

Е.Г. Климова¹, Ю.Н. Мороков¹, Г.С. Ривин¹, А.И. Бородулин², Б.М. Десятков²,
С.С. Котлярова², С.В. Зыков², Р.Ю. Игнатов³, К.Г. Рубинштейн³

Математическая оценка зон загрязнения поверхности земли ракетным топливом при падении отделяющихся частей ракет-носителей

¹ *Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск*

² *НИИ аэриобиологии ГНЦ ВВ «Вектор», пос. Кольцово Новосибирской обл.*

³ *Гидрометеорологический научно-исследовательский центр России, г. Москва*

Поступила в редакцию 25.03.2005 г.

Осуществлен анализ проведенного комплекса расчетов возможных зон загрязнения поверхности земли остатками ракетного топлива при падении отработавших вторых ступеней ракет-носителей класса «Протон», запускаемых с космодрома Байконур. Для моделирования процесса падения в атмосфере ансамбля капель несимметричного диметилгидразина применялась разработанная авторами модель. В расчетах использовалась телеметрическая информация о траекториях падения вторых ступеней ракет-носителей и входные метеорологические данные, полученные с привлечением данных реанализа (NCAR/NCEP).

Введение

Задача математического моделирования загрязнения приземного слоя атмосферы и поверхности земли ракетным топливом при падении отделяющихся частей ракет-носителей (РН) актуальна вследствие следующих причин.

Схемы активного участка траекторий ракет-носителей рассчитываются таким образом, чтобы соответствующие им трассы проходили над малонаселенными районами, а отделяющиеся части РН попадали в специально выделенные для этого районы [1]. Однако это не исключает загрязнения окружающей среды остатками ракетного топлива и представляет непосредственную угрозу для населения, проживающего в местах падения отделяющихся частей РН. Эта ситуация на протяжении уже более сорока лет оказывает неблагоприятное воздействие на население, проживающее в районах падения отделяющихся частей ракет-носителей на территории Республики Алтай.

Отработавшие вторые ступени ракет класса «Протон» отделяются от РН на высотах порядка 80–100 км и разрушаются на высотах 30–40 км. После этого остатки ракетного топлива (НДМГ — несимметричный диметилгидразин) в процессе падения ступени вытекают в атмосферу. Остаточное количество ракетного топлива в баках второй ступени РН класса «Протон» составляет до 400–1000 кг НДМГ.

Нами для расчетов возможных зон загрязнения поверхности земли остатками ракетного топлива при падении отработавших вторых ступеней ракет-носителей класса «Протон», запускаемых с космо-

дрома Байконур, использовалась телеметрическая информация о траекториях падения вторых ступеней РН.

Запускам тяжелых трехступенчатых ракет класса «Протон» с космодрома Байконур с наклоном орбит 50,6–51,8°; 62,25–65,1° и 70,0–71,7° соответствуют три района падения (РП) на территории Республики Алтай остатков отработавших вторых ступеней РН с координатами центра: РП-310 (50°54′ с.ш., 83°35′ в.д.); РП-326 (50°55′ с.ш., 88°35′ в.д.); РП-327 (51°52′ с.ш., 87°34′ в.д.). Районы падения имеют форму эллипса с площадью порядка 1500–5000 км². Расчеты были проведены для девяти эпизодов падения остатков ступеней в эти три РП за период с 1980 по 2002 г.

Моделирование падения ансамбля капель НДМГ в атмосфере

Разработанная нами модель процесса падения в атмосфере ансамбля капель несимметричного диметилгидразина описана в [2] и основана на работах [1, 3, 4]. Расчеты проводились в двух вариантах — с учетом и без учета влажности воздуха. Начальный этап формирования капель не рассматривался, и не учитывалось взаимодействие между падающими каплями. Предполагалось, что топливо вытекает непрерывно вдоль траектории падения ступени, начиная с высоты $H = 30$ км над уровнем моря. Для четырех пусков подробно рассмотрены варианты точечного выброса всего топлива на разных высотах в диапазоне от 30 км до поверхности земли.

Необходимые для расчетов входные метеорологические данные были получены с помощью технологии, разработанной в Гидрометеоцентре России. В рамках этой технологии по начальным полям, которыми служили результаты объективных анализов или NCAR/NCEP-реанализов, проводился трех- или четырехдневный прогноз с помощью глобальной прогностической модели T40L15. Таким образом, в расчетах использовалась реальная метеорологическая информация о пространственно-временном распределении метеорологических полей ветра, давления, температуры и влажности.

Метеорологические данные, соответствующие районам падения вторых ступеней ракет, уточнялись в пограничном слое атмосферы для обеспечения более детального временного и пространственного разрешения расчетов. Для этого использовалась численно-аналитическая модель для определения полей скорости ветра, температуры и влажности воздуха в пограничном слое атмосферы [5], адаптированная для каждого района падения.

Модель основана на аналитическом решении системы уравнений пограничного слоя атмосферы, с учетом орографических и динамических неоднородностей подстилающей поверхности и квазистационарного подслоя. Она учитывает влияние высоты рельефа и температуры земной поверхности на скорость ветра, температуру и влажность воздуха, а также на процессы турбулентного обмена и, следовательно, на распространение частиц ракетного топлива. Информация о рельефе, типах поверхности и видах растительности снималась с физико-географической карты Республики Алтай. Далее, для каждого типа почвы и вида растительности по справочной литературе определялись динамические и теплофизические характеристики подстилающей поверхности. Пространственное разрешение расчетов составляло 4 мин по широте и 2,5 мин по долготе, 100 м по вертикали с общим количеством узлов сетки, равным $76 \times 73 \times 21$.

При определении распределения массы НДМГ, выпадающей на Землю, учитывалось размывание облака капель за счет атмосферной турбулентной диффузии. Определение коэффициентов турбулентного обмена в пограничном слое осуществлялось по модели алгебраического типа, которая аналогична описанной в [6, 7]. При этом использовалась экспериментально подтвержденная нами в ус-

ловиях открытой атмосферы гипотеза о пропорциональности компонент тензора коэффициентов турбулентной диффузии соответствующим компонентам тензора вязких напряжений Рейнольдса [8].

Анализ результатов расчетов

Результаты расчетов представлены в виде изолиний плотности осадка НДМГ на поверхности земли на административной карте регионов.

В табл. 1 приведены рассчитанные с учетом влажности средние по всем пускам и сезонам значения количества топлива Q , осевшего на поверхности земли (в процентах к общему количеству, выбрасываемому при каждом пуске), и коэффициенты вариации K_v (отношение стандартного отклонения к среднему значению) для каждого РП. Из данных табл. 1 видно, что наблюдается различие как по РП, так и по сезонам. Так, средние значения количества топлива, выпавшего на поверхность земли для всех пусков для РП-326 и РП-327, примерно совпадают. Сезонное различие между зимой и летом является максимальным и больше в 2,9 раза по количеству осевшего топлива для РП-326 и в 3 раза для РП-327.

Описанные выше результаты получены в предположении, что топливо выливается равномерно вдоль траектории падения второй ступени, начиная с 30 км и до поверхности земли. Однако возможны ситуации, когда вторая ступень разрушается полностью на какой-то высоте и топливо практически мгновенно выливается на этой же высоте. Математически это соответствует точечному источнику примеси. Для изучения характеристик загрязнения поверхности земли топливом в этом случае нами были рассчитаны четыре пуска для следующих дат: зимний – 25.12.97; весенний – 9.04.96; летний – 18.06.99 и осенний – 26.09.96. Для каждого из этих пусков рассмотрены десять вариантов расположения точечного источника на высотах от 30 до 2,5 км. Результаты этих расчетов представлены на рис. 1.

Наблюдается относительно слабая зависимость Q от высоты источника H в диапазоне 8–30 км и сильная зависимость от H в диапазоне 2–8 км. Это объясняется тем, что капли испаряются в основном в тропосфере. Для сравнения – для линейного источника $Q = 5,4; 26; 11,7$ и $5,4$ соответственно для осени, зимы, весны и лета.

Таблица 1

Средние по всем пускам и по сезонам значения количества топлива Q (%), осевшего на поверхности земли, и коэффициенты вариации K_v для каждого РП (N – число пусков)

Район падения	Все пуски		Весна		Зима		Лето		Осень	
	N	$Q, \%$ (K_v)	N	$Q, \%$ (K_v)	N	$Q, \%$ (K_v)	N	$Q, \%$ (K_v)	N	$Q, \%$ (K_v)
РП-310	9	7,8 (0,22)	2	7,1 (–)	4	11,0 (0,26)	2	3,0 (–)	1	5,9 (–)
РП-326	57	7,1 (0,57)	14	6,0 (0,47)	16	11,0 (0,14)	13	3,8 (0,35)	14	7,1 (0,28)
РП-327	24	7,6 (0,45)	4	5,6 (0,38)	9	10,9 (0,23)	5	3,6 (0,35)	6	7,3 (0,20)

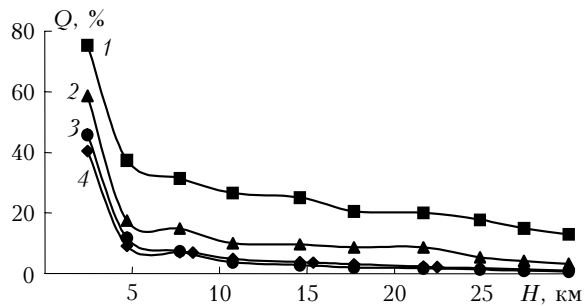


Рис. 1. Доля НДМГ, достигшая поверхности земли, для случая, когда все топливо выливается на высоте H . Сезоны: зима (1), весна (2), лето (3) и осень (4)

На рис. 2 приведены зависимости высот полного испарения капель топлива z от различного начального радиуса для различных высот выброса капель, рассчитанные по нашей модели и приведенные в [3]. Так, например, если точечный источник находится на высоте 30 км, то частицы радиусом до 1 мм при падении с этой высоты испарятся на высоте примерно 22 км. Все частицы радиусом до 1,5 мм испаряются, не достигнув поверхности земли. И только частицы начальным радиусом более 1,5 мм достигают поверхности земли. Если источник находится на высоте 10 км, то до поверхности земли долетят частицы радиусом более 0,8 мм. Таким образом, так же как и в [3], «испарение капель происходит частично в верхней стратосфере, а в основном в тропосфере ниже 10 км. Отсюда следует важный вывод – увеличение высоты выброса НДМГ не обеспечивает испарения капель в верхней атмосфере».

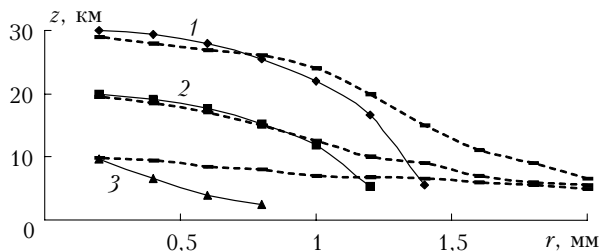


Рис. 2. Зависимости высот z полного испарения капель НДМГ с различными начальными радиусами r для зимнего пуска и различных высот выброса $H = 30$ (1); 20 (2) и 10 (3) км. Результаты расчетов из [3] отмечены штриховыми линиями

Приведенные в [3] данные соответствуют самому холодному месяцу – январю над станцией Кзыл-Орда (44°46' с.ш., 65°32' в.д.) при «минимальном» вертикальном профиле температуры, когда до земли долетает максимальное количество топлива. Наблюдается существенная разница в приведенных результатах. Например, если источник находится на высоте 10 км, то по данным [3] все частицы радиусом до 2 мм испаряются, не достигнув высоты 5 км. А по нашим расчетам частицы радиусом более 0,8 мм достигнут поверхности земли. Необходимо отметить, что согласно [3] «массо-

вая доля капель, достигших поверхности земли при «минимальном» профиле температуры при полном выбросе на высоте 10 км, составляет всего 0,19% и не представляет особой опасности». Из рис. 1 видно, что в нашем случае это доля равна приблизительно 27% зимой и 4% летом. Средние значения этих величин, приведенные в табл. 1, равны приблизительно 11% зимой и 3,8% летом для РП-326 и 10,9% зимой и 3,6% летом для РП-327. Средние значения по всем пускам составляют 7,1% для РП-326 и 7,6% для РП-327.

Одной из причин различия между нашими результатами и приведенными в [3] является то, что в наших расчетах учтено возможное влияние атмосферной влажности на процесс испарения капель. Для подтверждения этого вывода все расчеты по определению зон загрязнения проводились нами в двух вариантах: с учетом и без учета влажности атмосферы. Сравнение этих двух вариантов было представлено нами уже в работе [2]. В табл. 2 приведены результаты расчетов для трех пусков в РП-326: двух осенних (06.09.96 и 26.09.96, относительно влажная атмосфера) и одного летнего (24.05.97, относительно сухая атмосфера).

Таблица 2

Рассчитанные с учетом и без учета влажности значения максимальной плотности и массы топлива, достигшего поверхности земли

Дата	Учет влажности воздуха	$P_{\max} \cdot 10^8$	$Q, \%$
06.09.96	нет	1,07	1,6
06.09.96	да	2,11	5,2
26.09.96	нет	0,38	2,0
26.09.96	да	0,37	5,3
24.05.97	нет	0,90	1,3
24.05.97	да	0,88	1,8

В табл. 2 наряду с Q представлены также максимальные поверхностные плотности P_{\max} достигшего земли топлива ($\text{кг}/\text{м}^2$) в предположении, что при падении ступени вытекает 1 кг топлива (непрерывное вытекание). Величина P_{\max} определяется в основном высотой последнего точечного выброса. Однако для всех пусков, представленных в табл. 2, эта высота одна и та же, что позволяет провести относительное сравнение этой величины для трех пусков. Видно, что количество топлива, достигшего поверхности земли с учетом влажности, примерно в 3,2 раза больше, чем без учета влажности для влажной атмосферы (пуск 06.09.96) и только в 1,4 раза для относительно сухой атмосферы (пуск 24.05.97).

Второй причиной существенного различия наших результатов и данных, приведенных в [3], является то, что поверхность земли исследуемых нами районов находится на высоте примерно 2–3 км над уровнем моря. В эксперименте [3] поверхность земли находится на уровне моря, т.е. разность в высоте этих двух поверхностей составляет 2–3 км. Но, как было отмечено выше, именно в нижней части атмосферы происходит испарение большей

части капель. Следовательно, по результатам [3] капли продолжают падать и испаряться в этом слое, и до земли их долетает меньше, чем в нашем эксперименте.

На рис. 3 для сравнения изображены изолинии плотности осадения для осеннего пуска 26.09.96, рассчитанные без учета и с учетом атмосферной влажности.

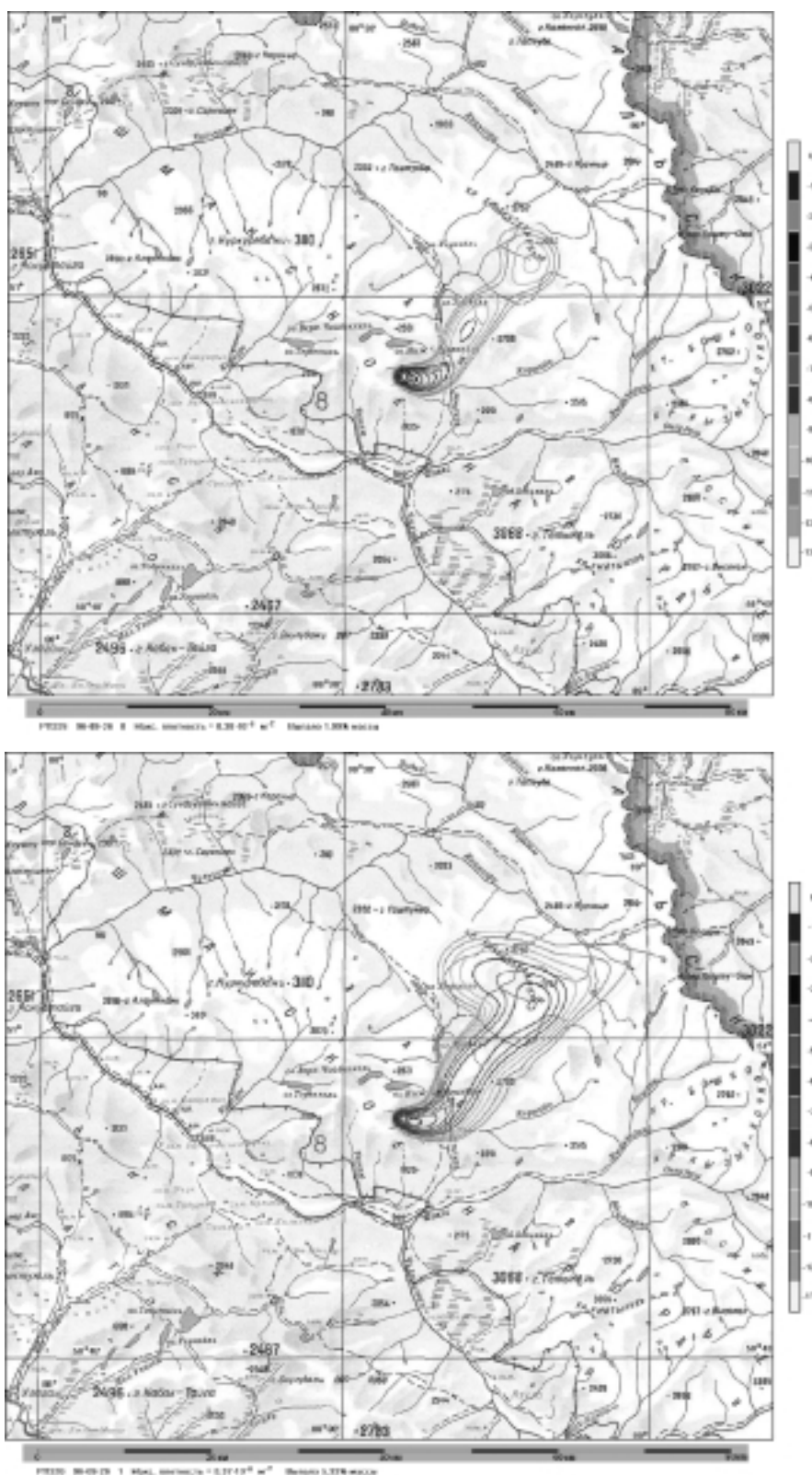


Рис. 3. Изолинии плотности осадка НДМГ для осеннего пуска 26.09.96, рассчитанные без учета (вверху) и с учетом (внизу) влажности воздуха

В заключение авторы выражают благодарность Международному научно-техническому центру (МНТЦ) за финансирование проекта № 1924 «Изучение клинико-эпидемиологических последствий продолжительного воздействия на население техногенных факторов окружающей среды», в рамках которого проводились наши исследования.

1. *Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую среду* / Под ред. В.В. Адушкина, С.И. Козлова, А.В. Петрова. М.: Изд-во «Анкил», 2002. 640 с.
2. *Климова Е.Г., Морокков Ю.Н., Ривин Г.С., Бородулин А.И., Десятков Б.М., Сарманаев С.Р., Зыков С.В.* Моделирование загрязнения поверхности земли ракетным топливом // *Оптика атмосф. и океана*. 2004. Т. 17. № 9. С. 769–773.
3. *Александров Э.Л.* О поведении капель ракетного топ-

лива в атмосфере // *Метеорол. и гидрол.* 1993. № 4. С. 36–45.

4. *Васильев И.Н.* Выпадение ракетного топлива при сбросе 2 ступеней ракет // *Наука и образование*. 1999. № 1. С. 39–41.
5. *Десятков Б.М., Сарманаев С.Р., Бородулин А.И.* Численно-аналитическая модель переноса аэрозолей в термически стратифицированном пограничном слое атмосферы // *Оптика атмосф. и океана*. 1996. Т. 9. № 6. С. 815–820.
6. *Теверовский Е.Н., Дмитриев Е.С.* Перенос аэрозольных частиц турбулентными потоками. М.: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.
7. *Роди В.* Модели турбулентности окружающей среды // *Методы расчета турбулентных течений*. М.: Мир, 1984. С. 227–321.
8. *Бородулин А.И., Майстренко Г.А., Чалдин Б.М.* Статистическое описание процесса турбулентной диффузии аэрозолей в атмосфере. Метод и приложения. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1992. 124 с.

E.G. Klimova, Yu.N. Morokov, G.S. Rivin, A.I. Borodulin, B.M. Desyatkov, S.S. Kotlyarova, S.V. Zykov, R.Yu. Ignatov, K.G. Rubinstein. Mathematical estimation of pollution of the ground surface by rocket fuel upon falling of separated parts of carrier rockets.

The analysis is carried out for the complex of calculations of possible pollution zones of the ground surface by residual rocket fuel upon falling the second stages of Proton carrier rockets launched from the cosmodrome Baikonur. The model developed was used to model the falling of an ensemble of unsymmetrical Dimethylhydrazine drops in the atmosphere. The telemetric information on trajectories of falling of the second stages of carrier rockets and the input meteorological data obtained with use of Reanalysis data (NCAR/NCEP) were used.