

УДК 528.88

## **Методика формирования состава бортовой научной аппаратуры малых космических аппаратов для мониторинга радиоактивного загрязнения Земли**

**Карелин А.В.<sup>1</sup>, Скрипачев В.О.<sup>2\*</sup>, Туманов М.В.<sup>3</sup>, Жуков А.О.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>*Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, ул. Пионерская, 4, Королёв, Московская область, 141070, Россия*

<sup>2</sup>*Экспертно-аналитический центр, ул. Талалихина, 33, стр.4, Москва, 109316, Россия*

<sup>3</sup>*Научно-исследовательский институт электромеханики, ул. Панфилова, 11, Истра, Московская область, 143502, Россия*

<sup>4</sup>*Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Университетский проспект, 13, Москва, 119234, Россия*

*\*e-mail: skripatchevv@inbox.ru*

### **Аннотация**

Рассмотрена возможность применения метода последовательных сравнений при формировании состава бортовой научной аппаратуры малых космических аппаратов (МКА) для мониторинга радиоактивного загрязнения. Отмечено сходство физических эффектов, возникающих при повышении сейсмической активности и при радиоактивных загрязнениях. Предложен способ формирования рационального состава бортовой научной аппаратуры (БНА) перспективных МКА дистанционного зондирования Земли, основанный на методе последовательных сравнений.

Разработана вычислительная программа, реализованная на языке Java. Приведены результаты обработки экспертной информации.

**Ключевые слова:** космический аппарат, облик, радиоактивное загрязнение, системный анализ, экспертное оценивание, алгоритм, последовательные сравнения.

Мониторинг чрезвычайных ситуаций, в том числе стихийных гидрометеорологических и геофизических явлений, возможен с помощью применения традиционных систем дистанционного зондирования Земли из космоса [1, 2]. Отдельным видом чрезвычайных ситуаций, актуальным для космического мониторинга, являются радиоактивные загрязнения, которые могут быть обусловлены как природными, так и техногенными факторами. Количество потенциальных источников радиоактивных загрязнений возросло с началом промышленного использования атомной энергии в различных странах и постоянным увеличением количества потенциально опасных объектов.

Сегодня ядерные энергетические установки применяются не только на наземных и водных объектах, но и устанавливаются на космические аппараты различного назначения. Являясь компонентами космических аппаратов (КА), они в существенной мере определяют эффективность применения, продолжительность активного функционирования, затраты и сроки создания перспективных космических средств [3].

Аварии на атомных электростанциях в настоящее время являются наиболее опасными источниками радиоактивного загрязнения. Как правило, в штатных режимах работы атомные электростанции не выбрасывают в атмосферу продуктов, ведущих к радиоактивному загрязнению территории, а дозы облучения организмов флоры и фауны находятся на экологически безопасном уровне [4, 5].

Однако, за историю развития атомной энергетики на ядерных объектах произошёл целый ряд крупных аварий для описания которых используется шкала INES, разработанная Международным агентством по атомной энергии. Перечень наиболее крупных аварий приведен в таблице 1 [6].

В ряде аварий бортовой научной аппаратурой (БНА) космических аппаратов фиксировались различные физические эффекты. Аналогичные явления могли быть вызваны и природными источниками радиации.

Так в [7, 8] отмечалось сходство физических эффектов, возникающих как во время локальной ионизации атмосферы, вызванной эманацией радиоактивных и заряженных аэрозолей из земной коры перед землетрясением, так и непосредственно во время неконтролируемых радиоактивных выбросов аварийного предприятия.

Таблица 1

### Наиболее крупные аварии на атомных объектах

№ п.п.	Название	Дата	Уровень по шкале INES
1	Радиохимический завод «Маяк» (СССР)	29.09.1957	6 (Серьезная авария)

2	АЭС Windscale Piles (в настоящее время Sellafield) (Великобритания)	08.10.1957	5 (Авария с широкими последствиями)
3	АЭС Three Mile Island (США)	28.03.1979	5 (Авария с широкими последствиями)
4	Чернобыльская АЭС (СССР)	26.04.1986	7 (Крупная авария)
5	АЭС Фукусима-1 (Япония)	11.03.2011	7 (Крупная авария)

В сложившейся экономической ситуации в стране на первый план выступает вопрос минимизации затрат при создании новых КА ДЗЗ, в том числе КА мониторинга ЧС. Поэтому необходимо в максимальной степени использовать имеющийся научно-технический задел для создания КА радиоактивного мониторинга, а также реализовать возможности существующих КА мониторинга ЧС, например, малых КА серии «Канопус-В» [9]. В работах [10, 11] также отмечалась принципиальная возможность применения малых КА для мониторинга радиоактивных загрязнений за счет комплексирования различной БНА.

Однако, ввиду современных ограничений, предъявляемых к составу целевой аппаратуры малых КА (требования по энергопотреблению, массе, габаритам и т.д.), реализация необходимой БНА на малом КА может представлять трудную задачу, в которой необходимо найти рациональные проектно-конструкторские решения [12, 13.]. Для ее решения возникает необходимость в разработке методики определения рационального состава БНА, например, на основе существующих методов системного анализа [14].

Для обоснования рационального состава БНА целесообразно воспользоваться методами экспертного оценивания. Данные методы позволяют решать различные задачи, которые не могут быть в полной мере описаны математически, поскольку являются слабоструктурированными, то есть содержат неопределенности относительно не только измерения, но и самого характера исследуемых целей, средств их достижения и внешних условий [15, 16, 17].

Известно, что при формализации процесса подготовки выбора с помощью экспертов необходимо выделить наиболее существенные факторы, получить экспертные оценки и выбрать наиболее предпочтительное решение [18, 19, 20].

В качестве экспертов целесообразно привлекать привлечение ведущих специалистов в области разработки и применения соответствующей БНА, а также в предметной области дистанционных методов исследования физических эффектов, возникающих под действием ионизирующего излучения. Для экспертного оценивания привлекались сотрудники МИРЭА, АО «Российские космические системы», АО «НИИЭМ», ИРЭ РАН.

Для проведения дистанционного мониторинга радиоактивных загрязнений из космоса в настоящее время наиболее перспективно использовать следующие методы, основанные на определении физических эффектов, возникающих под действием ионизирующего излучения [10, 21]:

1. Метод биоиндикации, основанный на регистрации реакции живых фотосинтезирующих организмов на радиоактивное загрязнение, в частности, изменение цветности водоемов и растительного покрова.

2. Метод регистрации концентрации основных малых газовых составляющих ионизированной атмосферы.

3. Метод наблюдения ионосферных возмущений, в основе которого лежит эффект изменчивости характеристик ионосферы (например, ионной и электронной концентрации) над районами радиоактивного загрязнения на поверхности Земли и в нижних слоях тропосферы.

4. Метод оценки состояния атмосферы, находящейся под действием радиоактивного излучения, при котором во влажной атмосфере могут образовываться не совсем обычные физические объекты, излучающие в радиодиапазоне спектра, и происходить резкие погодные изменения, обусловленные резкой интенсификацией процессов конденсации

5. Метод определения существенных изменений абсолютной влажности, основанный на регистрации аномалий в уходящем от поверхности земли тепловом ИК-излучении и изменений химического потенциала паров воды.

Для удобства указанные методы обозначим  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$ ,  $M_5$  соответственно. Поскольку номенклатура БНА достаточно широкая, ограничимся только следующими типами приборов: спектрометр видимого диапазона ( $A_1$ ), спектрометр ИК-диапазона ( $A_2$ ), СВЧ-радиометр ( $A_3$ ), бортовой ионозонд ( $A_4$ ), радиочастотный анализатор ( $A_5$ ).

Для определения полезности БНА применим метод последовательных сравнений, для реализации которого авторами разработана вычислительная программа на языке программирования Java. Для удобства вычислений исходные

экспертные оценки указывались экспертами по 5-балльной шкале (5 - наилучшая оценка, 1 – наихудшая оценка). В таблице 2 приведены исходные оценки  $Q_i$ , полученные анкетированием экспертов.

Таблица 2

Исходные экспертные оценки  $Q_i$

<b>БНА</b>	<b><math>M_1</math></b>	<b><math>M_2</math></b>	<b><math>M_3</math></b>	<b><math>M_4</math></b>	<b><math>M_5</math></b>
$A_1$	5	3	1	2	3
$A_2$	4	5	2	3	5
$A_3$	3	4	3	4	4
$A_4$	1	2	5	5	1
$A_5$	2	1	4	1	2

Каждый столбец таблицы 2 обрабатывался согласно алгоритму, представленному на рис.1.

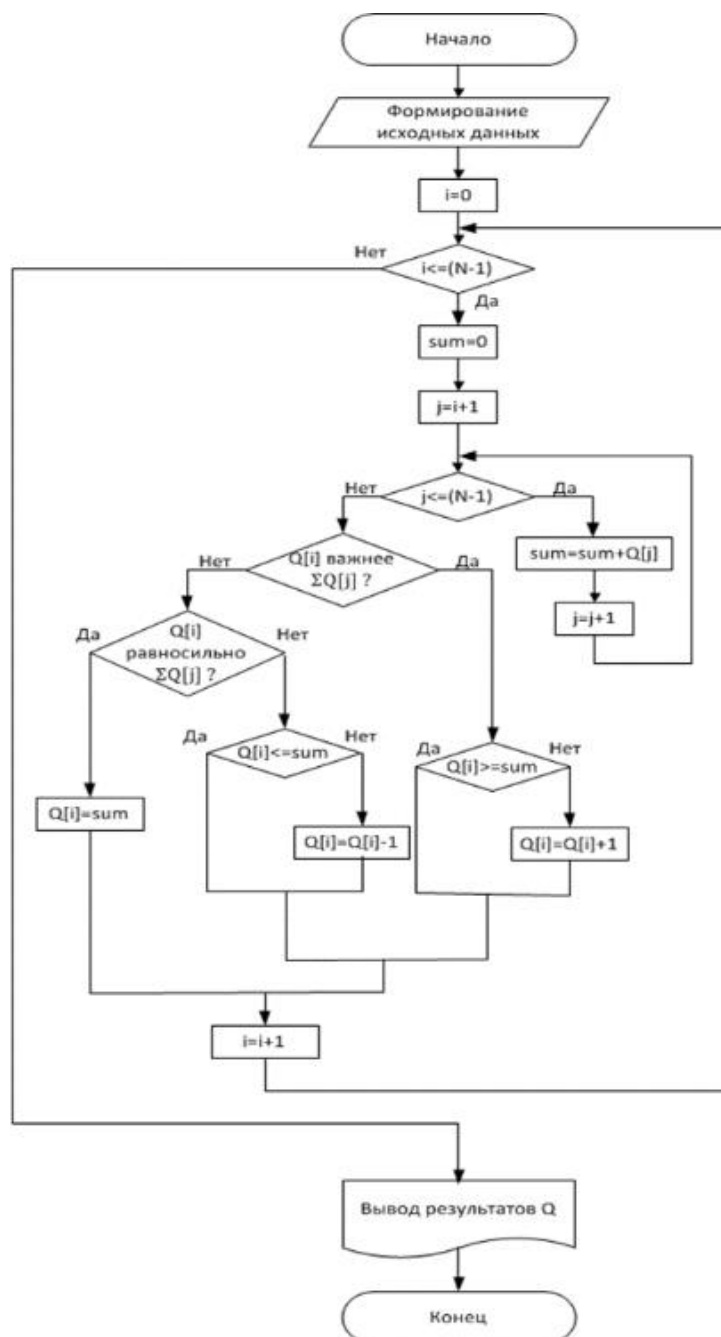


Рис. 1. Блок-схема алгоритма последовательных сравнений

После присвоения исходных экспертных оценок эксперт сравнивает альтернативу БНА  $A_i$  с суммой альтернатив БНА  $A_{i+1}, \dots, A_N$ , если она предпочтительнее чем их сумма, то оценки необходимо корректировать так, чтобы [16]:



$$Q_i > \sum_{j=i+1}^N Q_j,$$

где  $N$  – число альтернатив БНА.

В противном случае оценка должна быть скорректирована как:

$$Q_i < \sum_{j=i+1}^N Q_j.$$

В случае равных альтернатив их оценки должны быть равными:

$$Q_i = \sum_{j=i+1}^N Q_j.$$

В таблице 3 приведены данные по коррекции исходных оценок  $Q_i$  исходя из сравнения альтернатив.

Таблица 3

### Данные корректировки экспертами

Сравнение	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$
$A_1 \vee \sum_{i=2}^N A_i$	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
$A_2 \vee \sum_{i=3}^N A_i$	Да	Да	Нет	Нет	Нет
$A_3 \vee \sum_{i=4}^N A_i$	Да	Да	Нет	Нет	Да
$A_4 \vee \sum_{i=5}^N A_i$	Нет	Нет	Да	Да	Нет

После корректировки полученные новые оценки  $Q_i^{\text{кор}}$  были усреднены. В таблице 4 приведены результаты обработки.

### Результаты обработки

БНА	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	Итоговая оценка	Нормированная оценка
A <sub>1</sub>	0.48	0.19	0.07	0.13	0.20	1.07	0.72
A <sub>2</sub>	0.30	0.50	0.13	0.20	0.33	1.47	1.00
A <sub>3</sub>	0.17	0.25	0.20	0.27	0.27	1.16	0.79
A <sub>4</sub>	0.00	0.00	0.33	0.33	0.07	0.73	0.50
A <sub>5</sub>	0.04	0.06	0.27	0.07	0.13	0.57	0.39

На рис.2 приведены полученные нормированные оценки, которые характеризуют полезность данного вида БНА.

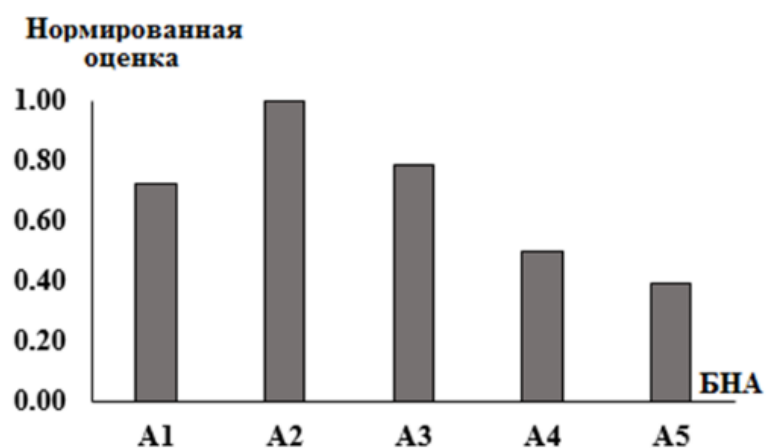


Рис. 2. Нормированные оценки

## **Выводы**

Таким образом, с учетом полученных оценок альтернатив, сформирован рациональный состав БНА малого КА для мониторинга радиоактивного загрязнения Земли на основе полезности:

- спектрометр ИК-диапазона ( $A_2$ );
- СВЧ-радиометр ( $A_3$ );
- спектрометр видимого диапазона ( $A_1$ );
- бортовой ионозонд ( $A_4$ ).
- радиочастотный анализатор ( $A_5$ ).

В настоящем исследовании показана принципиальная возможность применения метода последовательных сравнений для определения рационального состава БНА малого космического аппарата для мониторинга радиоактивных загрязнений Земли. Разработанная методика может быть также использована при разработке облика малых КА различного назначения.

## **Библиографический список**

1. Olsen R.C. Remote Sensing from Air and Space, Bellingham, SPIE Press Monograph, 2007, 270 p.
2. Jensen J.R. Remote sensing of the environment: an Earth resource perspective, Toronto, Prentice Hall, 2007, 592 p.

3. Яковлев О.В. Системный анализ безопасности и риска космической ядерной энергетики // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2011. № 2. С. 44 - 48.
4. Боярчук К.А., Гальпер А.М., Колдашов С.В., Улин С.Е. Прикладная ядерная космофизика. - М.: МИФИ, 2007. - 216 с.
5. Крышев И.И. Сазыкина Т.Г. Радиационная безопасность окружающей среды: необходимость гармонизации российских и международных нормативно-методических документов с учетом требования федерального законодательства и новых международных основных норм безопасности ОНБ-2011 // Радиация и риск. 2013. Т. 22. № 1. С. 47 – 61.
6. INES Руководство для пользователей международной шкалы ядерных и радиологических событий. - Вена: МАГАТЭ, 2010. - 235 с.
7. Скрипачев В.О., Долгих Н.А., Скребушевский Б.С. Анализ возможности космического мониторинга объектов ядерного топливного цикла // Исследование Земли из космоса. 2004. № 6. С. 3 - 11.
8. Pulinetz S.A., Ouzounov, D.P., Karelin A.V., Davidenko D.V. Physical Bases of the Generation of Short-Term Earthquake Precursors: A Complex Model of Ionization-Induced Geophysical Processes in the Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere–Magnetosphere System // Geomagnetism and Aeronomy, 2015, vol. 55, no. 4, pp. 540 - 558.

9. Салихов Р.С., Туманов М.В., Карелин А.В. Перспективы применения космических аппаратов на платформе «Канопус-В» для мониторинга радиоактивных загрязнений // Геоматика. 2014. № 4. С. 59 – 61.
10. Боярчук К.А., Салихов Р.С., Сеник Н.А., Туманов М.В., Карелин А.В. Космические технологии мониторинга радиационной обстановки вокруг атомных электростанций // Космонавтика и ракетостроение. 2013. Т. 4. № 73. С. 27 – 35.
11. Туманов М.В. Разработка облика космической системы комплексного мониторинга радиационной обстановки // VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (Москва, 1-3 июня 2016). Сборник трудов. – М.: АО «РКС», 2016. С. 532 – 539.
12. Ламзин В.А. Методические основы прогнозных исследований модификаций космических аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=66060>
13. Kaloshin I., Kuznetsov V., Skripachev V., Surovceva I. Capabilities evaluation of spaceborne scientific equipment for geophysical applications, MATEC Web of Conferences 102, 01024 (2017) // V International Forum for Young Scientists "Space Engineering" DOI: 10.1051/matecconf/201710201024
14. Калошин И.Б., Харламов А.Г., Скрипачев В.О., Суровцева И.В., Иванов В.К. Системный подход к выбору целевой аппаратуры малых космических аппаратов // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18. № 4. С. 868 – 875.

15. Вдовин В.М., Суркова Л.Е., Валентинов В.А. Теория систем и системный анализ. – М.: Изд-во Дашков и К, 2010. – 640 с.
16. Александровская Л.Н., Аронов И.З., Иосифов П.А., Кириллин А.В. Математические основы риск-менеджмента технических систем. Экспертные методы оценки в риск-менеджменте. - М.: Изд-во АИР, 2017. Т.1. – 238 с.
17. Dennis Blumenfeld. Operations Research Calculations Handbook, Second Edition, CRC Press, 2012, 256 p.
18. Заковряшин А.И. Особенности интеллектуальной поддержки принятия решений // Труды МАИ. 2012. № 61. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35525>
19. Биккузина А.И., Жуков А.О., Никольский Ю.В., Буханец Д.И. Подход к решению задачи упорядочения альтернатив в диалоговой системе моделирования принятия решения при информационно-аналитическом обеспечении оценки и прогноза экологического состояния территорий эксплуатации крупных технических комплексов // Новые исследования в разработке техники и технологий. 2014. № 1. С. 33 – 40.
20. Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2006. – 206 с.
21. Боярчук К.А., Карелин А.В., Широков Р.В. Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы. - М.: ВНИИЭМ, 2006. - 203 с.