

УДК 004.052

© 2012 г. С.В. Сай, д-р техн. наук,  
Д.С. Чемерис,  
Н.Е. Ничипорук

(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск)

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ КОДОВ В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ПОДВОДНОГО РОБОТА\*

В статье приводятся результаты исследования эффективности помехоустойчивых кодов при передаче сигналов подводных гидролокационных изображений через реальный гидроакустический канал связи. Приведены результаты оценок корректирующей способности кодов Рида-Соломона, предложен каскадный код на основе кода Рида-Соломона и сверточного кода.

**Ключевые слова:** система технического зрения, помехоустойчивое кодирование, вероятность ошибки.

### Введение

Необходимость помехоустойчивого кодирования сигналов подводных изображений обусловлена тем, что передача и прием сигналов через гидроакустическую систему связи (ГАСС) всегда осуществляется на фоне помех. В общем случае шумы в гидроакустическом канале можно разделить на внешние, собственные и реверберационные помехи [1]. По характеру взаимодействия помехи классифицируются как аддитивные и мультипликативные. Аддитивные по своей структуре могут быть флуктуационными, импульсными и гармоническими.

Наиболее распространенной является флуктуационная помеха, представляющая собой бесконечную сумму излучений от разных источников шума, которые не связаны с полезным сигналом.

К импульсным помехам относятся помехи в виде одиночных импульсов, возникающие, например, в процессе работы излучающей антенны. При этом длительность импульсной помехи может занимать от одного до нескольких периодов передаваемого сигнала. Импульсная помеха имеет в основном мультипликативный характер.

Действие помех приводит к зашумленности изображения и, следовательно, к ухудшению его зрительного восприятия при решении задач анализа и распознавания подводных объектов оператором. Использование методов помехоустой-

---

\* Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг. НИР (государственный контракт № П476).

чивого кодирования позволяет повысить качество приема сигналов на фоне помех и, следовательно, снизить требования к шумовым характеристикам канала связи.

Из обзора технологий и методов помехоустойчивого кодирования следует, что в основном в литературных источниках приводятся результаты эффективности применения помехоустойчивых кодов для не сильно зашумленных каналов передачи данных.

Для сильно зашумленных каналов, каким является гидроакустический канал, результаты оценки эффективности кодов практически отсутствуют. Данное обстоятельство требует проведения дополнительных исследований с целью поиска наиболее эффективного помехоустойчивого кода.

На данный момент известно много различных классов помехоустойчивых кодов, отличающихся друг от друга структурой, функциональным назначением, энергетической эффективностью, алгоритмами кодирования и декодирования, а также многими другими параметрами [2].

В качестве объектов исследований в работе выбран код Рида-Соломона (RS) и каскадный код на основе RS кода и сверточного кода. Целью исследований является поиск наиболее оптимальных параметров кода, позволяющих передавать данные через зашумленный гидроакустический канал связи с наименьшими потерями.

### Аппаратное обеспечение ГАСС

Для проверки корректирующей способности и оценки эффективности алгоритмов помехоустойчивого кодирования разработано аппаратное обеспечение системы передачи данных через реальный гидроакустический канал связи. Обобщенная структура аппаратного обеспечения ГАСС представлена на рис. 1, в которой в качестве модельного образца системы технического зрения подводного робота использованы блок изображения и помехоустойчивый кодер. Блок изображения представляет собой буферное ЗУ с записанным файлом данных фрагмента изображения, полученного с гидролокатора бокового обзора (ГБО).

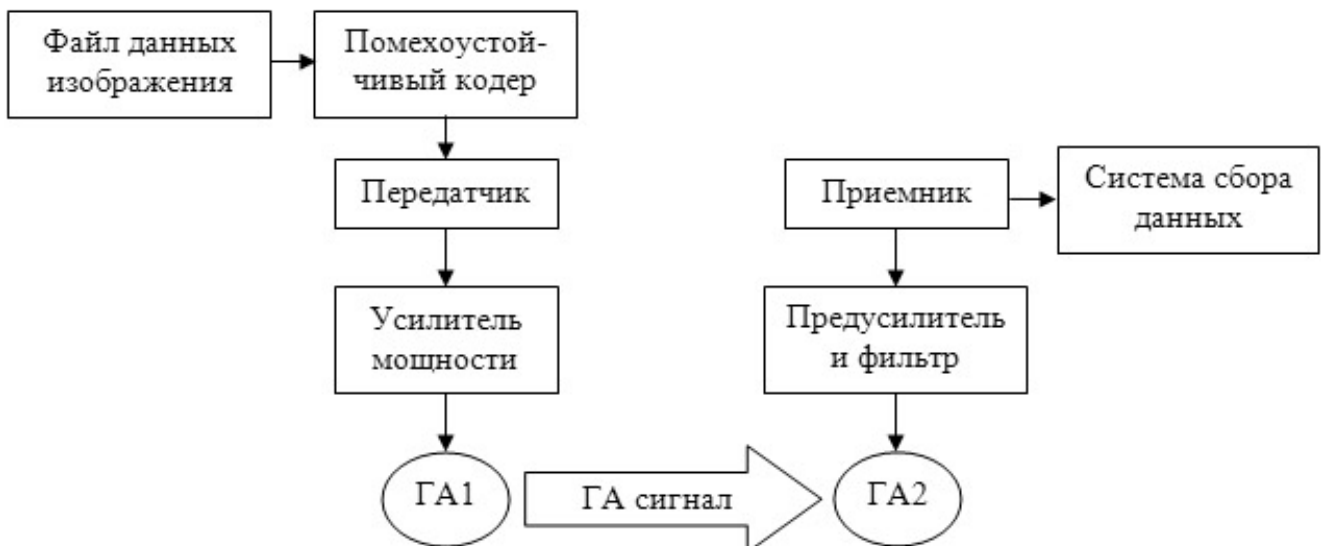


Рис. 1. Обобщенная структура ГАСС.

Передающая часть состоит из следующих блоков:

передатчик на базе микросхемы FPGA фирмы Altera, включая цифро-аналоговый преобразователь на базе микросхем Analog Devices;

звуковой усилитель мощности IRAUDAMP7S [3];

излучающая гидроакустическая антенна типа ПИ1-ЛУ3.814 (ГА1) [4].

В приемную часть включены следующие блоки:

приемная гидроакустическая антенна типа ПИ1-ЛУ3.814 (ГА2);

предусилитель с фильтром принимаемого сигнала, основой которого является активный фильтр, выполненный на операционном усилителе LM358 [5];

приемник на базе микросхемы FPGA фирмы Altera, включая аналого-цифровой преобразователь на базе микросхем Analog Devices;

система сбора данных, представляющая собой IBM совместимый компьютер с поддержкой интерфейсов Ethernet и RS-232.

Приемник и передатчик выполнены на основе отладочного стенда Xilinx ML402 [6]. Основная функция передатчика – формирование пакетов информационного сообщения, формат которого показан на рис. 2.

31-символьная M-послед.				4 сегмента, 272 символа (1024 бит)																
				4 символа				64 символа (256 бит)				4 символа				64 символа (256 бит)				
$g_1$	$g_2$	...	$g_{31}$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$d_1$	$d_2$	...	$d_N$	...	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$d_1$	$d_2$	...	$d_N$
Сигнал синхронизации				Пилот-сигнал				Данные				Пилот-сигнал				Данные				
				1-й сегмент								4-й сегмент								

Рис. 2. Формат пакета информационного сообщения.

При проведении эксперимента использованы следующие параметры сигналов пакета:

сигнал синхронизации – 31 символьная фазоманипулированная M-последовательность с фиксированной длительностью 84 мс;

четыре сегмента состоящего из 272 символов, каждый из которых содержит 4 символа пилот-сигнала и 64 символа данных;

длительность символов ( $t$ ) данных выбирается из следующих значений: 0.67 мс, 1 мс, 1.5 мс, 2 мс и 3 мс;

частота дискретизации:  $f_d = 192$  кГц;

частота основной несущей:  $f_n = 12$  кГц.

Для передачи данных выбран гибридный тип модуляции QPSK+FSK, что представляет собой передачу цифровых данных на четырех несущих частотах ( $f_1 \dots f_4$ ), расположенных относительно основной несущей ( $f_n$ ) в полосе пропускания излучающей антенны. При этом каждая несущая модулируется по фазе 4-QPSK. Соответствие частоты и фазы битам передаваемых данных представлено в таблице.

При такой модуляции каждый символ передаваемых данных представляет собой гармонический сигнал, состоящий из заданного числа периодов несущей частоты со сдвигом по фазе. Количество периодов ( $N$ ) определяется длительностью символа. Например, при передаче комбинации бит (0001) в интервале  $t$  передается  $N = t/f_1$  периодов сигнала с частотой  $f_1$  и фазой  $\varphi_2$ .

Частота	Фаза	Данные		Частота	Фаза	Данные	
		Старшие	Младшие			Старшие	Младшие
$f_1$	$\varphi_1$	00	00	$f_3$	$\varphi_1$	10	00
	$\varphi_2$	00	01		$\varphi_2$	10	01
	$\varphi_3$	00	10		$\varphi_3$	10	10
	$\varphi_4$	00	11		$\varphi_4$	10	11
$f_2$	$\varphi_1$	01	00	$f_4$	$\varphi_1$	11	00
	$\varphi_2$	01	01		$\varphi_2$	11	01
	$\varphi_3$	01	10		$\varphi_3$	11	10
	$\varphi_4$	01	11		$\varphi_4$	11	11

Очевидно, что скорость передачи также зависит от длительности передаваемых символов данных. В частности, при  $t = 2$  мс весь пакет информационного сообщения (рис. 2) будет передан за 628 мс, что соответствует скорости передачи 1630 бит/с.

В приемнике гидроакустический сигнал преобразуется в цифровую форму, демодулируется и поступает в систему сбора информации, где выполняются декодирование и восстановление исходного ГБО-изображения.

### Результаты эксперимента

Данный эксперимент проводился с целью проверки работоспособности и оценки эффективности алгоритмов помехоустойчивого кодирования данных ГБО-изображения в реальном режиме функционирования ГАСС в условиях мелкого моря при различном соотношении сигнал/шум на входе приемника в зависимости от дальности распространения сигнала. Прием данных осуществлялся на расстояниях от 100 до 2500 м.

Испытания проводились сотрудниками кафедры вычислительной техники ТОГУ в августе 2011 г. в бухте Патрокл Уссурийского залива Приморского края, в условиях мелкого моря. На рис. 3 представлены экспериментальные графики зависимости битовых ошибок (BER) от отношения сигнал/шум, полученные для разных длительностей символа.

Из результатов экспериментальных исследований следует, что в реальном гидроакустическом канале связи вероятность битовых ошибок (BER) может изменяться в пределах  $0,01 \dots 0,1$ . Данная величина BER использована для оценки эффективности применения помехоустойчивых кодов. В качестве критерия помехоустойчивости выбрано следующее условие: величина BER на выходе декодера должна быть не более  $10^{-6}$ .

В процессе экспериментов на первом этапе передавались битовые данные изображения без использования помехоустойчивого кода.

На рис. 4 в качестве примера показан фрагмент ГБО-изображения ( $324 \times 256$  пикселей) полученный после передачи сигналов через ГАСС при длительности символов 2,0 мс.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что шум в реальном гидроакустическом канале связи вряд ли можно описать равномерным законом распределения. Ошибки имеют пакетированный характер и ближе к импульсному нестационарному шуму.

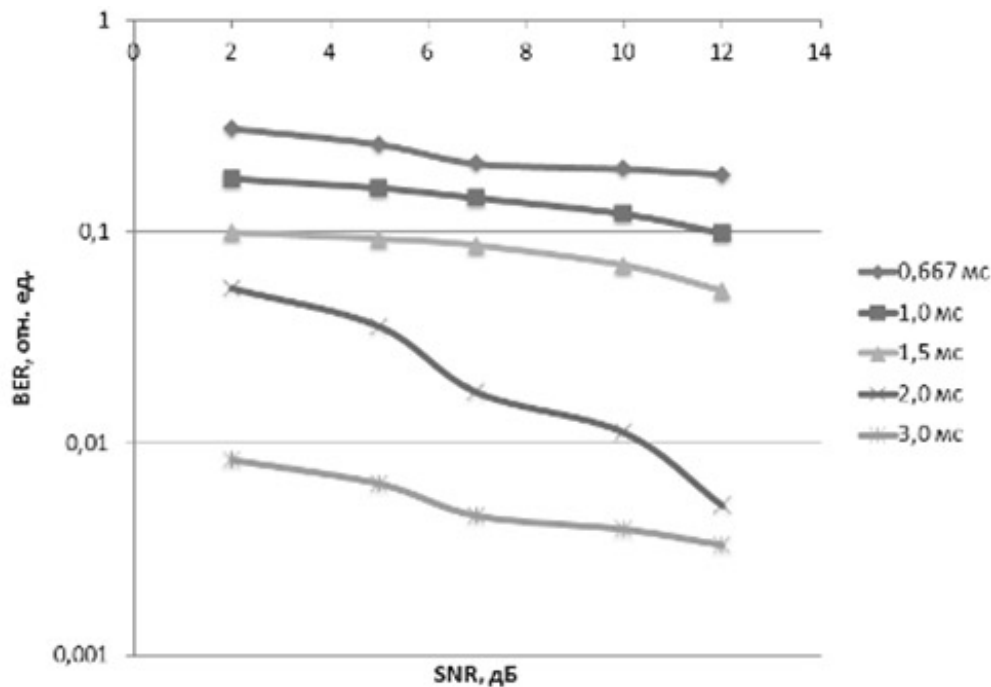
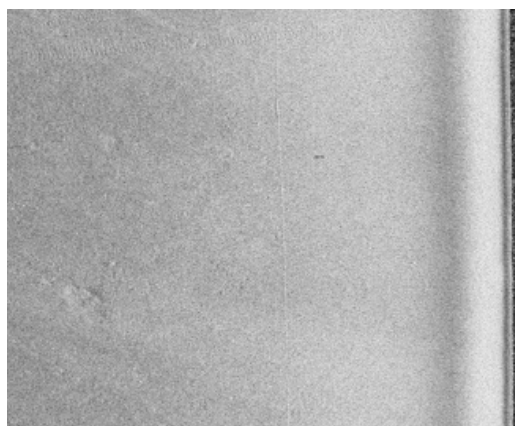
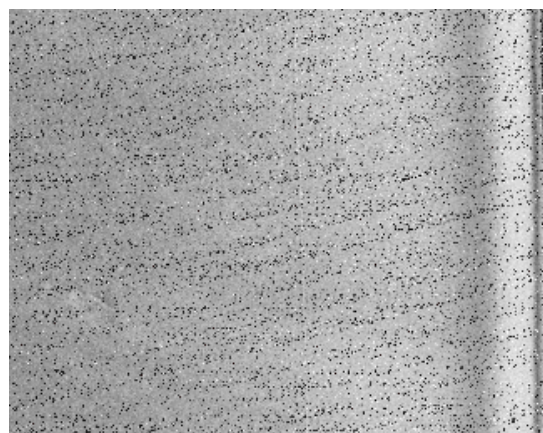


Рис. 3. Графики зависимости BER от SNR.



а) BER = 0



б) BER = 0,05

Рис. 4. Влияние шума на ГБО-изображение.

Известно [7], что наиболее высокой корректирующей способностью к пакетированным ошибкам обладают коды Рида-Соломона (RS-коды). В работе [8] приведены результаты исследования эффективности RS-кодов, где в качестве модели шума использовался аддитивный шум с равномерным законом распределения битовых ошибок. В частности, показано, что RS-код (255, 128) успешно справляется с коррекцией ошибок, вероятность которых не превышает значения  $BER < 0,03$ .

На втором этапе эксперимента была поставлена задача оценить эффективность RS-кодов при передаче сигналов изображения через реальный гидроакустический канал связи. На рис. 5 показаны результаты декодирования фрагмента ГБО-изображения для разных параметров RS-кода при значении  $BER = 0,05$ .

В результате испытаний получено, что RS-код (255, 32) полностью исправляет ошибки (рис. 5 г) в гидроакустическом канале связи, однако при этом скорость передачи данных снижается в восемь раз.

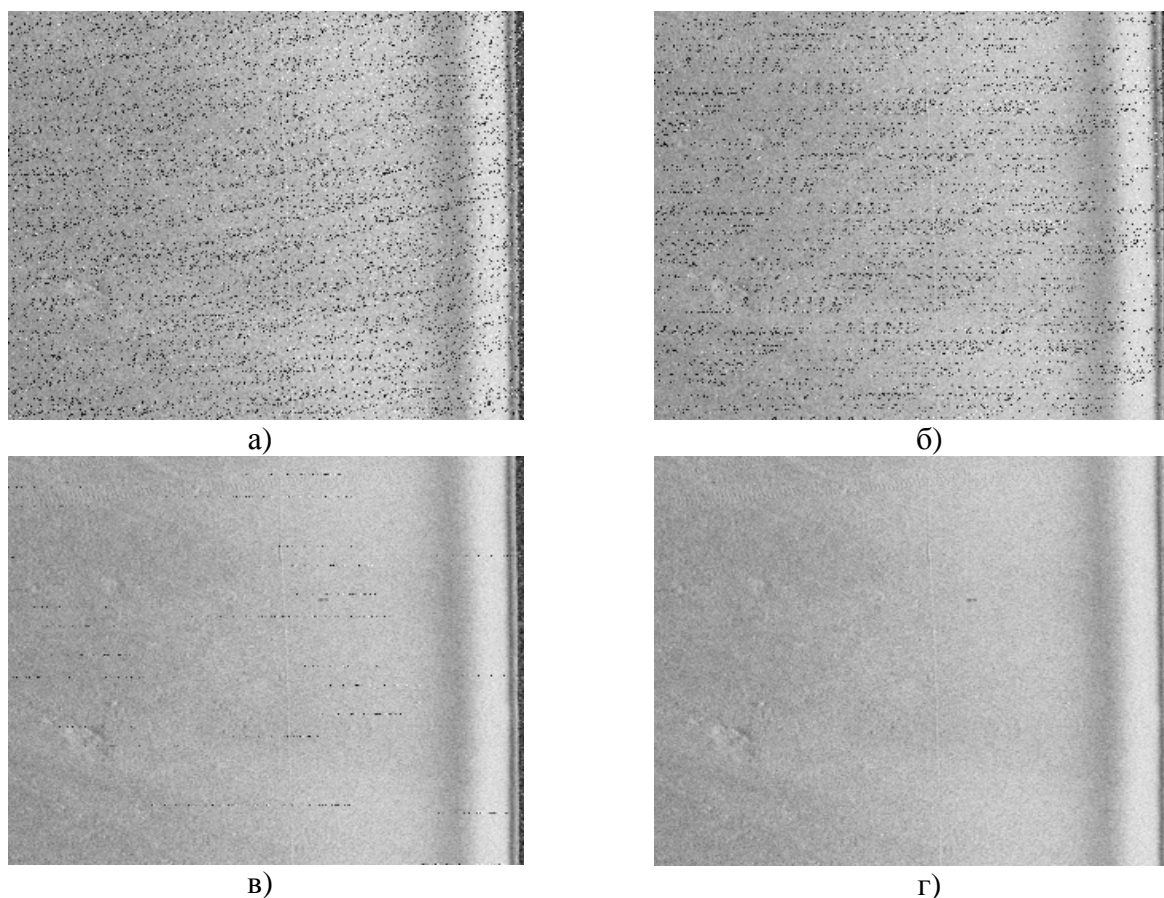


Рис. 5. Фрагменты ГБО-изображений без использования (а) и с использованием RS-кода: б) RS(255, 128), BER=0,031; в) RS(255, 64), BER=0,0012; г) RS(255, 32), BER=0,0.

Приведем простые расчеты. Согласно формату передаваемых данных (рис. 2) при длительности символа  $t = 2$  мс скорость передачи равна 1630 бит/с. Следовательно, для передачи фрагмента полутонового изображения без помехоустойчивого кодирования и с размером  $324 \times 256 \times 8 = 663552$  бит потребуется время около 407 сек., или 6,8 мин. Очевидно, что использование RS-кода (255, 32) увеличивает объем передаваемых данных и, следовательно, время передачи в восемь раз, т.е. до 54,3 мин. Такие временные интервалы могут накладывать существенные ограничения на оперативность решения задач поиска и обнаружения подводных объектов. Повышение скорости передачи возможно за счет решения трех основных задач: повышение скорости передачи данных в аппаратуре ГАСС; использование методов и алгоритмов сжатия ГБО-изображения [9]; применение помехоустойчивых кодов с более высокой скоростью.

Рассмотрим третью задачу – использование помехоустойчивого кода с более высокой скоростью. В результате проведенных исследований нами выбран каскадный код, структура которого показана на рис. 6.

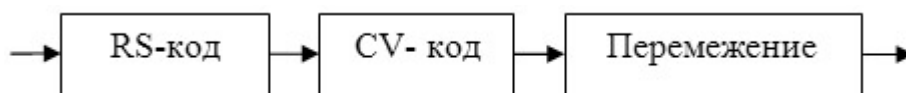


Рис. 6. Структура каскадного кода.

Первым блоком каскадного кода является RS-код со скоростью  $R = 0,5$ . Вторым кодом – сверточный код (CV), также со скоростью  $R = 0,5$ . Очевидно, что

общая скорость кода равна  $R = 0,25$ . В блоке перемежения выполняется перераспределение кодированных бит с целью приближения распределения ошибок на входе декодера к равномерному закону. В результате экспериментальных исследований установлено, что при выбранных характеристиках блоков RS(255, 128) и CV(8,4) каскадный код является достаточно эффективным и позволяет полностью корректировать битовые ошибки гидроакустического канала связи, вероятность которых не превышает значения  $BER < 0,08$ . Таким образом, применение каскадного кода дает возможность длительность символа  $t = 1$  мс и, следовательно, повысить скорость передачи данных до 2876 бит/с. Это означает, что для нашего примера, при передаче фрагмента полутонового изображения (324×256 пикселей) с полной коррекцией ошибок, требуется около 923 сек., или 15,4 мин.

### Заключение

Экспериментальные данные полностью подтвердили работоспособность и эффективность разработанных алгоритмов помехоустойчивого кодирования сигналов подводных изображений в модельном образце системы технического зрения подводного робота, используемого в составе аппаратного обеспечения ГАСС. Следующим этапом исследований является проведение испытаний с помощью аппаратуры технического зрения в составе реального подводного робота.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ольшевский В.В.* Статистические методы в гидролокации. Серия: «Библиотека инженера-гидроакустика». – Л.: Судостроение. 1983.
2. *Кларк Д., Кейн Д.* Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. – М.: Радио и связь, 1987.
3. IRAUDAMP7S [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.inductor.com/irf/iraudamp7s.pdf>.
4. Acoustic communication system for underwater vehicle telecommunication / M.A. Linnik, I.V. Karabanov, A.S. Mironov, I.N. Burdinskiy // The First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (6-9 September, 2010). – Vladivostok, 2010. – P. 317-320.
5. LM158/LM258/LM358/LM2904 Low Power Dual Operational Amplifiers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.national.com/ds/LM/LM158.pdf>.
6. Virtex-4 Family Overview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.xilinx.com/support/documentation/data\\_sheets/ds112.pdf](http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds112.pdf).
7. *Касперски К.* Коды Рида-Соломона в практических реализациях, или Информация, воскресшая из пепла III/ Журнал «Системный администратор», ноябрь 2003 // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://av5.com/journals-magazines-online/1/35/308>.
8. *Сай С.В., Ничипорук Н.Е.* Эффективность применения кодов Рида-Соломона в системе передачи подводных изображений // Вестник ТОГУ. – 2011. – №3(22) – С.29-36.
9. *Сай С.В., Шоберг А.Г., Бурдинский И.Н. и др.* Алгоритмы анализа и цифровой обработки гидролокационных изображений / // Подводные исследования и робототехника. – 2008. – №2(6) – С.30-42.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Чье Ен Уном.*

*E-mail:*

*Сай Сергей Владимирович – [sai@evm.khstu.ru](mailto:sai@evm.khstu.ru);*

*Чемерис Денис Сергеевич – [denischemeris@gmail.com](mailto:denischemeris@gmail.com);*

*Ничипорук Наталья Евгеньевна – [nata\\_8686\\_86@mail.ru](mailto:nata_8686_86@mail.ru).*