

## АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

**Многоспутниковый оперативный мониторинг околоземной радиации в рамках проекта «Универсат-СОКРАТ»**

М. И. Панасюк,<sup>1</sup> М. В. Подзолко,<sup>1,а</sup> В. В. Калегаев,<sup>1</sup> А. С. Ковтюх,<sup>1</sup> Н. В. Кузнецов,<sup>1</sup> В. И. Оседло,<sup>1</sup> В. Л. Петров,<sup>1</sup> Е. П. Попова,<sup>2</sup> А. Ю. Поройков,<sup>1</sup> И. А. Рубинштейн,<sup>1</sup> С. И. Свертилов,<sup>1</sup> В. И. Тулупов,<sup>1</sup> И. В. Яшин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ).

Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

<sup>2</sup> Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН Россия, 123242, Москва, Б. Грузинская, д. 10, стр. 1.

Статья поступила 26.07.2018, принята к публикации 05.10.2018.

В статье рассматривается задача оперативного мониторинга радиационных условий в околоземном пространстве, являющаяся частью разрабатываемого в МГУ проекта группировки малых спутников «Универсат-СОКРАТ». Определяется научный подход к реализации этой задачи, обосновывается выбор орбит и пространственной ориентации спутников и конфигурации детекторов энергичных заряженных частиц с учетом других задач, решаемых проектируемой спутниковой группировкой.

**Ключевые слова:** малый космический аппарат, орбиты спутников, радиационные пояса Земли, спектрометр протонов и электронов, высотный ход, пич-угловое распределение.

УДК: 520.662, 523.4-854. PACS: 94.30.Xy, 94.80.+g.

**ВВЕДЕНИЕ**

В Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова в сотрудничестве с другими научными институтами и организациями космической промышленности, ведется разработка проекта «Универсат-СОКРАТ»<sup>1</sup> по созданию группировки малых космических аппаратов для мониторинга космических угроз: ионизирующей радиации; потенциально опасных объектов естественного (астероиды, метеороиды) и техногенного (космический мусор) происхождения, а также электромагнитных транзиентов земного и космического происхождения.

В данной статье рассматривается одна из основных задач проектируемой спутниковой системы — оперативный мониторинг околоземной радиации, представляющей опасность для бортовых систем спутников, главным образом потоков электронов и протонов радиационных поясов Земли, а также энергичных частиц солнечных космических лучей (СКЛ). Необходимость такого мониторинга обусловлена тем, что эти потоки даже в геомагнитно спокойных условиях испытывают очень большие средне- и долгосрочные вариации, которые не могут быть описаны существующими статическими моделями радиационных поясов Земли.

Предполагается, что несколько малых спутников, оснащенных, в частности, многонаправленными спектрометрами протонов и электронов, будут выведены с помощью попутного запуска на специально подобранные орбиты и будут получать и оперативно передавать на землю экспериментальные данные, которые позволят в режиме, близком к «реальному времени», реконструировать текущую 3-мерную картину пространственного распределения радиации в значительной области околоземного пространства.

Разработка научных подходов к созданию такой космической системы начата нами в работах [1, 2]. В на-

стоящей работе обосновывается выбор концепции осуществления радиационного мониторинга, орбит спутников, пространственной ориентации спутников и детекторов энергичных заряженных частиц. При этом также учитываются требования к запуску, орбитам и ориентации ИСЗ, определяемые другими задачами проектируемой спутниковой группировки. Подробно рассмотреть эти задачи планируется в отдельных публикациях.

**1. АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАДАЧИ МОНИТОРИНГА ОКОЛОЗЕМНОЙ РАДИАЦИИ**

Экспериментальные измерения потоков энергичных заряженных частиц в околоземном пространстве начались с началом космической эры. В СССР в 1960–80 гг. такие измерения проводились аппаратурой НИИЯФ МГУ на специализированных ИСЗ серий «Электрон» и «Прогноз» и спутниках связи «Молния» и «Космос». В США также проводились аналогичные экспериментальные измерения на спутниках серий Explorer, Injun, Telstar, IMP, OGO, Pegasus, ATS и др. Эти измерения позволили определить общую структуру радиационных поясов, выявить механизмы генерации и потерь частиц.

На основе этих измерений в 1970–80 гг. были созданы эмпирические модели радиационных поясов Земли, которые описывают пространственное и энергетическое распределение всенаправленных потоков протонов с энергиями от сотен кэВ до сотен МэВ и электронов с энергиями от десятков кэВ до  $\approx 7-10$  МэВ в значительной области околоземного пространства — от высот  $\approx 150$  км и вплоть до области геостационарной и высокоэллиптических орбит. Наиболее известными являются американские модели AP8 и AE8 [3, 4]. В последнее время разработана новая модель AP9/AE9 [5], основанная на более новых экспериментальных данных. В НИИЯФ МГУ также разработаны модели радиационных поясов Земли [6–9]. Указанные модели используются для расчетных оценок радиационных условий полета при разработке космических аппаратов.

<sup>а</sup> E-mail: spacerad@mail.ru

<sup>1</sup> «Универсат» — английская аббревиатура: University Satellites. СОКРАТ — русская аббревиатура: Система оповещения космической радиационной, астероидной и техногенной опасности.

Однако эти модели являются статическими. Вариации потоков частиц отражены в них только заданием потоков для эпох «минимума» и «максимума» солнечной активности, при этом соответствующие значения потоков различаются только для некоторых энергий в пределах максимум нескольких раз.

В то же время реальные потоки заряженных частиц в окрестности Земли испытывают очень значительные вариации, которые не могут быть описаны существующими статическими моделями радиационных поясов. В частности, потоки электронов внешнего пояса даже в геомагнитно-спокойных условиях испытывают вариации на интервалах времени от нескольких суток до нескольких лет в пределах более чем порядка величины относительно модельных значений (см., например, [10–13]). Эти вариации связаны с солнечной и геомагнитной активностью, изменением магнитного поля Земли и плотности верхней атмосферы.

Также описаны случаи [14–17] возникновения после мощных геомагнитных возмущений новых временных радиационных поясов с временем жизни до нескольких недель или месяцев. Так, после сильной магнитной бури 24 марта 1991 г. ИСЗ CRRES зарегистрировал возникновение нового пояса протонов и электронов с  $E > 10$  МэВ, просуществовавшего  $\approx 6$  месяцев. В области этого пояса дозы радиации превышали модельные значения на 2–3 порядка величины. Такие новые радиационные пояса, конечно, не могут описываться существующими статическими моделями.

Еще более значительная трансформация радиационных поясов происходит кратковременно во время сильных магнитных бурь.

Кроме того, в область орбиты Земли могут приходиться значительные потоки энергичных частиц, инжектированных во время мощных солнечных вспышек. Во время таких событий потоки протонов и ядер с энергиями в десятки и сотни МэВ/нуклон, способных проникать за защиту ИСЗ, до нескольких суток могут превышать фоновые потоки галактических космических лучей на 3–4 порядка и более. Такие события имеют трудно предсказуемый характер, поэтому для описания потоков частиц СКЛ применяются вероятностные модели, например модель НИИЯФ [18, 19].

Таким образом, реальные потоки энергичных заряженных частиц на орбитах ИСЗ могут существенно отличаться от модельных значений. По этой причине необходимы новые экспериментальные измерения, которые могут дать информацию о радиационной обстановке на орбитах эксплуатируемых ИСЗ в текущий момент времени.

В настоящее время измерения потоков энергичных заряженных частиц осуществляются рядом космических аппаратов. Следует отметить систему геофизических наблюдений американского агентства NOAA, действующую с конца 1970-х гг., в которой используются ИСЗ серий POES на низких полярных орбитах и GOES на геостационарной орбите (одновременно  $\geq 2$  ИСЗ на каждой орбите). Российская аппаратура для измерений потоков энергичных заряженных частиц, созданная НИИЯФ МГУ, функционирует на российских метеоспутниках серий «Метеор-М» (низкоорбитальные) и «Электро-Л» (геостационарные). Также

имеется еще ряд ИСЗ, в том числе малых космических аппаратов, осуществляющих такие измерения.

Однако большинство этих ИСЗ осуществляют измерения потоков энергичных заряженных частиц только в ограниченной области пространства и диапазоне питч-углов (угол между векторами скорости частицы и индукции магнитного поля).

Перечисленные факторы обуславливают актуальность разработки в НИИЯФ МГУ космической системы оперативного мониторинга радиационных условий в околоземном пространстве, предназначенной для использования при применении и развертывании космических аппаратов.

Проект с аналогичными задачами разрабатывается Европейским космическим агентством [20].

## 2. КОНЦЕПЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ, ОРБИТЫ СПУТНИКОВ

Задача проектируемой группировки малых спутников — в режиме, близком к «реальному времени» (с периодом несколько десятков минут), реконструировать трехмерную картину текущего распределения потоков энергичных протонов и электронов в значительной области радиационных поясов Земли. Зная эту картину, мы можем рассчитать текущие радиационные условия для большого диапазона орбит ИСЗ.

В данном проекте ставится задача строить такую картину в основном для квазиспокойных геомагнитных условий или слабых магнитных возмущений, когда можно, по крайней мере, локально во времени (в течение десятков минут), считать движение энергичных заряженных частиц близким к адиабатическому. Для построения картины пространственного распределения частиц в большой области магнитосферы во время магнитных бурь, в ходе которых имеют место значительные процессы ускорения частиц при их взаимодействии с волнами, по-видимому, нужно значительно большее число спутников, чем предусматривается в данном проекте.

В квазидипольном магнитном поле захваченные частицы радиационных поясов двигаются по спиральным траекториям вдоль магнитных силовых линий между «точками отражения» с одинаковым значением индукции магнитного поля  $B$  в Северном и Южном магнитном полушариях и дрейфуют перпендикулярно плоскости магнитного меридиана, формируя т. н. магнитные дрейфовые оболочки, описываемые параметром Мак-Илвайна  $L$  (приближенно равном расстоянию от центра диполя до магнитной силовой линии в плоскости магнитного экватора). Зависимость  $F(B)$  потоков частиц на заданной  $L$ -оболочке от величины индукции магнитного поля  $B$  называется «высотным ходом» потоков. Высотный ход также связан с питч-угловым распределением  $F_0(\alpha_0)$  потоков частиц на магнитном экваторе теоремой Лиувилля.

Для высот  $> 5 - 7$  радиусов Земли, где сказывается влияние межпланетного магнитного поля, и в условиях слабовозмущенной магнитосферы можно считать, что частицы локально во времени остаются на своих дрейфовых оболочках и сохраняют адиабатические инварианты движения, но сами дрейфовые оболочки «деформируются» в пространстве относительно квазидипольной конфигурации. Такие дрейфовые оболочки

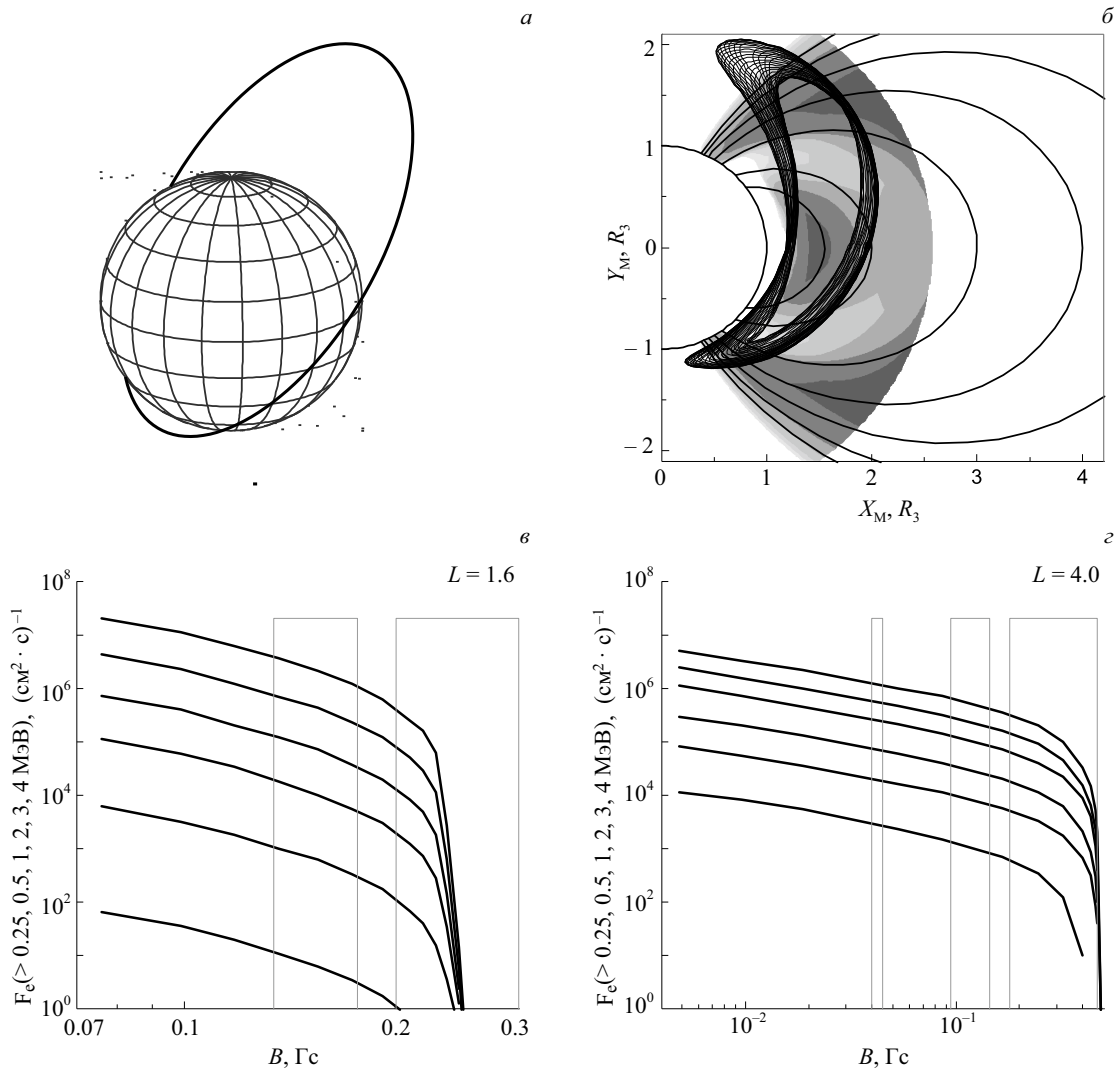


Рис. 1. *а* – Эллиптическая орбита с высотами перигея и апогея  $\approx 600 - 700$  и  $8000$  км, наклонением  $63.4^\circ$  и аргументом перигея  $\approx 310^\circ$ ; *б* – ее проекция на плоскость магнитного меридиана. Показаны L-оболочки  $L = 1.6, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ . Цветом показаны потоки электронов с  $E > 2$  МэВ по модели AE8; *в, г* – области, в которых орбита пересекает высотный ход потоков электронов на  $L = 1.6$  и  $4$  (максимум внутреннего и внешнего пояса)

описываются модифицированным параметром  $L^*$  Редера [21] или  $L$  Гальперина [22], рассчитываемым с использованием динамических моделей возмущенного магнитного поля Земли.

Таким образом, для построения трехмерной картины текущего распределения потоков протонов и электронов в значительной области радиационных поясов Земли необходимы измерения, охватывающие больший диапазон L-оболочек (желательно вплоть до  $L = 5-7$ , т.е. до орбит GPS/ГЛОНАСС или геостационарной) и для каждой L-оболочки позволяющие реконструировать высотный ход потоков частиц в данный момент времени.

Одна из теоретически возможных концепций решения этой задачи – детальные измерения питч-углового распределения потоков захваченных частиц на разных L-оболочках вблизи геомагнитного экватора. При этом высотный ход частиц для каждой L-оболочки может быть рассчитан по теореме Лиувилля. Подобные измерения были реализованы на ИСЗ NASA Explorer-45 и RBSP/«Van Allen Probes». Два ИСЗ Van Allen Probes выведены в 2012 г. на орбиту с высотами перигея и апогея  $\approx 700$  и  $30000$  км и наклонением  $\approx 10^\circ$ , которая охватывает диапазон  $L$  до  $\approx 6 - 6.5$ .

Измерения питч-углового распределения потоков обеспечиваются узконаправленными детекторами и вращением спутников вокруг оси, имеющей направление на Солнце, которое вблизи магнитного экватора примерно перпендикулярно вектору индукции магнитного поля [23].

Однако у такой концепции есть ряд недостатков. Среди них – большая стоимость вывода ИСЗ на высокоапогейную орбиту и период обращения. Но главной проблемой является необходимость чрезвычайно большой точности питч-угловых измерений (и в то же время достаточной скорости счета) для расчета потоков частиц внешнего пояса на низких высотах. Практически, для этого необходимы измерения с шагом питч-угла в единицы градусов. Для Van Allen Probes этот шаг составляет  $11-16^\circ$ , а угол апертуры телескопов спектрометров энергичных частиц равен  $\approx 20^\circ$ . Надо отметить, что ИСЗ Van Allen Probes не имеют задач оперативного мониторинга радиации в околоземном пространстве и функционируют только в научных целях.

Для проекта, разрабатываемого МГУ, принят другой подход: использование более низких орбит с большим наклонением, измерения всенаправленных потоков

частиц в разных точках L-оболочки на разных высотах, а затем расчет высотного хода всенаправленных потоков для всей L-оболочки путем интерполяции и экстраполяции данных измерений с использованием известных теоретических и эмпирических закономерностей высотного хода.

При выборе орбит ИСЗ важным фактором, который мы учитывали, является форма высотного хода потоков захваченных частиц, имеющая следующие характерные участки:

- область резкого «завала» высотного хода на высотах  $< 1000$  км,
- некоторая переходная область «колена»,
- область медленного, близкого к степенному изменения потоков на больших высотах вплоть до геомагнитного экватора.

После анализа различных вариантов орбит в конечном счете была выбрана эллиптическая орбита с высотами перигея и апогея  $\approx 600 - 700$  и  $8000$  км, наклоном  $63.4^\circ$ , аргументом перигея  $\approx 310^\circ$  и периодом около 3 часов.

На рис. 1 проиллюстрирована форма этой орбиты, ее проекция на плоскость магнитного меридиана и области, в которых орбита пересекает высотные ходы потоков частиц на разных L-оболочках.

Как видно из рисунка, орбита пересекает разные L-оболочки во всех указанных выше областях, в которых имеется различный характер высотного хода потоков. Для орбиты выбрано наклонение  $63.4^\circ$ , при котором отсутствует изменение аргумента перигея под влиянием 2-й зональной гармоники гравитационного потенциала Земли. При этом в окрестностях перигея и апогея орбита пересекает L-оболочки соответственно на низких и «средних» высотах, причем в разных точках на разных витках.

Следовательно, используя данные измерений за последние несколько витков, можно путем интерполяции рассчитать высотный ход потоков на каждой L-оболочке вплоть до высот  $8000$  км. Для больших высот мы вынуждены будем прибегнуть к экстраполяции; но, как видно из рис. 1, это можно сделать, поскольку в этой области потоки меняются сравнительно слабо по простому степенному закону; кроме того, можно использовать измерения имеющихся геостационарных спутников для уточнения расчета. После измерений на каждом следующем витке будет производиться новый расчет высотных ходов. Таким образом будет строиться текущая трехмерная картина пространственного распределения потоков частиц радиационных поясов Земли в значительной области околоземного пространства.

Для лучшего временного разрешения и точности целесообразно использовать 2 ИСЗ в противоположных фазах орбиты и с разным положением плоскостей орбит. При этом можно будет обновлять трехмерную картину распределения потоков с периодом 1.5 часа (1/2 витка) или меньшим — при помощи экстраполяции временного хода потоков.

Также при построении картины пространственного распределения потоков могут учитываться потоки протонов с энергиями  $> 5 - 10$  МэВ от мощных солнечных вспышек. На орбитах проектируемой группировки ИСЗ

они будут регистрироваться в областях высоких широт, где протоны радиационных поясов с такими энергиями отсутствуют. После чего можно рассчитать их потоки в других областях пространства, например при помощи модели НИИЯФ проникновения космических лучей в магнитосферу Земли [24].

Попутный запуск малых ИСЗ на указанную эллиптическую орбиту может быть осуществлен, например, одновременно с выводом основной полезной нагрузки на орбиту типа «Молния», имеющую то же наклонение но большую высоту апогея  $\approx 40000$  км.

Данные измерений должны оперативно передаваться на Землю (желательна задержка в пределах десятков минут — единиц часов) через системы спутниковой связи или сеть наземных принимающих станций.

### 3. КОНФИГУРАЦИЯ ДЕТЕКТОРОВ, ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРИЕНТАЦИЯ СПУТНИКОВ

Выбранная концепция предусматривает измерения всенаправленных потоков энергичных протонов и электронов различных энергий.

Типовая конструкция прибора для измерения энергетических спектров электронов и протонов представляет собой сборку в виде «телескопа», включающую несколько полупроводниковых и сцинтилляционных детекторов разной толщины, расположенных один под другим на единой оси (например, [25, 26]). Заряженные частицы, пройдя через входное окно телескопа и попадая в детектор, выделяют в нем энергию, которая преобразуется в электрический импульс величины, пропорциональной выделенной энергии. Сборка из нескольких детекторов и электронные логические схемы, работающие по принципу совпадений—антисовпадений импульсов от разных детекторов позволяют определять вид частиц (электроны, протоны), разделять их по энергиям, и частично отсеивать боковые прохождения частиц (через корпус телескопа). Спектрометр, разрабатываемый для проектируемой группировки ИСЗ, является дальнейшим развитием приборов НИИЯФ МГУ, используемых на ИСЗ «Электро-Л», и будет регистрировать потоки отдельно протонов с энергиями от 1 до  $> 160$  МэВ и электронов с энергиями  $0.15 - 10$  МэВ (в  $\approx 8$  подынтервалах в каждом указанном интервале энергий).

Однако угол обзора телескопа для приемлемой точности работы спектрометра ограничен значением  $\approx 60^\circ$ . Причина в том, что энерговыделение частицы данного вида и энергии в детекторе различается в зависимости от длины ее пробега в материале детектора, которая в свою очередь зависит от угла пролета частицы через детектор. Как следствие, с увеличением диапазона углов будет уменьшаться точность определения вида и энергии частиц. Возникает задача: каким образом, имея инструмент с ограниченным полем зрения, измерять всенаправленные потоки частиц?

Решение заключается в использовании нескольких телескопов, оси которых ориентированы под разными углами к вектору индукции магнитного поля. По таким измерениям можно путем аппроксимации построить пичч-угловое распределение потоков частиц и рассчитать всенаправленный поток. При этом чрезвычайно высокая точность пичч-угловых измерений не требуется.

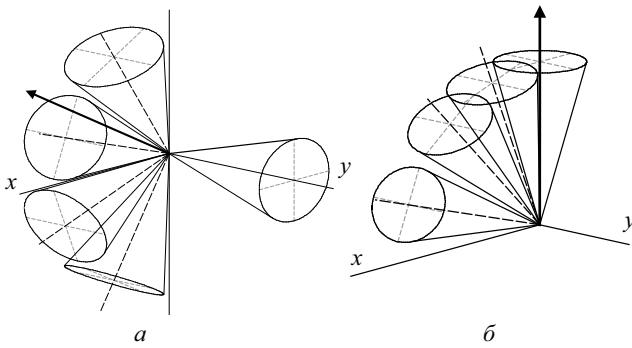


Рис. 2. Варианты ориентации ИСЗ и телескопов: *a* — ось 1-го телескопа (*y*) перпендикулярна плоскости магнитного меридиана, 2-я ось ИСЗ (*x*) направлена в центр смещенного магнитного диполя Земли, оси еще 4 телескопов лежат в плоскости магнитного меридиана; *b* — 1-я ось ИСЗ (*y*) перпендикулярна плоскости магнитного меридиана, 2-я ось ИСЗ параллельна расчетному вектору индукции магнитного поля **B**, оси 4 телескопов лежат в плоскости магнитного меридиана

Для аппроксимации питч-угловых распределений потоков можно с удовлетворительной точностью использовать функцию

$$F(\alpha) = F_0 \sin^A \left( \alpha - \alpha_1 \frac{\pi/2 - \alpha}{\pi/2 - \alpha_1} \right),$$

где  $\alpha$  — питч-угол,  $\alpha_1(L, B)$  — угол «конуса потерь» (минимальное значение возможных питч-углов захваченных частиц в данной точке магнитной силовой линии),  $A$  — показатель анизотропии [27].

Чтобы построить такую функцию, т.е. найти значения параметров  $F_0$  и  $A$ , необходимы измерения как минимум для двух разных значений питч-углов; для большей точности — желательно для 3 или более существенно различных значений питч-углов. При этом детекторы фактически измеряют не поток частиц для одного значения питч-угла, а среднее значение потока для диапазона значений питч-углов внутри конуса обзора телескопа. Для достаточной точности

построения аппроксимации необходимо учесть питч-угловую зависимость потоков в пределах угла обзора каждого телескопа. Соответствующая методика построения аппроксимации питч-углового распределения потоков в несколько «проходов», в ходе которых определяется и уточняется показатель анизотропии, приводится в работе [27].

На рис. 2 схематически показаны различные варианты пространственной ориентации телескопов и спутников. Эти варианты предусматривают наличие системы активной трехосевой ориентации ИСЗ с использованием приближения «смещенного диполя» модели IGRF магнитного поля Земли.

На рис. 2, *a* показан вариант, в котором одна из осей спутника ориентирована в направлении центра смещенного диполя, а вторая ось направлена перпендикулярно плоскости магнитного меридиана. Ось основного телескопа направлена перпендикулярно плоскости магнитного меридиана, как следствие он дает измерения для питч-углов в окрестности  $90^\circ$ . Оси нескольких дополнительных телескопов лежат в плоскости магнитного меридиана, и они дают измерения для других питч-углов. Угол поля зрения телескопов взят равным  $35^\circ$ . При этом, поскольку направление в центр смещенного диполя близко к направлению в нади́р (отклонение не превышает  $\approx 6^\circ$ ), в любой точке орбиты возможно осуществление связи с Землей.

Также, поскольку для достаточной точности питч-угловых измерений необходимо знать фактические углы между осями телескопов и вектором индукции магнитного поля с точностью  $\approx 1^\circ$ , ИСЗ должны быть оснащены 3-компонентным магнитометром.

На рис. 3 показаны рассчитанные для указанной на рис. 2, *a* ориентации ИСЗ и телескопов и выбранной эллиптической орбиты значения питч-углов осей всех телескопов в разных точках орбиты.

Как видно из рисунка, в любой точке орбиты имеется не менее 3 значений питч-углов осей телескопов, отличающихся более чем на  $10^\circ$ .

Но надо учесть, что для аппроксимации питч-углового распределения потоков захваченных частиц необходимо использовать только измерения телескопов,

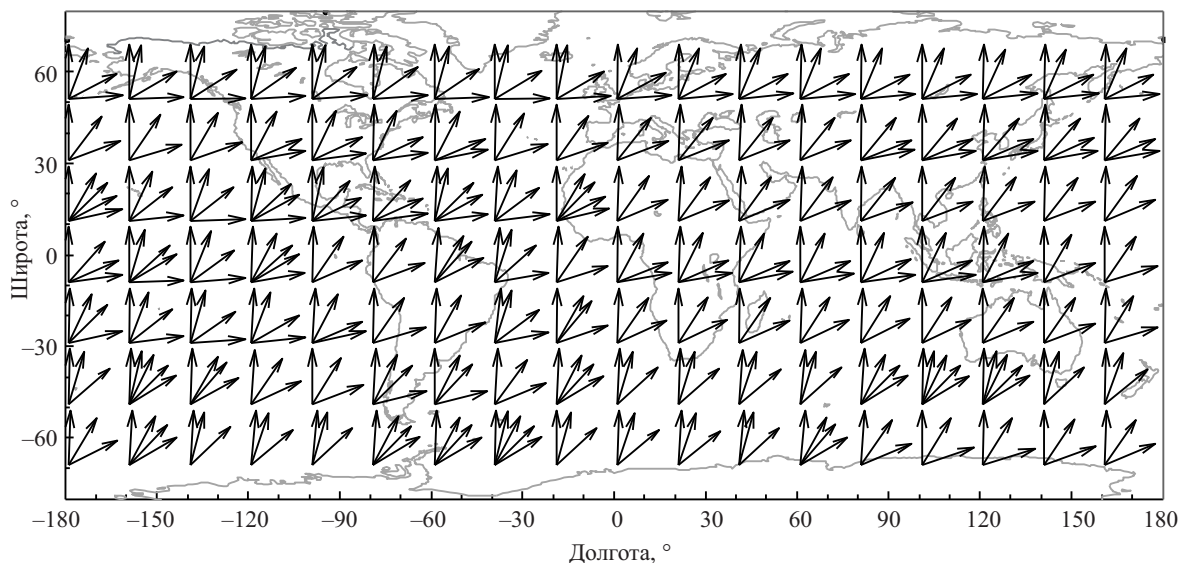


Рис. 3. Величины углов между осями телескопов и магнитной силовой линией при ориентации 1-го телескопа перпендикулярно, а 4 других — параллельно плоскости магнитного меридиана на эллиптической орбите (на восходящей части витка). Показаны только углы осей телескопов, отличающиеся более чем на  $10^\circ$

большая часть поля зрения которых не попадает в область конуса потерь. Вблизи апогея орбиты углы конуса потерь равны  $\approx 15^\circ$ ; тогда как на высотах  $< 1000$  км они составляют  $> 50^\circ$ . Для рис. 3 специально подобрана конфигурация телескопов, лежащих в плоскости магнитного меридиана (углы между осями соседних телескопов  $32, 40$  и  $32^\circ$ ) таким образом, чтобы на низких высотах их оси смотрели в область больших питч-углов. Но в некоторых точках орбиты у нас будет только 2 значения питч-углов, отличающихся более чем на  $10^\circ$ , что уменьшит точность аппроксимации питч-углового распределения.

На рис. 2, б показан другой вариант пространственной ориентации ИСЗ и телескопов: первая ось ИСЗ перпендикулярна плоскости магнитного меридиана, вторая — направлена вдоль расчетного значения вектора индукции магнитного поля, оси 4 телескопов лежат в плоскости магнитного меридиана. Угол поля зрения телескопов взят равным  $25^\circ$ .

При такой ориентации в каждой точке орбиты питч-углы осей детекторов будут одинаковы, т. е. в каждой точке можно обеспечить оптимальные питч-угловые измерения.

При этом для обеспечения связи с Землей можно выбрать такую ориентацию антенны, чтобы на средних северных широтах, где расположены российские пункты управления и приема данных со спутников, она была направлена близко к направлению в нади́р.

При указанном количестве телескопов и каналов по типам и энергиям частиц и шаге измерений  $\approx 5$  секунд объем данных измерений составит  $\leq 5$  Мбайт/сутки или  $\leq 600$  Кбайт за 1 виток рассматриваемой эллиптической орбиты. Это в принципе позволяет передавать данные через спутники Globalstar при пролете перигея орбиты либо через наземные станции УКВ-диапазона.

#### 4. УТОЧНЕНИЕ ВЫБОРА ОРБИТ И ОРИЕНТАЦИИ С УЧЕТОМ ДРУГИХ ЗАДАЧ СПУТНИКОВОЙ ГРУППИРОВКИ

Проект группировки малых спутников «Универсат-СОКРАТ» предусматривает, помимо задачи оперативного мониторинга околоземной радиации, также другие задачи:

- оперативный мониторинг космического мусора и околоземных астероидов при помощи оптических инструментов на борту ИСЗ совместно с глобальной наземной сетью мини-телескопов МГУ «МАСТЕР»;
- наблюдения транзитных световых явлений в верхней атмосфере Земли;
- наблюдения мощных гамма-всплесков во Вселенной.

Для уменьшения стоимости проекта предполагается использование небольшого числа ИСЗ и их выведение на орбиту при помощи попутного запуска.

Для задачи обнаружения и определения орбит фрагментов космического мусора и астероидов необходима возможность в любой момент времени полета с очень высокой оперативностью (десятки секунд) передавать параметры зарегистрированных оптическими инструментами на ИСЗ объектов в наземный центр обработки данных для их сравнения с базой данных известных объектов и подключения к наблюдениям наземной сети телескопов. Единственным способом передачи данных,

удовлетворяющим этому требованию, является использование низкоорбитальных систем спутниковой связи типа «Globalstar». Как следствие, для ИСЗ необходимо использовать орбиту высотой  $< 1000$  км. Также необходимо исключить направление оптических камер в сторону Солнца.

Для наблюдений в УФ-диапазоне транзитных световых явлений в атмосфере также необходима низкая орбита, ориентация ИСЗ в нади́р и пролеты над ночной полусферой Земли.

Исходя из указанных факторов, в состав проектируемой спутниковой группировки планируется включить отдельный несколько более крупный ИСЗ, несущий широкоугольные камеры/мини-телескопы и УФ/рентген/гамма-детекторы, который будет выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой  $\approx 600$  км (орбита 1 на рис. 4).

Этот ИСЗ также будет нести на борту спектрометр энергичных протонов и электронов. В силу очень больших значений углов конуса потерь ( $\geq 70^\circ$ ) на этих высотах для измерений всенаправленных потоков достаточно использовать один «телескоп», ось которого ориентирована перпендикулярно плоскости орбиты, при этом в любой точке орбиты она будет ориентирована в область питч-углов, близких к  $90^\circ$  [2]. Его измерения будут использоваться для задачи радиационного мониторинга дополнительно к измерениям многонаправленных спектрометров протонов и электронов на борту двух более легких ИСЗ, на эллиптических орбитах с высотами перигея и апогея  $\approx 600 - 700$  и  $8000$  км, наклоном  $63.4^\circ$  и аргументом перигея  $\approx 310^\circ$  (орбиты 2.1 и 2.2 на рис. 4), которые подробно обсуждались в предыдущих разделах.

Данные измерений этих трех ИСЗ при некоторых допущениях обеспечат периодичность построения картины пространственного распределения радиации во внешнем поясе менее  $\approx 45$  минут (1/2 витка низкой круговой орбиты).

В качестве альтернативы можно рассмотреть запуск одного ИСЗ с многонаправленным спектрометром протонов и электронов вместо указанной эллиптической

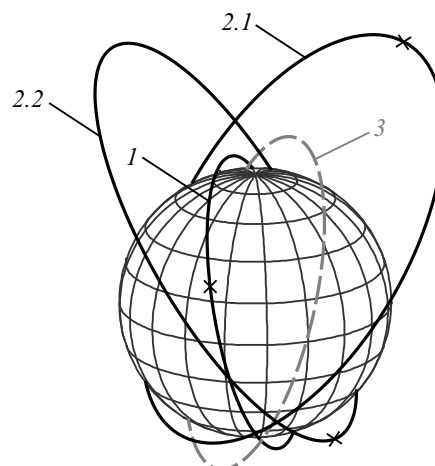


Рис. 4. Схема группировки малых спутников для мониторинга космических угроз. 1 ИСЗ на орбите 1 несет широкоугольные камеры/телескопы, УФ/рентген/гамма-детекторы, спектрометр энергичных протонов и электронов; 2 ИСЗ на орбитах 2 (либо один из них на орбите 3) — многонаправленные спектрометры энергичных протонов и электронов

орбиты с высотой апогея 8000 км на круговую орбиту высотой  $\approx 1500$  км или эллиптическую высотой 800–2000 км и наклоном  $\approx 80^\circ$  (орбита 3 на рис. 4). Для такой орбиты существует больше возможностей попутного запуска: например, вместе со спутниками связи «Гонец» на орбиту высотой 1400 км или при многоспутниковом запуске ракетами «Союз» с разгонным блоком «Фрегат». Такой ИСЗ при достаточно точных питч-угловых измерениях в принципе может самостоятельно решать задачу радиационного мониторинга для всех низких орбит  $h \leq 1500$  км (потоки для более низких высот будут рассчитываться на основе питч-угловых измерений по теореме Лиувилля).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача оперативного мониторинга околоземной радиации в рамках проекта НИИЯФ МГУ группировки малых спутников «Универсат-СОКРАТ».

Необходимость такого мониторинга обусловлена значительными (на порядки величин) вариациями потоков энергичных заряженных частиц, связанных с солнечной и геомагнитной активностью, которые не могут описываться существующими статическими моделями радиационных поясов Земли. В то же время большинство проводящихся в настоящее время спутниковых измерений дают сведения о потоках частиц лишь в ограниченной области пространства и диапазонах энергий и питч-углов.

В результате анализа различных возможных концепций измерений выбрано решение, заключающееся в запуске 2 ИСЗ на эллиптические орбиты с высотами перигея и апогея  $\approx 600 - 700$  и  $8000$  км, наклоном  $63.4^\circ$  и аргументом перигея  $\approx 310^\circ$ , с разным положением плоскостей орбит и положением спутников на орбите, которые будут осуществлять измерения энергетических спектров всенаправленных потоков энергичных протонов и электронов. Такая орбита охватывает большой диапазон L-оболочек и пересекает каждую из них на разных низких и «средних» высотах, где характер высотного хода потоков частиц различается, причем в разных точках на разных витках. Таким образом, по данным измерений за последние несколько витков может рассчитываться аппроксимация высотных ходов потоков для большого диапазона L-оболочек, тем самым строиться трехмерная картина текущего распределения потоков в значительной области околоземного пространства.

Рассмотрена задача измерения всенаправленных потоков спектрометрами энергичных протонов и электронов, которые в силу физики измерений имеют угол обзора  $\leq 60^\circ$ . Предложено использовать несколько разнонаправленных «телескопов» спектрометров частиц. Рассмотрены и проанализированы различные варианты ориентации спутников и телескопов, предусматривающие наличие активной трехосевой системы ориентации ИСЗ, с учетом углов конуса потерь частиц на разных высотах.

Также при выборе орбит были учтены другие задачи, выполняемые проектируемой спутниковой группировкой: оперативный мониторинг космического мусора и околоземных астероидов, и наблюдения детекторами разного диапазона длин волн транзитных световых явлений в верхней атмосфере и мощных гамма-всплесков во Вселенной. Для этих целей

несколько более крупный ИСЗ, несущий широкоугольные камеры/мини-телескопы и УФ/рентген/гамма-детекторы будет выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой  $\approx 600$  км. Также этот ИСЗ будет нести спектрометр энергичных частиц, направленный в область больших значений питч-углов, данные которого будут использоваться для задачи радиационного мониторинга в дополнение к измерениям ИСЗ на эллиптической орбите.

Помимо решения прикладной задачи мониторинга околоземной радиации, полученные измерения будут использоваться и для научных задач, таких как апробация и уточнение существующих и разработка новых моделей радиационных поясов, изучение динамики потоков частиц и решение проблем физики магнитосферы Земли.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России по результатам исследований в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (уникальный идентификатор № RFMEFI60717X0175).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панасюк М.И., Подзолко М.В., Ковтюх А.С. и др. // Космич. исслед. 2015. **53**, № 6. С. 461. (Panasyuk M.I., Podzolko M.V., Kovtyukh A.S. et al. // *Cosmic research*. 2015. **53**, P. 461.)
2. Панасюк М.И., Подзолко М.В., Ковтюх А.С. и др. // Космич. исслед. 2017. **55**, № 2. С. 85. (Panasyuk M.I., Podzolko M.V., Kovtyukh A.S. et al. // *Cosmic Research*. 2017. **55**, P. 85.)
3. Sawyer D.M., Vette J.I. AP-8 trapped proton environment for solar maximum and solar minimum // NSSDC/WDC-A-R&S 76-06, 1979.
4. Vette J.I. The AE-8 trapped electron environment // NSSDC/WDC-A-R&S 1-24, 1991.
5. Ginot G.P., O'Brien T.P., Huston S.L. et al. // *Space Sci. Rev.* 2013. **179**, N 1-4. P. 579.
6. Панасюк М.И., Сосновец Э.Н. и др. Естественные радиационные пояса Земли // В кн. «Модель космоса». М.: Изд. МГУ. 1983. **3**. С. 66.
7. Панасюк М.И., Сосновец Э.Н. Интенсивности электронов и протонов в зависимости от L и В // В кн. «Модель космоса». М.: Изд. МГУ. 1983. **3**. С. 421.
8. Гецелев И.В., Гусев А.А., Дарчиева Л.А. и др. Модель пространственно-энергетического распределения потоков захваченных частиц (протонов и электронов) в радиационных поясах Земли. М.: Изд. МГУ. 1991.
9. Гецелев И.В., Сосновец Э.Н., Ковтюх А.С. и др. // Космич. исслед. 2005. **43**, № 4, С. 243. (Getselev I.V., Sosnovets E.N., Kovtyukh A.S. et al. // *Cosmic Research*. 2005. **43**, P. 243.)
10. Мягкова И.Н., Богомолов А.В., Шугай Ю.С. // *Вестник Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2010. **№ 3**. С. 77. (Myagkova I.N., Bogomolov A.V., Shugai Yu.S. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **65**, N 3. P. 234.)
11. Тверская Л.В., Балашов С.В., Веденькин Н.Н. и др. // Геомагнетизм и Аэрономия. 2012. **52**, № 6. С. 779. (Tverskaya L.V., Balashov S.V., Veden'kin N.N. et al. // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012. **52**, P. 779.)
12. Богомолов А.В., Мягкова И.Н., Калегаев В.В. и др. // Космич. исслед. 2017. **55**, № 6. С. 459. (Bogomolov A.V., Myagkova I.N., Kalegaev V.V. et al. // *Cosmic Research*. 2017. **55**, P. 459.)

13. *Panasuyk M.I., Kalegaev V.V., Myagkova I.N. et al. // Cosmic Research. 2017. 55, N 6. P. 464.*
14. *Vernov S.N., Gortchakov E.V., Kuznetsov S.N. et al. Earth's radiation belt // Proc. 9th International Cosmic Ray Conference, London, UK, September 1965. 1. P. 40.*
15. *Горчаков Е.В., Афанасьев В.Г., Афанасьев К.Г. и др. // Известия вузов МВ и ССО СССР. Физика. 1987. № 10. С. 69.*
16. *Mullen E. G., Gussenhoven M. S., Ray K., Violet M. A. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1991. 38. P. 1713.*
17. *Лозачев Ю.И., Лазутин Л.Л. //Космич. исслед. 2012. 50, № 2. С. 122. (Logachev Yu. I., Lazutin L. L. // Cosmic Research. 2012. P. 116.)*
18. *Nymmik R. A. // Radiation Measurements. 1999. 30, N 3. P. 287.*
19. *ISO/DTR 18147. Space environment (natural and artificial) – The method of the solar energetic protons fluences and peak fluxes determination. 2013.*
20. *Kraft S., Lupi A., Luntama J.-P. ESA's Distributed Space Weather Sensor System (D3S) utilizing hosted payloads for operational space weather monitoring // Proc. 67th International Astronautical Congress, Guadalajara, Mexico, 26–30 September 2016, p. IAC-16, D1, 7,1, x35329.*
21. *Roederer J. G. Dynamics of Geomagnetically Trapped Radiation. Springer-Verlag, 1970.*
22. *Kosik J. C. // Annales Geophysicae. 2007. 25, N 12. P. 2627.*
23. *Fox N., Burch J. L. The Van Allen Probes mission. Springer, 2014.*
24. *Ныммик Р.А., Панасюк М.И., Петрухин В.В., Юшков Б.Ю. // Космич. исслед. 2009. 47, № 3. С. 213 (Nymmik R. A., Panasyuk M. I., Petrukhin V. V., Yushkov B. Yu. // Cosmic Research. 2009. P. 191.)*
25. *Власова Н.А., Гинзбург Е.А., Калегаяев В.В. и др. // Космич. исслед. 2013. 51, № 5. С. 355. (Vlasova N. A., Ginzburg E. A., Kalegaev V. V. et al. // Cosmic Research. 2013. P. 319.)*
26. *Золотарев И.А., Новиков Л.С., Оседло В.И. и др. // Перспективные материалы. 2016. № 11. С. 16. (Zolotarev I. A., Novikov L. S., Osedlo V. I. et al. // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. 8, N 2. P. 222.)*
27. *Кузнецов Н.В., Николаева Н.И. // Космич. исслед. 2012. 50, № 1. С. 15. (Kuznetsov N. V., Nikolayeva N. I. // Cosmic Research. 2012. P. 13.)*

### Multi-Satellite Operative Monitoring of Near-Earth Radiation within the Universat-SOCRAT Project

**M. I. Panasyuk<sup>1</sup>, M. V. Podzolko<sup>1,a</sup>, V. V. Kalegaev<sup>1</sup>, A. S. Kovtyh<sup>1</sup>, N. V. Kuznetsov<sup>1</sup>, V. I. Osedlo<sup>1</sup>, V. L. Petrov<sup>1</sup>, E. P. Popova<sup>2</sup>, A. Yu. Poroykov<sup>1</sup>, I. A. Rubinstein<sup>1</sup>, S. I. Svertilov<sup>1</sup>, V. I. Tulupov<sup>1</sup>, I. V. Yashin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*

<sup>2</sup>*The Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS. Moscow 123242, Russia.*

*E-mail: <sup>a</sup>spacerad@mail.ru.*

In this paper the task of the operative monitoring of radiation conditions in the near-Earth space is considered as a part of a project Universat-SOCRAT of the system of small satellites, which is being developed at Moscow State University. The scientific approach to the realization of this task is determined. The choice of the satellite orbits and spatial orientation and the configuration of energetic charged particle detectors is validated taking into account other tasks performed by the projected satellite system.

*Keywords:* small spacecraft, satellite orbits, Earth radiation belts, spectrometer of protons and electrons, altitude dependency, pitch-angle distribution.

PACS 94.30.Xy, 94.80.+g.

*Received 26 July 2018.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2018. 73, No. 6. Pp. 687–695.*

#### Сведения об авторах

1. Панасюк Михаил Игоревич — доктор физ.-мат. наук, профессор, директор НИИЯФ МГУ; тел.: (495) 939-18-18, e-mail: [panasyuk@sinp.msu.ru](mailto:panasyuk@sinp.msu.ru).
2. Подзолко Михаил Владимирович — науч. сотрудник, тел.: (495) 939-52-33, e-mail: [spacerad@mail.ru](mailto:spacerad@mail.ru).
3. Калегаяев Владимир Владимирович — доктор физ.-мат. наук, зав. лаб.; тел.: (495) 939-19-15, e-mail: [klg@dec1.sinp.msu.ru](mailto:klg@dec1.sinp.msu.ru).
4. Ковтюх Александр Семенович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел. (495) 939-28-10, e-mail: [kovtyukhas@mail.ru](mailto:kovtyukhas@mail.ru).
5. Кузнецов Николай Викторович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 932-88-61, e-mail: [nvk@srd.sinp.msu.ru](mailto:nvk@srd.sinp.msu.ru).
6. Оседло Владислав Ильич — канд. физ.-мат. наук, зам. директора; тел.: (495) 939-10-85, e-mail: [osedlo@mail.ru](mailto:osedlo@mail.ru).
7. Петров Василий Львович — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-50-50, e-mail: [vas.i.nas@gmail.com](mailto:vas.i.nas@gmail.com).
8. Попова Елена Петровна — канд. физ.-мат. наук; тел.: (495) 932-88-61, e-mail: [popovaelp@mail.ru](mailto:popovaelp@mail.ru).
9. Поройков Александр Юрьевич — вед. электроник; тел.: (495) 939-49-47, e-mail: [aporoykov@mail.ru](mailto:aporoykov@mail.ru).
10. Рубинштейн Илья Александрович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-18-20, e-mail: [iarubinst@mail.ru](mailto:iarubinst@mail.ru).
11. Свртилов Сергей Игоревич — физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-51-60, e-mail: [sis@coronas.ru](mailto:sis@coronas.ru).
12. Тулулов Владимир Иванович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-51-01, e-mail: [ikt0840@mail.ru](mailto:ikt0840@mail.ru).
13. Яшин Иван Васильевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-57-31, e-mail: [ivn@eas.sinp.msu.ru](mailto:ivn@eas.sinp.msu.ru).