

ПОДВИЖНОСТЬ АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО РОБОТА

Е.В. Авотин, ст. науч. сотр. ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, канд. техн. наук, ewg.avotin2013@yandex.ru

К.В. Епишин, нач. отд., ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук, epishin@extech.ru

Рассмотрен комплекс НИР, направленных на организацию производства образцов универсальных роботизированных машин, предназначенных для автономной работы на объектах в первую очередь транспортной, энергетической и военной инфраструктур.

Ключевые слова: автономные машины, система управления, технологические машины, окружающая среда, безопасность.

THE MOBILITY OF THE AUTONOMOUS TRANSPORT ROBOT

E.V. Avotin, Senior Researcher, Saint-Petersburg state Polytechnical University, Doctor of Engineering, ewg.avotin2013@yandex.ru

K.V. Epishin, Head of Department, SRI FRCEC, Doctor of Engineering, epishin@extech.ru

The article considers the package of research works aimed at organization of samples of universal robotic vehicles, intended for Autonomous work at the facilities especially of the transport, energy and military infrastructures.

Key words: stand-alone machine, control system, technological machinery, environment, security.

Основные положения. В настоящее время не существует технических сложностей в создании транспортного средства (ТС), способного передвигаться по подготовленной поверхности (имеется в виду организованная окружающая среда – автомобильные дороги любой категории; улицы, проспекты, дворовые территории городов и населенных пунктов) и по пересеченной местности, насыщенной произвольной формы рельефными образованиями (неорганизованная окружающая среда) со скоростью не превышающей скорость пешехода. Однако, создание подобного ТС с автономной системой управления – автономного транспортного робота (АТР), несмотря на накопленный опыт работы над проектами подобного уровня в зарубежных странах (США, Германия, Италия, Япония) и Российской Федерации [2], еще продолжает оставаться сложной инженерно-технической задачей.

Основные трудности, возникающие в этом направлении, связаны с выбором, разработкой и комплексной экспериментальной проверкой:

- конструкции шасси повышенной подвижности с максимальной геометрической и динамической адаптивностью к окружающей среде при наличии как подвижных, так и неподвижных препятствий;

- быстродействующего и энергоемкого бортового информационно-вычислительного управляющего комплекса (БИВУК), информационной системы, алгоритмического и программного обеспечений, назначение которых заменить естественный интеллект человека (водителя) на искусственный – «электронный» интеллект.

Под термином «подвижность» в дальнейшем понимается способность АТР переместиться из точки старта $S(x_S, y_S)$ в точку финиша $F(x_F, y_F)$ за конечный промежуток времени

$$t_{SF} = \frac{S_{SF}}{V_{CP}}, \quad (1)$$

где $t_{SF} \in (0, \infty)$ – время нахождения в пути при движении из точки старта $S(x_S, y_S)$ в точку финиша $F(x_F, y_F)$; (x_S, y_S) , (x_F, y_F) – соответственно, координаты точек старта и финиша; S_{SF} – фактический путь, пройденный при перемещении из точки $S(x_S, y_S)$ в точку $F(x_F, y_F)$; V_{CP} – средняя скорость на фактическом участке пути.

Оценку подвижности системы передвижения при выполнении основной транспортной задачи – переместиться из точки старта в точку финиша, предлагается оценивать коэффициентом эффективности $K_{ЭФ}$ $[0, 1]$:

$$K_{ЭФ} = \frac{t_T}{t_{\Phi}} = \frac{V_{CP} S_{\min}}{V_{\max} S_{SF}}, \quad (2)$$

где $t_T = \frac{S_{\min}}{V_{\max}}$ и $t_{\Phi} = \frac{S_{SF}}{V_{CP}}$ – соответственно, теоретическое и фактическое время нахождения в пути; $V_{\max}$ – максимальная (проектная) скорость; $S_{\min} = \sqrt{(x_S - x_F)^2 + (y_S - y_F)^2}$ – расстояние между точками $S(x_S, y_S)$ и $F(x_F, y_F)$.

Путь, пройденный по реализованной, фактической траектории от пункта отправления до пункта назначения (S_{SF}), не всегда лежит на одной прямой. Искривление траектории происходит за счет появления на пути следования случайных возмущающих воздействий; многочисленных и разнообразных препятствий (кочек, камней, ям, грунтов с низкой несущей способностью, болот, водных преград, горной местности), некоторые из которых приходится объезжать. Маневрирование приводит к увеличению длины фактической траектории и уменьшению средней скорости передвижения. Анализ соотношения (1) показывает, что уменьшение t_{SF} приводит к повышению подвижности, а $t_{SF} \rightarrow \infty$ означает, что при движении из одной точки в другую произошла потеря подвижности АТР, т. е. основная транспортная задача оказалась не выполненной ($K_{ЭФ} = 0$). $K_{ЭФ} = 1$ соответствует выполнению основной транспортной задачи с максимально возможной эффективностью (гипотетический случай).

К основным показателям, с помощью которых в теории и практике движения ТС проводят исследование подвижности, относятся критерии оценки тягово-сцепных и динамических характеристик (динамический фактор, коэффициент сцепления, свободная сила тяги, средняя скорость передвижения), проходимости (профильная, опорная), устойчивости (курсовая, к опрокидыванию), управляемости (прямолинейное движение, поворот), маневренности (ровная поверхность, пересеченная местность), плавности хода (перегрузки элементов конструкции механических, электронных и информационных систем), нагруженности (ходовая часть, трансмиссия, тяговый двигатель, перевозимый груз или оборудование), энергопотребления (прямолинейное движение, поворот) и надежности.

Таким образом, для создания АТР, способного с высокой эффективностью выполнять основную транспортную задачу, в первую очередь необходимо:

1. Разработать технические требования на АТР и сформировать окружающую среду, в которой предполагается его эксплуатация.
2. Провести анализ возможных вариантов построения конструктивных схем, на основе которых выбрать для дальнейшей разработки конструкторской документации наиболее эффективную концепцию.

3. С учетом имеющегося в мировой практике опыта создания образцов ТС с автономной системой управления сформировать облик:

- информационной системы и системы управления, на основании которых провести выбор исполнительных устройств;
- системы безопасности, включая защиту АТР от попадания в критические ситуации и проникновения третьих лиц;
- системы измерения несущей способности опорной поверхности, геометрических и тягово-сцепных параметров организованной и неорганизованной окружающей среды;
- системы диагностики и контроля работоспособности механических, электронных, исполнительных и информационных устройств; алгоритмического и программного обеспечений.

4. Разработать навигационную систему, включающую:

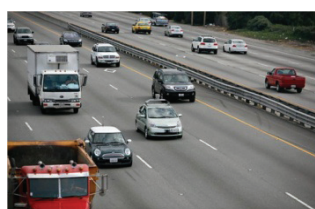
- построение карты организованной и неорганизованной окружающей среды с учетом подвижных (люди, животные) и неподвижных (искусственные и естественные) препятствий;
- алгоритм выбора оптимальной и безопасной траектории движения;
- алгоритм управления, контроля и корректировки параметров подвижности при движении по выбранной траектории.

5. Разработать комплекс программ, содержащий:

- алгоритмическое и программное обеспечение системы передвижения;
- математический аппарат, предназначенный для моделирования подвижности АТР как в текущем, так и в прогнозируемом положении;
- методику оценки эффективности передвижения АТР, позволяющую проводить исследования еще на начальной стадии разработки конструкции и вносить необходимые корректировки в концепцию и конструктивный облик на любом этапе его создания.

Окружающая среда и обеспечение безопасности. Для оценки подвижности АТР окружающую среду целесообразно разделить на две зоны (вида): подготовленная (организованная) и неподготовленная (неорганизованная).

При нахождении в подготовленной зоне (рис. 1, а) могут быть реализованы все проектные характеристики подвижности, заложенные в конструкцию АТР при работе в колесном режиме, например, максимальная скорость; минимальные энергопотребление, инерционные и механические перегрузки; хорошая проходимость, устойчивость и управляемость.



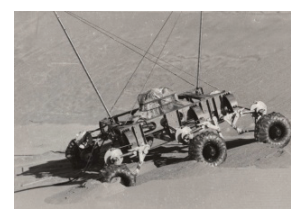
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Фрагменты подготовленной зоны окружающей среды в США и неподготовленной зоны в районе вулканической деятельности на полуострове Камчатка и в пустыне Кара-Кум

- а – в третьем ряду АТР фирмы Google на автобане в США;
- б – на вулканической опорной поверхности экспериментальный ходовой макет ТС с колесно-шагающим двигателем и жесткими цилиндрическими колесами;
- в – экспериментальный ходовой макет ТС с колесно-шагающим двигателем, шарнирно-сочлененной рамой и коническо-цилиндрическими колесами;
- г – экспериментальный ходовой макет ТС с колесно-шагающим двигателем и упругими металлическими колесами в районе пустыни Кара-Кум (разработчик макетов ОАО «ВНИИТРАНСМАШ»)

Необходимо отметить, что из-за условия обеспечения безопасности АТР и окружающей его среды, указанные выше характеристики в некоторых ситуациях могут оказаться нереализованными. К таким ситуациям следует отнести сложившиеся погодно-климатические условия и дорожную обстановку; плотный транспортный поток, наличие людей, светофоров, дорожных указателей и знаков; возможное проникновение третьих лиц; дополнительных ограничений скорости при нахождении пределах дворовых территорий.

Неподготовленная зона может содержать участки с низкой несущей способностью и углами наклона опорной поверхности до 33° ; твердые опорные поверхности с разнообразными препятствиями типа камней, впадин, траншей, эскарпов или контрэскарпов (рис. 1, б–г). Некоторые из таких препятствий могут оказаться непреодолимыми. Эксплуатация АТР при нахождении в этой зоне может происходить с минимальными динамическими (скорость передвижения, плавность хода) и максимальными тягово-сцепными характеристиками (коэффициент сцепления, коэффициент свободной силы тяги, преодолеваемые углы подъема).

Поэтому основное требование, связанное с обеспечением безопасности функционирования АТР и окружающей среды, целесообразно сформулировать в следующем виде: безопасность движения АТР и окружающей среды, с которой он взаимодействует, должны быть гарантированы в любых условиях эксплуатации и на любых режимах его функционирования. Например, безопасность движения не обеспечивается, если произойдет одно из следующих событий:

- потеря проходимости, управляемости, курсовой устойчивости или устойчивости к опрокидыванию;
- превышение нагрузки жизненно важных узлов и превышение допустимых значений перегрузки;
- столкновение с подвижными (люди или животные) и неподвижными препятствиями.

Потеря проходимости. Потеря проходимости может произойти из-за недостаточных дорожного просвета, радиусов проходимости, углов отвеса и конструктивных особенностей ходовой части (количество колесных осей, расстояние между колесами, радиус колеса, координаты центра тяжести).

Потеря курсовой устойчивости. Потеря курсовой устойчивости (*способность сохранять заданное направление при движении по траектории или в заданном коридоре*) может произойти при движении по ровной поверхности, косогору; на спуске или подъеме из-за действия разнообразных случайных возмущающих факторов. К таким факторам обычно относят ветровые нагрузки, инерционные перегрузки, различие тягово-сцепных свойств и нормальных реакций опорной поверхности под колесами правого и левого бортов, а также низкие несущая способность опорной поверхности или тягово-сцепные свойства движителя с опорной поверхностью.

Наличие возмущающих факторов, которые обычно не учитываются из-за их малости, может привести к нарушению динамического и статического равновесия. Поэтому устойчивое (установившееся) движение может перейти – в неустойчивое (неустановившееся). Неустойчивое движение часто сопровождается появлением увода, либо бокового сноса (рис. 2, б; 3, а; 3, б). Отклонение от заданной траектории может привести к продольному или поперечному удару в выступающее препятствие колесами правого или левого бортов или падению с уступа.

Потеря устойчивости к опрокидыванию. Потеря устойчивости к опрокидыванию может произойти при экстренном торможении, интенсивном разгоне, повороте, ударе в препятствие или его преодолении, падении во впадину или с уступа, переход с ровного участка или со спуска – на более крутой спуск или подъем (рис. 2, а).

В качестве критерия оценки динамической устойчивости выбирают максимально допустимую скорость [1], которую обычно называют критической (для критической скорости в дальнейшем принято условное обозначение $V_{кр}$).

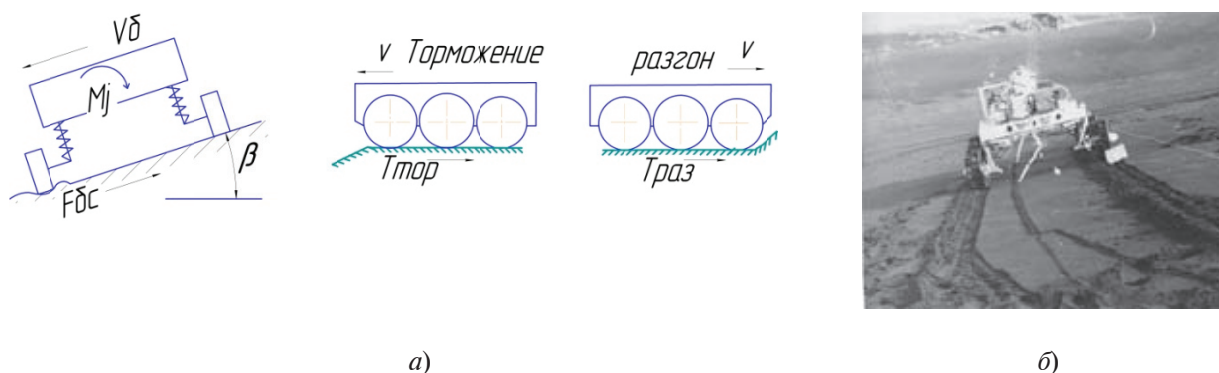


Рис. 2. Потеря устойчивости к опрокидыванию

а – возможные ситуации, в которых может произойти потеря устойчивости:

- $F_{бс}$ – сила бокового сопротивления,
- $V_{б}$ – скорость скольжения в боковом направлении;
- M_J – инерционный момент;
- $T_{торм}$ – сила торможения;
- $T_{раз}$ – сила тяги;
- β – угол наклона опорной поверхности в вертикально-продольной плоскости;
- V – скорость в продольном направлении;

б – неустойчивое движение экспериментального макета с жесткими металлическими управляемыми колесами при движении по косогору (разраб. ОАО «ВНИИТРАНСМАШ»)

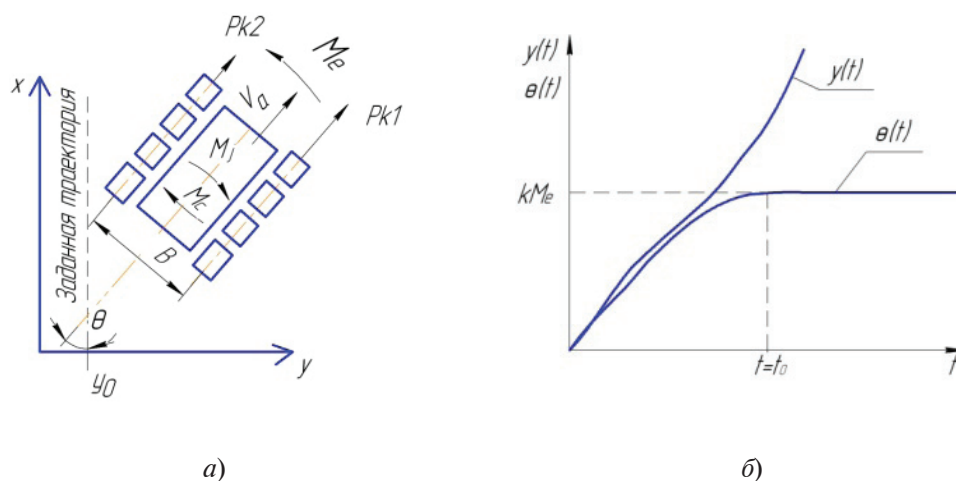


Рис. 3. Наличие внешнего возмущающего фактора

а – отклонение от заданного направления $y = y_0$ и $\theta = 0$; V_0 – продольная скорость центра масс; M_c – момент сопротивления повороту; P_{ki} – сила тяги i -го борта; B – ширина колеи;

б – качественная картина изменения отклонений АТР от параметров заданной траектории, например, при отказе системы управления и наличии внешних возмущений: $y(t)$ – вертикальная координата, $\theta(t)$ – курсовое отклонение; M_e – момент на двигателе; t – текущее время

Ее определяют из следующих соотношений:

1. Критическая скорость при экстренном торможении, интенсивном разгоне или жестком ударе в непреодолимое препятствие:

$$V_{\text{крх}}^2 = \frac{2gJ_{nx}}{MH^2(1-K)^2} [1 - \sin(\alpha + \varphi_n)], \quad (3)$$

где g — ускорение свободного падения; $K = -1$ при жестком ударе в препятствие, $K = 0$ при экстренном торможении и интенсивном разгоне; J_{nx} — момент инерции относительно продольной оси опрокидывания;

$$l^2 = H^2 + (l_1)^2, \quad \varphi_H = 90^\circ - \alpha_{CT} = \arctg(H/l_1), \quad (4)$$

l_1 — проекция расстояния от центра тяжести до оси опрокидывания на продольную ось АТР; H — высота расположения центра тяжести; α , α_{CT} — соответственно, угол наклона опорной поверхности и статический угол устойчивости в вертикально-продольной плоскости.

2. Критическая скорость при повороте:

$$V_{\text{крп}}^2 = gR \frac{0,5B \mp H \operatorname{tg} \beta}{H \pm 0,5B \operatorname{tg} \beta}, \quad (5)$$

где R — радиус поворота; B — ширина колеи; β — угол наклона поверхности в вертикально-поперечной плоскости, верхний знак относится к повороту в сторону подъема, нижний — в сторону спуска.

3. Критическая скорость при боковом скольжении:

$$V_{\text{крб}}^2 = \frac{gsJ_{ny}}{2MH^{22}} [1 - \sin(\beta + \psi_n)], \quad (6)$$

где J_{ny} — момент инерции относительно поперечной оси опрокидывания;

$$S^2 = H^2 + (0,5B)^2, \quad \psi_H = \arctg(2H/B). \quad (7)$$

Приведенные критерии оценки динамической устойчивости к опрокидыванию получены в предположении, что сцепных и прочностных характеристик движителя при взаимодействии с опорной поверхностью достаточно для реализации необходимой силы удара, торможения, тяги или сопротивления боковому скольжению.

Аналитических критериев, которые позволяли бы оперативно провести оценку динамической устойчивости к опрокидыванию при преодолении нестандартных препятствий (например камень, кратер, трещина и другие), в литературных источниках обнаружить не удалось. Поэтому в подобных ситуациях исследование устойчивости к опрокидыванию может быть проведено либо экспериментальным путем, либо путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений, адекватно описывающих взаимодействие ходовой части с окружающей средой.

Потеря управляемости. Потерю управляемости можно ожидать при движении по косо-
гору или ровной поверхности с низкими тягово-сцепными свойствами, неправильно спрог-
нозированным или выбранным скоростным режимом движения АТР. Под управляемостью
понимают совокупность свойств, обеспечивающих движение в заданном направлении, ко-
ридоре или по заданной траектории с максимальной скоростью. На управляемость оказы-
вают влияние такие внешние воздействия режимы движения как торможение, разгон или
поворот. При движении в первых двух режимах разгружаются задние или передние колеса,
что уменьшает силу по сцеплению этих колес с опорной поверхностью. При повороте раз-
гружаются колеса одного из бортов, что, в свою очередь, также приводит к уменьшению
сцепной силы на колесах соответствующего борта. Поэтому в критической ситуации поте-
ря устойчивого прямолинейного движения может возникнуть при появлении случайного
незначительного внешнего возмущающего фактора, например, из-за уменьшения коэффи-
циента сцепления или попадание под колеса незначительного возвышения или уступа на
опорной поверхности.

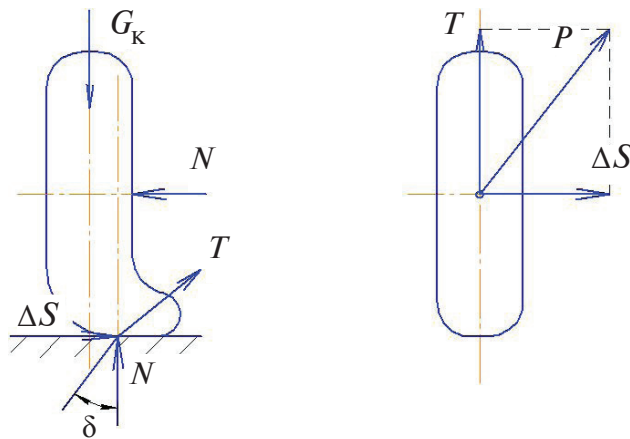


Рис. 4. Схема сил, действующих на упругое колесо, при наличии внешних возмущений

G_k — нагрузка на колесо, действующая со стороны поддрессоренной части АТР; T — тяго-
вое (тормозное) усилие; N — нормальная реакция опорной поверхности; F — внешнее
возмущающее воздействие; ΔS — боковое смещение нормальной реакции; F_s — боковая
реакция опорной поверхности; P — результирующая сила, действующая на колесо в пятне
контакта с опорной поверхностью; δ — угол увода

Наличие внешнего возмущающего фактора F (рис. 4) приведет к появлению боковой
реакции в грунте ΔS в точке контакта колеса с опорной поверхностью. В такой ситуации
незначительное боковое усилие может вызвать боковой снос. Устойчивость прямолиней-
ного движения к боковому сносу обеспечивается, если выполняется условие $P \leq \varphi_c N$, (φ_c —
коэффициент сцепления). Если последнее условие не выполняется, то при скольжении
заблокированных колес теряется устойчивость к управляемости. Потеря управляемости
может также произойти при случайных бесконечно малых боковых возмущениях, кото-
рые приводит к появлению угла увода δ , изменению величины радиуса поворота и откло-
нению АТР от заданной траектории. Поэтому требуется обеспечивать постоянный кон-
троль движения по выбранной траектории и при необходимости проводить ее корректи-
ровку.

Влиять на управляемость полноприводного АТР с бортовым способом поворота, переменной геометрией (переменная геометрия — способность изменять величину колеи, базы и дорожного просвета), индивидуальным приводом всех колес можно изменением частоты вращения или нормальной нагрузки на колеса и изменением геометрии ходовой части. Так, с уменьшением частоты вращения крайних колес относительно средних увеличивается курсовая устойчивость [3], а при ее увеличении улучшается управляемость. Увеличение нормальных нагрузок на крайние колеса относительно средних приводит к улучшению курсовой устойчивости [4], а при их уменьшении — управляемости. Аналогично, с увеличением отношения L/B (величины базы к ширине колеи) улучшается курсовая устойчивость, а с его уменьшением — управляемость. При кинематическом способе поворота влиять на управляемость можно правильным выбором режима движения, который зависит от состояния окружающей среды, выбранной скорости, массово-габаритных параметров АТР и параметров его системы поддрессирования. При прочих равных условиях колесное ТС со всеми управляемыми колесами обладает лучшей управляемостью по сравнению с аналогичным ТС с бортовым способом поворота.

Для сравнительной оценки управляемости транспортным средством М.Г. Беккером предложен критерий (8), который с успехом может быть применен для АТР [5]:

$$\eta^2 = \left(\frac{N_{\text{дин}}}{F_{\text{воз}}} \right)^2 - \left(\frac{N_{\text{ст}}}{F_{\text{воз}}} \right)^2, \quad (8)$$

где N — один из параметров, например, вертикальная нагрузка; $F_{\text{воз}}$ — внешнее (боковое) возмущающее воздействие, например, инерционная сила, возникающая при повороте или ветровые нагрузки; СТ — статическая вертикальная нагрузка; ДИН — динамическая вертикальная нагрузка.

Хорошей управляемостью обладают машины, которые имеют минимальное значение по критерию η .

Влияние скорости движения на управляемость иногда оценивают через реализуемое центробежное ускорение. Считается, что ТС обладает хорошей управляемостью, если выполняется условие:

$$V^2 \leq Rg(\text{tg}\beta + \text{tg}\varphi_c), \quad (9)$$

где V — скорость движения; R — радиус поворота.

Нагруженность жизненно важных узлов и недопустимые перегрузки могут стать причиной потери подвижности при движении АТР по пересеченной местности, выбранный режим которого не соответствуют конструктивным параметрам ходовой части.

Столкновение с людьми или животными, проникновение третьих лиц может произойти из-за несовершенства информационного, алгоритмического или программного обеспечения.

Анализируя нарушения безопасности АТР можно отметить, что они связаны со следующими причинами:

- неправильно выбранный режим движения;
- не правильно спрогнозированы параметры окружающей среды;
- отказ или сбой системы диагностики и контроля;
- своевременно не проведено распознавание наличия в зоне безопасности АТР грунтов с низкой несущей способностью, третьих лиц, подвижных или неподвижных препятствий.

Подвижность. Прогнозирование параметров подвижности АТР и окружающей среды.

Подвижность АТР зависит от выбранной конструктивной схемы, характеристик ходовой части, состава информационного, алгоритмического и программного обеспечений. Так, например, колесно-шагающий движитель по сравнению с классической колесной схемой в колесно-шагающем режиме может обеспечить преодоление:

- препятствия высотой до двух диаметров колеса и более;
- участков опорной поверхности с низкой несущей способностью;
- углов наклона опорной поверхности соответствующих углам наклона барханов (31–33°).

Кроме того, в колесно-шагающем режиме передвижения за счет переменной геометрии ходовой части повышается профильная проходимость (возможность преодоления различных преград в плане и профиле, таких как рвы, трещины, эскарпы, контрэскарпы; камни, ямы или другие единичные препятствия), курсовая устойчивость и устойчивость к опрокидыванию.

В колесном режиме на подготовленной поверхности может быть реализована скорость, которая более чем на порядок превышает скорость передвижения в колесно-шагающем режиме.

Реализация требуемых динамических параметров АТР таких, как максимальная скорость, необходимая плавность хода, допустимая нагруженность узлов и механизмов обеспечивается выбором оптимальных параметров движителя и системы подрессоривания при соответствующих информационном, алгоритмическом и программном обеспечении.

Прогнозирование подвижности является одной из основных задач, которая должна решаться на борту АТР. При этом прогнозирование проходимости, как правило, разбивается на две зоны: ближнюю и дальнюю. В каждой зоне работают определенные типы информационных датчиков, информация от которых поступает в бортовой информационно-вычислительный и управляющий комплекс (БИВУК) для ее обработки и анализа. Следует отметить, что прогнозирование подвижности целесообразно проводить как в статике (при установившемся режиме движения), так и в динамике.

К основным параметрам, прогнозирование которых целесообразно производить при эксплуатации АТР, следует отнести следующие:

- окружающая среда (тип, габариты и расположение препятствий);
- тягово-сцепные характеристики движителя при взаимодействии его с опорной поверхностью и ее несущая способность;
- угловое положение АТР в пространстве;
- максимально допустимая скорость движения;
- нагруженность узлов и агрегатов.

В настоящее время прогнозирование параметров окружающей среды производится с помощью разнообразных информационных устройств (рис. 5, а, б), например, лазерными измерителями дальности (лидарами), ультразвуковыми (доплеровскими), радиолокационными, телевизионными (триангуляционными). Иногда применяют датчики инфракрасного излучения.

С учетом информации, содержащейся в географических и топографических картах, прогнозирование параметров АТР и окружающей среды в дальней зоне может производиться с использованием информации, поступающей от систем глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС и т. п.).

В ближней зоне прогнозирование углового положения (ПУП) с шарнирно-сочлененной рамой может производиться по угловому положению одной секции относительно другой (рис. 1, в) [6, 7]. Одна из возможных схем ПУП в вертикально-продольной плоскости АТР с жесткой рамой приведена на рис. 5, в. Откуда следует, что прогнозируемый усредненный угол наклона опорной поверхности в вертикально-продольной плоскости движения АТР на

расстоянии его базы L , (статический прогнозируемый дифферент АТР) может быть определен по формуле (2) [8]:

$$\alpha_{\text{пр}} = \arcsin \frac{D \sin(\xi - \varphi) - l_0 \sin \varphi - h \cos \varphi}{L}, \quad (10)$$

где φ – текущий угол наклона АТР в вертикально-продольной плоскости (дифферент); ξ – угол наклона измерителя расстояния до опорной поверхности относительно продольной оси АТР; $\alpha_{\text{пр}}$ – прогнозируемый осредненный угол наклона опорной поверхности (статический дифферент АТР); h – проекция расстояния от измерителя расстояния до точки контакта среднего колеса с опорной поверхностью на вертикальную ось АТР; L – база ТС; l_0 – проекция расстояния между точками крепления передней и средней подвесок на продольную ось АТР.

Критерии для расчета ПУП в пространстве по статическому крену и дифференту приведены [1].

На первом этапе выполнения работ целесообразно воспользоваться существующими традиционными методиками (например, разработанными в ОАО «ВНИИТРАНСМАШ») определения текущих и прогнозируемых тягово-сцепных свойств АТР таких, как буксование, коэффициент сцепления, коэффициент свободной силы тяги и другие [10]. На последующих этапах (после разработки облика АТР, изготовления ходового макета и проведения необходимых испытаний) целесообразно располагать методикой, учитывающей особенности конструкции, динамические качества и условия эксплуатации АТР.

Максимально допустимую критическую скорость движения следует выбирать исходя из сложившихся в данный момент времени условий эксплуатации и дорожной обстановки, а также массово-геометрических, тягово-динамических и сцепных свойств АТР с опорной поверхностью.

При движении по подготовленной и неподготовленной поверхности выбор скорости передвижения зависит от дорожной обстановки, погодных-климатических условий, текущей

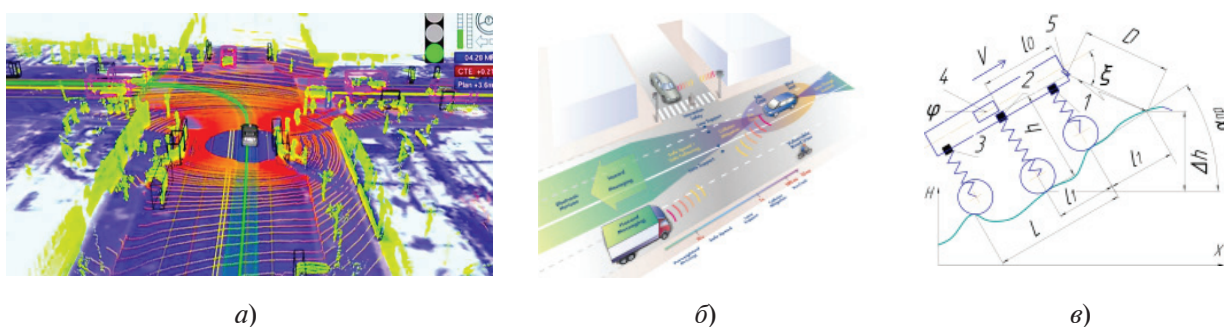


Рис. 5. Прогнозирование параметров окружающей среды с помощью информационной системы в дальней и ближней зоне

а – представление окружающей среды в памяти БИУВК в зоне безопасности АТР информационной системы фирмы GM (США);

б – необходимое информационное пространство окружающей среды воспринимаемое информационной системой в безопасной зоне;

в – расчетная схема одного из вариантов ПУП в ближней зоне: 1 – датчик хода подвески переднего колеса; 2 – датчик хода подвески среднего колеса; 3 – датчик хода подвески заднего колеса; 4 – датчик дифферента; 5 – измеритель дальности D до опорной поверхности перед АТР на расстоянии l_1 ; Δh – перепад высот рельефа на расстоянии базы L ; V – скорость передвижения

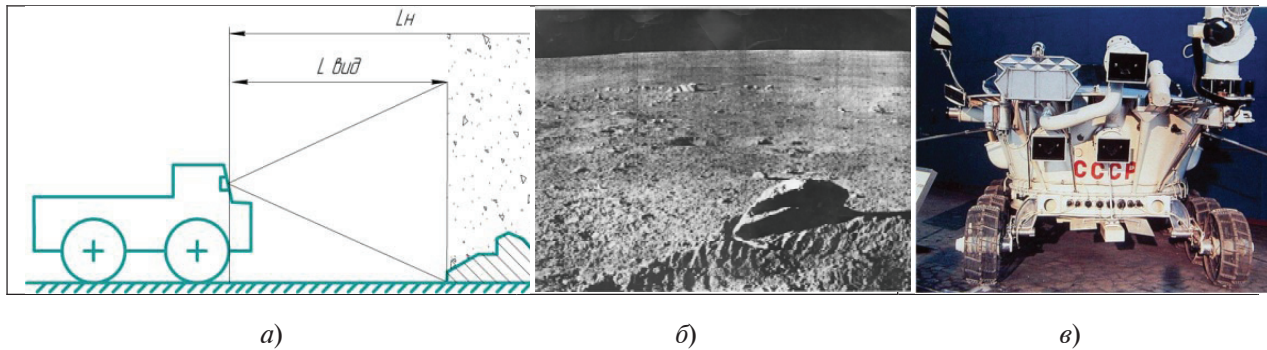


Рис. 6. Иллюстрационные материалы

- а* – к расчету тормозного пути; $LН$ – необходимая дальность «видения» для обеспечения реализации проектных характеристик АТР, $L_{\text{вид}}$ – текущая дальность «видения», зависящая от погодно-климатических условий;
- б* – след колеи советского планетохода «Луноход-2», оставшийся на поверхности Луны после переезда через камень (1973 г.);
- в* – советский планетоход «Луноход-2»

дальности «видения» информационных систем и тормозного пути. Исходя из требований безопасности, тормозной путь и текущая дальность «видения» (рис. 6, *а*) должны удовлетворять следующему неравенству $x_t \leq D_{\text{вид}}$, где x_t – тормозной путь, который может быть определен из соотношения (11):

$$x_t = T_0 V + \frac{\delta_0 V^2}{2g(\varphi_c \cos \alpha_{\text{пр}} - f \cos \alpha_{\text{пр}} \pm \sin \alpha_{\text{пр}})}, \quad (11)$$

где $D_{\text{вид}}$ – текущая дальность «видения» информационной системы; $T_0 = T_{\text{дои}} + T_{\text{сдк}} + T_{\text{арк}} + T_{\text{зск}}$ – постоянная времени запаздывания срабатывания тормозов; $T_{\text{дои}}$ – дискретность обновления информации о параметрах и состоянии окружающей среды, системы диагностики и контроля работоспособности механических, электронных, исполнительных и информационных устройств; алгоритмического и программного обеспечений; $T_{\text{сдк}}$ – время обработки информации о параметрах и состоянии окружающей среды, системы диагностики и контроля работоспособности механических, электронных, исполнительных и информационных устройств; алгоритмического и программного обеспечений; $T_{\text{арк}}$ – время, затраченное на анализ поступившей информации, принятие решений о режиме движения и выдачу команд на исполнительные механизмы; $T_{\text{зск}}$ – время запаздывания срабатывания исполнительных механизмов тормозной системы.

Из последнего соотношения при $D_{\text{вид}} = x_t$ определяется максимально допустимая (критическая) скорость из условия обеспечения безопасности АТР по тормозному пути $V_{\text{крт}}$, то есть:

$$V_{\text{крт}} = -\frac{T_0 \lambda}{2\delta_0} + \sqrt{\frac{T_0^2 \lambda^2}{4\delta_0^2} + \frac{D_{\text{вид}} \lambda}{\delta_0}}, \quad (12)$$

где $\lambda = 2g(\varphi_c \cos \alpha_{\text{пр}} - f \cos \alpha_{\text{пр}} \pm \sin \alpha_{\text{пр}})$.

Из (12) видно, что критическая скорость движения АТР зависит от времени запаздывания срабатывания тормозов, тягово-сцепных параметров движителя с опорной поверхно-

стью, коэффициента учета вращающихся масс, угла наклона поверхности, ускорения свободного падения и дальности видения.

Вторым ограничителем скорости движения является устойчивость к опрокидыванию при торможении, ударе в препятствие, повороте или преодолении препятствий. Критическая скорость движения в этих режимах определяется по приведенным выше соотношениям, а максимально – допустимая скорость выбирается из условия обеспечения гарантированной безопасности. Например, у советских планетоходов «Луноход-1» и «Луноход-2», максимально допустимая скорость была уменьшена на 20 % относительно критической [9].

К третьему ограничению следует отнести нагруженность узлов и механизмов. Если предположить, что максимальная нагруженность узлов и механизмов возникает при ударе в непреодолимое препятствие, то оперативная оценка максимальной величины сила удара может быть проведена по следующей упрощенной формуле:

$$P_{уд} = V k \sqrt{M c_k}, \quad (13)$$

где $P_{уд}$ – максимальная сила удара, возникающая при наезде колесом на препятствие; V – скорость движения; M – масса; c_k – радиальная жесткость системы «препятствие – колесо – элементы его крепления к корпусу АТР»; k – коэффициент пропорциональности, характеризующий диссипативные свойства системы «препятствие – колесо – элементы его крепления к корпусу АТР», влияние момента инерции относительно поперечной оси АТР и его геометрических параметров (высота расположения центра тяжести, диаметр колеса, конструктивная схема системы поддрессоривания, тягово-сцепные параметры колеса с опорной поверхностью, колесная формула).

Коэффициент пропорциональности k может быть определен экспериментальным путем либо с помощью математических моделей, адекватно описывающих процесс взаимодействия колеса с препятствием [1]. На первом этапе разработки АТР при проведении проектных оценок изменение коэффициента пропорциональности можно принять в следующих пределах $0,6 \leq k \leq 1$. $K = 1$ соответствует случаю центрального удара, то есть, когда высота расположения центра тяжести АТР совпадает с высотой приложения силы удара и диссипативные потери в системе «препятствие – колесо – элементы его крепления к корпусу АТР» отсутствуют.

Из (13) следует, что максимально допустимая (критическая) скорость $V_{крн}$ из условия допустимой нагруженности системы «препятствие-колесо-элементы его крепления к корпусу АТР» $P_{удн}$ определится из формулы:

$$V_{крн} = \frac{P_{удн}}{k \sqrt{M c_k}}, \quad (14)$$

Накопленный опыт эксплуатации ТС различного назначения показывает, что наличие формы и размеров препятствия иногда может оказаться недостаточным для оценки его упруго-диссипативных параметров. Примером может служить эксперимент с преодолением камня (рис. 6, б), который был проведен при эксплуатации советского «Лунохода-2» (рис. 6, в) на поверхности Луны. В процессе преодоления «Луноходом-2» камня по информации, поступившей по телеметрическим каналам на наземный пункт управления, не было зафиксировано существенного увеличения нагрузок на тяговый привод лунохода. Вероятно, из-за длительного воздействия солнечной радиации и перепада температур камень утратил прочностные свойства. Приведенный пример показывает, что при эксплуатации АТР кроме измерения и прогнозирования геометрических параметров препятствий необходимо научиться прогнозировать их прочностные свойства, например, путем измерения мощности отраженного от препятствия сигнала и т. п.

Скоростной режим. Скоростной режим зависит от следующих условий:

- вида окружающей среды (подготовленная или неподготовленная), погоднo-климатических условий;
- состояния опорной поверхности и дорожно-транспортной обстановки;
- технического состояния АТР, его конструктивной схемы и параметров системы под-
рессоривания;
- состава информационного, алгоритмического и программного обеспечений;
- быстродействия и объема памяти БВИУК.

Решающим фактором при выборе скоростного режима является гарантированное обеспечение безопасности АТР и окружающей его среды.

Так как при эксплуатации АТР может возникнуть необходимость применения экстренного торможения, интенсивного разгона или поворота с малым радиусом на большой скорости, то нельзя исключить неожиданную встречу с непреодолимым или преодолимым препятствием, а также воздействием на АТР случайных бесконечно малых внешних и внутренних силовых возмущающих факторов. Поэтому, приведенные выше критерии оценки критической скорости движения АТР не позволяют гарантировать сохранение подвижности, то есть обеспечить безопасность функционирования на любых режимах движения и в любых условиях эксплуатации (основное требование – сохранение безопасности АТР и окружающей среды).

Максимально безопасная скорость. Под максимально безопасной скоростью в дальнейшем будем понимать такую скорость, при движении с которой гарантируется сохранение подвижности в случае попадания АТР в приведенные выше ситуации. Наличие таких ситуаций в некоторых случаях состояния окружающей среды также может привести к потере подвижности. Поэтому при выборе критерия оценки максимально безопасной скорости движения АТР (в дальнейшем будем ее обозначать символом $V_{без}$) предлагается за основу принять соотношение, включающее в себя критическую скорость в соответствующей ситуации (экстренное торможение, интенсивный разгон, удар в непреодолимое препятствие, тормозной путь, дальность видения и т. д.) и коэффициенты запаса по критической скорости а также входящие в нее критические параметры, например, угол наклона поверхности, дальность видения, коэффициент сцепления и др. В одних ситуациях критическим параметром может являться угол наклона поверхности, в других – тормозной путь (дальность видения), коэффициент сцепления, сопротивление движению и т. д.

Максимально безопасная скорость АТР, при движении с которой гарантируется устойчивость к продольному опрокидыванию, (например, при экстренном торможении, интенсивном разгоне, жестком ударе в непреодолимое препятствие) $V_{безх}$ может быть определена из соотношения:

$$V_{безх}^2 = K_{динх} \frac{2gl_1 J_{nx}}{MH^2(1-K)^2} [1 - \sin(K_\alpha \alpha + \varphi_n)], \quad (15)$$

безопасность эксплуатации по тормозному пути и дальности видения $V_{безт}$ может быть определена из следующего соотношения:

$$V_{безт} = K_{динт} \left(-\frac{T_0 \lambda(K_\alpha)}{2\delta_0} + \sqrt{\frac{T_0^2 \lambda^2(K_\alpha)}{4\delta_0^2} + \frac{K_{Dвид} D_{вид} \lambda(K_\alpha)}{\delta_0}} \right), \quad (16)$$

где $K_{динх}$, $K_{динт}$ – коэффициенты запаса по скорости при оценке, соответственно, устойчивости к опрокидыванию или безопасности по тормозному пути (дальности видения); $K_\alpha = \frac{1}{1-m}$ – коэффи-

коэффициент запаса по углу наклона поверхности α , определяемый из соотношения следующего соотношения; m – необходимый запас по преодолеваемому углу подъема; $\lambda(K_\alpha)$ – коэффициент запаса по состоянию окружающей среды:

$$\lambda(K_\alpha) = 2g(\varphi_c \cos(\frac{\alpha_{np}}{K_\alpha}) - f \cos(K_\alpha \alpha_{np}) + \sin(K_\alpha \alpha_{np})). \quad (17)$$

В последнем соотношении параметр $\lambda(K_\alpha)$ определен для случая движения АТР под уклон.

Термин «безопасность по тормозному пути – дальности видения» означает, что в процессе движения АТР не попадет в критическую ситуацию, так как его остановка должна произойти раньше, чем возникнет критическая ситуация. Например, остановка АТР произойдет перед впадиной, обрывом, неожиданно остановившимся впереди идущим ТС или появившимся человеком.

Аналогичные критерии для оценки безопасной скорости движения АТР могут быть получены при совершении поворота, возникшем боковом сносе, преодолении препятствий или разнообразных по форме и размерам неровностей рельефа.

Выводы

Приведенный анализ особенностей эксплуатации ТС с автономной системой управления, а также накопленный опыт в этом направлении в зарубежных странах и Российской Федерации позволяет заключить:

1. Создание в Российской Федерации АТР является актуальной, своевременной и практически реализуемой задачей, которая может быть решена в кратчайшие сроки, учитывая, что сохранились специалисты обладающие знаниями в этой предметной области, накоплен огромный опыт экспериментальной, конструкторской и технологической работы, а главное имеется серьезный технический задел.

2. К центрам компетенции следует отнести следующие предприятия:

– ОАО «ВНИИТрансмаш» – головной Исполнитель работ – разработка конструкторской документации, информационного и программного обеспечений; навигация, производственная база;

– ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» – прикладное программное и информационное обеспечение, навигация;

– ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» – алгоритмическое обеспечение;

– ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт» (НАМИ) – организация и проведение испытаний;

– ООО «РОКАД» (соисполнитель) – разработка конструкторской документации;

– ЗАО НТП «Ровер» (соисполнитель) – производственная кооперация;

– ООО «Конвент+» (соисполнитель) – производственная база;

– ООО «Скай-Консалтинг» (соисполнитель) – системное программное обеспечение.

3. По нашему мнению в конструктивной схеме шасси, зависящий от назначения АТР и облика окружающей среды, в отличие от классической компоновки могут присутствовать следующие особенности:

– переменная геометрия, колесная формула 6×6;

– шарнирно-сочлененная рама;

– не исключается применение колесно-шагающего движителя и коническо-цилиндрических колес [6].

Список литературы

1. Авотин Е.В., Болховитинов И.С., Кемурджиан А.Л. и др. М.: «Наука» Главная редакция физико-математической литературы, 1979.
2. Нагайцев М.Г., Сайкин А.М., Ендачев Д.В. «Беспилотные» автомобили – этапы разработки и испытаний. Журнал Автомобильных Инженеров № 5 (76), 2012.
3. Авотин Е.В., Кажукало И.Ф., Мицкевич А.В. Авторское свидетельство № 841208 «Способ перемещения многоопорного транспортного средства», 1981.
4. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. М.: «Машиностроение», 1981.
5. Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность – машина. М.: «Машиностроение», 1973.
6. Громов В.В. и др. // Труды Международной школы-семинара «Адаптивные роботы и GSLT, Moscow-St. Petersburg-Brescia», 2004.
7. Bogatchev A., Koutcherenko V., Matrosov S., Fedoseev S., Pavlovsky V., Vladykin S., Petriga V. From Planetary Rovers to Special Robots, 1st German-Russian Conference on Robotics (GRCR), Munich, GERMANY, May 2012.
8. Авотин Е.В., Кемурджиан А.Л., Мишкинюк В.К., Поляков Л.Н. Авторское свидетельство № 754787: «Устройство для прогнозирования положения ТМ», 1980.
9. Передвижная лаборатория на Луне – «Луноход-1» в 2 т. Т. 2. / Под. ред. А.П. Виноградова. М.: «Наука», 1978.
10. Кемурджиан А.Л., Громов В.В., Черкасов И.И., Шварев В.В. Автоматические станции для изучения поверхностного покрова Луны. Машиностроение, 1976.

References

1. Avotin E.V., Bolkhovitinov I.S., Kemurjan A.L., etc. (1979) «*Nauka*» Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury [«*Nauka*» Main edition of physico-mathematical literature], Moscow.
2. Nagaytsev MG, Saikin A.M., Yendachev A.I. (2012) «*Bespilotnye*» avtomobili – etapy razrabotki i ispytaniy [«Unmanned» cars – the stages of development and testing], *Zhurnal Avtomobil'nykh Inzhenerov* [Journal of Automotive Engineers], no. 5(76).
3. Avotin E.V., Kajukalo I.F., Mickevich A.V. (1981) *Avtorskoe svidetel'stvo № 841208 «Sposob peredvizheniya mnogoopornogo transportnogo sredstva* [Author's certificate no. 841208 «Way to travel manybearing vehicle»]
4. Smirnov G.A. (1981) *Teoriya dvizheniya kolesnykh mashin* [Theory of motion of wheeled vehicles]. «*Mashinostoenie*» [«*Machinery building*»], Moscow.
5. Becker M.G. (1973) *Vvedenie v teoriyu sistem mestnost' – mashina* [Introduction to the theory of systems countryside – machine], «*Mashinostoenie*» [«*Machinery building*»], Moscow.
6. Gromov V.V., etc. (2004) *Trudy Mezhdunarodnoi shkoly-seminara «Adaptivnye roboty i GSLT, Moscow-St. Petersburg-Brescia*» [Proceedings of International school-seminar «Adaptive robots and GSLT, Moscow-St. Petersburg-Brescia»].
7. Bogatchev A., Koutcherenko V., Matrosov S., Fedoseev S., Pavlovsky V., Vladykin S., Petriga V. From Planetary Rovers to Special Robots, 1st German-Russian Conference on Robotics (GRCR), Munich, GERMANY, May 2012.
8. Avotin E.V., Kemurjan A.L., Mishkiniuk VK, Poliakov L.N. (1980) *Avtorskoe svidetel'stvo № 754787: «Ustroistvo dlya prognozirovaniya polozheniya TM»* [Copyright certificate no. 754787 «Device for prediction of TM»].
9. *Peredvizhnaya laboratoriya na Lune – «Lunokhod-1»* [Mobile laboratory on the moon «Lunokhod-1»], Pod. red. A.P. Vinogradova, «*Nauka*» [Under. Ed. by A.P. Vinogradov, Nauka], Moscow, 1978, vol. 2.
10. Kemurjan A.L., Gromov V.V., Cherkasov I.I., Shvariov V.V. (1976) *Avtomaticheskie stantsii dlya izucheniya poverkhnostnogo pokrova Luny* [Automatic station for the study of the surface cover of the moon], *Mashinostoenie* [Mechanical engineering].