

# КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 681.58, 621.355

## ЛИТИЙ-ИОННЫЕ АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А.В. Хромов

Проведён анализ опыта создания отечественными и зарубежными предприятиями литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) низкоорбитальных космических аппаратов (КА). В настоящее время в составе отечественных КА, как правило, используются батареи, составленные из последовательно соединённых аккумуляторов номинальной ёмкости. На борту зарубежных КА преобладают ЛИАБ параллельно-последовательной (PS) и последовательно-параллельной (SP) структуры, укомплектованные аккумуляторами малой ёмкости, в том числе стандарта 18650. Благодаря встроенным защитным устройствам батареи SP-структуры применяются без устройств выравнивания и байпасных переключателей. На малых КА проходят лётные испытания ЛИАБ из коммерчески доступных аккумуляторов. Сделаны выводы о целесообразности создания отечественного литий-ионного аккумулятора стандарта 18650, а также о целесообразности разработки и стандартизации методики отработки ЛИАБ низкоорбитальных космических аппаратов.

**Ключевые слова:** космический аппарат, система электропитания, литий-ионная аккумуляторная батарея, коммерчески доступные компоненты.

Аккумуляторная батарея (АБ) является одним из основных элементов системы электропитания (СЭП) космического аппарата (КА), от её надёжного функционирования зависит продолжительность использования КА по назначению. Ресурс спутника во многом ограничивается деградацией характеристик АБ.

Целью данной работы является анализ и обобщение опыта создания литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) низкоорбитальных КА (обращающихся по околокруговым орбитам со средней высотой не более 2000 км) отечественными и зарубежными предприятиями, определение задач, решение которых необходимо для повышения характеристик ЛИАБ и выработка подходов к решению данных задач.

Рассмотрим требования к АБ низкоорбитальных КА. В ходе эксплуатации АБ таких спутников подвергаются как минимум одному циклу заряд-разряд на каждом витке полёта. Поэтому при сроке активного существования (САС) низкоорбитального КА 5 лет циклический ресурс АБ должен составлять не менее 30 тыс. циклов, а при САС 7 лет – не менее 40 тыс. циклов. Для достижения данных ресурсных характеристик глубину разряда (DOD) АБ ограничивают на уровне порядка 20 %.

Особенностью полёта по низкой орбите является сравнительно короткий период времени, в течение которого должен быть осуществлён заряд АБ, а также существенное превышение нагрузки в ходе сеанса съёмки Земли или передачи целевой информации над средним уровнем потребления бортовой аппаратуры. Отсюда следует необходимость производить циклирование аккумуляторной батареи от-

носительно большими токами (до  $C/3$  при заряде и до  $C/2$  при разряде).

В настоящее время практически завершился переход от никель-кадмиевых (Ni-Cd), никель-металлогидридных (Ni-MH) и никель-водородных (Ni-H) космических АБ к батареям литий-ионной электрохимической системы. Первым КА, оборудованным ЛИАБ, стал запущенный в 2001 г. европейский микроспутник Proba 1, укомплектованный литий-ионной батареей производства ABSL (Великобритания) [1]. Известно, что в 2014 г. КА продолжал функционировать. Экспериментальная отечественная ЛИАБ – 6ЛИ-25 производства ПАО «Сатурн» (г. Краснодар) – была впервые испытана на КА «Глонасс-М» № 27, запущенном 25.12.2008 [2]. Первой штатной отечественной ЛИАБ в составе СЭП низкоорбитального спутника стала 4ЛИ-20, её эксплуатация началась в конце 2013 г. [3].

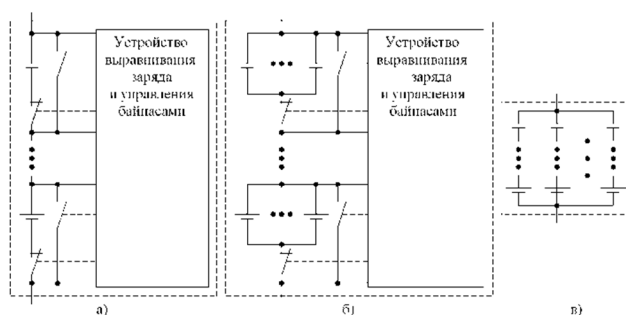


Рис. 1. Схемы построения космических ЛИАБ: а – последовательное включение аккумуляторов номинальной ёмкости; б – параллельно-последовательная структура; в – последовательно-параллельная структура

Таблица 1

**Низкоорбитальные КА с ЛИАБ, выполненными по последовательной схеме [4]**

Запуск	Спутник	DOD, %	Срок службы	Конфигурация	Статус	Тип элемента
27.10.05	SSETI	80	1 год	6S	Запущен	MP176065
28.04.08	GanX2	20	1 год	1S	Запущен	MP174350
28.04.08	NTS	20	1 год	1S	Запущен	MP176065
29.07.09	NanoSat-1B	10	5 лет	(2) 6S	Запущен	MPS176065
12.07.10	AISSat-1	10	3 года	2S	Запущен	MP144350
24.11.13	OPTOS	20	<1 года	1S	Запущен	MPS176065
25.12.13	Космос-2491*	–	>2,5 лет	4S	Запущен	ЛИГП-20
23.05.14	Космос-2499*	–	>2,5 лет	4S	Запущен	ЛИГП-20
08.07.14	DX1	15	3 года	4S	Запущен	MPS176065
31.03.15	Космос-2504*	–	>2,5 лет	4S	Запущен	ЛИГП-20

\* Предположительно в составе данных КА (имеющих аналогичные орбиты, массогабаритные параметры и способ выведения) эксплуатируются АБ 4ЛИ-20, созданные ПАО «Сатурн» [3].

Таблица 2

**Низкоорбитальные КА с ЛИАБ PS-структуры [4, 5]**

Запуск	Спутник	DOD, %	Срок службы	Конфигурация	Аккумулятор
28.04.06	Calipso	20	7 лет	3P9S	VES100
27.12.06	Corot	20	7 лет	3P9S	VES100
20.06.08	Jason 2	20	7 лет	3P9S	VES100
29.08.09	EMU	–	–	16P8S	US18650HC
02.11.09	SMOS	20	7 лет	3P9S	VES100
10.01.07	SRE1	20	1 мес.	10P1S	VES140
18.05.12	Kompsat 3	20	5 лет	4P12S+ISIS	VES100
23.07.13	Kompsat 5	20	5 лет	4P13S+ISIS	VES100
26.03.15	Kompsat 3A	20	5 лет	4P12S+ISIS	VES100
17.01.16	Jason 3	20	7 лет	3P9S	VES100
28.04.16	Аист-2Д	18	3 года	2P8S	ЛИГП-40А
2017	НУ-3	20	8 лет	(2) 5P8S	VES180
2021	«Обзор-Р»	–	5 лет	3P7S	ЛИГП-50
2021	«Метеор-М» №3	20	7 лет	(2) 5P8S+ISIS	VES180

Все перспективные КА оснащаются ЛИАБ. Традиционным способом построения Ni-Cd и Ni-H АБ является последовательное соединение аккумуляторов номинальной ёмкости до достижения необходимого напряжения АБ. Первые ЛИАБ были построены по аналогичной схеме (рис. 1, а и табл. 1).

Ввиду недопустимости перезаряда и переразряда литий-ионного аккумулятора в составе такой батареи необходимо применение устройств выравнивания заряда между аккумуляторами и (зачастую) байпасных переключателей, предназначенных для исключения отказавшего аккумулятора из силовой цепи ЛИАБ.

Можно указать основные недостатки последовательной схемы построения ЛИАБ:

- при необходимости даже небольшого изменения ёмкости ЛИАБ следует заново создавать аккумулятор (включая дорогостоящую отработку);
- отказ любого аккумулятора типа «обрыв» (холостой ход) означает отказ батареи в целом;
- при изготовлении ЛИАБ необходимо тщательно подбирать аккумуляторы по электрическим параметрам, чтобы добиться их синхронной деградации. Для комплектации батареи дополнительно изготавливается ~ 20% аккумуляторов для подбора, что ведёт к увеличению стоимости АБ и не все-

гда обеспечивает эффективное решение проблемы, так как разница в уровне саморазряда аккумуляторов в 0,1 % приводит к сложностям в эксплуатации батареи [3].

Ввиду избыточного давления в Ni-Cd и Ni-H аккумуляторах им требуется прочный корпус, массовая эффективность АБ может быть достигнута при создании аккумулятора номинальной ёмкости, а возможный отказ аккумулятора в холостой ход парируется применением нескольких АБ в составе СЭП. Такое резервирование тем более целесообразно, так как необходимо периодическое проведение формовочных циклов Ni-Cd и Ni-H АБ, несовместимых со штатным циклированием батареи, что приводит к появлению в составе СЭП двух или более АБ.

Первые отечественные космические ЛИАБ, разработанные ПАО «Сатурн», имели последовательную структуру. На КА «Глонасс-М» проходила испытания батарея, состоявшая из аккумуляторов ЛИГП-25, а для первой штатной батареи, отличавшейся по ёмкости всего на 5 А·ч, потребовалось создание аккумулятора ЛИГП-20 номинальной ёмкостью 22 А·ч.

Для исключения упомянутых недостатков фирма «Saft» (Франция), а в последнее время и ПАО «Сатурн» строят батареи параллельно-последовательной (PS) структуры (рис. 1, б), гибкость в создании ЛИАБ достигается параллельным соединением аккумуляторов в пакет до достижения необходимой ёмкости, последовательным соединением пакетов достигается заданное напряжение ЛИАБ.

Производство крупной партии аккумуляторов для изготовления батареи существенно упрощает их подбор по электрическим параметрам, а параллельное соединение аккумуляторов в пакет в значительной степени нивелирует их электрические характеристики. Тем не менее, в лёгких образцах батарей, имеющих PS-структуру, применяются устройства выравнивания и (зачастую) байпасные переключатели.

Недостаток параллельно-последовательной структуры ЛИАБ – наличие в её составе сложных электронных модулей, а также необходимость корректировки алгоритма заряда в зависимости от количества сработавших байпасных переключателей. Кроме того, при разработке аккумулятора необходимо исключить возможность его отказа типа «короткое замыкание», который может привести к закорачиванию и последующему тепловому разгону соседних аккумуляторов пакета.

В табл. 2 приведены низкоорбитальные КА с ЛИАБ PS-структуры. Отметим, что основной обла-

стью применения ЛИАБ такой структуры являются геостационарные телекоммуникационные КА. Первым российским низкоорбитальным спутником, оборудованным ЛИАБ, имеющей параллельно-последовательную структуру стал, «Аист-2Д» разработки РКЦ «Прогресс», запущенный 28.04.16.

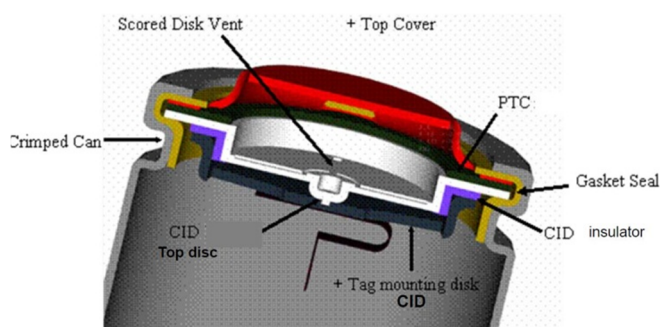
Заслуживает упоминания аккумуляторная батарея средства обеспечения выходов астронавта в открытый космос Extravehicular Mobility Unit (EMU) NASA, имеющая структуру 16P5S и составленная из аккумуляторов Sony US 18650HC (Япония) [5]. Это единственный известный автору случай применения аккумуляторов данного типоразмера в космических батареях PS-структуры, обусловленный, вероятнее всего, пожеланием заказчика (необходимостью заменить батарею предыдущего поколения).

Батареи PS-структуры эксплуатируются совместно с блоками электроники, основными функциями которых является измерение напряжения и выравнивание уровня заряда пакетов аккумуляторов, а также приведение в действие байпасных переключателей в случае критических отказов аккумуляторов. Блоки электроники являются достаточно сложными электронными устройствами, например, измерение напряжения на пакете аккумуляторов должно производиться с точностью порядка 0,1 %, при этом должна быть обеспечена высокая надёжность, в том числе – исключение короткого замыкания пакета по измерительным цепям при любом отказе электроники. Задача включения байпасных переключателей ЛИАБ низкоорбитальных КА (в условиях малого количества кратковременных сеансов связи со спутником) также не является тривиальной [3].

Альтернативным путём является применение АБ последовательно-параллельной (SP) структуры (рис. 1, в), в которых последовательно соединённые аккумуляторы малой ёмкости образуют цепочку, а путём параллельного соединения цепочек получается аккумуляторная батарея необходимой ёмкости.

Для комплектации батарей фирма ABSL использует аккумуляторы Sony US18650HC [5], а фирма «Saft» – аккумуляторы MPS176065 и VES16 собственного производства. В составе цилиндрических аккумуляторов имеется механический размыкатель цепи, «брейкер» (рис. 2). В случае перезаряда или перегрева аккумулятора происходит разложение материала катода, что приводит к повышению давления, изгибанию специальной мембраны и срабатыванию предохранителя. В результате происходит необратимый разрыв цепочки. Для защиты ЛИАБ от взрывного разрушения элемента

помимо механического размыкателя аккумулятор снабжается предохранительным клапаном, который обеспечивает вскрытие корпуса аккумулятора при дальнейшем повышении давления. Кроме того, аккумулятор оборудован термозащитой – элементом, сопротивление которого возрастает с ростом температуры. При протекании повышенного тока температура и сопротивление термопредохранителя возрастают, и происходит ограничение тока до штатного значения, что предохраняет аккумулятор от срабатывания «брейкера» при импульсных нагрузках.



**Рис. 2. Защитные устройства литий-ионных аккумуляторов малой ёмкости [1]: CID – current interrupt device – механический размыкатель цепи (брейкер); PTC – positive-temperature-coefficient component – термозащитный элемент, элемент с положительным температурным коэффициентом сопротивления**

В связи с тем, что аккумулятор имеет защитные элементы, батареи с SP-структурой эксплуатируют без байпасных переключателей, а также с упрощёнными выравнивающими устройствами («Saft») или вообще отказываются от применения последних (ABSL).

В табл. 3 – 5 приведены низкоорбитальные КА с ЛИАБ PS-структуры. Можно заключить, что применение батарей с такой структурой является характерным для европейского консорциума «Airbus DS». Отметим, что призматические аккумуляторы MPS176065 фирмы «Saft» будут производиться до 2017 г., далее их сменит цилиндрический аккумулятор типа VES16. Первым КА с аккумуляторами VES16 стал спутник TeLEOS-1 (Сингапур), запущенный 16.12.2015.

Анализ приведённых таблиц позволяет сделать вывод о консервативном подходе к комплектованию ЛИАБ из аккумуляторов, имеющих лёгкую квалификацию: аккумулятор US18650HC используется уже более 10 лет. За это время в создании литий-ионных аккумуляторов для наземных применений произошёл значительный прогресс: ём-

кость одного элемента увеличилась более, чем вдвое, внедрены новые материалы катода (оксиды никеля, кобальта и алюминия (NCA) вместо кобальтата лития), что положительно повлияло на безопасность эксплуатации. Данные обстоятельства, а также распространение применения коммерчески доступных (COST) электронных компонентов в космической технике стимулирует разработчиков (в первую очередь университетских микро- и наноспутников) применять на борту КА аккумуляторы, созданные для наземной портативной электроники.

Положительным примером может служить применение аккумуляторов Panasonic NCR18650A на японском микроспутнике ShindaiSat [8], созданном университетом Shinshu и для обработки линии связи «КА – Земля» в оптическом диапазоне. Спутник запущен 27.02.2014 на круговую орбиту высотой ~ 400 км, прекратил своё существование (сгорел в плотных слоях атмосферы) 24.11.2014, т. е. эксплуатировался почти 9 месяцев. Сигналы от спутника принимались практически до входа в атмосферу [9], следовательно, ЛИАБ данного КА успешно отработала несколько тысяч циклов.

Важным элементом в создании космических батарей из литий-ионных аккумуляторов малой ёмкости является методика подбора аккумуляторов для комплектования лёгкого образца ЛИАБ, а также подход к отработке батареи в целом. Например, ABSL использует методику, аналогичную отбору COST-конденсаторов для применения в космосе [6]. Производится закупка крупной партии аккумуляторов (порядка 25 тыс. шт.). Из них 3 – 6 % случайным образом отбираются для проведения испытаний по приёмке партии. Часть отобранных аккумуляторов проходят разрушающий физический анализ с проверкой механических и химических характеристик. Оставшиеся отобранные аккумуляторы распределяются между тремя группами, которые проходят испытания на ресурс, испытания на воздействие внешних факторов (вибрация с последующим разрушающим анализом и термоциклы). Отказ аккумулятора на любом из данных испытаний приводит к отказу в приёмке всей партии. В случае успешного прохождения данного этапа производятся электрические испытания всех аккумуляторов партии.

Алгоритм комплектования ЛИАБ является ноу-хау фирмы ABSL, судя по отечественным публикациям [3], одним из основных параметров, по которым производится подбор, является значение саморазряда аккумулятора.

Таблица 3

**Низкоорбитальные КА с ЛИАБ SP-структуры из аккумуляторов Sony US18650HC [6, 7]**

Запуск	Спутник	W, А·ч	Срок службы	Конфигурация	Статус	Масса, кг
22.10.01	Proba-1	9	1 год	6S6P	Запущен	1,9
20.12.02	Saudisat-1C	6		2S4P	Запущен	–
18.12.04	Nanosat-1	3	3 года	6S2P	Запущен	–
08.10.05	Criosat	66	5,5 лет	8S44P	Запущен	16,8
22.03.06	STS	9	6 мес.	2S6P	Запущен	–
19.12.06 02.07.07 01.11.07 27.03.08 27.07.07	SAR-Lupe (5 КА)	132	10 лет	2x8S44P	Запущен	33,6
08.07.07 09.12.07 25.10.08 06.11.10	COSMOSky-Med (4 КА)	336	5 лет	8x9S28P	Запущен	136
15.06.07	TerraSAR-X	108	5 лет	3×12S24P	Запущен	–
29.08.08	RapidEye (5 КА)	15	7 лет	8S10P	Запущен	4
17.03.09	GOCE	78	2 года	2×8S16P+8S20P	Запущен	25,4
29.07.09	Deimos-1	15	5 лет	8S10P	Запущен	4
29.07.09	UK-DMC-2	15	5 лет	8S10P	Запущен	4
08.04.10	Cryosat-2	66	5,5 лет	8S44P	Запущен	16,8
21.06.10	TanDEM-X	108	5 лет	3×12S24P	Запущен	–
17.01.11	Nigeriasat-2	15	7 лет	8S10P	Запущен	4
17.08.11	Nigeriasat-X	15	5 лет	8S10P	Запущен	4
17.12.11	Pleiades-1A	150	7 лет	8S100P	Запущен	40,4
27.01.12	ExactView-1	15	5 лет	8S10P	Запущен	4
22.07.12	Канопус-В №1	78	5 лет	8S52P	Запущен	20,7
22.07.12	Белорусский КА	78	5 лет	8S52P	Запущен	20,7
02.12.12	Pleiades-1B	150	7 лет	8S100P	Запущен	40,4
06.05.13	Proba-V	12	5 лет	7S8P	Запущен	–
03.04.14	Sentinel-1A	324	12 лет	17S216P	Запущен	130
26.04.16	Sentinel-1B	324	12 лет	17S216P	Запущен	130
28.04.16	Ломоносов	78	5 лет	8S52P	Запущен	20,7
2017	Канопус-В-ИК	90	5 лет	8S60P	Поставка	25
2017, 2018	Канопус-В (4 КА)	90	5 лет	8S60P	Поставка	25

Отметим, что в США действует стандарт военно-воздушных сил «Литий-ионные аккумуляторные батареи космических аппаратов» SMC-S-017, который регламентирует обработку ЛИАБ КА как на уровне аккумулятора, так и на уровне всей АБ.

В России действует только ГОСТ Р МЭК 61960 – 2007, областью применения которого являются аккумуляторы для наземной портативной техники. Так как у разработчиков батареи КА «Таблетсат-Аврора», применивших COST-аккумуляторы фирмы А123, имелся отри-

цательный опыт [10, 11], представляется целесообразным выпуск российского стандарта на ЛИАБ.

Анализ российского рынка литий-ионных аккумуляторов стандарта 18650 показал, что в настоящее время ОАО АК «Ригель» (г. Санкт-Петербург) серийно выпускается аккумулятор ЛИКГЦ-1,5С [12]. Кроме того, в 2016 г. данным предприятием завершается ОКР «Материя-ЛЦ», в результате которой должна быть присвоена литера «О» документации на аккумулятор данного стандарта с ёмкостью 2,5 А·ч.

Таблица 4

**Низкоорбитальные КА с ЛИАБ SP-структуры из призматических аккумуляторов SAFT MPS176065 [4]**

Запуск	Спутник	DOD, %	Срок службы	Конфигурация	Статус
23.04.07	Agile	20	5 лет	8S3P	Запущен
02.11.09	Proba 2	20	3 года	7S3P	Запущен
12.10.11	VesseSAT-1	15	3 года	3S2P	Запущен
09.01.12	VesseSAT-2	15	3 года	3S2P	Запущен
07.10.12	Orbcomm-G2	25	5 лет	(2) 8S3P	Запущен
18.12.12	Gokturk-2	16	5 лет	(2) 8S3P	Запущен
25.02.13	Sapphire	9	5 лет	8S3P	Запущен
24.11.13	Dubaisat-2	20	5 лет	(2) 8S3P	Запущен
20.06.14	KazEOSat-2	10	7,5 лет	8S3P	Запущен
20.06.14	Deimos-2	20	7 лет	(2) 8S4P	Запущен
08.07.14	Techdemosat	10	7,5 лет	8S3P	Запущен
14.07.14	Orbcomm-G2 (6)	25	5 лет	(2) 8S3P	Запущен
10.07.15	DMC3 (3)	15	7 лет	8S3P	Запущен
10.07.15	Carbonite-1	15	7 лет	8S3P	Запущен
20.12.15	Orbcomm-G2 (11)	25	5 лет	(2) 8S3P	Запущен
22.06.16	M3M	20	5 лет	(2) 8S3P	Запущен
2016	INTA $\mu$ SAT-1	20	5 лет	7S3P	Поставка
2016	CSAT	20	7 лет	8S4P	Поставка
2016	SARE 1B	20	10 лет	(2) 8S3P	Поставка
2016	Formosat 7	20	10 лет	(6) 8S5P	Поставка
2016	DMC3 (2)	15	7 лет	8S3P	Поставка
2017	KazSTSat	15	7 лет	8S3P	Поставка
2017	Alsat-1B	15	7 лет	8S3P	Поставка

Таблица 5

**Низкоорбитальные КА с ЛИАБ SP-структуры из аккумуляторов SAFT VES16 [4]**

Запуск	Спутник	DOD, %	Срок службы	Конфигурация	Статус
16.12.15	TeLEOS-1	15	5 лет	(2) 8S5P	Запущен
2016	UPMSAT-2	15	5 лет	6S4P	Поставка
2016	TubSat	7	5 лет	4S3P	Поставка
2016	ITASAT-1	15	5 лет	7S3P	Поставка
2016	Iridium Next (81)	20	10 лет	9S28P	Производство
2017	Myriades Evo (Merlin)	15	7 лет	9S5P	Поставка
2018	Institutional	10	11 лет	24S6P	Производство
2018	NextSat-1	20	5 лет	8S4P	Производство
2018	Eu:cropis	20	2 года	8S8P	Производство
2017	CERES	20	8 лет	(3) 9S12P	Поставка
2020, 2022	«Ионосфера-М» (4)	15	7 лет	8S6P	Поставка

Негативным фактором является отсутствие в составе аккумулятора механического размыкателя цепи. В НИИ «Источники» созданы опытные образцы аккумуляторов данного стандарта с обеспечением ёмкости до 3,2 А·ч. Все упомянутые аккумуляторы предназначены для наземной портативной техники. Характеристики аккумуляторов стандарта 18650 приведены в табл. 6.

Быстрый прогресс в характеристиках коммерчески доступных аккумуляторов связан с изменением их конструкции и применяемых компонентов, что приводит к необходимости повторной сертификации аккумулятора для использования в космической технике, и как следствие, увеличение сроков и стоимости создания ЛИАБ, а также риск снятия с производства устаревшего аккумулятора.

## Сравнение литий-ионных аккумуляторов типоразмера 18650 [12 – 15]

Параметр	US18650HC	ЛИКГЦ-1,5С	ЛИКГЦ-2,5С	NCR18650A
Изготовитель	Sony	АК «Ригель»		Panasonic
Ёмкость, А·ч	1,5	1,5	2,5	3,07
Напряжение, В	2,5 – 4,2	2,5 – 4,2		2,4 – 4,2
Номинальный ток разряда, А	0,4	0,3 (1,5 доп.)	0,5	–
Максимальный ток разряда, А	1,5	3,0	5,0	–
Максимальный ток заряда, А	1,5	0,75	1,25	1,475
Температурный диапазон, °С				
– заряд,	5 – 25	–10 – 50		0 – 45
– разряд,	5 – 25	–40 – 50		–20 – 60
– хранение	–10 – 35	–50 – 60		–20 – 50
Срок службы, лет	10	5	7	–
Ресурс, циклов	500	500	1000	–
Саморазряд, %/мес.	3	20	5	–
Материал катода	LCo/Ni/MnO	LCO	LCO	NCA
Механический размыкатель	+	–	–	+
Термопредохранитель	+	+	+	+
Статус отработки	Лётная эксплуатация с 2001 г.	Лит. «О1» Поставки с 2006 г.	Лит. «О» в 2016 г.	Лётные испытания

Закупка и сертификация крупной партии аккумуляторов ограничены календарным старением последних. Данное обстоятельство обуславливает целесообразность проведения отраслевой опытно-конструкторской работы (ОКР) по созданию и постановке на производство отечественного литий-ионного космического аккумулятора стандарта 18650, снабжённого защитными устройствами.

### Выводы

1. Наиболее распространённым подходом к построению ЛИАБ низкоорбитальных КА является их комплектование из аккумуляторов малой ёмкости.

2. Самой распространённой и перспективной является схема построения ЛИАБ из цилиндрических аккумуляторов (в том числе, стандарта 18650) со встроенными устройствами защиты по последовательно-параллельной схеме.

3. Среди эксплуатирующихся в настоящий момент на орбите преобладают аккумуляторы с кобальтатными катодами (LCO), происходит переход на более современные материалы (в частности, NCA).

4. Целесообразно провести ОКР по созданию отечественного космического литий-ионного аккумулятора стандарта 18650, предназначенного для использования в условиях космического пространства и имеющего встроенные защитные устройства. Наибольший прогресс в области производства аккумуляторов данного типоразмера для военной и специаль-

ной техники в России имеет ОАО АК «Ригель».

5. Для создателей ЛИАБ космического назначения из аккумуляторов малой ёмкости принципиально важным является наличие методики отбора аккумуляторов для комплектации лётных образцов батарей, а также обеспечение необходимого и достаточного объёма наземной экспериментальной отработки ЛИАБ. Целесообразно выпустить отечественный стандарт на ЛИАБ космических аппаратов, опираясь на опыт российских и зарубежных предприятий.

### Литература

1. Pistoia G. Lithium-Ion Batteries Advances and Applications / G. Pistoia. – Elsevier, The Netherlands, 2014. – 634 p., ill. – (ISBN: 978-0-444-59513-3).
2. Фалько М. Ю., Нестеришин М. В., Кудряшов В. С., Качин Л. А., Рачип А. Н. Лётные испытания экспериментального батарейного модуля на основе литий-ионной аккумуляторной батареи с управляющей и измерительной электроникой / М. Ю. Фалько и др. // Электронные и электромеханические системы и устройства : Сборник научн. трудов. – Томск : Изд-во НТЛ. – 2011. – С. 70 – 81.
3. Лихоносов С. Д., Попов В. А., Кулыга В. П., Каллут Ю. В., Пачуев А. В. Литий-ионные аккумуляторы космического назначения, основные направления работ и полученные результаты / С. Д. Лихоносов и др. // Автономная энергетика. – 2014. – № 32. – С. 39 – 46.
4. Guler M. Saft Battery Solutions for Space. August 2015 / Рекламный материал Saft на авиасалоне МАКС-2015, Москва, 2015. – 16 с.

5. Flora C., Neubauer J., Dembeck J., Pearson C. The NASA EMU Battery Program and Progress. – 2009. – 30 p.
6. Pearson C., Thwaite C., Russel N. Small Cell Lithium-Ion Batteries: The Responsive Solution for Space Energy Storage // Paper AIAA RS3-2005-5003 presented at the 3<sup>rd</sup> Responsive Space Conference, Los Angeles, CA, USA, 2005, April, 25 – 28.
7. Satellite Missions Database [Электронный ресурс] / Сетевой справочник по КА ДЗЗ eoPortal. – URL : <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>. – (Дата обращения: 12.07.2016).
8. ShindaiSat: A Visible Light Communication Experimental Microsatellite / A. Nakajima, N. Sako, M. Kamemura, Y. Wakayama, A. Fukuzawa, H. Sugiyama, N. Okada // Proceedings of the ICSOS (International Conference on Space Optical Systems and Application), Ajaccio, Corsica, France, 2012, October 9 – 12.
9. ShindaiSat [Электронный ресурс] / Страница спутника на сайте университета Shinshu (на японском языке). – URL: <http://www.shinshu.ac.jp/shindaisat/place/index.html>. – (Дата обращения: 12.07.2016).
10. Микроспутниковые технологии СПУТНИКС для научных, технологических и образовательных экспериментов в космосе / А. В. Потапов, С. О. Карпенко, А. В. Попов, Н. А. Ивлев, А. С. Сивков, А. Л. Власкин, З. С. Жумаев // Тезисы докладов XXXIX Королёвских чтений, Москва, 27 – 30 января 2015 г.
11. Микроспутник «Таблетсат-Аврора»: прошёл год со дня запуска на орбиту [Электронный ресурс] / Оф. сайт компании «СПУТНИКС». – URL: <http://www.sputnix.ru/ru/analytics/item/369-mikrosputnikovaya-platforma-table-sat-i-mikrosputnik-tablesat-avrora-na-ee-osnove-dlya-provedeniya-nauchnykh-tehnologicheskikh-i-obrazovatelnykh-eksperimentov-v-kosmose>. – (Дата обращения: 12.07.2016).
12. ТУ 3482-065-20503890-2005 Аккумулятор ЛИКГЦ-1,5С и батареи на его основе. Технические условия. Введ. 2006-05-10. – СПб. : ОАО АК «Ригель». – 2005. – 65 с.
13. Lithium Ion Rechargeable Batteries: Technical Handbook, Sony Corporation [Электронный ресурс] / Официальный сайт Sony. – URL: <http://www.sony.com.cn/products/ed/battery/download.pdf>. – (Дата обращения: 12.07.2016).
14. Требования к техническим характеристикам опытно-конструкторской работы «Разработка и освоение на отечественном предприятии цилиндрического литий-ионного аккумулятора в стандартных габаритах 18650 и двух батарей на его основе в габаритах 6×4ЛИГЦ-1,5С и 10×4ЛИГЦ-1,5С с повышенными энергетическими, мощностными и эксплуатационными характеристиками», шифр «Материя-ЛЦ» / Конкурсная документация Минпромторга РФ (конкурс объявлен приказом от 27 декабря 2013 г. № 2149. – М., 2013. – 14 с.
15. NCR18650A : Cylindrical type [Электронный ресурс] / Официальный сайт Panasonic. – URL: <http://industrial.panasonic.com/ww/products/batteries/secondary-batteries/lithium-ion/cylindrical-type/NCR18650A>. – (Дата обращения: 19.07.2016).

Поступила в редакцию 20.07.2016.

*Александр Викторович Хромов, канд. техн. наук, начальник отдела,  
т. (495) 624-82-90, e-mail: ahromov@vniiem.ru.  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

## LITHIUM-ION ACCUMULATOR BATTERIES for LOW-ORBIT SPACECRAFT

**A.V. Khromov**

*The article analyses experience of domestic and foreign companies in creation of lithium-ion battery units (LIBU) for low-orbit Spacecraft (SC). Today domestic SC are usually equipped with battery units comprised of series-connected nominal capacity batteries. Foreign SC mostly have on board parallel-series (PS) and series-parallel (SP) LIBU with low capacity batteries including 18650 batteries. Build-in protection devices allow using of SP-batteries without equalization units and bypass switches. LIBU based commercial-of-the-shelf batteries are now flight-tested on small SC. It has been concluded in the article that creation of domestic 18650 lithium-ion batteries, as well as developing and standardization of methodology for low orbit SC LIBU maturing are quite reasonable.*

**Key words:** Spacecraft, power supply system, lithium-ion accumulator battery, commercial-of-the-shelf components.

### List of References

1. Pistoia G. Lithium-Ion Batteries Advances and Applications / G. Pistoia. – Elsevier, The Netherlands, 2014. – 634 p., ill. – (ISBN: 978-0-444-59513-3).
2. Falko M. Iu., Nesterishin M. V., Kudriashov V. S., Kachin L. A., Rachip A. N. Flight tests of experimental battery module based on lithium-ion battery with control and measuring electronics / M. Iu. Falko et al. // Electronic and electromechanical systems and devices: Collection of scientific papers. – Tomsk: Izdatelstvo NTL [Scientific and Technical Literature Publ.]. – 2011. – Pp. 70 – 81.



3. Likhonosov S. D., Popov V. A., Kulyga V. P., Kallut Iu. V., Pachuev A. V. Lithium-ion batteries designed for Space applications, main lines of works and obtained results / S. D. Lichonosov et al. // Avtonomnaia Energetika [Autonomous energetics]. – 2014. – No. 32. – Pp. 39 – 46.
4. Guler M. Saft Battery Solutions for Space. August 2015 / Saft promotional material for MAKS-2015, Moscow, 2016. – 16 pages.
5. Flora C., Neubauer J., Dembeck J., Pearson C. The NASA EMU Battery Program and Progress. – 2009. – 30 p.
6. Pearson C., Thwaite C., Russel N. Small Cell Lithium-Ion Batteries: The Responsive Solution for Space Energy Storage // Paper AIAA RS3-2005-5003 presented at the 3rd Responsive Space Conference, Los Angeles, CA, USA, 2005, April, 25 – 28.
7. Satellite Missions Database [Digital resource] / Network guide for ERS SC eoPortal. – URL : <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>. – (Accessed date: 12.07.2016).
8. ShindaiSat: A Visible Light Communication Experimental Microsatellite / A. Nakajima, N. Sako, M. Kamemura, Y. Wakayama, A. Fukuzawa, H. Sugiyama, N. Okada // Proceedings of the ICSOS (International Conference on Space Optical Systems and Application), Ajaccio, Corsica, France, 2012, October 9 – 12.
9. ShindaiSat [Digital resource] / Shinshu University's page for Spacecraft on the University's website (Japanese). – URL: <http://www.shinshuu.ac.jp/shindaisat/place/index.html>. – (Accessed date: 12.07.2016).
10. SPUTNICS satellite technologies for scientific, technological and educational space experiments / A. V. Potapov, S. O. Karpenko, A. V. Popov, N. A. Ivlev, A. S. Sivkov, A. L. Vlaskin, Z. S. Zhumaev // Reports notes for XXXIXth Korolev Readings, Moscow, January 27 through 30, 2015.
11. Microsatellite «TabletSat-Aurora»: one year after orbital launching [Digital access] / «SPUTNICS» Company official website. – URL: <http://www.sputnix.ru/ru/analytics/item/369-mikrosputnikovaya-platforma-ta-ble-sat-i-mikrosputnik-tablesat-avrora-na-ee-osnove-dlya-provedeniya-nauchnykh-tekhnologicheskikh-i-obrazovatelnykh-eksperimentov-v-kosmose>. – (Accessed date: 12.07.2016).
12. TU 3482-065-20503890-2005 Cells ЛИГЦ-1,5С and battery packs assembled on their basis. Technical Specifications. Introduction 2006-05-10. – St. Petersburg : ОАО АК «Rigel». – 2005. – 65 pages.
13. Lithium Ion Rechargeable Batteries: Technical Handbook, Sony Corporation [Digital access] / Sony official website. – URL: <http://www.sony.com.cn/products/ed/battery/download.pdf>. – (Accessed date: 12.07.2016).
14. Requirements to technical specifications for the R&D work «Developing and assimilation of cylinder lithium-ion battery of 18650 standard and two high-performance batteries (6×4ЛИГЦ-1,5С and 10×4ЛИГЦ-1,5С), created on its basis, for domestic production», code «Материя-ЛЦ» / Tender documents of Minpromtorg RF [Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation] (tender announced by order No. 2149 dated December 27, 2013). – М., 2013. – 14 pages.
15. NCR18650A : Cylindrical type [Digital resource] / Panasonic official website. – URL : <http://industrial.panasonic.com/products/batteries/secondary-batteries/li-thium-ion/cylindrical-type/NCR18650A>. – (Accessed date: 19.07.2016).

*Aleksandr Viktorovich Khromov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of Department,  
tel. (495) 624-82-90, e-mail: [ahromov@vniiem.ru](mailto:ahromov@vniiem.ru).  
(JC «VNIEM Corporation»).*