

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 504.5:629.762.2

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИСПЫТАНИЙ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ГЕОЛОГИЧЕСКУЮ СРЕДУ

© 2007 г. **Н. Г. Максимович**

ФГНУ «Естественнонаучный институт», г. Пермь

Поступила в редакцию 23.05.2006 г.

После исправления 20.11.2006 г.

Рассмотрено воздействие на геологическую среду кратковременных выбросов большой мощности при испытании ракетных двигателей на твердом топливе. Разработана методика исследования выпадения на земную поверхность твердых и жидких продуктов сгорания ракетного топлива. Приведены результаты исследований состояния геологической среды в районе испытаний. Оценены размеры зоны влияния испытательного стенда.

ВВЕДЕНИЕ

Создание технических устройств, обладающих значительными запасами энергии, привело к появлению специфических источников воздействия на окружающую среду, характеризующихся кратковременными выбросами большой мощности. Примерами подобных источников воздействия могут служить взрывы емкостей с горючими веществами, взрывы боеприпасов, запуски ракет, стендовые испытания или уничтожение ракетных двигателей и т.д. Воздействие таких выбросов на окружающую среду изучено мало. Освещены только отдельные аспекты этой проблемы [1, 4–6, 9]. Протекающие при этом явления не вписываются в существующие математические модели, что во многих случаях не позволяет достаточно объективно охарактеризовать источник воздействия с экологических позиций.

В рамках решения данной проблемы выполнено исследование воздействия испытаний ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) на геологическую среду. В качестве объекта был выбран открытый стенд для сжигания твердых ракетных топлив в г. Пермь.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСТОЧНИКА ВОЗДЕЙСТВИЯ

В ходе испытаний ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) за короткий период времени в атмосферу поступает значительное количество загрязняющих веществ. При осаждении из атмосферы продуктов сгорания загрязняются растительность, почва, поверхностные и подземные воды, грунты. Загрязняющие вещества мигрируют, накапливаются, трансформируются в этих средах. К настоящему времени слабо изучен характер воздействия таких выбросов на геологическую среду, что не позволяет разрабатывать эффективные способы ее защиты. Кроме того, отсутствие объективной информации об экологических последствиях вызывает беспокойство у населения, проживающего в районе испытаний.

Испытания и отжиг РДТТ осуществляется на специально оборудованном открытом стенде с горизонтальным расположением двигателя и наклонной отбойной стенкой. Это обуславливает выброс продуктов сгорания в атмосферу на большую высоту и их осаждение на значительную территорию. Процесс сгорания топлива РДТТ массой от 10 до 50 т происходит за 10–100 с. При этом образуются продукты сгорания с температурой 1500–3500°К со сверхзвуковыми скоростями истечения из сопла и большими массовыми расходами загрязняющих веществ — 100–700 кг/с. При движении в атмосфере струи продуктов сгорания, вышедшей из сопла, происходит многостадийный процесс изменения ее газотермодинамических, физико-химических, геометрических параметров. В продуктах

сгорания содержатся твердые, газообразные и жидкие соединения: оксид алюминия, хлористый водород, оксиды азота, диоксид углерода и др. [12].

Выделяют два этапа формирования облака продуктов сгорания: 1) истечение горячей сверхзвуковой струи из сопла, а затем дозвуковой до отбойной стенки стенда в горизонтальном направлении; 2) отражение газовой дозвуковой струи от отбойной стенки в атмосферу и собственно формирование облака продуктов сгорания. После достижения высоты стабилизации, которая может составлять 1–2 км, облако начинает перемещаться с потоком воздуха. При таком перемещении происходит его рассеивание вследствие турбулентной диффузии и гравитационное оседание аэрозолей и твердых частиц [12].

Расчеты, выполненные В. М. Суслоновым и В. Н. Ивановым [12], показали, что при испытании образуется вытянутое облако продуктов сгорания с концентрациями хлористого водорода порядка 10–20 тыс. мг/м³. В процессе первоначального подъема и расширения облака средняя концентрация хлористого водорода в нем за несколько первых минут уменьшается до 100–1000 мг/м³. Такая концентрация в центре облака может сохраняться в течение нескольких десятков минут. При относительной влажности воздуха свыше 60% и содержании водяных паров в продуктах сгорания более 7% в облаке может происходить конденсация паров соляной кислоты и последующее выпадение капель аэрозоля. В этом случае наблюдаются более высокие приземные концентрации *HCl*, чем в условиях без конденсации. Основными «загрязнителями» геологической среды являются твердые частицы оксида алюминия и соляная кислота.

Испытания РДТТ проводятся, круглогодично начиная с 1964 г. Нами изучалось влияние испытаний на поверхностные воды, грунты и снежный покров.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИСПЫТАНИЙ

Испытательный стенд находится в Кировском районе г. Пермь. Экологическая обстановка района складывается под воздействием предприятий нефтехимической, химической, оборонной, строительной и других видов промышленности, а также выбросов автотранспорта. Длительное техногенное воздействие различных источников привело к определенным деформациям компонентов окружающей среды, причем выделить роль каждого источника крайне затруднительно.

Территория расположена на правобережной пойме и 2-й надпойменной террасе р. Кама. Рельеф поймы волнистый, осложнен многочисленными заболоченными старичными понижениями и озерами, узкими грядами, валами. Поверхностные воды представлены старичными озерами в пределах широкой правобережной поймы Воткинского водохранилища, а также многочисленными болотами на пойме и в меньшей степени на террасах Камы. Воды гидрокарбонатно-кальциево-натриевого состава с минерализацией 0.1–0.2 г/л. В талых снежных водах преобладает ион SO_4^{2-} , а общая минерализация не превышает 20 мг/л [10, 12].

В геологическом строении территории принимают участие аллювиальные отложения четвертичной системы. Пойму слагают суглинки, глины (иногда заторфованные), супеси, пески, гравийные грунты, 2-ю надпойменную террасу — пески, песчано-гравийные отложения, суглинки. Они подстилаются континентальными отложениями верхнего отдела пермской системы, представленными аргиллитами, песчаниками, известняками.

В пределах поймы грунтовые воды вскрыты на глубине 0–3 м. Вскрытая мощность водообильной зоны составляет около 20 м. В пределах 2-й надпойменной террасы грунтовые воды залегают на глубинах 7–14 м. Воды пресные гидрокарбонатно-хлоридно-кальциево-натриевые, гидрокарбонатно-кальциево-натриевые, хлоридно-карбонатно-кальциевые, гидрокарбонатно-кальциевые, хлоридно-сульфатно-натриевые с минерализацией 0.15–0.6 г/л. Водоносный горизонт плохо защищен от поверхностного загрязнения, так как зона аэрации сложена в основном песками с коэффициентом фильтрации от 0.2 до 3.2 м/сут.

Преобладающий тип почв на исследуемой территории — подзолистый, включающий

несколько подтипов, различающихся глубиной залегания, мощностью и выраженностью подзолистого горизонта. Примыкающая к пойме Камы часть территории характеризуется болотно-подзолистым и болотным типами почв. По гранулометрическому составу доминируют песчаные и супесчаные разновидности. Растительность в пределах исследуемой территории представлена лесными, луговыми, болотными и с высокой долей синантропных видов сообществами растений [8].

ОРГАНИЗАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ВЛИЯНИЕМ ИСПЫТАНИЙ НА ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ ОБСТАНОВКУ

Для выявления экологических последствий сжигания твердых ракетных топлив необходима организация системы наблюдений за миграцией и формами нахождения загрязнителей в окружающей среде. Опыт, накопленный во время наблюдений при испытаниях на открытом стенде, с учетом результатов математического моделирования рассеивания продуктов сгорания [12], дает возможность предложить систему мониторинга, позволяющую дать оценку воздействия сжигания ракетного топлива на окружающую среду. Эта система включает две составляющие — наблюдения во время испытаний и постоянные наблюдения за состоянием окружающей среды (рис. 1).

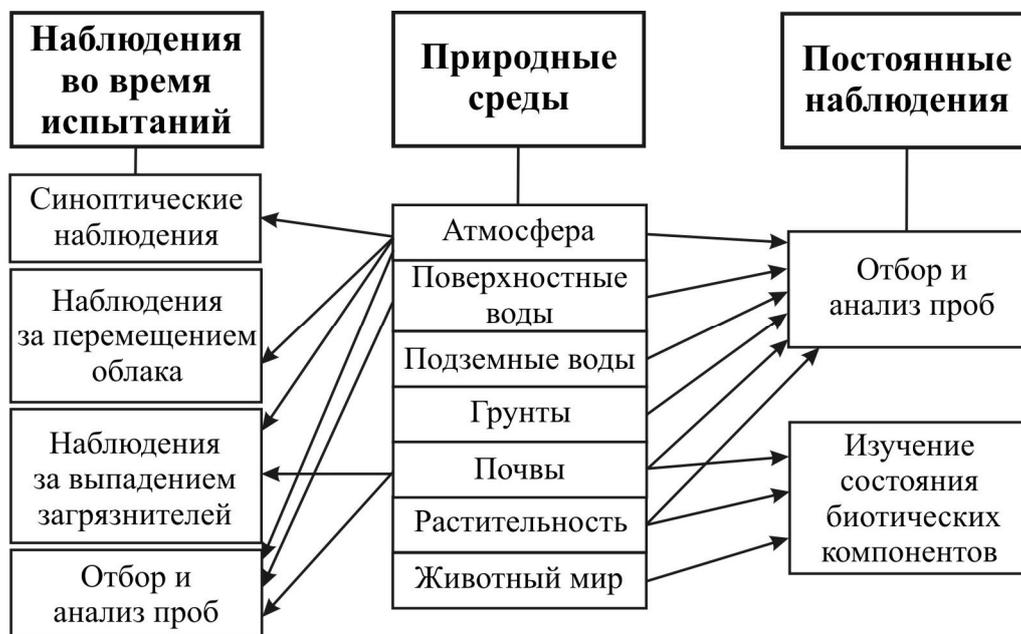


Рис. 1. Система наблюдений для оценки воздействия сжигания ракетного топлива на окружающую среду.

Наблюдения во время испытаний позволяют определить степень, зону и продолжительность загрязнения атмосферы, состав и количество выпадающих загрязняющих веществ и их взаимодействие с почвой, грунтами и гидросферой.

Постоянные наблюдения включают отбор и анализ проб воздуха (для определения фона), почв, грунтов, подземных и поверхностных вод и оценку состояния биологических компонентов, позволяющих оценить динамику накопления загрязнений и влияние испытаний на окружающую среду в целом. Элементы предлагаемой системы были опробованы как во время испытаний, так и при экологическом обследовании района стенда. Некоторые методические особенности проведенных наблюдений и их результаты изложены ниже.

Наблюдения за выпадением загрязнителей из облака

Основные загрязнители, как отмечалось выше, выпадение которых возможно на

земную поверхность в заметных количествах, HCl и оксиды алюминия.

Для оценки величин выпадения HCl на земную поверхность разработана и апробирована методика, заключающаяся в расстановке специальных ловушек по траектории движения облака. Ловушки представляют собой емкости, заполненные дистиллированной водой или раствором 0.01 н. Na_2CO_3 . В ловушках за счет выпадения из облака должно происходить увеличение содержания Cl^- и снижение рН растворов.

Предварительная апробация методики была проведена во время испытаний 28 и 29 мая 2002 г. Ловушки были установлены в трех точках в районе стенда (рис. 2). Контроль осуществлялся по двум параметрам — рН и Cl^- . Во время этих испытаний определялся также оптимальный объем растворов, заливаемых в ловушки (табл. 1). Как показали наблюдения, использование 0.01 н. раствора Na_2CO_3 объемом 0.25 л позволяет повысить чувствительность метода. Указанные параметры ловушек были использованы во время последующих испытаний. При испытаниях (5 июня 2002 г.) ловушки были размещены в 11 точках в районе стенда по направлению ветра, фиксированного до начала испытаний. Полученные значения рН и содержания Cl^- показаны на рис. 3.

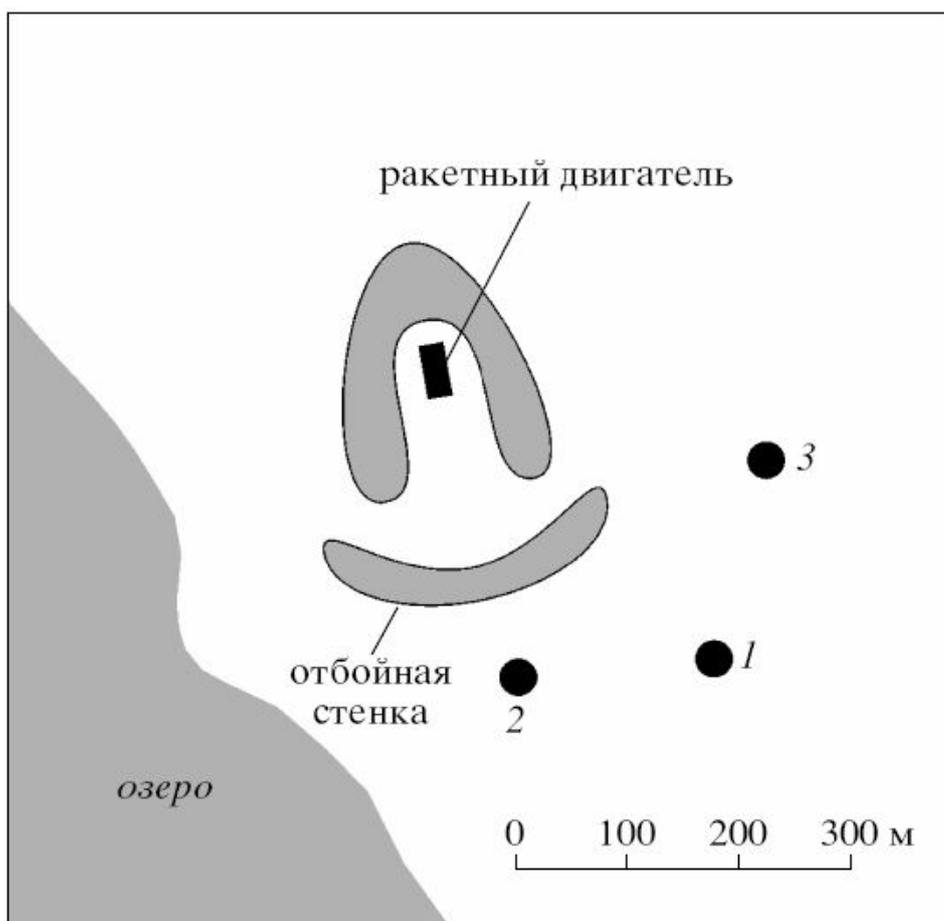


Рис. 2. Схема размещения точек наблюдения во время испытаний 28 мая и 29 мая 2002 г.

Таблица 1. Экспериментальные наблюдения по оценке возможности контроля выпадений хлористого водорода во время испытаний 28 и 29 мая 2002 г.

№ точки	28 мая объем жидкости 0,50 л				29 мая объем жидкости 0,25 л			
	H_2O		Na_2CO_3		H_2O		Na_2CO_3	
	рН	Cl^-	рН	Cl^-	рН	Cl^-	рН	Cl^-
1	7,27	7,24	10,13	13,93	6,80	6,55	8,07	9,75
2	7,18	11,56	9,40	15,88	-	16,86	9,66	29,53
3	6,17	3,90	10,35	7,38	6,29	13,09	10,15	11,56
Фон	7,15	2,50	10,37	4,60	6,24	2,50	10,35	4,60

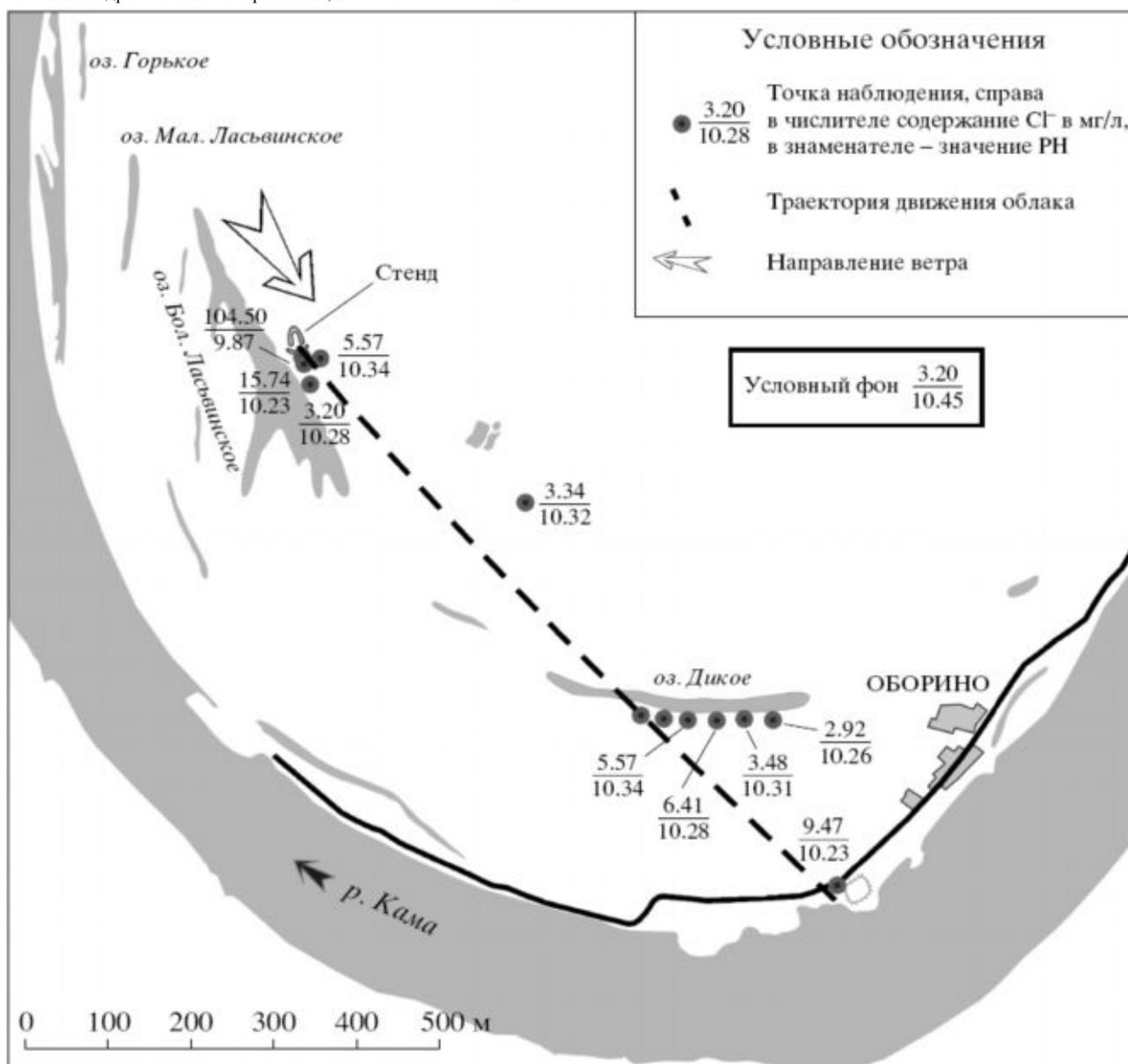


Рис. 3. Экспериментальные наблюдения за выпадением хлористого водорода в ловушки с раствором Na_2CO_3 во время испытания 5 июня 2002 г.

Во всех трех случаях после проведения испытаний зафиксировано увеличение содержания Cl^- в ловушках, что свидетельствует о принципиальной возможности использования этого метода для контроля выпадений HCl . Для количественной оценки выпадения HCl из облака необходима дальнейшая разработка оптимальной сети наблюдения по траектории его движения. Отметим также, что предпринимались попытки обнаружения твердых частиц оксида алюминия в ловушках. Однако его концентрация оказалась ниже чувствительности методов.

Основными компонентами твердой фазы выбросов, образующихся при испытаниях, являются различные модификации оксида алюминия: $\alpha-Al_2O_3$, $\gamma-Al_2O_3$, $\chi-Al_2O_3$, $\delta-Al_2O_3$, $\theta-Al_2O_3$ и $\kappa-Al_2O_3$. В природных условиях встречается только $\alpha-Al_2O_3$ — корунд, что позволяет уверенно использовать остальные модификации в качестве индикаторов загрязнения при сжигании РДТТ. Отметим, что α , β , $\gamma-Al_2O_3$ входят в состав так называемого технического глинозема [2].

Корунд химически стоек по отношению ко многим химическим реагентам. Он очень медленно реагирует с растворами щелочей и кислот даже при высоких температурах. Корунд

обладает высокой твердостью, практически не гигроскопичен. Теплота образования по реакции $2Al_{ТВ} + 1.5O_{2ГАЗ} = \alpha - Al_2O_3$, происходящей при сжигании ракетного топлива, составляет примерно 1675 кДж/моль [3, 14]. При нагревании до температуры 1600–1700°C происходит разложение ($\beta - Al_2O_3$ и превращение его в $\alpha - Al_2O_3$).

$\gamma - Al_2O_3$ имеет кристаллическую решетку кубической сингонии (типа шпинели). В зависимости от температуры получения кристаллизуется как в скрытокристаллической, так и в явно кристаллической формах. При нагревании превращение $\gamma - Al_2O_3$ в $\alpha - Al_2O_3$ происходит с образованием промежуточных метастабильных фаз δ и $\theta - Al_2O_3$ [7, 14]. В отличие от $\alpha - Al_2O_3$, $\gamma - Al_2O_3$ хорошо растворяется как в кислотах, так и в щелочах. Скрыто-кристаллический $\gamma - Al_2O_3$ обладает большой способностью поглощать влагу, а также другие вещества.

Дифрактограммы различных модификаций оксида алюминия часто невыразительны, так как фазы слабо раскристаллизованы [16].

Для исследования состава твердой фазы твердых продуктов сгорания было отобрано 4 образца грунта рядом с отбойной стенкой испытательного стенда. Рентгеноструктурный анализ их состава был выполнен В. Г. Шлыковым. В пробах обнаружены кристаллические фазы $\alpha - Al_2O_3$ (корунд) до 19%, в меньших количествах $\gamma - Al_2O_3$, $\delta - Al_2O_3$, $\theta - Al_2O_3$, $\kappa - Al_2O_3$ — до 17% суммарно.

Для двух проб проведен анализ водной вытяжки. Водная вытяжка имеет pH~5.5–5.8 и хлоридно-кальциевый состав. Содержание водорастворимых компонентов составляет 0.7–2.1 г/кг (табл. 2). Основным компонентом, который может переходить в природные воды и мигрировать в водной среде, является Cl^- — 289–968 мг/кг. Алюминий в водные растворы переходит незначительно ввиду небольшой кислотности вытяжки. Его содержание составляет 0.3–1.2 мг/кг грунта.

Таблица 2. Химический состав водной вытяжки твердых продуктов сгорания, мг/кг грунта

№ пробы	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-	NO_2^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Na^+ + K^+$	NH_4^+	Fe^{3+}	$Fe_{общ}$	Al^{3+}	Сумма	pH
1	33.6	348.2	967.9	63.1	0.1	489.0	38.9	118.4	60.5	0.2	0.6	0.3	2120.1	5.5
2	30.5	144.1	289.0	27.6	0.4	163.4	6.1	57.5	17.9	0.1	0.3	1.2	737.5	5.8

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ГРУНТОВ

Для изучения загрязнения грунтов проводился отбор проб как непосредственно в районе стенда, так и по трем профилям протяженностью до 4.1 км от него (рис. 4). Пробы представлены почвенно-растительным слоем и подстилающим его песком, реже суглинком. Из грунтов проводились водные вытяжки, в которых определялись pH, Al^{3+} , Cl^- . Твердая фаза исследовалась рентгеноскопически для выявления твердых техногенных компонентов, прежде всего оксидов алюминия.

Рентгеноструктурный анализ грунтов, выполненный без какой-либо подготовки образцов, не показал в них наличия оксидов алюминия ввиду их малого количества. После этого была сделана попытка выделения из проб оксидов алюминия, исходя из размеров частиц 10–0.1 мкм и их удельного веса. Пробы просеивались на ситах, отмучивались в водной среде, отстаивались, просушивались.

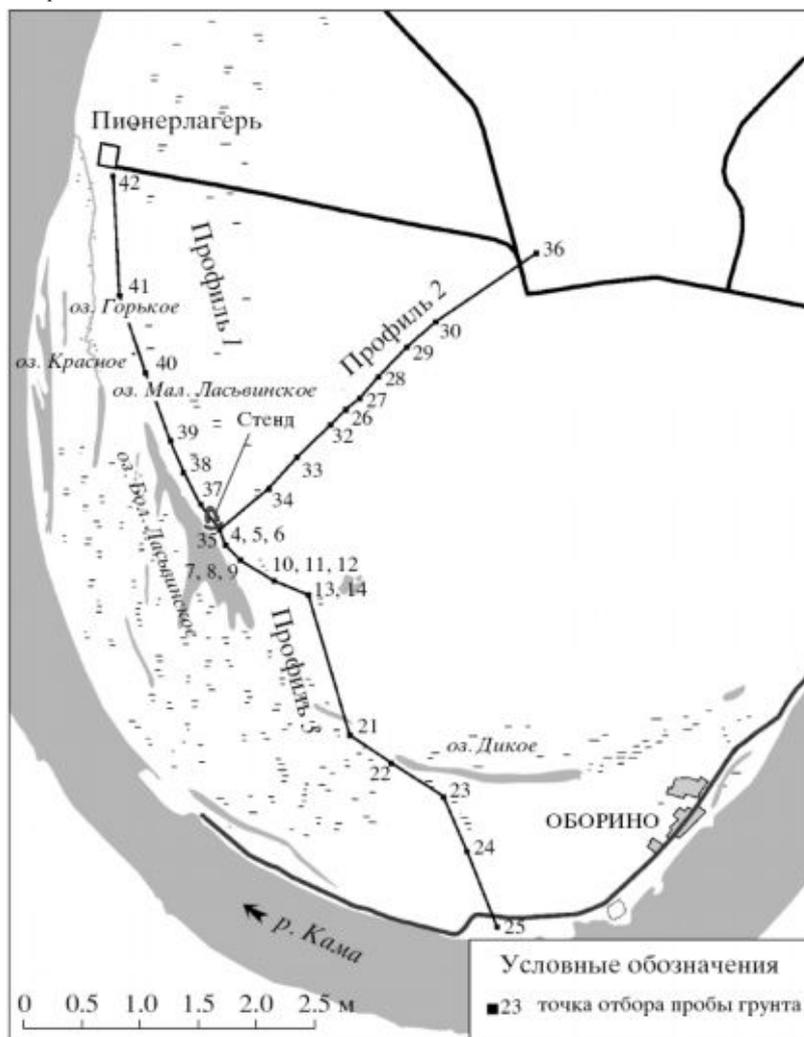


Рис. 4. Схема опробования грунтов в районе стенда.

По результатам рентгеноструктурного анализа можно сделать вывод, что минеральный состав проб, подготовленных по этой методике, весьма схож. Минеральная фаза состоит из кварца, плагиоклаза и примеси калиевых полевых шпатов. В пробе 13 присутствует небольшое количество доломита. Из глинистых минералов — смектит, хлорит, гидрослюда, каолинит и иллит. Техногенные продукты обнаружены только в пробе 4, в 150 м от отбойной стенки. В ее составе присутствует значительное количество техногенного оксида алюминия: 17–18% $\alpha - Al_2O_3$ (корунда) и 10–11% $\delta - Al_2O_3$ (не исключена и γ -форма).

Содержания хлоридов, алюминия и значения рН водной вытяжки грунтов в районе стенда представлены на рис. 5. Повышение содержания Cl^- до 90 мг/кг наблюдается лишь в небольшой 50-метровой зоне непосредственно за отбойной стеной. На остальной исследованной территории в радиусе 3–4 км от стенда содержание Cl^- незначительно и в среднем составляет около 20 мг/кг, т.е. соответствует природному фону. Исключением являются пробы 21–23 и 25, расположенные на профиле 3, где почвенно-растительный слой подстилается суглинками. Для этих проб содержание хлоридов составляет 40–50 мг/кг, что, скорее всего, объясняется естественными причинами.

Отчетливых закономерностей воздействия стенда на рН грунтов и содержание в них подвижных форм алюминия не выявлено. Изменение значения водородного показателя грунтов на профилях объясняется естественными условиями. Снижение рН наблюдается на заболоченных участках. На тех же участках отмечено некоторое увеличение в водных вытяжках содержания алюминия, подвижного в кислой среде.

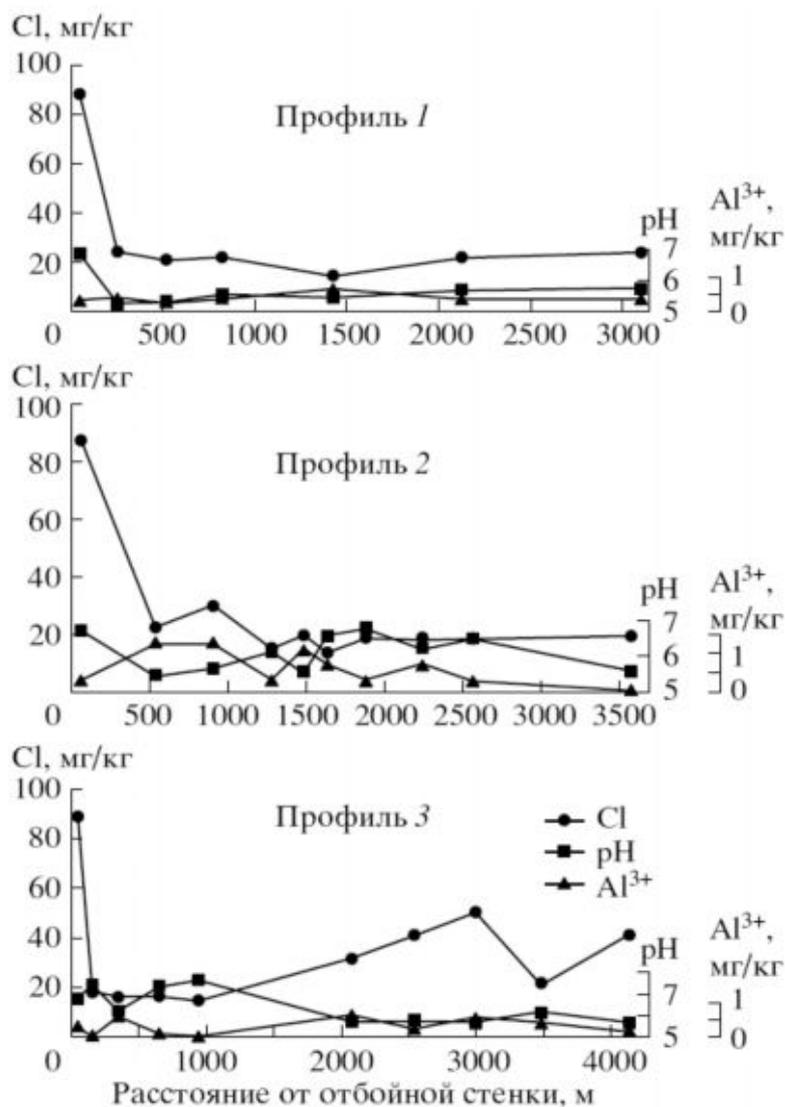


Рис. 5. Значения pH и содержание Cl^- , Al^{3+} в водной вытяжке из грунтов района стенда.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД

Для изучения влияния испытаний на поверхностные воды в районе стенда опробовались заполненные водой искусственные понижения рельефа, расположенные непосредственно за отбойной стеной, а также болота и мелкие водопроявления перед отбойной стенкой и западнее стенда. Наиболее загрязненными оказались воды, имевшие при испытаниях непосредственный контакт с реактивной струей. Вода относится к сильнокислой (pH~1.9), минерализация составляет 5.2 г/л. Состав воды хлоридно-кальциевый, причем содержание Cl^- составляет 3.9 г/л. В воде присутствует значительное количество ионов алюминия — 0.219 г/л и трехвалентного железа — 0.13 г/л.

Остальные водопроявления в районе стенда можно разделить на две группы. Первая группа расположена непосредственно за отбойной стенкой и подвержена воздействию стенда. Состав воды в водоемах этой группы преимущественно гидрокарбонатно-кальциевый, pH 6.5–7.7, минерализация 0.3–0.6 г/л. Вода характеризуется относительно высоким содержанием ионов хлора — 70–99 мг/л. Содержание ионов алюминия до 0.12 мг/л.

Вторая группа водопоявлений с преимущественно природным режимом — болота, находящиеся на расстоянии 400 и 500 м от отбойной стены. Состав воды в них гидрокарбонатно-кальциевый, причем минерализация составляет 36–60 мг/л (воды относятся к ультрапресным). Содержание Cl^- невысоко и составляет 6–14 мг/л. Для болотной воды характерны естественные низкие значения водородного показателя (pH~5.3–6.1). Повышенная кислотность приводит к увеличению миграционной активности железа и

алюминия, содержание которых достигает Fe^{3+} — 1.15 и Al^{3+} — 0.14 мг/л. Дефицит кислорода в болотной воде ведет к появлению ионов двухвалентного железа — до 2.1 мг/л. Перечисленные закономерности характерны для природных вод такого типа.

Режимные наблюдения за изменением химического состава поверхностных вод района стенда в период проведения серии испытаний показывают, что в водопрооявлениях, находящихся за отбойной стенкой, наблюдается рост содержания отдельных компонентов, в первую очередь хлора (рис. 6), даже, несмотря на прошедшие дожди. Тогда как в болоте, находящемся в 400 м за отбойной стеной, напротив, наблюдается снижение концентраций всех компонентов, что объясняется разбавлением дождевой водой.

Исследование воды в расположенном недалеко от стенда Большом Ласьвинском озере (см. рис. 3) не выявило какого-либо влияния на их состав произведенных испытаний РДТТ на открытом стенде.

Незначительное и локализованное на небольшом участке загрязнение грунтов и поверхностных вод не оказывает заметного влияния на подземные воды [10].

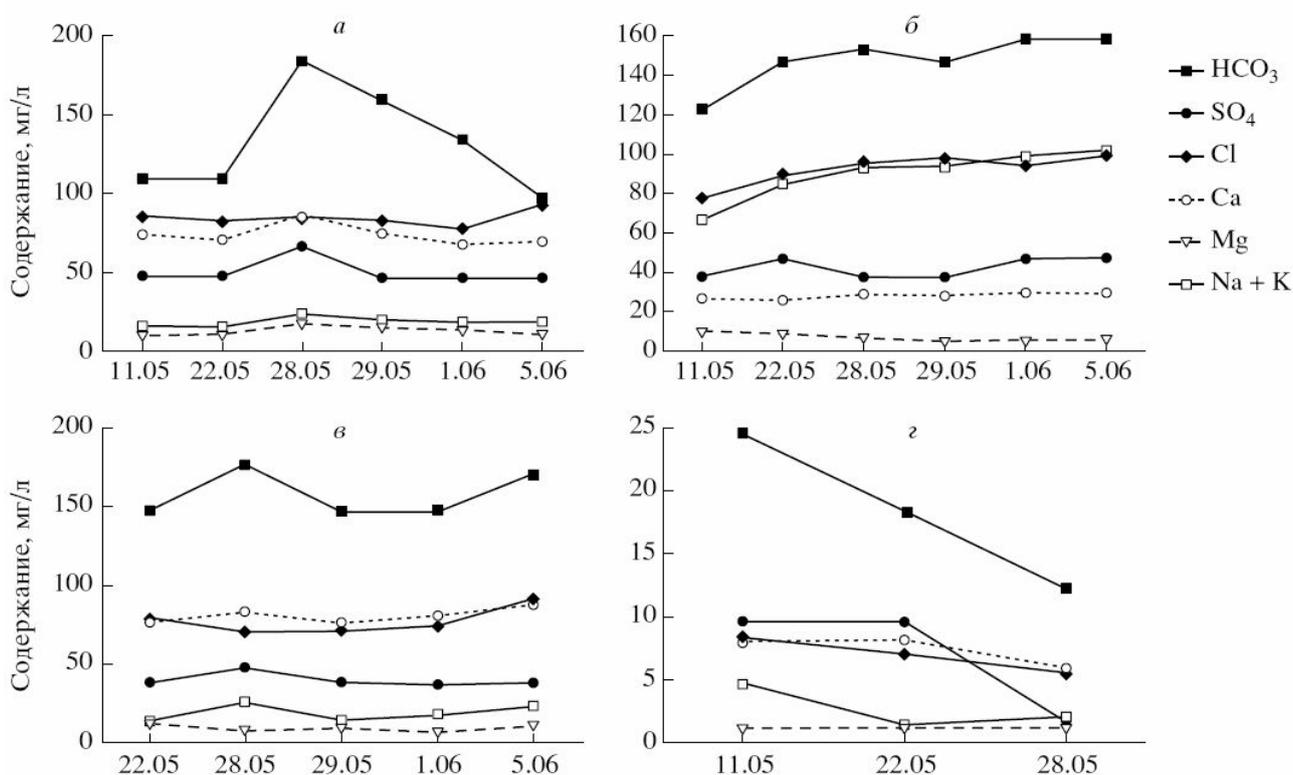


Рис. 6. Содержание компонентов в водопрооявлениях около отбойной стены (а, б, в) и в болоте на расстоянии 400 м от отбойной стены (г) в период испытаний.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ СНЕГОВОГО ПОКРОВА

В марте 2004 г. было проведено исследование снежного покрова. Снеговой покров в отличие от грунтов и почвы позволяет легче идентифицировать выпадающие на поверхность земли загрязнители [11, 15]. В районе стенда изучался химический состав жидкой и твердой фазы растопленного снега. Опробование снежного покрова проведено в радиусе 4 км от стенда [13]. Как и в случаях с грунтами и поверхностными водами процесс накопления загрязнителей в снеге в значительных количествах фиксируется лишь в 200-метровой зоне за территорией стенда. Наибольшее количество хлоридов зафиксировано в пределах внутренней зоны стенда — до 200 мг/л при рН 2.9 и общей минерализации 325 мг/л. За отбойной стенкой общая минерализация снеговых вод составляет 12—21 мг/л, содержание хлоридов 1.4—5.9 мг/л. Здесь же зафиксировано несколько повышенное содержание микроэлементов. За 200-метровой зоной гидрохимические показатели снеговых вод не отличаются от среднемноголетнего общегородского фона.

Рентгеноструктурный анализ твердой фазы снеговых вод в ближней к стенду зоне показал, что в твердом остатке содержится 13–19% $\alpha - Al_2O_3$ и 8–11% $\gamma - Al_2O_3$. На расстоянии 2–4 км от стенда обнаружен только $\alpha - Al_2O_3$ в незначительном количестве — 1% от общего количества твердых частиц. Изучение частиц под электронным микроскопом показало, что они имеют правильную шарообразную форму и диаметр 0.1–8 мкм. Все это однозначно говорит об их техногенном происхождении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволили оценить воздействие выбросов продуктов сгорания на природные объекты в районе испытательного стенда. Установлено, что накопление выбрасываемых загрязнителей — хлористого водорода и оксида алюминия происходит в основном на ограниченном участке, в пределах зоны 50–200 м за отбойной стенкой стенда. Здесь воздействие при проведении испытаний оказывается постоянно и в меньшей степени зависит от скорости и направления ветра. В поверхностных водах, снеге и грунтах этой зоны наблюдается увеличение содержания хлора и уменьшение рН.

С удалением от отбойной стены более чем на 200 м состав поверхностных вод, снега и водорастворимой части грунтов практически соответствует природному. Выпадающий порошок оксида алюминия различных модификаций ($\gamma - Al_2O_3$, $\chi - Al_2O_3$, $\delta - Al_2O_3$, $\theta - Al_2O_3$ и $\kappa - Al_2O_3$) является достаточно химически инертным веществом и на природные воды практически не влияет, так как алюминий обладает низкой миграционной способностью в условиях реакции среды, близкой к нейтральной. Накопление заметных количеств различных модификаций Al_2O_3 зафиксировано только в зоне, примыкающей к стенду.

Полученные результаты следует рассматривать как начальный этап оценки влияния испытаний РДГТ на геологическую среду. Разработанные методики и оценка зоны влияния стенда могут стать основой для разработки системы мониторинга окружающей среды при испытании, уничтожении, запуске ракет с твердотопливными двигателями и рекомендаций по рациональному размещению подобных сооружений в дальнейшем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аликин В. Н., Милехин Ю. М., Пак З. П. Пороха, топлива, заряды. Т. 1. Методы математического моделирования для исследования зарядов твердого топлива. М.: Химия, 2003. 216 с.
2. Белянкин Д. С., Иванов Б. В., Лапин В. В. и др. Петрография технического камня. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 583 с.
3. Бетехтин А. Г. Курс минералогии. М.: Госгеолгиздат, 1951. 544 с.
4. Военная экология: учебник для вузов Министерства обороны Российской Федерации / Под ред. В. И. Исакова. М.: МО РФ, 2005. 976 с.
5. Дмитриев А. Н., Шитов А. В. Техногенное воздействие на природные процессы Земли. Проблемы глобальной экологии. Новосибирск: Изд. дом «Манускрипт», 2003. 140 с.
6. Забелин Л. В., Гафиятуллин Р. В., Кузьмицкий Г. Э. Защита окружающей среды в производстве порохов и твердых ракетных топлив. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. 174 с.
7. Ивакин Ю. Д., Зуй А. И., Муравьева Г. П. и др. Зарождение и рост микрокристаллов корунда при термообработке гидраргиллита в атмосфере пара воды // Вестн. МГУ. Сер. 2. Химия. 2001. Т. 42. № 4. С. 258–262.
8. Иванова Е. Н. Классификация почв СССР. М.: Наука, 1976. 226 с.
9. Количественная оценка риска химических аварий / Под ред. В. М. Колодкина. Ижевск: Изд-во «Удмуртский ун-т», 2001. 228 с.
10. Малеев К. И., Двинских С. А. Экологическое краеведение. Пермская область. Пермь: Книжный мир, 2003. 224 с.

Максимович Н. Г. Воздействие испытаний твердотопливных ракетных двигателей на геологическую среду // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2007.- N5. – С.404-412.

11. Рыжков Л. П., Горохов А. В. Тяжелые металлы в атмосферных осадках // Экологическая химия. 1997. Т. 6(1). С. 20–23.412

12. Суслонов В. М., Максимович Н. Г., Иванов В. Н., Шкляев В. А. Воздействие на окружающую среду кратковременных выбросов большой мощности. Учеб. пособие. Пермь: ПГУ, 2005. 126 с.

13. Суслонов В. М., Максимович Н. Г., Рогозин М. В. и др. Опыт использования комплекса методов при контроле за выбросами предприятий при добыче и переработке алюминийсодержащего сырья // Эколого-экономические проблемы освоения минерально-сырьевых ресурсов. Тез. докл. Междунар. науч. конф. ФГНУ «ЕНИ» и др. Пермь: «Скорость света», 2005. С. 209–211.

14. Троицкий И. А., Железнов В. А. Металлургия алюминия. Справочник. Альфа-Металл. (<http://www.alfametal.ru>).

15. Экогеохимия городских ландшафтов / Под ред. Н. С. Касимова. М.: Изд-во МГУ, 1995. 336 с.

16. Rooksby H. P. Oxides and Hydroxides of Aluminum and Iron // The X-ray Identification and Crystal Structures of Clay Minerals / Miner. Society. London, 1961. P. 345–661.