

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 551.46.07

**ПРИБОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПОДВОДНОЙ
ОСВЕЩЕННОСТИ ПРЕСНОВОДНЫХ ВОДОЕМОВ ПО ГЛУБИНЕ
С МИНИМИЗАЦИЕЙ ВНЕШНИХ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ**

© 2025 г. И. А. Суторихин^а, В. А. Соловьев^{б,*}, Д. Е. Кривобоков^б

^аАлтайский государственный университет,

Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения

Российской академии наук

Россия, 656038, Барнаул, Молодёжная ул., 1

^бАлтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

Россия, 656038, Барнаул, просп. Ленина, 46

**e-mail: solvitali@mail.ru*

Поступила в редакцию 13.11.2024 г.

После доработки 29.01.2025 г.

Принята к публикации 12.05.2025 г.

Приведено описание приборного комплекса для измерения спектральной подводной освещенности на разных глубинах пресноводных водоемов, который состоит из двух герметичных погружаемых измерительных боксов и одного внешнего блока обработки данных. Основное отличие комплекса от аналогичных устройств в минимизации влияния изменения внешней надводной освещенности, связанной с облачностью, туманом, дымкой и слабым поверхностным волнением, на измерения. Комплекс опробован на различных глубинах нескольких участков акватории Телецкого озера в ходе экспедиции в летний период 2024 года. Приведены результаты измерений и выполнена оценка влияния слабого волнения водной поверхности.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для экологической оценки состояния участков акватории пресноводных водоемов важным параметром является распределение по глубине спектральной подводной освещенности в диапазоне 400–800 нм [1]. Глубина, на которую проникает от 0.1 до 1% солнечного света, определяется как фотический слой. В нем происходит фотосинтез фитопланктона и высших растений [2, 3]. Толщина фотического слоя, помимо уровня надводной освещенности, зависит также от степени прозрачности воды, она изменяется в широких пределах. Вариации погодных

условий при проведении измерений (облачность, туман, волнения водной поверхности) влияют на ход и результаты фотометрических подводных исследований [4]. Минимизация внешних влияющих факторов и оперативность при проведении измерений спектральной подводной освещенности на разных глубинах по сравнению с прибором, описанным в работе [5], и явилась целью создания данного приборного комплекса.

2. ОПИСАНИЕ ПРИБОРНОГО КОМПЛЕКСА

Для реализации поставленной цели был создан приборный комплекс, состоящий из двух погружаемых герметичных измерительных боксов и блока обработки данных (БОД) для управления комплексом, хранения и обработки значений подводной освещенности. В измерительных боксах установлены прозрачные окна из матово-белого стекла, набор узкополосных (интерференционных) светофильтров в диапазоне от 400 до 800 нм, а также фотоприемники с усилительными блоками, подключенными к БОД. Светофильтры закреплялись на вращающихся дисках, приводимых в движение шаговыми двигателями, управляемыми с БОД. Посредством двигателей осуществляется синхронное вращение дисков для установки требуемых светофильтров на одной оптической оси с входными окнами и фотоприемниками. Блок-схема приборного комплекса приведена на рис. 1.

Рис. 1. Блок-схема приборного комплекса.

Приборный комплекс функционирует следующим образом. Солнечный свет, пройдя определенный путь в водной среде, через прозрачное входное окно измерительного бокса попадает на интерференционный светофильтр, посредством которого выделяется узкий спектральный участок. Характеристики светофильтров представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики интерференционных светофильтров

Длина волны λ , нм	433	445	459	488	514	532	620	655	670	780
Полуширина ΔT , нм	5	5	5	2	2	2	2	5	5	5
Чувствительность, %	58	62	60	55	55	55	62	61	63	63

Входное окно включает в себя коллиматорную линзовую систему, состоящую из двух собирающих линз, формирующую параллельный пучок света, направленный на интерференционные светофильтры. Интенсивность прошедшего света регистрируется фотоприемником, в качестве которого используется фотодиод ФДУК-11УТ. Его спектральная

характеристика представлена на рис. 2. В устройстве предусмотрен режим калибровки для установки нуля электрической схемы, когда фотодиод при помощи реле отключается от измерительного контура с целью устранения влияния схемы на результат измерения, накоротко замыкая выводы фотодиода между собой. Наблюдается определенное смещение, значение которое позднее, при определении интенсивности солнечного излучения, вычитается из получаемого значения. Сигнал от фотоприемника поступает на блок операционных усилителей, состоящий из 6 каскадов. Экспериментально установлено, что подводная освещенность изменяется на 5–7 порядков на требуемой глубине измерения относительно поверхностного значения. В связи с этим необходимо использовать переключаемый коэффициент усиления. Блок-схема усилителя представлена на рис. 3. Затем аналоговый сигнал подается на вход микроконтроллера stm32f103 и преобразуется встроенным 12-разрядным АЦП, к которому подключается источник опорного напряжения, в цифровой вид, далее поступает на блок первичной обработки данных по кабелю с использованием интерфейса передачи RS-485. Шаговый двигатель Nema14 поворачивает диск, с расположенными на нем светофильтрами. При помощи концевого датчика происходит определение нулевой точки отсчета движения. Чтобы исключить возможные пропуски шагов двигателя данная процедура по каждый круг вращения диска.

Рис. 2. Спектральная характеристика фотодиода ФДУК-11УТ.

Рис. 3. Блок-схема 6-каскадного усилителя: СФ – сигнал с фотодатчика, ОУ – операционный усилитель, СУ – сигнал с ОУ.

3. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

На первом этапе измерений оба погружаемых бокса устанавливаются на глубине 3–5 см от поверхности воды, проводится фиксация спектрального пропускания на всех оптических каналах, которые принимаются за 100%. Затем первый бокс фиксируется на этой глубине, а второй последовательно опускается на глубину с интервалом 0.5 или 1 м. На каждой участке глубины повторяется процесс измерений, и данные заносятся в блок хранения данных. Отношение сигналов фотодатчиков первого и второго измерительных боксов соответствует доле прохождения светового потока в выбранном спектральном диапазоне, что исключает влияние изменения светового потока у поверхности водоема на результаты измерений за счет облачности и туманной дымки. Измерение завершается, когда на определенной глубине сигнал, регистрируемый в канале с наименьшим спектральным ослаблением света второго бокса, не превысит 0.3%.

Испытания комплекса проводились в экспедиции на озере Телецком в августе 2024 г. В качестве примера приведены результаты измерения спектральной подводной освещенности в Камгинском заливе (03.08.24 с 11 до 12 ч местного времени) на станции с координатами 51.77324 с.ш., 87.67678 в.д. Метеоусловия при проведении измерений были следующими: скорость ветра 1.5–2.5 м/с, температура воздуха 23 °С, поверхностная температура воды 20 °С при слабом волнении.

Для учета поверхностного волнения посредством статистической обработки данных проводилось несколько серий измерений с длительностью цикла 0.5, 2 и 5 с на каждом участке глубины через равные промежутки времени. Минимальный цикл измерения составляет 0.5 с. За это время микроконтроллер получает 200 значений освещенности на каждой длине волны и передает эти величины в блок обработки данных в виде усредненного значения.

В табл. 2 представлены результаты измерения спектральной подводной освещенности на длине волны 616 нм до глубины 8 м. Время измерения по каждому спектральному каналу на определенной глубине составляло 5 с. Таким образом, статистическая обработка проведена по 10 циклам измерения. Значение освещенности у поверхности принято за 100%.

Таблица 2. Результаты измерения спектральной подводной освещенности на длине волны 616 нм за время 5 с

Параметр	Глубина, м													
	0	0.5	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Среднее значение, %	100	75.7	57.1	46.5	5.5	4.5	2.9	2.1	1.9	1.1	0.8	0.5	0.4	0.3
Стандартное отклонение, %	30.3	10.4	24.9	6.9	0.9	1	0.4	0.2	0.3	0.1	0	0	0	0

В табл. 3 представлены результаты измерения подводной освещенности со временем измерения 2 с, статистическая обработка проведена по четырем циклам измерения

Таблица 3. Результаты измерения подводной освещенности на длине волны 616 нм за время 2 с

Параметр	Глубина, м													
	0	0.5	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Среднее значение, %	100	76.8	53.1	48	5.5	4.6	2.8	2.1	1.9	1.1	0.8	0.5	0.4	0.3

Стандартное отклонение, %	48.7	18.4	14.3	7	1.5	0.8	0.7	0.3	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0
---------------------------	------	------	------	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

В табл. 4 представлены результаты измерения подводной освещенности за время 0.5 с.

Таблица 4. Результаты измерения подводной освещенности на длине волны 616 нм за время 0.5 с

Параметр	Глубина, м													
	0	0.5	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Среднее значение, %	100	84.9	60	49	6.6	5.1	2.9	2	1.7	1.1	0.8	0.5	0.4	0.3
Стандартное отклонение, %	10	9.2	2.9	2.5	1.1	0.6	0	0.1	0.2	0	0	0	0	0

Рис. 4. Результаты расчета СКО подводной освещенности на длине волны 616 нм за время измерения 0.5, 2 и 5 с.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результат изменения среднего квадратического отклонения (СКО) в зависимости от глубины погружения датчика при разном времени измерений представлен на рис. 4. Время измерения 0.5 с меньше периода волнения водной поверхности. За данный промежуток больших изменений амплитуды сигнала не происходит, поэтому СКО меньше, чем во всех остальных случаях. В течение времени измерения, равного 2 с, из-за волнения водной поверхности изменения освещенности значительны, однако, по нашим представлениям, они не укладываются в период волны. Время измерения 5 с охватывает как минимум один (или несколько) периодов изменения освещенности за счет волнения водной поверхности.

Стоит также отметить, что разброс СКО у поверхности значительно выше, и он снижается с увеличением глубины. Подобное поведение СКО связано с тем, что волнение воды оказывает существенное влияние на результат измерения, оно снижается с увеличением глубины за счет рассеивающего действия водной толщи [6, 7].

Исходя из изложенного, предлагается проводить статистическую обработку результатов экспериментов кратко частоте волнения водной поверхности для снижения влияния волны воды на результаты измерений. Рассмотрим изменение СКО на математических моделях, построенных по измеренным значениям освещенности.

Построим графики изменения освещенности у поверхности и на глубине 1 м от времени.

Рис. 5. Графики изменения освещенности в зависимости от времени: а – у поверхности, б – на глубине 1 м.

Рис. 6. График изменения СКО в зависимости от времени.

В связи с тем, что в течение одного цикла измерений получено до 10 значений, их недостаточно для построения гладкой зависимости, поэтому было принято решение аппроксимировать их степенным полиномом. В дальнейшем для анализа рекомендуется проводить непрерывные измерения освещенности за выбранный интервал времени с целью получения гладкой зависимости без предварительного усреднения результатов измерения.

Построим графики изменения освещенности у поверхности и на глубине 1 м в зависимости от времени, выполним полиномиальную регрессию полиномом девятой степени и аппроксимацию полученных данных. Степень полинома обусловлена сложной формой зависимости и количеством экстремумов функции. Наибольшие расхождения получены на краях функции, они исключены при дальнейшей обработке.

Рис. 7. Графики изменения освещенности в зависимости от времени: а – у поверхности, б – на глубине 1 м; 1 – аппроксимированные значения, 2 – измеренные значения.

Рассчитаем СКО для аппроксимированных значений без учета точек по краям функции, имеющих большое отклонение относительно исходных данных. Наблюдается постепенное снижение СКО во времени.

Рис. 8. Графики изменения СКО в зависимости от времени: а – у поверхности, б – на глубине 1 м.

На рис. 8а видно, что примерно в диапазоне от 1 до 2 с происходит быстрое изменение СКО, а от 2 до 2.5 с – медленное. Можно предположить, что такое изменение обусловлено периодической природой волны водной поверхности. Таким образом, если проводить измерения в течение времени, кратного периоду волны, то СКО будет приближаться к минимальному значению.

Для подтверждения гипотезы смоделируем гармонический сигнал, состоящий из первой и третьей гармоник, который представлен на рис. 9.

Рис. 9. Гармонический сигнал.

Рассчитаем СКО (рис.10). Наблюдаются постепенное увеличение и стабилизация значения СКО.

Рис. 10. СКО сгенерированного сигнала.

Для модельного периодического сигнала характер изменения СКО подтверждается. Начальный всплеск соответствует времени измерения, равному половине периода волнения, что не отражает всей картины происходящих процессов. По окончании первого периода измерения возникает локальный минимум СКО, который соответствует предельному значению при увеличении времени измерения (т.е. большой выборки данных). При следующих периодах амплитуда СКО уменьшается. В качестве критерия окончания цикла измерения предлагается выбрать изменение СКО во времени не более 5%, что соответствует погрешности измерения измерительного комплекса. Время измерения выбираем следующим образом:

$$t = 2 |t_1 - t_2|,$$

где t_1 – время, при котором наблюдается минимальное значение СКО, t_2 – время, при котором наблюдается максимальное значение СКО.

5. ВЫВОДЫ

Как видно на рис. 10, СКО уменьшается с увеличением времени измерений прибора. Однако для повышения оперативности контроля подводной освещенности и, соответственно, получения результатов измерений фотического слоя при одинаковых условиях необходимо усовершенствовать конструкцию измерительного комплекса, а также выработать критерии управления длительностью сбора данных. В первом случае возможно использование

дополнительного канала измерения освещенности в верхнем подводном слое для оценки периодичности поверхностных волнений воды и формирования сигнала, синхронизирующего интервалы времени измерения погружаемых боксов. Во втором случае рассматривается возможность непрерывного расчета измерительным комплексом СКО в процессе сбора данных в реальном времени. При использовании критериев, связывающих периодичность поверхностных волнений воды и распределение СКО в течение времени накопления мгновенных измерений, также появится возможность уменьшения погрешности измерений в подводном поверхностном слое.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ФГБУН ИВЭП СО РАН №0306-2021-0001. В экспедиционных работах использовалось научное оборудование ЦКП “Научно-исследовательские суда ИВЭП СО РАН”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Суторихин И.А., Букатый В.И., Харламова Н.Ф., Акулова О.Б.* Климатические условия и гидрооптические характеристики пресноводных водоемов Алтайского края. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2016.
2. *Китаев С.П.* Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КНЦ РАН, 2007.
3. *Соколов О.Н.* О подводной освещенности. Труды ВНИРО Т. 36. 1958. С.295.
4. *Ерлов Н.* Оптическая океанография Москва: МИР, 1970.
5. *Суторихин И.А., Литвиненко С.А.* Изменение спектральной прозрачности и подводной освещенности воды Телецкого озера в летний период и период ледостава. Естественные и технические науки. 2019. № 12. С. 221.
6. Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана /Под ред. А. С. Монины. Москва: Наука, 1983.
7. *Шифрин К.С.* Введение в оптику океана. Москва: ЛЕНАНД, 2021.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Блок-схема приборного комплекса.

Рис. 2. Спектральная характеристика фотодиода ФДУК-11УТ.

Рис. 3. Блок-схема 6-каскадного усилителя: СФ – сигнал с фотодатчика, ОУ – операционный усилитель, СУ – сигнал с ОУ.

Рис. 4. Результаты расчета СКО подводной освещенности на длине волны 616 нм за время измерения 0.5, 2 и 5 с.

Рис. 5. Графики изменения освещенности в зависимости от времени: а – у поверхности, б – на глубине 1 м.

Рис. 6. График изменения СКО в зависимости от времени.

Рис. 7. Графики изменения освещенности в зависимости от времени: а – у поверхности, б – на глубине 1 м; 1 – аппроксимированные значения, 2 – измеренные значения.

Рис. 8. Графики изменения СКО в зависимости от времени: а – у поверхности, б – на глубине 1 м.

Рис. 9. Гармонический сигнал.

Рис. 10. СКО сгенерированного сигнала.

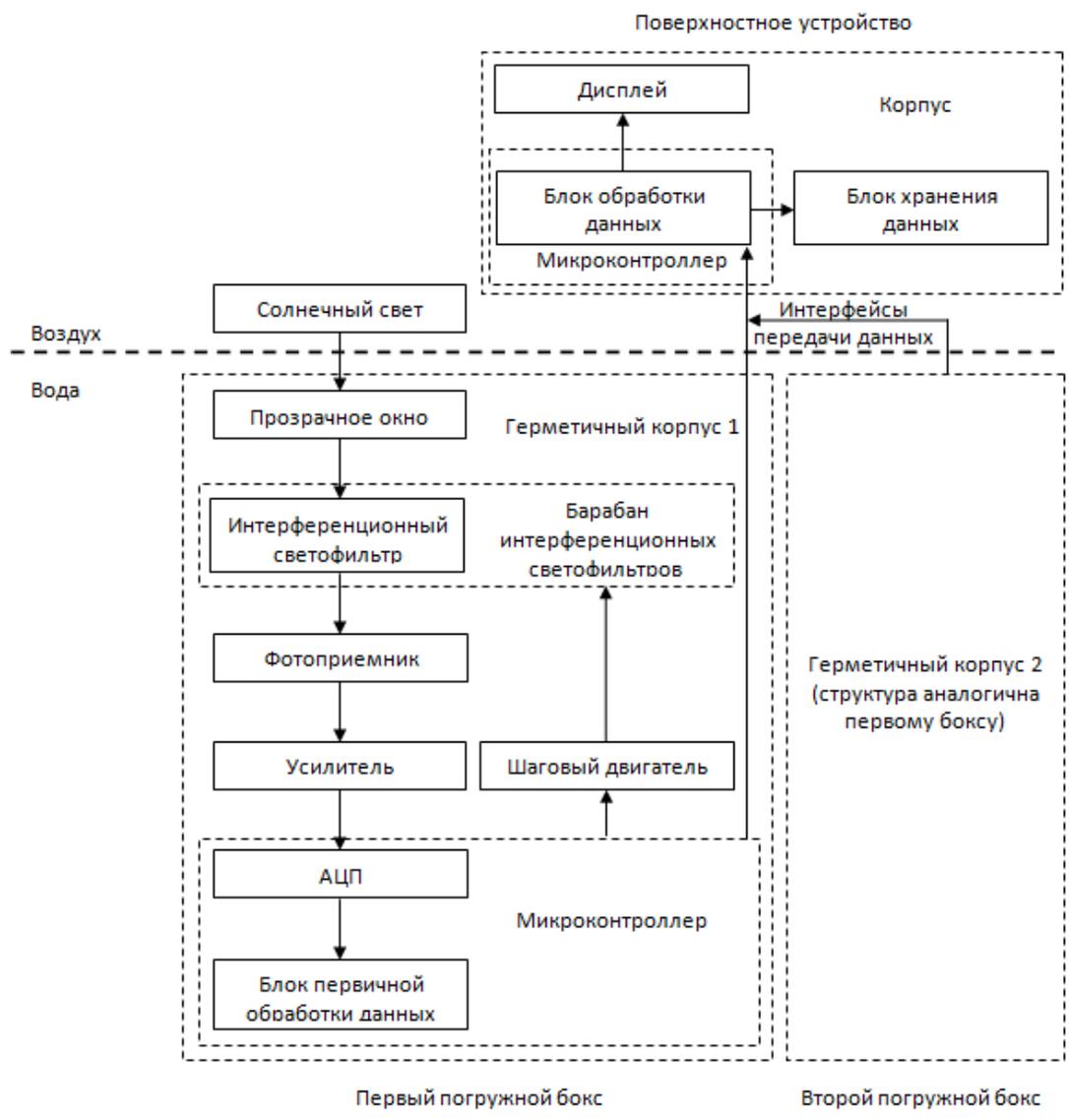


Рис. 1

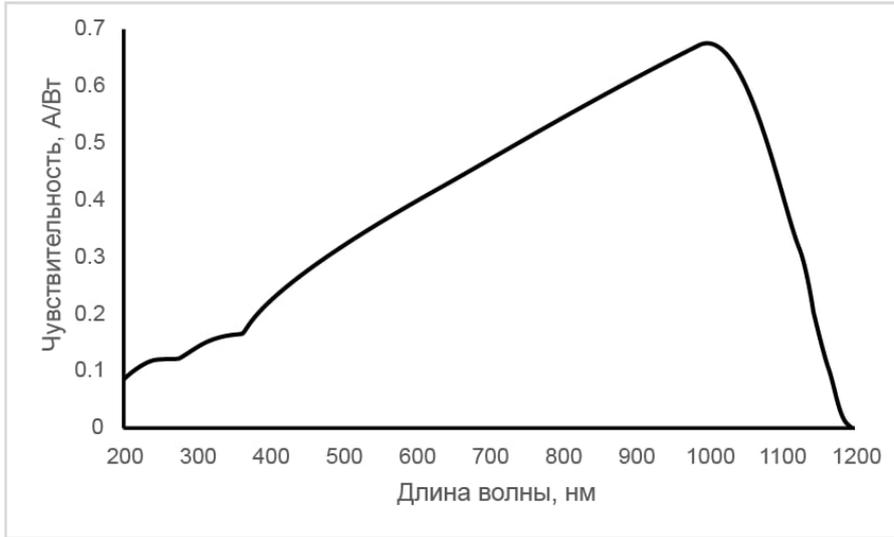


Рис. 2

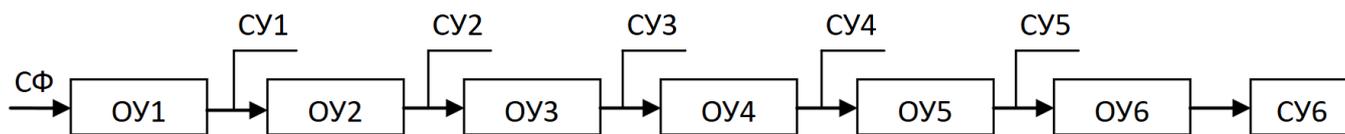


Рис. 3

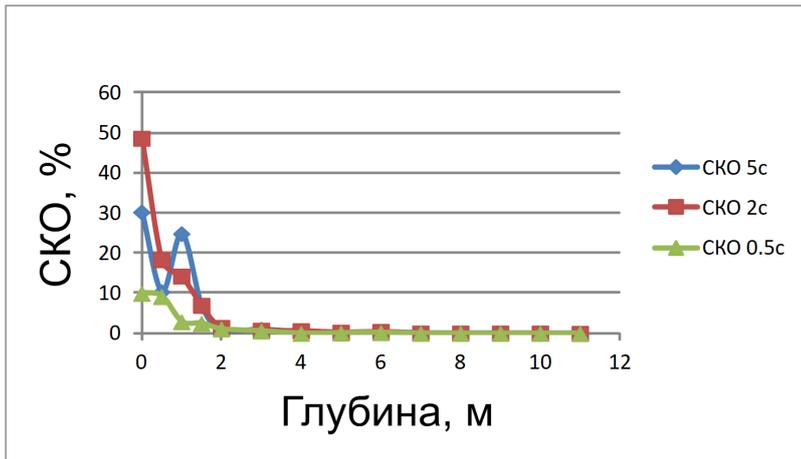
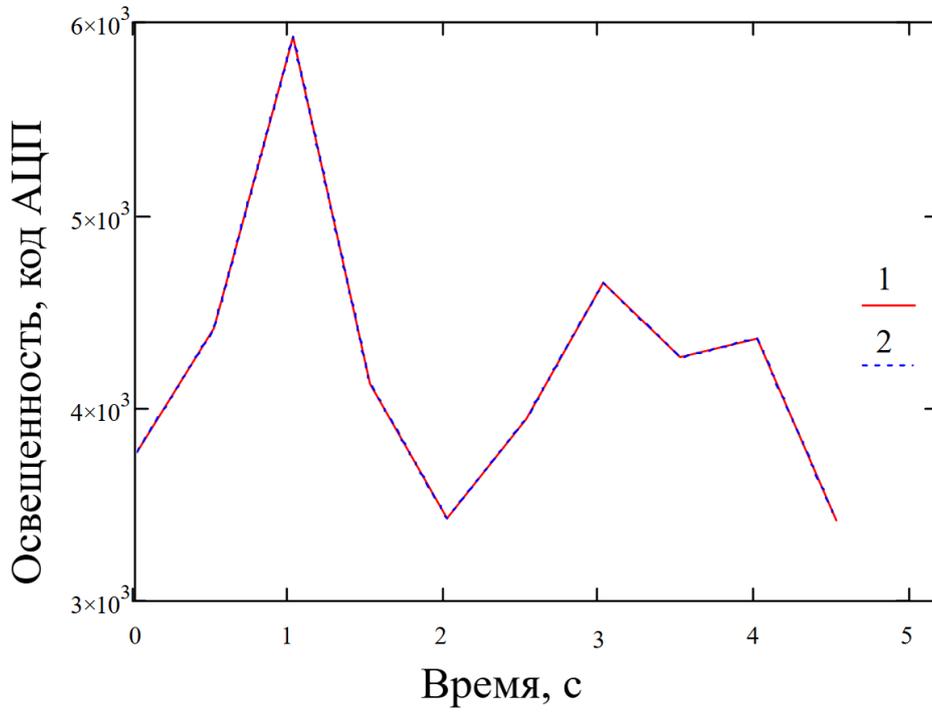


Рис. 4

(a)



(б)

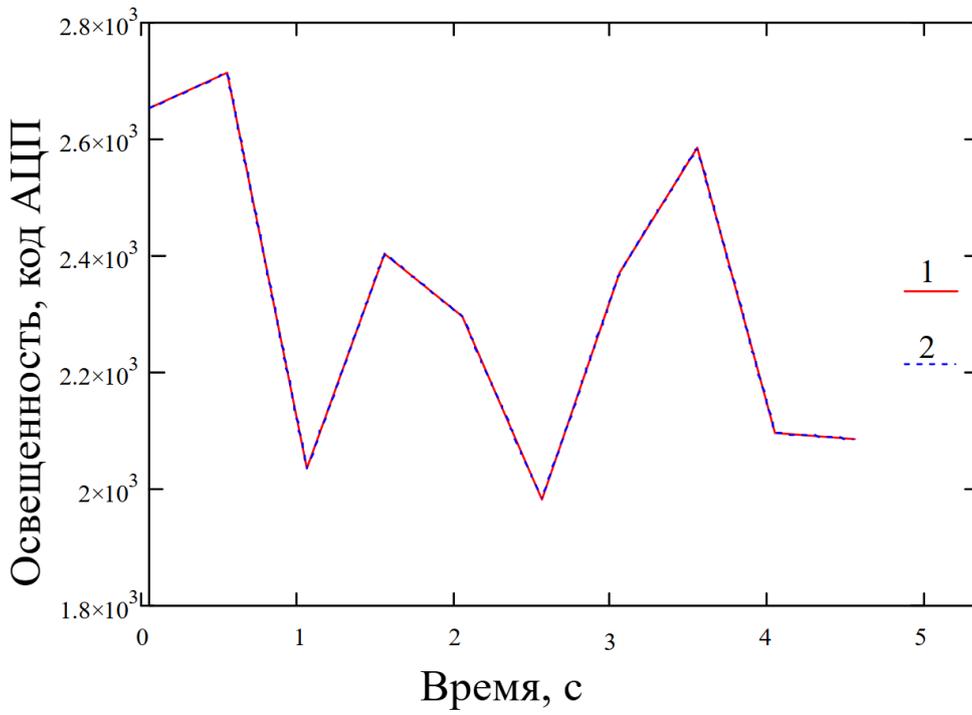


Рис.5

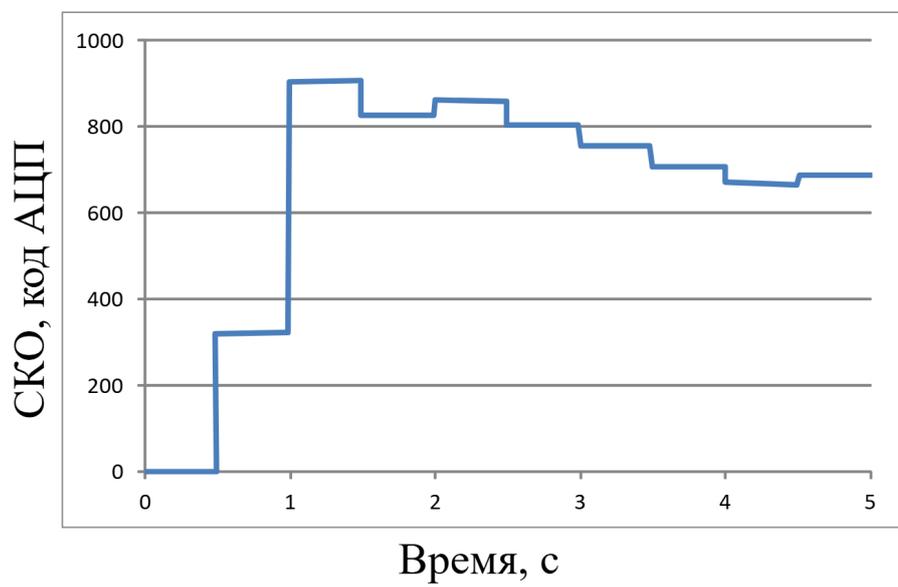
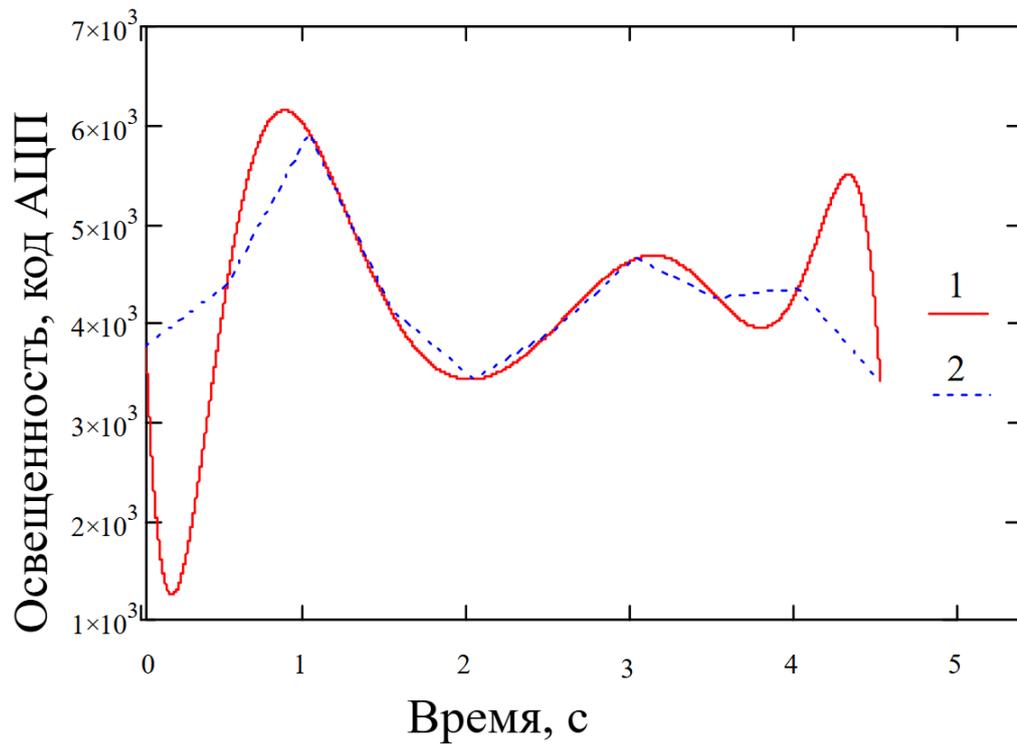


Рис.6

(a)



(б)

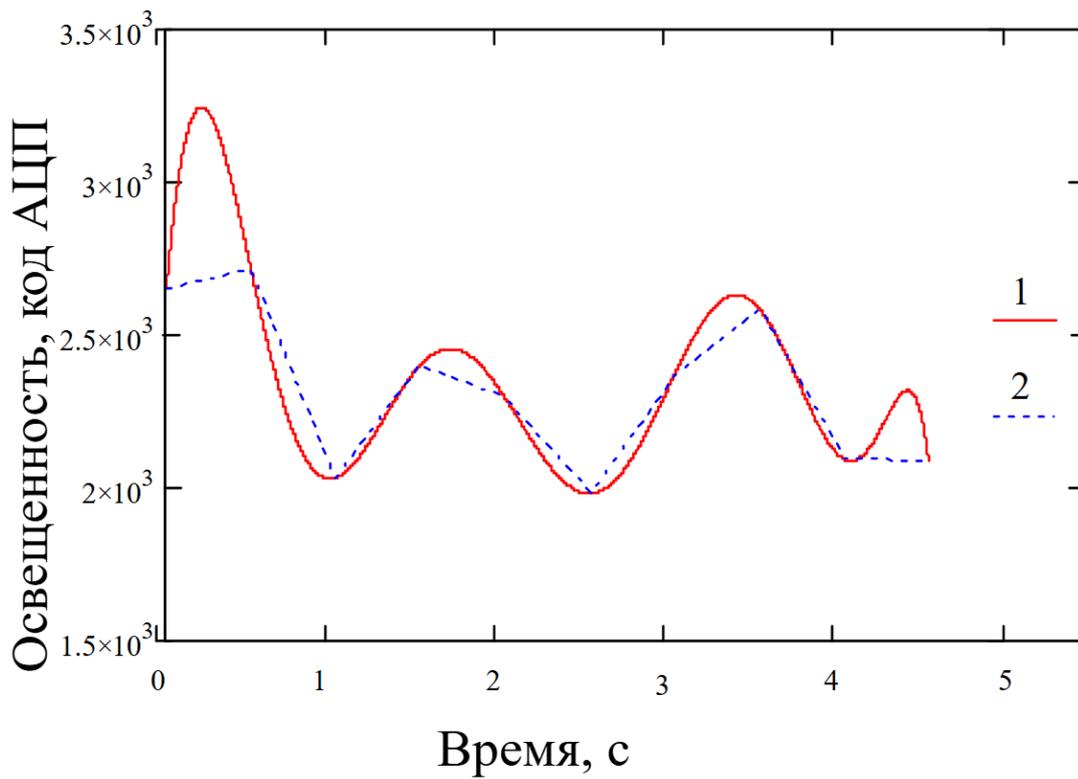
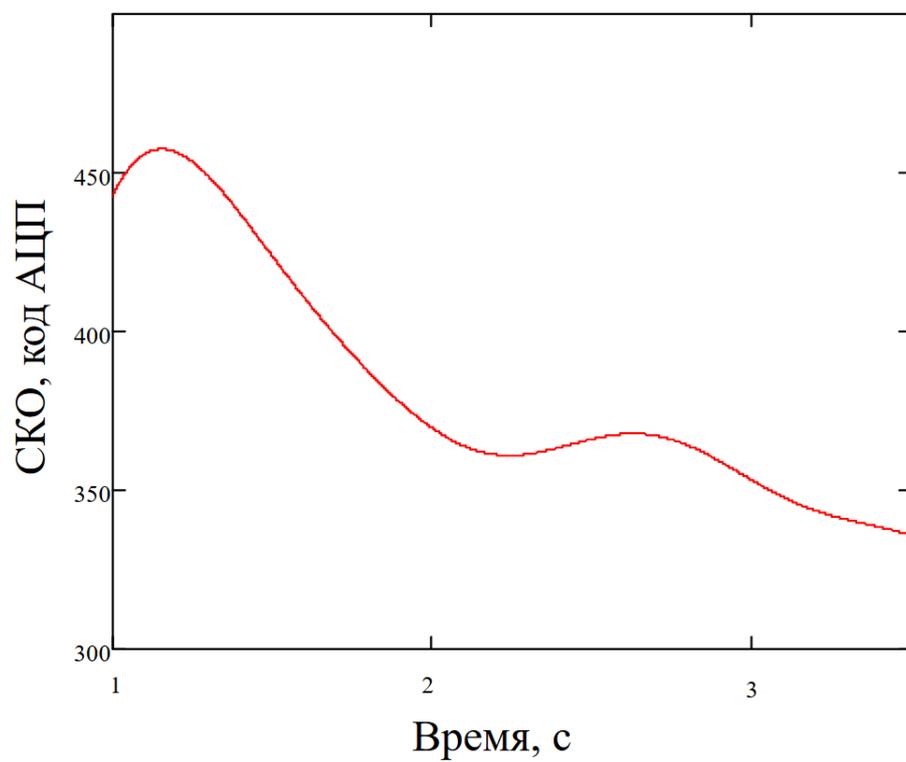


Рис. 7

(a)



(б)

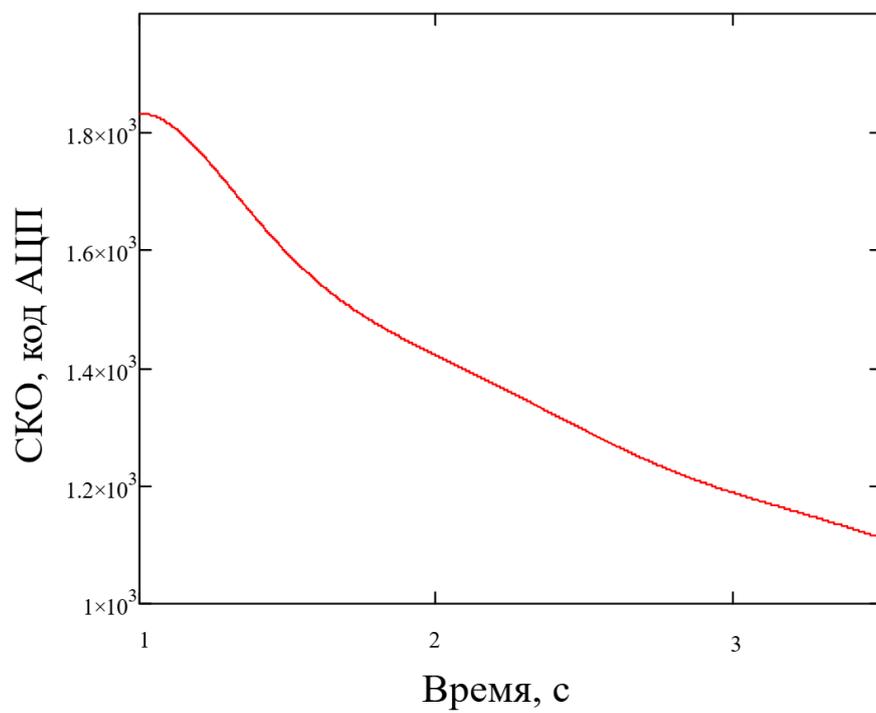


Рис. 8.

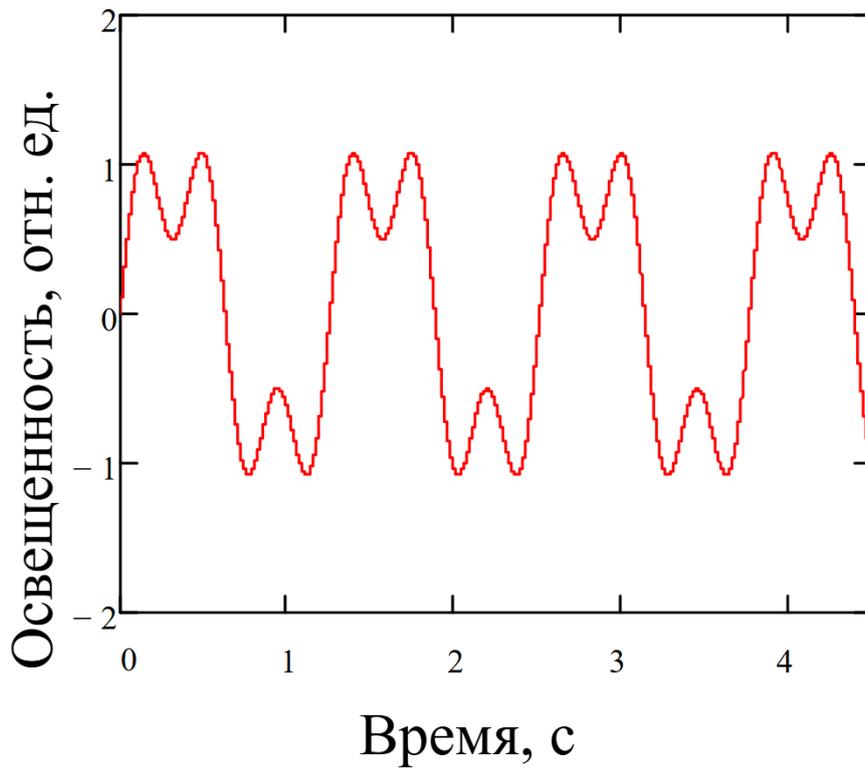


Рис. 9

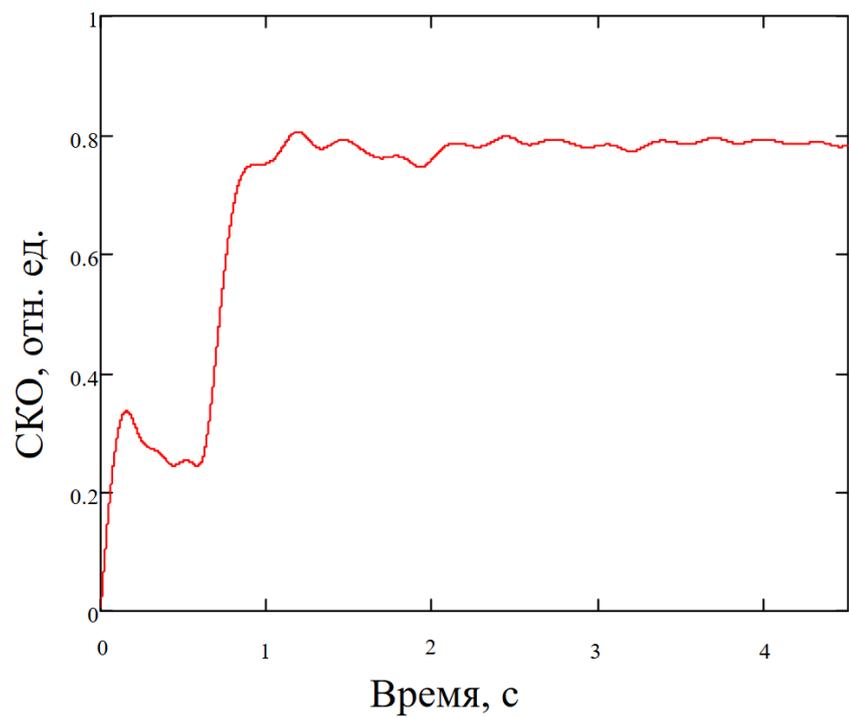


Рис. 10