не поддающуюся описанию стандартных выражений (формула Брауна). Это соответственно вносит в измерения систематическую погрешность по нашим данным до 20%.

3. Более строгими являются измерения альтиметров в оптическом диапазоне волн, точнее в инфракрасном диапазоне от 8 до 10 $\mu\text{м}$, для этих спектрорадиометров разрешение составляет 1 км. Измерение радио яркостной температуры спектрорадиометром от водной поверхности определяется не только яркостью отраженного сигнала от моря, но и яркостью отражения от подповерхностного слоя плюс к этому отраженного сигнала от морского дна. Отражения от подповерхностного слоя подразумевает отражение от хлорофилла в водной поверхности, который особенно интенсивен в летний период.

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 измерение радиояркостей температуры от водной поверхности.

5. Сравнения натурных и спутниковых измерений на MODIS (Terra) показывает, что систематическая погрешность спутниковых измерений в абсолютных величинах достигает $1,5-2^{\circ}\text{C}$ от измеряемой величины, в процентном отношении это 13-16%

6. В целом исходя из данных спутниковых измерений температура водной поверхности Иссык-Куля по классификации спутниковых измерений озеро Иссык-Куль можно отнести в закрытому внутреннему водоему.

Литература:

1. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А, Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. Москва, 2011.
2. Троицкая Ю.И., Рыбушкина Г.В., Соустова И.А., Баландина Г.Н., Костяной А. Г., Лебедев С.А., Панюгин 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 полусушливых зон «Центральная Азия: взгляд из космос». Иссык-Куль, 9-12-сентября, 2014 г.
4. 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.
5. Жумалиев К.М., Каримов К.А., Завьялов П.О. Исследование изменчивости гидрофизических и гидрохимических полей прибрежной зоны озера Иссык-Куль в районе г. Чолпон-Ата.- ДАН Кыргызстана, Б. №1, 2015.

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