

В.Ф. Рапута, А.П. Садовский, С.Е. Олькин, С.В. Зыков, И.К. Резникова, А.И. Смирнова

## Оценка характеристик выпадений ракетного топлива по его содержанию в озерной воде

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск  
НИИ аэробиологии ГНЦ ВБ «Вектор», пос. Кольцово Новосибирской обл.  
Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск*

Поступила в редакцию 29.11.2000 г.

Предложена модель распространения испаряющейся аэрозольной примеси от подвижного высотного источника. На основе этой модели рассмотрена обратная задача оценивания полей загрязнения местности. Для случая прямого экспериментального обнаружения ракетного топлива в ряде озер, находящихся в районе падения второй ступени ракеты, проведен анализ полученной информации. С учетом текущих метеоусловий, гидрологических характеристик озер, траектории падения ступени и ограничений на гарантийный запас топлива показано преобладание кинематического выпадения ракетного топлива на подстилающую поверхность.

### Введение

При отделении отработанных ступеней ракет с жидкостными реактивными двигателями возможен выброс в атмосферу значительных количеств высокотоксичных топливных компонентов. Поступление ракетного топлива сопровождается совокупностью взаимосвязанных физико-химических процессов: диффузии, коагуляции, дробления капель, движения смеси под действием ветра и т.д. Одной из важнейших характеристик является режим выброса примеси на траектории падения ступени. Точность количественных оценок возможной степени загрязнения поверхности земли и приземного слоя атмосферы существенным образом зависит от детализации описания параметров подвижного высотного источника выброса примеси, текущих метеоусловий, коагуляции и испарения капель.

В работе [1] оценивается поведение капель ракетного топлива в атмосфере при падении с больших высот в районе космодрома Байконур. Из результатов этих оценок вытекает, что основная масса (около 90%) несимметричного диметилгидразина (НДМГ) будет сосредоточена в каплях радиусом от 1 до 3 мм и поверхности земли вследствие процессов испарения могут достичь лишь относительно крупные капли радиусом более 2 мм, падающие с высот порядка 10 км. В условиях «холодной» атмосферы вероятность достижения каплями поверхности земли увеличивается, поскольку процессы испарения заметно снижаются. Тем не менее согласно [1] даже при низких температурах и выбросе НДМГ на высоте 10 км массовая доля выпавших на поверхность капель составит всего 0,19%. Отсюда с учетом рассеяния капель ветром делается вывод, что загрязнение почв НДМГ в районах падения вторых ступеней ракет практически исключается.

В работе [2] аналогичным образом рассмотрена эволюция капель НДМГ в сухой атмосфере Якутии. Расчеты, проведенные применительно к зимним условиям г. Верхоянска, показывают, что вероятность достижения поверхности земли капель радиусом больше 2 мм существ-

венно повышается, что создает реальную угрозу загрязнения приземного слоя атмосферы и подстилающей поверхности.

Расчеты, проведенные в [1–4], достаточно условны, поскольку данные распределения капель по размерам, по деформации падающих капель, по режиму функционирования источника и т.д. имеют предположительный характер. В связи с этим необходимы дополнительные экспериментальные исследования.

### Постановка задачи

Описание процессов переноса и диффузии аэрозольной примеси от высотного подвижного источника может быть получено на основе решения полумпирического уравнения турбулентной диффузии [5, 6]:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u(z) \frac{\partial q}{\partial x} - w(t, z) \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial q}{\partial z} + Q(t) f(\mathbf{s}) \quad (1)$$

с граничными и начальными условиями

$$q \Big|_{t=0} = 0, \quad q \Big|_{z=0} = 0, \quad q \rightarrow 0 \text{ при } |\mathbf{x}| \rightarrow \infty, \quad (2)$$

где  $t > 0$ ;  $q$  – объемная концентрация частиц;  $x, y$  – горизонтальные координаты; ось  $x$  ориентирована по направлению среднего ветра  $u(z)$ , ось  $z$  направлена вертикально вверх;  $w(t, z)$  – гравитационная скорость оседания частиц;  $K_y, K_z$  – коэффициенты поперечной и вертикальной турбулентной диффузии;  $Q(t)$  – интенсивность поступления ракетного топлива в атмосферу;  $f(\mathbf{s})$  – функция, описывающая траекторию падения ступени;  $\mathbf{s}$  – координаты точки на траектории.

Установившаяся скорость падения капли в атмосфере радиусом  $r$  определяется в соответствии с законом Стокса

$$w = 2\rho g r^2 / (9\mu F/F_s), \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $F/F_s$  – отклонение реальной силы сопротивления среды  $F$  к стоксовской силе  $F_s$ ;

$\mu$  – динамическая вязкость воздуха;  $g$  – ускорение свободного падения.

Отклонение  $F/F_s$ , зависящее как от режима обтекания, так и от деформации падающей капли, определяется экспериментально и описывается эмпирическими формулами [7, 8]. При падении капля топлива происходит их испарение. Скорость испарения капель жидкости в атмосфере от поверхности земли до высоты примерно 60 км лимитируется диффузией. В диффузионно-конвективном режиме скорость испарения пропорциональна радиусу капли  $r$  [1]:

$$dm/(dt) = -4\pi D r (p - p^\infty) F\eta, \quad (4)$$

где  $m$  – масса капли;  $D$  – коэффициент диффузии молекул пара в воздухе;  $p^\infty$  и  $p$  – плотность пара испаряющегося компонента в окружающем воздухе и у поверхности капли;  $F\eta$  – поправочный множитель, учитывающий влияние на скорость испарения падающей капли набегающего потока и режима обтекания.

Процесс испарения капли является многофакторным, в значительной степени зависит от температуры воздуха, а также от большого числа параметров, требующих экспериментального определения.

Решение задачи (1)–(4) требует задания значительного объема входной информации, что создает затруднения при ее численной реализации. В связи с этим представляется целесообразным привлечение данных прямых измерений содержания ракетного топлива на подстилающей поверхности и в различных слоях атмосферы, что заставляет обратиться к постановкам обратных задач переноса примеси.

Оценку неизвестных параметров следует проводить путем минимизации квадратичного функционала [9, 10]:

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^N \sigma_i^{-2} [p_i - q(x_i, \theta)]^2 \quad (5)$$

при ограничениях (1) – (4). Здесь  $\theta$  – вектор неизвестных параметров;  $p_i$  – данные измерений концентрации примеси в точках  $x_i$ ;  $\sigma_i$  – дисперсия ошибок наблюдений.

Привлечение дополнительной априорной информации о протекающих процессах и оптимальное размещение системы наблюдения могут существенно повысить эффективность оценивания. Следует отметить два крайних случая, отвечающих следующим скоростям оседания [5]:

$$U_{cp}/W \leq 10, \quad (6a)$$

$$U_{cp}/W > 60, \quad (6b)$$

где  $U_{cp}$  – средняя скорость ветра;  $W$  – скорость седиментации. Соответственно реализуется кинематическая и диффузионная схемы распространения.

В случае (6a) максимальные выпадения гептила следует ожидать на расстоянии  $X_{max}$  в направлении среднего ветра  $U_{cp}$  от места взрыва баков. Значение  $X_{max}$  оценивается следующим соотношением [5]:

$$X_{max} \leq H U_{cp}/W, \quad (7)$$

где  $H$  – высота выброса.

В случае (6b) процессы вертикальной и горизонтальной турбулентной диффузии оказывают существенное влияние на рассеяние примеси. Выпадения гептила следует ожидать на очень большой территории, причем значе-

ние  $X_{max}$  может составить более 1000 км [11]. Плотность аэрозольных выпадений будет соответственно невысокой и в пределах этой территории меняться слабо.

## Оценка аэрозольных выпадений гептила

Наибольший интерес представляют случаи прямого экспериментального обнаружения значительных количеств ракетного топлива в приземном слое атмосферы и на подстилающей поверхности. Они позволяют на основе постановок обратных задач переноса примеси уточнить оценки зон возможного загрязнения, дисперсного состава и времени прохождения аэрозольного облака, режимов поступления в атмосферу ракетного топлива от отработавших ступеней. На наш взгляд, предпочтение следует отдавать обследованию водных объектов и снеговых поверхностей, в большей степени отвечающих условиям однородности и обладающих консервирующими свойствами, что позволяет проводить их планомерное изучение в достаточно широких временных и пространственных пределах.

В качестве примера рассмотрим данные обследования озерной воды в районе падения вторых ступеней ракет на территории Чистоозерного района Новосибирской области (РП 213). Гептил – несимметричный диметилгидразин – был обнаружен в ряде озер (табл. 1, рисунок) после пуска ракеты «Протон» с космодрома Байконур 26 октября 1996 г. Обнаруженное его удельное содержание в озерах значительно варьируется – от 1 (оз. Круглое, № 18) до 20 (оз. Казенное, № 20) и 24 мкг/л (оз. Горько-соленое, № 13). Эти различия можно объяснить несколькими факторами: положением озера относительно траектории падения ступени ракеты, направлением ветра, площадью и объемом воды в озере.

Таблица 1

Оценки выпадения гептила в озера РП 213

Название озера и номер точки пробоотбора	Содержание НДМГ, мкг/л	Площадь озера, км <sup>2</sup>	Масса гептила, кг
Соленое (№ 2)	4	2,1	8,4
Тениз (№ 3)	2	0,8	1,6
Кульмакан (№ 10)	3	6,2	18,5
Горько-соленое (№ 13)	24	1,1	27,1
Утинное (№ 16)	2	2	4
Круглое (№ 18)	1	1,5	1,5
Вольше-Плес (№ 19)	9	7,1	63,6
Казенное (№ 20)	22	0,8	17,3



Схема района обследования. Стрелками указаны направления и скорости ветра на высотах: 10 м (4 м/с) – 1; 1,5 км (10 м/с) – 2; 5 км (14 м/с) – 3; 11 км (17 м/с) – 4; 16 км (14 м/с) – 5

Привлечение картографических данных по площади и средней глубине озер позволяет провести оценки содержания в них ракетного топлива. В табл. 1 представлены оценки массы гептила в озерах в предположении, что их средняя глубина составляет 1 м. Из данных табл. 1 вытекает, что суммарная масса гептила, содержащегося в озерах, составляет 142 кг при общей площади водной поверхности 21,6 км<sup>2</sup>. Отсюда получаем величину средней плотности выпадений  $P = 6,5$  кг/км<sup>2</sup>. Относительно высокое содержание НДМГ наблюдается в озерах № 13, 19, 20, 2, 10, что непосредственно связано с их положением относительно траектории движения ступени и направлением ветра. Следует также отметить, что одновременное присутствие НДМГ в изучаемых озерах указывает на непрерывность картины его выпадения между ними. Поскольку площадь территории между озерами существенно больше, чем площадь самих водоемов, то с учетом оценки суммарного содержания НДМГ (142 кг) в озерной воде следует, что суммарные выпадения НДМГ на подстилающую поверхность сопоставимы с величиной гарантийного запаса топлива (500–1000 кг).

Этот вывод можно несколько уточнить, если территорию района падения, на которой было обнаружено присутствие НДМГ, описать многоугольником, построенным по (охватывающим) озерам, находящимся в его вершинах с № 10, 18, 19, 20, 2, 3. Площадь этого многоугольника составляет 260 км<sup>2</sup>. С другой стороны, рассчитанная выше величина  $P$  позволяет оценить площадь основных выпадений НДМГ, которая при гарантийном запасе топлива 500–1000 кг составит соответственно 80–160 км<sup>2</sup>. Сопоставляя полученные оценки с площадью охватывающего многоугольника, можно сделать вывод, что в данном случае основная масса НДМГ оказалась в районе падения.

Ограниченность размеров района выпадения ракетного топлива позволяет сделать вывод, что в основном происходило кинематическое оседание НДМГ в виде крупных капель и аэрозолей, описываемое неравенством (6а). Действительно, согласно рисунку угол между траекторией падения ступени и направлением среднего ветра не менее 45°. Тогда с учетом (6а) имеет место оценка

$$X'_{\max}(H) \leq 10 H \sin 45^\circ, \quad (8)$$

где  $X'_{\max}(H)$  – расстояние от горизонтальной проекции траектории ступени до точки падения частиц, выпущенных на высоте  $H$ .

Поскольку поперечные размеры РП 213 не превышают 22 км, то согласно соотношению (3) предельные значения  $X'_{\max}(H)$  могут достигаться лишь для относительно небольших  $H$ , порядка 1–2 км, что и подтверждает правоту случая (6а).

В соответствии с данными телеметрии с дискретностью 10 с в табл. 2 представлены возможные характеристики источника выброса ракетного топлива.

Из совместного анализа данных, приведенных в табл. 1, 2 и на рисунке, вытекает, что в данном случае мгновенного выброса НДМГ в атмосферу не произошло. Более вероятно его основное поступление на траектории падения ступени, начиная с высот 9–11 км. В частности, имеющимся данным не противоречит режим равномерного истечения. В этом случае относительная мощность  $S$  линейного источника в дискретном виде выражается системой соотношений

$$S_i = 1/(L_i - L_{i-1}), \quad i = 1, \dots, 15, \quad (9)$$

где  $L_i$  – горизонтальное расстояние от места взрыва баков.

Таблица 2

Удельное истечение гептила на траектории падения второй ступени

Высота источника, км	Горизонтальная скорость ступени, км/с	Расстояние от места взрыва баков $L_i$ , км	Относительная скорость выброса гептила $S_i$ , км <sup>-1</sup>
30	2,301	23	0,04
25	1,062	33,6	0,09
22	0,503	38,7	0,20
19	0,378	42,4	0,27
17	0,295	45,4	0,33
15	0,251	47,9	0,40
13	0,22	50,1	0,45
11	0,2	52,1	0,50
9	0,171	53,8	0,59
7	0,154	55,4	0,62
5,5	0,141	56,8	0,71
4	0,131	58,1	0,77
3	0,122	59,3	0,83
2	0,115	60,4	0,91
1	0,109	61,5	0,91
0	0,104	62,6	0,91

Из (9) и табл. 2 следует, что из-за резкого падения скорости ступени выброс существенно возрастает и основное поступление НДМГ будет происходить в нижних слоях атмосферы.

## Заключение

Проведенный совместный анализ данных загрязнения НДМГ озерной воды, метеоусловий, характеристик траектории и других ограничений позволяет сделать следующие выводы:

- в результате падения второй ступени ракеты «Протон» 26 сентября 1996 г. в РП 213 значительная масса гарантийного запаса НДМГ осела в этом районе;

- относительная компактность зоны загрязнения указывает на преимущественно кинематический механизм выпадения ракетного топлива в виде крупных капель и аэрозолей;

- поступление НДМГ в атмосферу реализовалось в режиме линейного источника на траектории падения ступени.

Следует отметить, что предложенное в [1] описание поведения капель НДМГ в атмосфере требует в данном случае существенной корректировки. Для повышения надежности интерпретации данных наблюдений загрязнения местности и параметров источника выброса НДМГ необходим более тщательный учет гидрологических и гидрохимических характеристик водоемов, температурного и кислородного режимов.

При изучении выпадения ракетного топлива на снеговую поверхность объемные характеристики удельного содержания НДМГ в единице объема воды могут оказаться малопредставительными при нарушении условий однородности снегового покрова, единообразия пробоотбора. Более устойчивыми являются площадные данные выпадения НДМГ. Необходима оптимизация системы наблюдения в соответствии с текущими метеопара-

метрами, условиями местности, возможностями размещения точек пробоотбора, априорными сведениями о режимах поступления ракетного топлива в атмосферу.

1. Александров Э.Л. // Метеорология и гидрология. 1993. № 4. С. 36–45.
2. Васильев И.Н. // Наука и образование. 1999. № 1. С. 39–41.
3. Садовский А.П., Рапута В.Ф., Олькин С.Е., Зыков С.В., Резникова И.К. // Оптика атмосферы и океана. 2000. № 6–7. С. 672–677.
4. Кудрявцева Л.В. // Метеорология и гидрология. 1982. № 3. С. 41–50.
5. Петрова Г.М., Мирошкина А.Н. Закономерности рассеяния аэрозольных частиц в свободной атмосфере // Труды ИПГ. 1967. Вып. 7. С. 5–40.
6. Бызова Н.Л. Рассеяние примеси в пограничном слое атмосферы. М.: Гидрометеиздат, 1974. 191 с.
7. Flemmer R.L.C., Bancs C.L. // Powder Technol. 1986. V. 48. № 3. P. 217–221.
8. Александров Э.Л. // Изв. АН СССР. Серия ФАО. 1990. Т. 26. № 8. С. 878–880.
9. Рапута В.Ф., Крылова А.И. // Метеорология и гидрология. 1995. № 2. С. 49–58.
10. Крылова А.И., Рапута В.Ф., Суторихин И.А. // Метеорология и гидрология. 1993. № 5. С. 49–58.
11. Израэль Ю.А., Волков А.С., Ковалев А.Ф. // Метеорология и гидрология. 1995. № 3. С. 5–11.

*V.F. Raputa, A.P. Sadovsky, S.E. Olkin, S.V. Zykov, I.K. Reznikova, A.I. Smirnova. Evaluation of characteristics of rocket fuel fall-outs by its content in the lake water.*

A model of spreading of evaporating aerosol admixture from a mobile high-altitude source is proposed. Based on this model, the inverse problem of evaluating the fields of a locality contamination is considered. The analysis of the obtained data was performed for the case of direct experimental finding of the rocket fuel in a number of lakes located in the sites of falling the rockets of the second stage. The predominance of kinematic falling of rocket fuel onto the underlying surface is shown, taking into account the current meteorological conditions, hydrological characteristics of the lakes, the trajectory of the stage falling, and limitations on the fuel guarantee supply.