

ИОНОСФЕРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА СПУТНИКАХ «МЕТЕОР»

В.Н. Пономарёв
(ОАО «НИИЭМ»)

Рассматривается история выявления элемента полярной ионосферы, получившего название «поляризационный джет» (PJ). Дается обзор публикаций, посвященных вопросу выявления и экспериментального подтверждения существования поляризационного джета.

Ключевые слова: КА «Метеор», поляризационный джет, полярная ионосфера, авроральные явления, электрическое поле, плазма, ионный датчик курса.

Апрель 1962 г. Мы, несколько выпускников физического факультета МГУ, окончивших только что аспирантуру, приехали в Истру знакомиться с филиалом Всесоюзного научно-исследовательского института электромеханики (ФВНИИЭМ), куда были направлены на работу.

Мы вышли на привокзальную площадь. Оказалось, что Истра – это небольшой город, больше похожий на сельский посёлок. Везде бревенчатые домики, окружённые садами с роскошными кустами сирени. С левой стороны площадь ограничивал ряд деревянных торговых палаток. Выпили по стакану чая, расспросили, где находится ФВНИИЭМ. Узнали, что к нему надо было проехать ещё остановку – к станции Новоиерусалимская. Здесь мы и нашли наше предприятие-«филиал», как все называли его в Истре. Филиал – это два недавно построенных административно-технических четырёхэтажных корпуса, между которыми расположились несколько производственных зданий – все из серого кирпича.

Нас принял заместитель директора по научной работе А.Л. Родин. Желая заполучить нас в качестве своих сотрудников, он красочно рисовал перед нами будущее предприятия. Мы расстались с ним с условием, что те из нас, кто не передумает и согласится работать в Истре, придут вновь в назначенный день на приём к А.Г. Иосифьяну – основателю ВНИИЭМ и его директору.

И вот мы снова в Истре. Принимал нас Иосифьян по одному. Наступила моя очередь. Переговорив со мной и расспросив, чем я занимался в аспирантуре, он заглянул в моё личное дело. Из него он узнал, что у меня уже имеется кое-какой стаж научной работы (будучи аспирантом, я работал на полставки младшим научным сотрудником при кафедре физической электроники.) Это ему, по-видимому, понравилось, и он назначил меня на должность старшего научного сотрудника.

Определили нас в физический отдел, начальником которого оказался мужчина в очках, заядлый курильщик и энтузиаст физико-технических дел В.И. Докучаев. В отделе мы встретили много молодых ребят, тоже выпускников нашего физического факультета.

В это время ВНИИЭМ разрабатывал спутник «Омега», который по существу являлся прототипом спутника «Метеор». Для спутника «Омега» ФВНИИЭМ проектировал экспериментальный образец плазменного двигателя. Поскольку он не входил в состав штатной аппаратуры, его все называли «пассажиром».

Наши коллеги-физики, пришедшие раньше, были уже заняты в проекте. Все наиболее интересные физические задачи были распределены между ними, и нам пришлось некоторое время выполнять отдельные поручения «начальства».

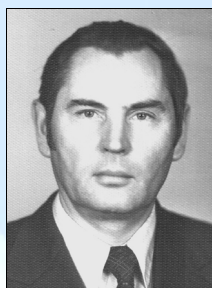
Памятна работа над отчётом, задачей которого было проанализировать все известные способы ориентации спутника. Наиболее интересным в отчёте получился раздел, посвящённый анализу электромагнитных силовых органов системы ориентации спутника. Идея силового взаимодействия геомагнитного поля и токовой катушки была принесена во ВНИИЭМ К.П. Станюковичем и М.И. Киселёвым. По их инициативе и был выпущен этот отчёт. В отчёте пришли к выводу, что непосредственное применение крутящего электромагнитного момента неэффективно из-за неравномерности геомагнитного поля. Отмечено было, что целесообразнее использовать этот момент в качестве опорного при разрядке маховиков гироорбитанта. Сотрудником ВНИИЭМ Р.И. Бихманом был предложен реальный вариант использования токовой катушки для системы разрядки на КА «Метеор». На это устройство Р.И. Бихман и К.П. Станюкович получили авторское свидетельство. Система магнитной разрядки оказалась настолько удачной, что она используется до сих пор.



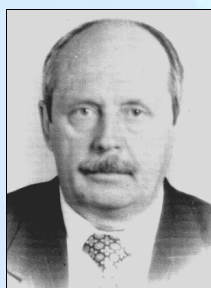
К.Н. Мкртчян



Р.С. Салихов



В.Н. Пономарёв



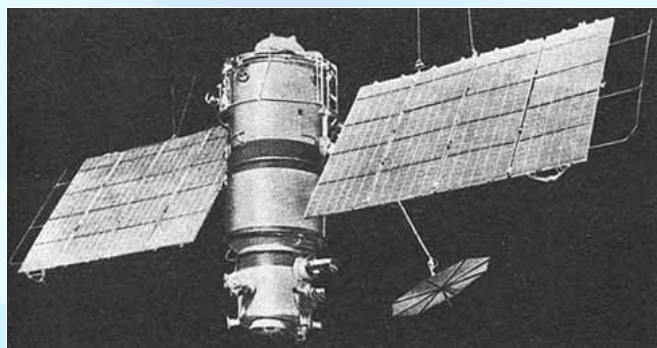
В.В. Зосимов



А.Г. Зосимова

Имея запас свободного времени, невольно пришлось настойчиво думать о задаче, над которой можно было бы с удовлетворением и пользой работать. Актуальной была задача найти другие возможные способы ориентации. Удачные идеи, как говорят, витают в воздухе.

Пришла мысль использовать для этой цели пару ионных трубок, улавливающих ионы, набегающие на быстро движущийся спутник. Разность токов в коллекторах двух трубок, поставленных под углом по отно-



Общий вид и компоновка метеорологических КА «Космос-122» и «Космос-144». На КА «Космос-184» ионный датчик устанавливался на левой боковой стороне контейнера посредством коленообразного патрубка

шению к друг другу, будет мерой угла отклонения оси симметрии трубок от направления полёта спутника, т. е. курса. Эта идея была доложена «руководству» отдела. В.И. Докучаев и К.Н. Мкртчян (первый директор ФВНИИЭМ) довели её до А.Г. Иосифьяна. Он одобрил эту идею и предложил немедленно приступить к разработке прибора.

При подготовке технической записки был проведён обзор литературы, и выяснилось, что идея такого прибора описана в ряде работ и, более того, осуществлена в фирме Королёва на КА «Союз» (прибор подобного назначения под названием «Напор» разрабатывался также в одной из Ленинградских фирм). Мы потом познакомились с королёвским прибором. Один к одному их прибор применить на КА «Метеор» было невозможно – всё равно нужны были большие доработки.

Иосифьян дал указание: для разработки «нашего» прибора организовать специальную лабораторию. В её состав вошли: В.Н. Пономарёв – начальник лаборатории, Ю.М. Трифонов, В.В. Зосимов, А.Г. Зосимова и др. Разработка приёмной части прибора – блока ионных трубок была поручена конструкторам: В.П. Лебедеву и Е.А. Погорелой. Блок электроники разработали во ВНИИЭМ В.П. Фока и В.С. Федотов. Свой прибор мы назвали – ионный датчик курса (ИДК).

Основу приёмного блока составляют четыре ионные трубки, установленные попарно под углом друг относительно друга. Одна пара устанавливалась в плоскости орбиты, другая – в плоскости касательной к траектории полёта. В качестве ионных трубок использовались радиочастотные масс-спектрометры, разработанные Ленинградским СКБ аналитического приборостроения. Первый вариант прибора был сконструирован, исходя из релейного способа управления. Этот вариант прибора был установлен на КА «Космос-100» (17.12.1965 г.). Для КА «Космос-122», «Космос-144», «Космос-156» и «Космос-184», образовавших первую экспериментальную метеорологическую систему «Метеор», был разработан усовершенствованный вариант ИДК, отличающийся от предыдущего линейным (пропорциональным) выходом управляющего сигнала. Разработчиком линейного варианта электронного блока был В.С. Самборский при участии Ф.Б. Довжика.

Физическое обоснование прибора и методики эксперимента, разработка испытательного стенда, имитирующего условия разрежённой плазмы, выполнены группой физиков ФВНИИЭМ: В.Н. Пономарёвым, Ю.М. Трифоновым, В.В. Зосимовым, А.Г. Зосимовой, В.П. Московкиным.



Спутник «Космос-122», запущенный 25 июня 1966 г., имеет две системы ориентации. Одна система обеспечивает ориентацию цилиндрического центрального тела с установленными на нём телевизионными камерами и инфракрасными датчиками по вертикали к Земле, другая постоянно ориентирует две большие панели солнечных батарей на Солнце, чтобы вырабатывать максимальную электроэнергию для питания бортовых систем.

Конструктивно система ориентации спутника была выполнена как трёхосная маховиковая система.

На лобовой поверхности установлен ионный датчик (виден слева в виде трезубца). Четвёртая трубка из-за выбранного ракурса мало заметна.

Надо отдать должное мастерству В.С. Самборского, который на элементной базе тех лет, оперируя токами $10^{-9} - 10^{-7}$ А, разработал надёжный, точный прибор. Первый образец линейного ИДК был испытан на КА «Космос-122» (25.06.1966 г.). В первые часы полёта, когда спутник входил в режим ориентации, проводилась натурная калибровка прибора. При произвольном вращении КА ориентация осей в пространстве определялась по показаниям солнечного датчика, что позволило определить угловую характеристику прибора, которая оказалась близка к расчётной. На заключительной стадии процесса ориентации, когда спутник ещё вращался вокруг оси Z, по двум засечкам 0-показаний прибора определялась угловая скорость, что давало возможность более точно определить крутизну характеристики и токовую чувствительность. Поскольку точность измерений имела принципиальное значение, в дальнейшем была проведена оценка возможного влияния на точность затеняющих конструкций, таких как солнечные батареи, зонт телевизионной антенны.

Полученная с КА «Космос-122» информация подтвердила уже известный из опыта полётов КА «Союз» факт, что основная угловая погрешность прибора связана с коротацией ионосферы. Широтный ход этой погрешности (максимум – у экватора, минимум – в приполярных областях) весьма напоминает широтный ход горизонтальной составляющей геомагнитного поля. Было предложено компенсировать часть коротационной погрешности сигналом с магнитометра, измеряющего горизонтальную составляющую геомагнитного поля. За счёт этого удалось бы снизить угловую погрешность прибора до $1 - 1,5^\circ$.

Однако, начиная с КА «Космос-144» (28.02.1967 г.), запуски стали осуществляться со стартовой площадки в Плесецке. Угол наклона плоскости орбиты увеличился с 65° до $81,2^\circ$. При обработке информации с КА «Космос-156» (27.07.1967 г.) в области полярных шапок

обнаружились большие, часто меняющие знак, отклонения выходного сигнала. Некоторые записи сигнала УОР (угол отклонения рыскания) при пролёте спутника над полярными шапками очень напоминали вид записей продольного электрического поля в экспериментах на КА OGO-6, INJUN-5. Это указывало на то, что в полярных областях существуют интенсивные течения плазмы – $E \times B$ дрейф ионов. Так как вариации сигнала УОР, выраженные в угловых единицах, составляли 5 и более град., то стало ясно, что из-за этого наш прибор как датчик курса непригоден.

К этому времени на КА «Метеор» была полностью отлажена система ориентации на основе строителя местной (инфракрасной) вертикали и гироорбитанта.

Появилась возможность использовать ИДК в качестве измерителя скорости дрейфа ионов.

Это побудило добиваться права устанавливать наш прибор на следующих спутниках в качестве исследовательского инструмента. Благодаря поддержке главного конструктора системы «Метеор» А.Г. Иосифьяна такое право было получено.

На КА «Космос-184» (25.10.1967 г.), строго ориентированном по трём осям, впервые были проведены прямые измерения скорости упорядоченного движения ионов. Понимая научную значимость полученных результатов, я решил во что бы то ни стало добиться разрешения на публикацию их в открытой печати. Мои доводы, что результаты уникальны, что объект исследования не является монополярным, и рано или поздно это будет сделано другими, убедили, и публикацию мне разрешили.

Несколько статей с описанием методики эксперимента и первых результатов по дрейфу ионов и широтному распределению концентрации ионов были опубликованы в журнале «Космические исследования».

Мой расчёт, что эти работы заинтересуют специалистов по ионосферным проблемам, оправдался. Со мной связался по телефону М.Н. Фаткуллин, и мы встретились с ним.

Он задал несколько вопросов, посетовал, что результаты не «привязаны» к геомагнитным координатам. К моему разочарованию продолжения эта встреча не имела.

Но скоро я получил письмо из ИКИ от Ю.И. Гальперина и с большим удовлетворением прочитал его. Я понял, что полученными результатами заинтересовался крупный специалист с многолетним опытом работы в области авроральных явлений. Естественно, я принял все предложения Гальперина.

Первая встреча произошла на станции метро «Профсоюзная». Юрий Ильич произвёл на меня самое благоприятное впечатление, которое со временем только закрепилось.

Это был среднего роста, приятной наружности молодой мужчина, сразу расположивший к себе своей естественностью, отсутствием всякого налёта превосходства.

Пока мы подходили к ИКИ, между нами шла ознакомительная беседа.

В ИКИ, который тогда ещё достраивался, Юрий Ильич рассказал о планах на будущее, показал корпус БЭСМ-4. В лаборатории, за его рабочим столом, я показал Юрию Ильичу записи телеметрической информации (каждый виток на бумажной ленте метровой длины). Мне был предоставлен образец расчёта геомагнитных параметров – целый свиток бумажной ленты.

Началась кропотливая, ручная работа по привязке расчётных величин UT , MLT , Λ к спутниковым данным. Чуть позже к этой работе была привлечена А.Г. Зосимова, ставшая к этому времени аспиранткой Юрия Ильича. Она проделала большую работу, обрабатывая первичные результаты и снабжая их сравнительными данными зарубежных экспериментов.

Юрий Ильич сразу оценил значимость полученных результатов, их приоритетность, поэтому торопился обнародовать их как можно скорее. Первая наша совместная работа появилась в виде препринта, а затем в виде статьи. Брошюру (препринт) Юрий Ильич распространил среди своих коллег, и на неё в скором времени появились отклики.

Юрий Ильич был широко эрудированным и сведущим в вопросах полярной ионосферы, причём сведения он черпал не только из своего опыта, из публикаций, которые он внимательно отслеживал, но и непосредственно от своих зарубежных коллег, с которыми, благодаря своей общительности, поддерживал тесные связи. К

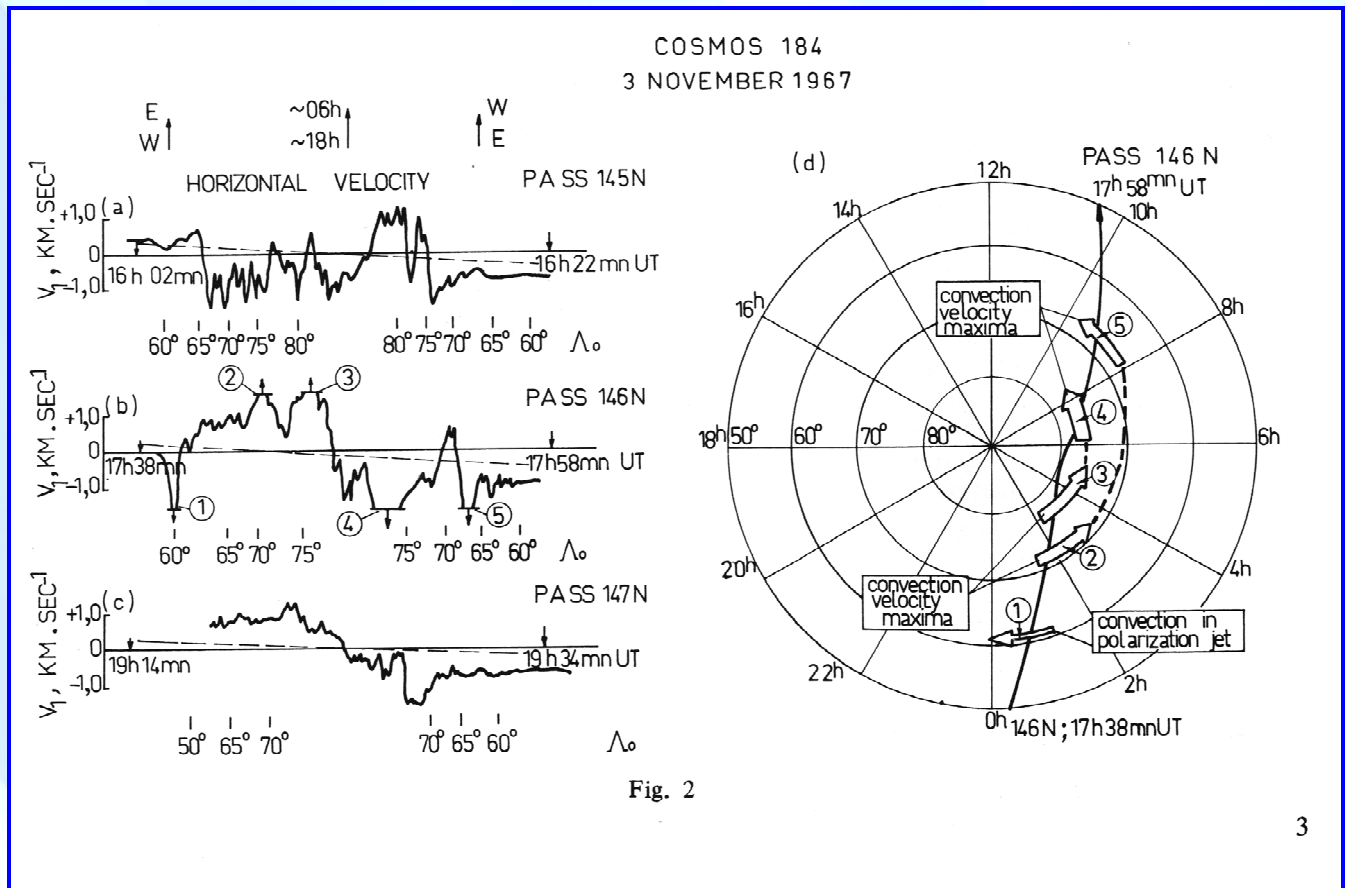
тому времени в среде учёных имелось мнение, что электрическое поле, возникающее в хвостовой части магнитосферы и проектирующееся хорошо проводящими магнитными силовыми трубками на субавроральную область ионосферы, должно вызывать в ней сильное течение (дрейф) в западном направлении. Юрий Ильич предполагал увидеть нечто подобное в нашем эксперименте, и, когда мы разложили на столе подборку записей по пролётам за 3 ноября, уже привязанных к геомагнитным координатам, Юрий Ильич, показав на узкий выброс в районе 60 град. инвариантной магнитной широты, воскликнул: «Это – поляризационный джет!».

На основе этих результатов были написаны две работы, одна из которых опубликована в журнале «Космические исследования», 1973, т. 11, с. 283, другая – в «Annales Geophysicae», 1974, vol. 30, p. 1 – 7.

Это те работы, в которых впервые путем прямых измерений выявлен элемент полярной ионосферы, названный Ю.И. Гальпериним «поляризационный джет» (PJ). PJ – это узкая сверхзвуковая полоса (струя, поток, течение, дрейф) плазмы, движущейся в западном направлении в области ионосферной проекции плазмапаузы, наиболее явно проявляющаяся во время магнитных бурь. Это наиболее употребляемое определение, хотя оно может включать и другие сопутствующие явления или акцентировать другие факторы, например, электрическое поле, возбуждающее движение плазмы. В ионосфере существование поляризационного джета приводит к целому ряду резких изменений, создающих сильные плазменные неоднородности, которые хорошо регистрируются с поверхности Земли с помощью ионозондов и сильно нарушают распространение радиоволн, т. е. влияют на космическую погоду.

На с. 33 воспроизведена страница из журнала «Annales Geophysicae», где отмечен первый случай регистрации поляризационного джета (кружок с цифрой 1).

Спустя несколько лет явление поляризационного джета было подтверждено в экспериментах на спутниках Explorer и приобрело новое название – SAID (sub-auroral ion drift). В этих экспериментах использовался планарный измеритель ионного дрейфа с цифровой обработкой сигнала. Наряду с терминами PJ, SAID часто используется термин SAPS (sub-auroral polarization stream), который ввели Foster и Burke. Его цель – оттенить тот факт, что в более спокойные геомагнитные условия PJ/SAID существует в виде более широкого и менее интенсивного потока плазмы. Взаимоотношение между этими тремя названиями выражено так:



3

Первый случай регистрации поляризационного джета

• Polarization Jet (PJ) – term used by Galperin (1973) to describe narrow, intense poleward-directed electric field structures observed just equatorward of the nighttime auroral region by Soviet spacecraft;

• Sub-Auroral Ion Drift (SAID) – term introduced by Spiro et al. (1978) to describe essentially the same phenomena on the basis of Atmosphere Explorer ion drift measurements;

• Sub-Auroral Polarization Stream (SAPS) – term introduced by John Foster to include somewhat broader and less intense regions of sub-auroral, poleward-directed electric field (здесь сделан акцент на электрическое поле как на причину движения плазмы).

Более 30 лет эта структура широко изучалась как со спутников, так и наземными средствами. При описании этого явления и ему сопутствующих учёными ведущих стран мира употребляются и другие названия, такие как, например: SAEF (sub-auroral electric field), характеризующее именно электрическое поле в этой структуре; AWFC – auroral westward flow channel; SAPS – Sub-Auroral Positive Stream; SARAS – sub-storm-associated radar auroral surges; DS-drift spike.

Количественное описание формирования и развития PJ/SAID можно найти во многих работах.

В дальнейшем, используя опыт работы над ионным датчиком, испытательный стенд, имитирующий условия разреженной плазмы, в отделе (начальник Г.А. Аватинян, заведующий лаборатории Ю.П. Рылов) группой сотрудников (В.Н. Пономарёвым, И.А. Перковым, В.Ф. Мосалевым, Г.В. Ивановым) совместно с сотрудниками Института прикладной геофизики (Ю.А. Романовским, Л.М. Погуляевским) был модернизирован, испытан, откалиброван и поставлен на борт спутника «Метеор» один из вариантов масспектрометра, предоставленного ИПГ. На спутнике «Метеор», запущенном 07.04.1976 г. была получена обширная информация по распределению ксенона, истекающего из ионного двигателя коррекции орбиты, а также ионов кислорода и азота ионосферы. Все исполнители этой работы были молоды, работали азартно с большой самоотдачей, так что, несмотря на сжатый срок, отведённый на работу (10 месяцев!), она была успешно выполнена. Осуществление этого эксперимента стало возможным благодаря поддержке А.Г. Иосифьяна, его заместителя Ю.В. Трифонова и Г.А. Аватиняна.

В середине 70-х гг. XX века по случаю 1300-летия Болгарии правительством НРБ было решено ознаменовать эту дату запуском собственного спутника, задачей которого ставилось исследование физических свойств околоземного пространства. С советской стороны участником этих исследований стал ИКИ АН СССР. Базовым аппаратом для размещения научной аппаратуры болгарских учёных был выбран метеорологический спутник «Метеор». Он оказался наиболее подходящим для выполнения поставленной задачи, так как имел полярную орбиту и жёсткую трёхосную ориентацию.

Главный конструктор «Метеора» А.Г. Иосифьян предложил Истринскому филиалу ВНИИЭМ переоборудовать один из образцов спутника под задачу болгарских учёных.

Общее руководство этой работой было возложено на главного конструктора филиала В.И. Адасько, ответственным отделом-исполнителем стал отдел, возглавляемый Р.С. Салиховым.

Общие вопросы по научной аппаратуре курировали Ю.М. Трифонов и В.В. Зосимов. Отдельные приборы вели А.Г. Зосимова, Г.В. Охматовский, Э.Ю. Бронников, А.К. Нурмухамедов, В.В. Слукин.

Запуск спутника был осуществлён 07.08.1981 г. В список запусков КА он вошёл под названием «Интеркосмос – Болгария-1300». Активная работа спутника продолжалась около двух лет. За это время была собрана информация, пополнившая, в частности, сведения о механизме воздействия потока солнечной плазмы на магнитосферу и ионосферу Земли. Почти в то же время (03.08.1981 г.) был запущен американский спутник «Dynamics Explorer-2», оснащённый аналоговой аппаратурой. Координированная работа этих двух спутников позволила получить более достоверные характеристики изучавшихся ионосферных явлений.

Разработка метеорологических спутников «Метеор» высветила лучшие качества нашей инженерно-конструкторской школы. Его создание – результат самоотверженного труда многочисленного отряда учёных, инженеров, рабочих ВНИИЭМ и его филиала. Невозможно перечислить всех участников этого проекта. Однако каждый, кто участвовал в этой работе, с полным правом мог бы сказать: «Я внёс незаменимый вклад в эту работу».

Поступила в редакцию 01.03.2011

Виктор Николаевич Пономарёв, канд. физ.-мат. наук, ведущий научн. сотрудник,
т. 8-496-31-30-046, e-mail: vicnik35@mail.ru.