
**ПАРАМЕТРЫ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ТЕЛЕСКОПЕ АЗТ-33ИК,
ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В АКТИВНОМ КОСМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ
«РАДАР–ПРОГРЕСС»**

**PARAMETERS OF OPTICAL SIGNALS REGISTERED WITH THE AZT-33IK
TELESCOPE IN ACTIVE RADAR–PROGRESS SPACE EXPERIMENT**

М.В. Еселевич*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, mesel@iszf.irk.ru***В.В. Хахинов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, khakhin@iszf.irk.ru***Е.В. Клунко***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, eklunko@gmail.com***M.V. Eselevich***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, mesel@iszf.irk.ru***V.V. Khakhinov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, khakhin@iszf.irk.ru***E.V. Klunko***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, eklunko@gmail.com*

Аннотация. При проведении активного космического эксперимента «Радар–Прогресс» с помощью оптического телескопа АЗТ-33ИК Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН регистрировались изображения транспортных грузовых кораблей серии «Прогресс» и области пространства вокруг них. Во время включения двигательной установки и после ее выключения в процессе продувки топливной системы были получены изображения струй выхлопных газов и топливных струй, сопровождавших эти процессы. В разных сеансах эксперимента ориентация «Прогрессов» относительно телескопа была различной, что позволило определить некоторые параметры наблюдаемых явлений. Полученные параметры позволяют определить момент включения двигательных установок, оценить скорость истечения струй и, при необходимости, контролировать геометрию космического эксперимента. В работе приведены обобщенные характеристики и параметры оптических сигналов от струй, измеренные в данных экспериментах.

Ключевые слова: активный космический эксперимент, оптический сигнал, космический аппарат, низкая орбита, телескопические наблюдения.

Abstract. Images of Progress cargo spacecraft (PCS) and areas around them were captured by the AZT-33IK optical telescope (Sayan Observatory of ISTP SB RAS) during sessions of the active Radar–Progress space experiment. We took images of exhaust and fuel jets when propulsion systems worked and after they were cut off, during fuel system purging. In different sessions of the experiment, PCS had different orientations relative to the telescope, thus allowing us to find some parameters of the observed phenomena. These parameters make it possible to determine instants of engine ignitions, to estimate velocities of the jets, and, if necessary, to control the geometry of the space experiment. The paper reports common features of optical signals from jets measured in these experiments.

Keywords: active space experiment, optical signal, spacecraft, low orbit, telescopic observations.

ВВЕДЕНИЕ

Активный космический эксперимент (КЭ) «Радар–Прогресс» был направлен в первую очередь на исследование процессов в ионосферной плазме, вызванных контролируемым включением двигательных установок на борту транспортного грузового корабля (ТГК) «Прогресс» [Хахинов и др., 2012, 2013]. При этом ведущая роль в диагностике состояния ионосферы отводилась Иркутскому радару некогерентного рассеяния (ИРНР) ИСЗФ СО РАН [Лебедев и др., 2008; Potekhin et al., 2009].

В то же время при включении двигателей могут проявляться другие эффекты, которые недоступны для радарных измерений. Очевидной является попытка получить оптическое изображение ТГК во время экс-

перимента. Движение космического аппарата происходит по низкой орбите на удалении около 300–400 км от поверхности Земли — на таком расстоянии имеется возможность получить достаточно детальное изображение если не самого космического аппарата (КА), то области вокруг КА, связанной с выбросом вещества в процессе работы двигателей.

Для анализа орбиты, а также технического состояния КА часто используются телескопические наблюдения [Korobtsev et al., 2011]. В таких измерениях, как правило, отраженное от КА солнечное излучение регистрируется как полученное от точечного источника, т. е. анализируется изменение блеска космического аппарата.

При использовании специальных адаптивных оптических систем возможно получение детальных

изображений космических аппаратов на низких орбитах [Галкин и др., 2008], а применение методов спекл-интерферометрии в сочетании с достаточно крупным инструментом позволяет получить изображение КА и на геостационарной орбите [Алешин и др., 2011].

В данной работе не ставилась задача получить изображение ТГК «Прогресс» — это невозможно осуществить с имеющимися средствами наблюдений. Предполагалось зарегистрировать момент включения двигательной установки, получить изображения струй, выброс которых сопровождает работу двигателя, занимающих область, существенно превышающую размеры самого космического аппарата. Планировалось измерить параметры струй, исследовать их динамику и взаимодействие с окружающей средой.

Поставленная задача была реализована только частично. Оказалось, что оптический сигнал от струи газа при работе двигательной установки достаточно слабый — на пределе чувствительности системы регистрации. Существенным ограничением стала и зависимость от погодных условий. Продолжительность космического эксперимента не превышает нескольких минут, и, хотя сеансы наблюдений планировались из условий наилучшей видимости ТГК «Прогресс» радаром и другими пунктами наблюдений, погодные условия в момент их проведения могли быть далеко не идеальными. В отдельных случаях оптические изображения не были зарегистрированы в течение эксперимента по техническим причинам.

Тем не менее в нескольких удачных сеансах наблюдений были получены оптические изображения струй во время и после включения двигателей на ТГК «Прогресс». Описание аппаратуры и методик, с помощью которых проводились оптические наблюдения ТГК «Прогресс» во время сеансов КЭ «Радар–Прогресс», приведено в [Клунко и др., 2016]. Обобщенные характеристики и параметры оптических сигналов от струй, измеренные в этих экспериментах, приводятся в данной работе.

ТИПЫ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Уже первые оптические измерения, проведенные во время КЭ, показали, что можно выделить два сильно различающихся типа оптических сигналов, регистрируемых во время эксперимента.

Во всех экспериментах отсчет времени привязывался к моменту включения сближающе-корректирующего двигателя (СКД) на борту ТГК «Прогресс». Длительность работы двигателя изменялась в разных сеансах и составляла примерно 7–8 с. На рис. 1 приведена последовательность изображений, полученных с помощью широкоугольной оптоэлектронной системы (параметры системы приведены в [Клунко и др., 2016]) во время включения СКД в сеансе наблюдений 01.09.2010. Под каждым изображением указана разность $T-T_0$ (в секундах) между моментом начала экспозиции и моментом включения СКД. Изображение самого ТГК пересвечено и выглядит как яркое пятно вблизи центра

кадра. Тонкие наклонные линии на изображениях — треки звезд. На рис. 1 видно, что, начиная с момента включения СКД, регистрируется очень слабый оптический сигнал в виде слабоконтрастной светящейся области сверху от изображения ТГК. Сигнал быстро ослабевает, и время регистрации этой области не превышает $\approx 1-1.5$ с, тогда как длительность работы двигателя в этом сеансе наблюдений составляет 7.5 с. Время начала регистрации оптического сигнала примерно соответствует моменту включения СКД. Начало экспозиции кадра на рис. 1 с первой регистрацией сигнала соответствует моменту $T-T_0=-0.3$ с, однако следует учитывать, что длительность экспозиции составляет 0.5 с, поэтому невозможно провести привязку по времени точнее.

Другой тип оптических сигналов, регистрируемых при проведении сеансов КЭ «Радар–Прогресс», соответствует интервалу времени после выключения СКД. После окончания работы двигателя включается режим продувки, при котором остатки несгоревшего топлива вытесняются из двигательной установки. Этот процесс сопровождается гораздо более сильным оптическим сигналом — образуется достаточно яркая «струя», вытянутая в направлении работы СКД (рис. 2), форма которой быстро изменяется, а яркость постепенно уменьшается.

Из-за большей яркости топливной струи продувки продолжительность регистрации оптического сигнала от нее больше, чем от струи при работе СКД, и в отдельных сеансах наблюдений составляет до 10–20 с.

ГЕОМЕТРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Из условий проведения КЭ всегда известна траектория движения ТГК относительно звездной системы координат — это позволяет осуществлять сопровождение КА оптическим телескопом на нужном участке его траектории. Информация о взаимном расположении оптического наблюдательного пункта и ИРНР тоже известна из географических координат обсерваторий. Все эти данные дают возможность привязать наблюдаемые в течение КЭ особенности и детали оптических изображений к направлению видимой скорости ТГК и направлениям на другие пункты наблюдений. В зависимости от условий эксперимента взаимная ориентация этих направлений может различаться.

На рис. 3 (левая панель) показано изображение ТГК и струи продувки, полученное во время КЭ 02.09.2010. Изображения, получаемые на оптическом телескопе, ориентированы в звездной системе координат. Горизонтальная ось изображений совпадает с направлением изменения угла прямого восхождения α (угол α увеличивается влево на изображении), а вертикальная — с направлением изменения угла склонения δ (увеличивается вверх на изображении).

Зная дальность до ТГК и масштаб изображений, можно рассчитать линейный размер (оси на рисунке выражены в км). Направление и проекция скорости движения ТГК на плоскость изображения показаны на рисунке вектором с обозначением V . Длина этого вектора соответствует расстоянию, преодолеваемому

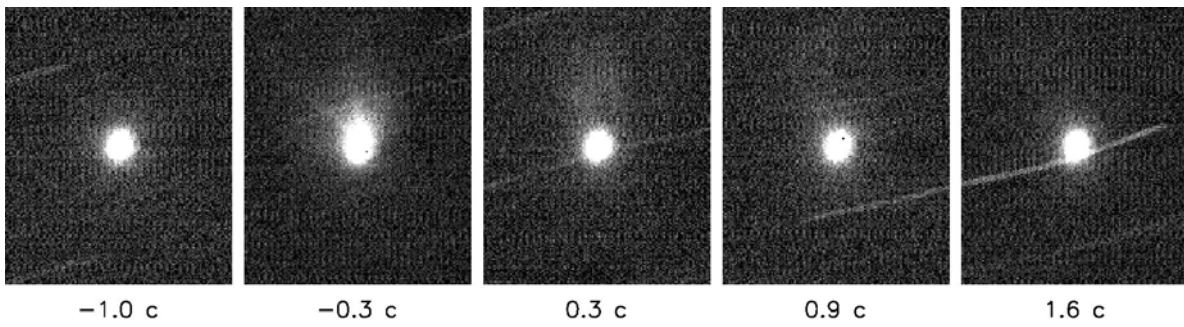


Рис. 1. Оптический сигнал, регистрируемый во время работы СКД (01.09.2010 г.). Время экспозиции 0.5 с

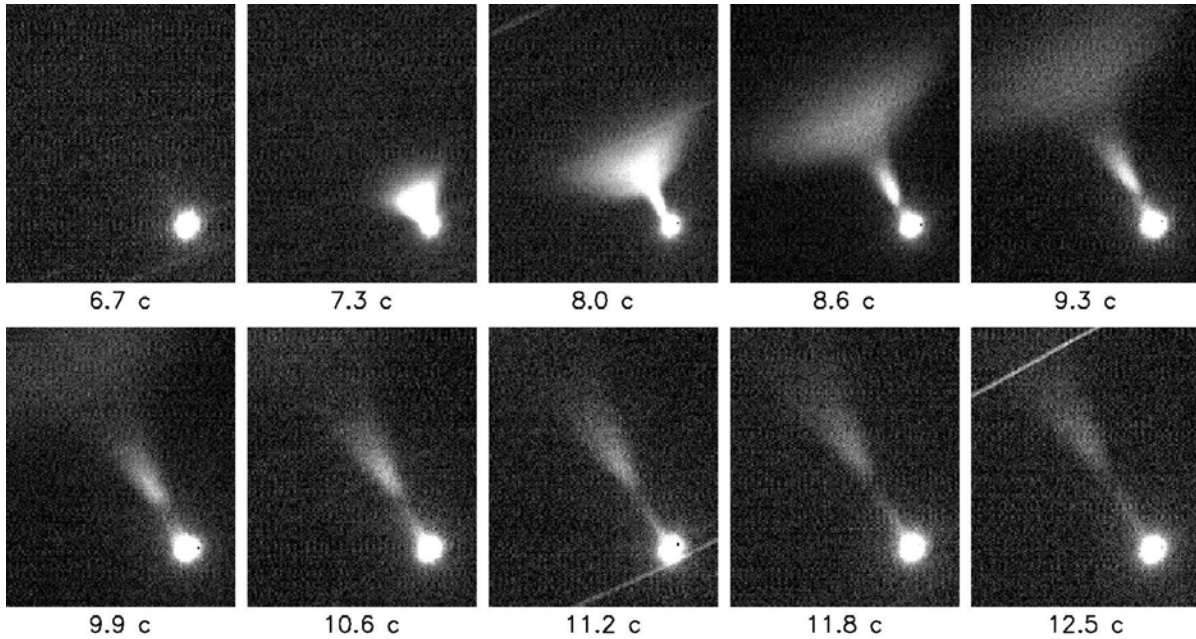


Рис. 2. Оптический сигнал, регистрируемый во время продувки СКД (01.09.2010). Время экспозиции 0.5 с

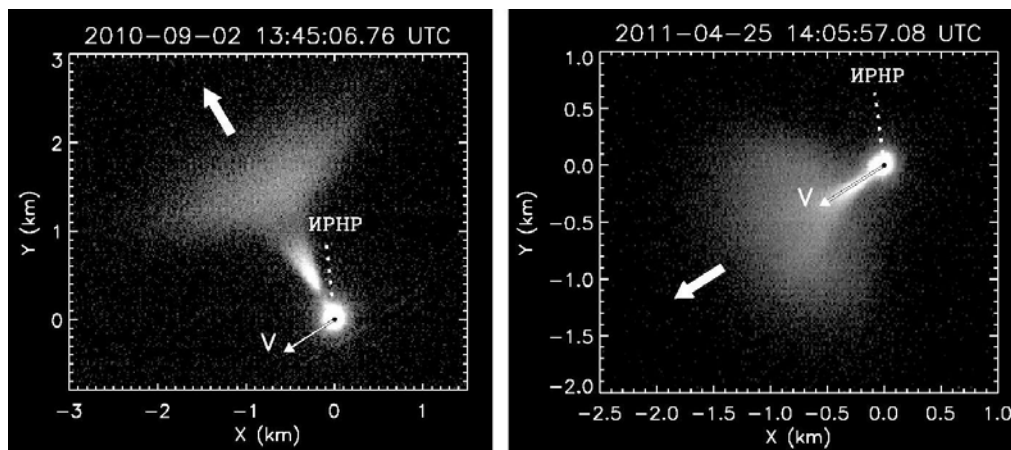


Рис. 3. Геометрия КЭ 02.09.2010 (слева) и 25.04.2011 (справа) по результатам оптических наблюдений. Вектор V показывает проекцию скорости движения ТГК. Пунктирной линией показано направление на ИРНР, широкой стрелкой — направление выброса струи продувки.

ТГК за 0.1 с. В момент времени, показанный на рисунке, скорость ТГК составляла 6.7 км/с. Широкая стрелка на рисунке показывает видимое направление выброса струи продувки, а пунктирная линия — направление на ИРНР. В плоскости изображения угол между направлением выброса и направлением на ИРНР составил 21° , а между направлением выброса и направлением скорости — 83° .

В сеансах КЭ 22–26 апреля 2011 г. выброс струи был «на торможение». В этом случае направление струи совпадало с направлением скорости ТГК (рис. 3, справа). Таким образом, регистрируя на оптическом изображении направление выброса струи и зная орбиту ТГК относительно пунктов наблюдения, можно контролировать геометрию КЭ в целом.

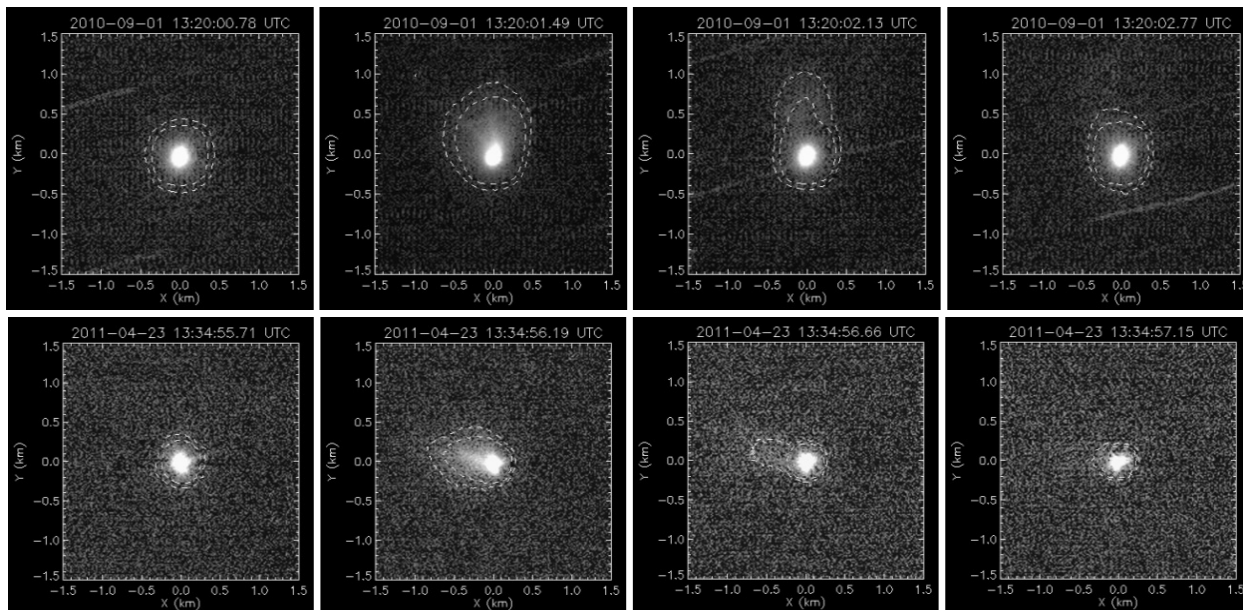


Рис. 4. Последовательности изображений 01.09.2010 (верхний ряд) и 23.04.2011 (нижний ряд). Включение СКД произошло в 13:20:01.58 и 13:34:55.5 UTC соответственно

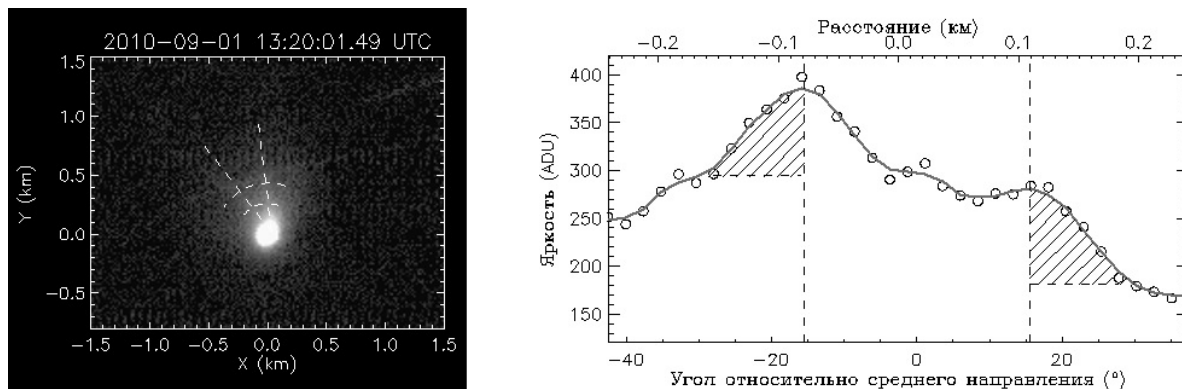


Рис. 5. Слева — изображение, полученное в момент включения СКД 01.09.2010: наблюдаются два слабоконтрастных луча под углом 30° , соответствующим углу раскрытия сопла СКД (штриховые прямые). Справа — азимутальное сечение лучей (усреднение в пределах диапазона, показанного слева штриховыми дугами), внешние границы лучей на сечении выделены штриховкой

ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ОТ ВКЛЮЧЕНИЯ СКД

Наблюдения ТГК на телескопе АЗТ-33ИК во время сеансов КЭ позволили обнаружить оптические явления, вызванные работой СКД. Выглядят они как слабоконтрастная вспышка («облако»), возникающая в момент включения СКД и исчезающая в течение 1–2 с. Типичные примеры регистрации включения СКД приведены на рис. 4.

Эти изображения получены с помощью широкоугольной оптоэлектронной системы [Клунко и др., 2016] с экспозицией 0.5 с. Из-за особенностей конструкции объектива и камеры этой системы корпус ТГК (яркое пересвеченное пятно в центре кадра) дает небольшой блик в своей окрестности. Это можно видеть по изолиниям яркости (белые штрихи). Изолиниями отмечены уровни яркости, немного превышающие уровень яркости фона — на 0.5 и 1.0 от величины шума, измеренной в фоновой части

изображения. До включения СКД изолинии яркости по форме близки к окружности, т. е. наблюдается симметричный блик вокруг ТГК. Во время включения СКД появляется вытянутая область повышенной яркости, что хорошо видно по изолиниям. Через 1–2 с все возвращается к исходному состоянию (последние кадры в сериях).

В отдельных случаях, при удачных условиях КЭ, удалось проследить некоторые детали, сопровождающие включение СКД. В сеансах 1 и 2 сентября 2010 г. ориентация оси ТГК составляла примерно 90° с направлением на телескоп. Таким образом, можно заметить реальные размеры и скорости движения струй, не искаженные эффектом проекции. В частности, 01.09.2010 в момент включения СКД на изображении можно выделить два слабоконтрастных луча, расположенных под углом 30° (рис. 5, слева). Этот угол соответствует углу раскрытия сопла СКД, а среднее направление лучей близко к направлению струи продувки, которая наблюдалась позднее.

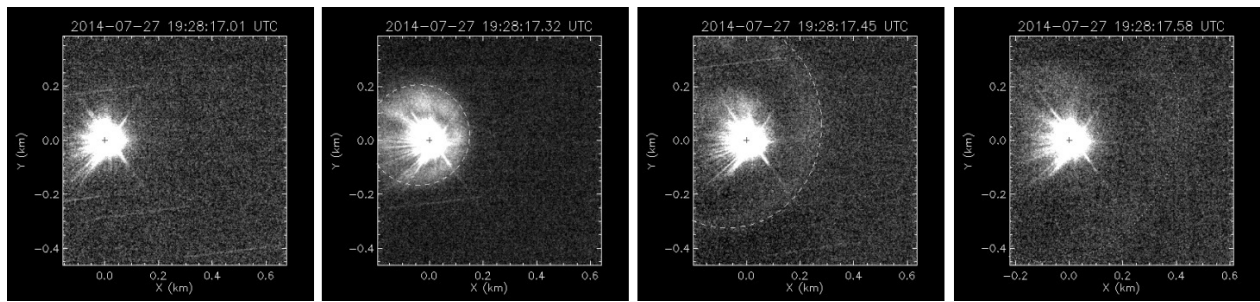


Рис. 6. Момент включения СКД 27.07.2014. Наблюдается расходящееся кольцо, которое теряет яркость. В 19:28:17.58 невозможно уверенно определить границу кольца

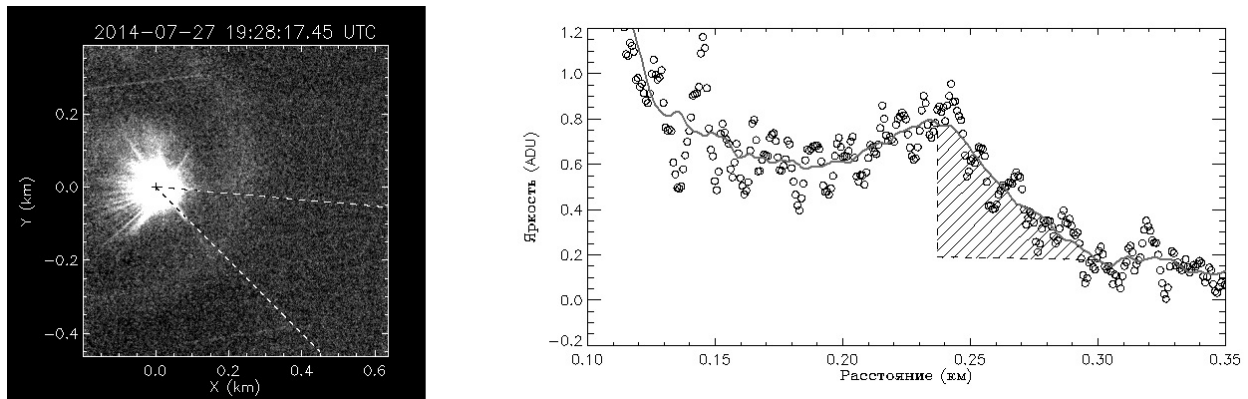


Рис. 7. Изображение (слева) и поперечное сечение (справа) расширяющегося кольца в 19:28:17.45 27.07.2014. Для уменьшения шума производилось усреднение в пределах сектора, показанного слева штриховыми линиями. Область передней границы кольца на сечении справа выделена штриховкой

По сечению, показанному на правой панели рис. 5, можно определить характерный размер внешней границы луча — она составляет примерно 100 м (от минимума до максимума). Второй луч (правый на сечении) выделяется гораздо хуже, однако можно определить, что граница луча также имеет характерный размер ~ 100 м. Можно предположить, что данные лучи трассируют границу расширяющейся струи газа.

Иначе выглядит включение СКД при наблюдении под малым углом к направлению выброса. Например, 27.07.2014 угол между осью ТГК и направлением на пункт наблюдения составлял примерно 30° в момент включения СКД (рис. 6).

Изображения, приведенные на рис. 6, получены в основной оптоэлектронной системе телескопа АЗТ-33ИК [Клунко и др., 2016] с экспозицией 0.05 с. На изображениях видно, что после включения СКД в 19:28:16.96 начиная с 19:28:17.32 наблюдается диффузное расширяющееся кольцо, которое быстро теряет яркость. Следы кольца можно видеть до 19:28:17.70, таким образом оптический эффект длится по времени около одной секунды. Используя два момента времени, когда границу кольца можно определить достаточно уверенно, мы измерили скорость его расширения (скорость увеличения радиуса): $V_p \approx 1.2$ км/с. Если предположить, что при наблюдении вдоль оси выброса мы видим расширяющуюся границу основания конуса с углом 30° при вершине (угол раскрытия сопла СКД), то скорость самого выброса V можно пересчитать из измеренной ско-

рости расширения, используя соотношение $V = V_p / \text{tg} 15^\circ$. В результате получаем скорость выброса $V \approx 4.5$ км/с.

На рис. 7 представлено сечение поперек расширяющегося кольца. По сечению можно определить характерную ширину кольца, а также ширину его передней границы (заштрихованная область на графике), которая составляет около 50 м. Следует отметить, что изображение получено с экспозицией 0.05 с. При скорости расширения кольца ~ 1 км/с за время экспозиции произойдет уширение поперечного профиля кольца примерно на 50 м, т. е. на величину порядка измеренной ширины границы кольца. Можно предположить, что при оптических измерениях видна внешняя граница струи газов, выбрасываемой при работе СКД. Она выделяется на изображениях повышенной яркостью. Геометрия струи примерно сохраняет геометрию сопла, по крайней мере, в первые секунды работы. Это позволяет при необходимости измерить скорость истечения выхлопных газов и проконтролировать режим работы СКД.

Как видно из анализа, включение СКД дает очень слабый эффект на оптических изображениях. Это связано как со слабым отражающим действием струи газов, так и с быстротечностью этого процесса. Наилучшие результаты при оптических наблюдениях дают измерения с помощью основной оптоэлектронной системы телескопа АЗТ-33ИК, имеющей высокую чувствительность, с малыми экспозициями и с высокой частотой кадров. Однако даже тогда

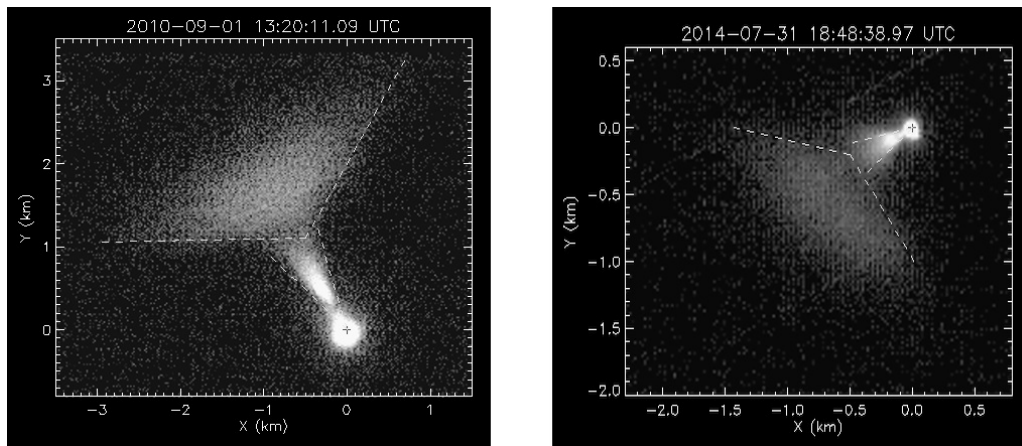


Рис. 8. Типичный вид струи продувки: слева — при наблюдении сбоку (01.09.2010); справа — при наблюдении под углом около 30° к направлению выброса (31.07.2014)

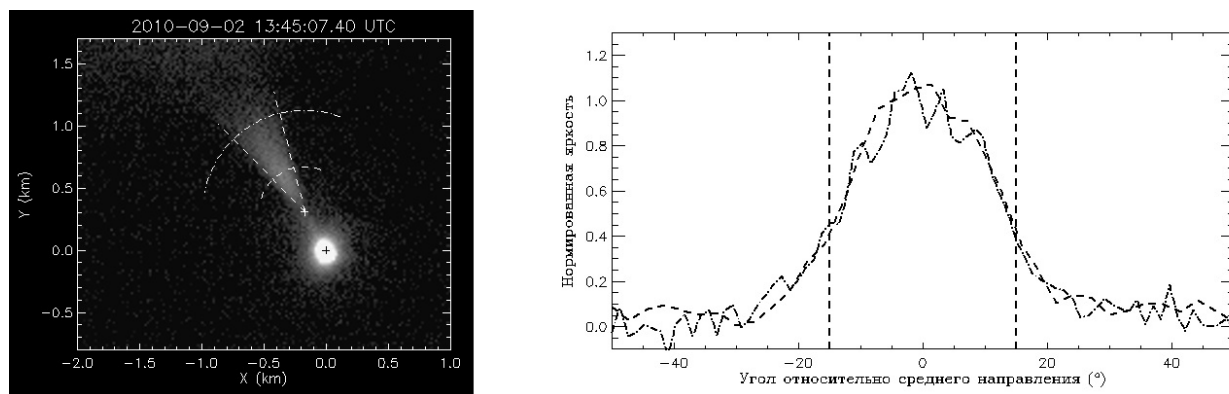


Рис. 9. Узкая компонента струи продувки: слева — изображение в один из моментов сеанса 01.09.2010 г.; справа — два азимутальных сечения струи на разных расстояниях, показанных слева штриховой и штрихпунктирной дугами

удается регистрировать оптический сигнал только в первые 1–2 с после начала работы СКД.

ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ОТ СТРУИ ПРОДУВКИ

Гораздо более ярким при оптических наблюдениях оказывается процесс продувки двигательной установки после окончания работы СКД. При этом образуется достаточно яркая струя, вытянутая в направлении работы СКД. В строении струи можно выделить две части (рис. 8). Первая, отходящая от ТГК, выглядит как узкий конус с раствором около 30°. Вторая часть, примыкающая к первой, является широкой, диффузной. Она тоже имеет вид конуса, но с углом раствора около 120°.

Обе части струи постепенно увеличиваются в размерах, при этом их яркость уменьшается. Узкая часть, более яркая, остается видимой в течение 10–20 с. Оси узкой и диффузной частей могут не совпадать, особенно четко это видно при наблюдениях под малым углом к направлению выброса (рис. 8, справа). Диффузная часть струи при этом может иметь видимый угол больше 120°, возможно, за счет эффектов проекции. Между двумя частями струи наблюдается область пониженной яркости.

Наиболее просто динамику струи можно проанализировать по сеансам КЭ, в которых выброс струи

происходил под углом, близким к 90° с направлением на телескоп. К ним относятся сеансы 1 и 2 сентября 2010 г. со сходными условиями наблюдений. Вершина узкой части струи продувки отделена от ТГК небольшим расстоянием, которое увеличивается в течение процесса продувки. На изображениях положение вершины струи можно определить по положению минимума яркости между струей и ТГК (белый крестик на левой панели рис. 9). Измерения показывают, что вершина струи удаляется от центра ТГК со средней скоростью около 0.2 км/с.

Как было отмечено выше, узкая часть струи продувки имеет угол 30°. Отметим, что этот угол хорошо сохраняется, если его строить не из центра изображения ТГК, а именно из вершины струи, т. е. из положения минимума яркости (рис. 9).

Обращает на себя внимание отличие профиля яркости поперек струи продувки от профиля, полученного при сканировании поперек струи газов при работе СКД (ср. рис. 5, справа и рис. 9, справа). В случае работы двигателя наблюдаются более яркие области на границе угла 30°, в случае струи продувки максимум яркости приходится на середину струи и яркость плавно спадает к границам 30-градусного угла.

Общую скорость выброса струи можно определить по положению передней и задней границы диффузной части. Задняя граница хорошо определяется по положению минимума яркости между узкой и диффуз-

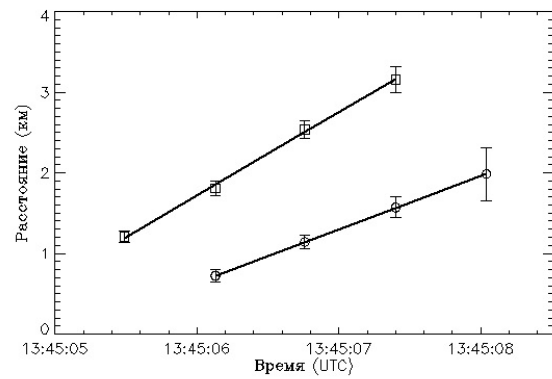
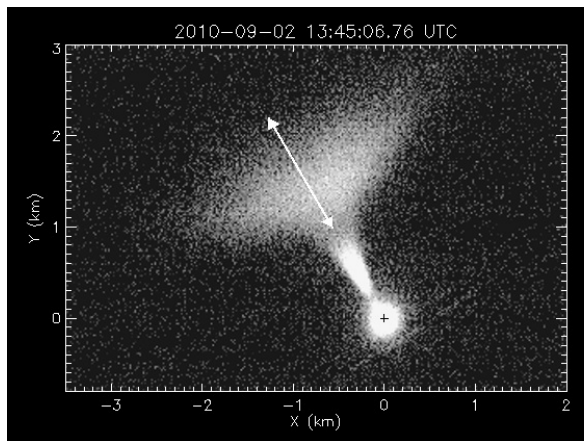


Рис. 10. Определение размеров и положения диффузной части вдоль направления движения струи 02.09.2010: слева — продольные границы диффузной части струи (отмечено стрелкой); справа — расстояние от ТГК до передней (квадратики) и задней (кружки) границы струи продувки в зависимости от времени

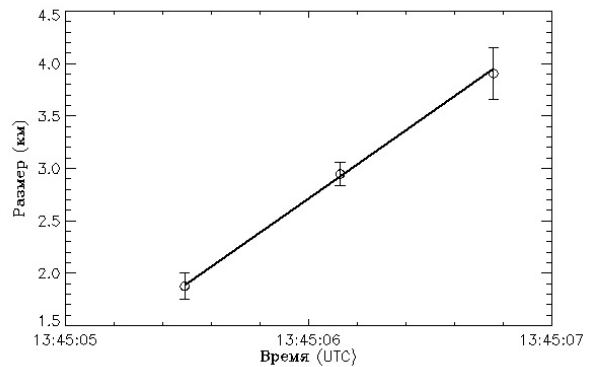
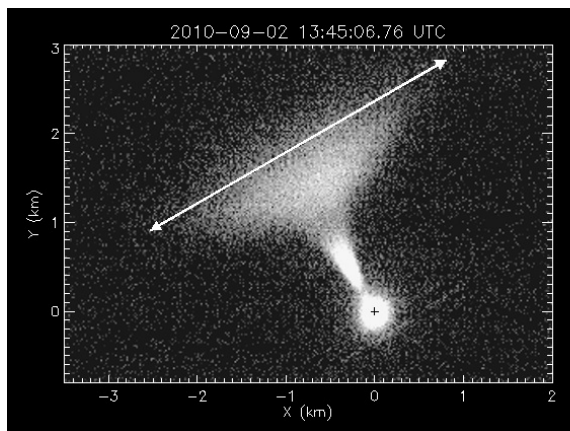


Рис. 11. Определение размеров и положения диффузной части поперек движения струи 02.09.2010: слева — поперечные границы диффузной части струи (отмечено стрелкой); справа — поперечный размер диффузной части струи в зависимости от времени

ной частью струи. Определенные таким образом границы диффузной части отмечены стрелкой на левой панели рис. 10. График положения передней и задней границ диффузной части в зависимости от времени приведен на правой панели. Скорость передней границы струи равна 1.0 км/с (рис. 10, справа, квадратики). Скорость задней границы диффузной части струи составляет примерно 0.67 км/с (рис. 10, справа, кружки).

Поперечный размер диффузной части, если его измерить в самой широкой части струи, как показано на рис. 11, слева, тоже возрастает, и скорость его увеличения составляет примерно 1.6 км/с (рис. 11, справа).

Имеется небольшая асимметрия в поперечном расширении струи. В направлении, совпадающем с направлением движения ТГК (практически под прямым углом к направлению струи), размер диффузной части растет медленнее, чем в противоположном направлении. Это дает общее смещение струи в направлении, поперечном направлению выброса. Скорость этого смещения составляет примерно 0.3 км/с. Аналогичная скорость, измеренная 01.09.2010, составила 0.2 км/с. В обоих случаях смещение направлено в сторону, противоположную движению ТГК,

поэтому это смещение можно связать с взаимодействием частиц струи с окружающей средой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения с помощью оптического телескопа АЗТ-33ИК в ходе КЭ «Радар-Прогресс» показали, что во время как включения, так и продувки (после выключения) двигателя ТГК «Прогресс» удается зарегистрировать оптический сигнал от струй газа и топлива.

Во время работы двигателя наблюдается слабый оптический сигнал, процесс расширения газов протекает быстро, поэтому регистрация оптического сигнала от струи газов возможна только в первые 1–2 с после включения двигателя. Основной особенностью при работе двигателя является повышенная яркость внешней границы струи газов. Геометрия струи примерно сохраняет геометрию сопла в первые секунды работы двигателя, что позволяет получить оценку скорости истечения газов — 4–5 км/с.

Оптический сигнал при продувке двигателя образуется за счет отражения солнечного света от более плотных частиц топлива, выбрасываемых из двигателя. Скорость выброса струи ниже, чем ско-

рость струи газов при работе двигателя, и не превышает ≈ 1 км/с. Струя при этом состоит из двух частей — узкой и широкой, более диффузной. Узкая часть имеет вид конуса с углом раствора 30° , соответствующим выходному углу сопла, который сохраняется со временем. Широкая часть представляет собой конус с углом раствора $\approx 120^\circ$. На фоне общего расширения струи наблюдается ее слабое смещение ($V \approx 0.2-0.3$ км/с) в направлении, противоположном движению ТГК, которое можно связать с взаимодействием с окружающей средой.

Наблюдаемые различия в распределении яркости поперек выхлопной струи работающего двигателя и струи продувки, по-видимому, связаны с разным характером течения и составом частиц в выбрасываемых струях. В обоих случаях наблюдаемое свечение вызвано солнечным излучением, рассеянным дисперсионными частицами, присутствующими в струе. В случае работы жидкостного ракетного двигателя причиной образования дисперсионных частиц является конденсация паров воды [Wu, 1975; Platov, Kosch, 2003] при их быстром расширении и охлаждении после выхода из сопла. Распределение яркости будет определяться характером сверхзвукового истечения струи и процессом образования частиц льда. Результаты, полученные в данной работе, показывают, что наблюдаемое распределение яркости выхлопной струи при работе двигателя имеет повышенные значения на краях струи. Подобное распределение яркости приведено в работе [Платов и др., 2011], где регистрировалась струя при работе двигателя космического аппарата ГЛОНАСС на высоте 20 000 км над поверхностью Земли. Аналогичный эффект отмечался также при регистрации факела от двигателя космического аппарата Saturn-IVB во время лунной миссии «Аполлон-8» [Kung et al., 1975]. В качестве возможных причин эффекта указываются формирование частиц льда большего размера на границе струи (что может приводить к большей интенсивности рассеяния) и повышенная конденсация частиц на границе струи за счет взаимодействия с окружающими атомами кислорода [Kung et al., 1975]. Эти вопросы не рассматривались детально и требуют дальнейшего изучения.

При наблюдениях струи продувки в качестве рассеивающих служат частицы несгоревшего топлива, выбрасываемого из камеры сгорания двигателя. В этом случае при равномерном распределении плотности частиц по сечению струи количество рассеивающих частиц на луче зрения будет уменьшаться к боковой границе струи, соответственно, наблюдаемая яркость будет максимальна на ее оси. Заметим, что процесс, аналогичный процессу продувки, наблюдается при выключении ракетных двигателей на твердом топливе [Платов и др., 2003]: внезапный сброс давления в камере сгорания приводит к практически мгновенному выбросу различных компонентов топлива и продуктов сгорания в атмосферу. Мощные ракеты могут выбрасывать сотни килограммов вещества, при этом образуются огромные газопылевые облака размерами до ~ 1500 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алешин В.П., Балега Ю.Ю., Максимов А.Ф. и др. Спекл-интерферометрия геостационарных ИСЗ: реальность и перспективы // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2011. Вып. 6 (39). С. 154–158.

Галкин А.А., Гришин Е.А., Иншин П.П., Шаргородский В.Д. Получение изображений космических аппаратов телескопом Алтайского оптико-лазерного центра с использованием адаптивной оптики // Космические исследования. 2008. Т. 46, № 3. С. 201–205.

Клунко Е.В., Еселевич М.В., Тергов В.И. Наблюдения на оптическом телескопе АЗТ-33ИК // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3. С. 17–23.

Лебедев В.П., Хахинов В.В., Габдуллин Ф.Ф. и др. Исследование методами радиозондирования характеристик плазменного окружения низкоорбитальных космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 1 (50). С. 51–60.

Платов Ю.В., Куликова Г.Н., Черноус С.А. Классификация газопылевых образований в верхней атмосфере, связанных с выбросами продуктов сгорания ракетных двигателей // Космические исследования. 2003. Т. 41, № 2. С. 168–173.

Платов Ю.В., Семенов А.И., Филиппов Б.П. Конденсация продуктов сгорания в выхлопной струе ракетных двигателей в верхней атмосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. 2011. Т. 51, № 4. С. 556–562.

Хахинов В.В., Потехин А.П., Лебедев В.П. и др. Результаты дистанционного зондирования ионосферных возмущений в активных космических экспериментах «Радар-Прогресс» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 3. С. 199–206.

Хахинов В.В., Потехин А.П., Лебедев В.П. и др. Некоторые результаты активных космических экспериментов «Плазма-Прогресс» и «Радар-Прогресс» // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2013. Спец. вып. 5 (51). С. 160–163.

Korobtsev I., Tergoev V., Karavaev Yu., et al. Observations of near-Earth space objects at the Sayan Observatory. Opportunities and perspectives // Proceeding of 9-th US/Russian Space Surveillance Workshop. Irkutsk, 2012. S5.6.

Kung R.T.V., Cianciolo L., Myer J.A., Solar scattering from condensation in Apollo translunar injection plume // AIAA J. 1975. V. 13. P. 432–437.

Platov Y.V., Kosch M.J. Sublimation of ice particles from rocket exhausts in the upper atmosphere // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N A12. P. 1434–1439.

Potekhin A.P., Khakhinov V.V., Medvedev A.V., et al. Active space experiments with the use of the transport spacecraft “Progress” and Irkutsk IS Radar // PIERS Proceedings. Moscow, 2009. P. 223–227.

Wu B.J.C. Possible water vapor condensation in rocket exhaust plumes // AIAA J. 1975. V. 13, N 6. P. 797–802.

REFERENCES

Aleshin V.P., Balega Yu.Yu., Maksimov A.F., Komarinsky S.L., Novgorodtsev D.D. Speckle interferometry of the GEOs: reality and perspectives // *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of M.F. Reshetnev Siberian State Aerospace University]. 2011, iss. 6 (39), pp. 154–158. (In Russian).

Galkin A.A., Grishin E.A., Inshin P.P., Shargorodskii V.D. Spacecraft images obtained with a telescope at the Altai Optical Laser Center using adaptive optics. *Cosmic Research*. 2008, vol. 46, iss. 3, pp. 197–201.

Khakhinov V.V., Potekhin A.P., Lebedev V.P., Alsatkin S.S., Ratovskiy K.G., Kushnarev D.S., Tverdokhlebova E.M.,

Kurshakov M.Yu., Manzeley A.I., Timofeeva N.I. Results of the remote sensing of the ionospheric disturbances in active space experiments "Radar-Progress". *Sovremennye problemy distatsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern Problems of the Earth Remote Sensing From the Space]. 2012, vol. 9, iss. 3, pp. 199–206. (In Russian).

Khakhinov V.V., Potekhin A.P., Lebedev V.P., Kushnarev D.S., Alsatkin S.S. Some results of the active space experiments "Plasma-Progress" and "Radar-Progress" // *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of M.F. Reshetnev Siberian State Aerospace University]. 2013, special iss. 5 (51), pp. 160–163. (In Russian).

Klunko E., Eselevich M., Tergoev V. Observations of TCS "Progress" with AZT-33IK optical telescope. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2016, vol. 2, no. 3, pp. 17–23. (In Russian).

Korobtsev I., Tergoev V., Karavaev Yu., Klunko E., Goryashin V., Mishina M., Tsukker T., Eselevich M., Papushev P. Observations of near-Earth space objects at the Sayan Observatory. Opportunities and perspectives. *Proceeding of 9-th US/Russian Space Surveillance Workshop*. Irkutsk, 2012, S5.6.

Kung R.T.V., Cianciolo L., Myer J.A., Solar scattering from condensation in Apollo translunar injection plume. *AIAA J.* 1975, vol. 13, pp. 432–437.

Lebedev V.P., Khakhinov V.V., Gabdullin F.F., Korsun A.G., Tverdokhlebova E.M., Laletina E.A., Mazheley A.I. Study of the plasma environment characteristics around spacecrafts in low orbits using radio sounding methods. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and Rocket Engineering]. 2008, iss. 1 (50), pp. 51–60. (In Russian).

Platov Y.V., Kosch M.J. Sublimation of ice particles from rocket exhausts in the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. A12, pp. 1434–1439.

Platov Yu.V., Kulikova G.N., Chernouss S.A. Classification of gas-dust structures in the upper atmosphere associated with the exhausts of rocket-engine combustion products. *Cosmic Research*. 2003, vol. 41, no. 2, pp. 153–158.

Platov Yu.V., Semenov A.I., Filippov B.P. Condensation of combustion products in the exhaust plumes of rocket engines in the upper atmosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2011, vol. 51, no. 4, pp. 550–556.

Potekhin A.P., Khakhinov V.V., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., Lebedev V.P., Shpynev B.G. Active space experiments with the use of the transport spacecraft "Progress" and Irkutsk IS Radar. *PIERS Proceedings*. Moscow, 2009, pp. 223–227.

Wu B.J.C. Possible water vapor condensation in rocket exhaust plumes. *AIAA J.* 1975, vol. 13, no. 6, pp. 797–802.