

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

## К вопросу об аэрозолировании гептила в районах падения отделяемых частей ракет-носителей

*НИИ аэриологии ГНЦ ВВ «Вектор», Кольцово, Новосибирская обл.,  
ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск*

Поступила в редакцию 9.02.2000 г.

Площадь районов падения отделяющихся частей ракет-носителей, запускаемых с космодрома «Байконур», на территории России составляет 4,5 млн. га. Контролю загрязнения районов падения ракетным топливом гептилом подвергаются почва, поверхностные водоемы, растительность. Вне рамок контроля остается перенос гептила в атмосфере за счет процессов аэрозолирования. Проведенные комплексные исследования состояния экосистемы вблизи районов падения РП 213 в Новосибирской области установили ухудшение в структуре здоровья населения в районах, прилегающих к РП 213. Высказано предположение, что это вызвано процессами аэрозолирования гептила в атмосфере. Предложены некоторые подходы к изучению явления аэрозолирования гептила при падении отделяющихся частей ракет-носителей.

### Введение

Районы падения (РП) отделяющихся частей ракет-носителей, запускаемых с космодромов России, составляют площадь около 20 млн. га. Из них, например, с космодромом Байконур связаны районы падения, занимающие общую площадь на территории России 4,5 млн. га, в том числе: 0,96 млн. га в Новосибирской области, 1,96 млн. га в Томской области, 0,53 млн. га в Республике Алтай.

В зону, прилегающую к районам падения, попадают сельскохозяйственные районы, поселки нефтяников, заповедники. Главную экологическую угрозу для районов падения представляет компонент ракетного топлива гептил, основу которого составляет несимметричный диметилгидразин (НДМГ). Количество диметилгидразина в отделяющихся частях ракет-носителей может составлять примерно 600–1300 л. Таким образом, в районы падения регулярно вносятся химическое вещество техногенного происхождения, не характерное для соответствующих экосистем. Влияние компонентов ракетного топлива на объекты окружающей среды и на здоровье населения, проживающего в районах падения, изучено очень слабо. Это объясняется как закрытостью тематики, связанной с ракетной техникой, так и с большими техническими трудностями, сопряженными с наблюдением и сбором необходимой информации в районах падения.

В последнее время в средствах массовой информации в связи с конверсией ракетной техники и утилизацией ракетного топлива широко обсуждаются проблема загрязнения гептилом окружающей среды и возможные последствия для здоровья человека. Особо актуален этот вопрос для населения, проживающего в районах падения отделяющихся частей ракет-носителей, поскольку снижения активности космической деятельности в обозримом будущем не предвидится.

Отсутствие сколько-нибудь систематизированной информации о возможных последствиях постоянного попадания несимметричного диметилгидразина и продуктов его превращения в экосистеме не позволяет обосновать и сформулировать критерии экологической безопасности для районов падения отделяющихся частей ракет-носителей и тем более обосновать региональную концепцию устойчивого развития этих районов.

В работе [1] дан довольно полный обзор результатов исследования возможных механизмов влияния несиммет-

ричного диметилгидразина на организм человека. Установлено, что НДМГ оказывает токсическое воздействие на печень, нервную систему, влияет на иммунный статус населения. Кроме того, несимметричный диметилгидразин обладает канцерогенным и мутагенным действием. Но гораздо большую опасность представляют продукты превращения НДМГ в атмосфере и водных системах. Установлено [1], что в атмосфере (до 60%) несимметричный диметилгидразин превращается в диметилнитрозоамин. Время полупревращения сильно зависит от состояния атмосферы, наличия озона, гидроксильных радикалов, диоксида азота, температуры воздуха и колеблется в пределах от нескольких минут до нескольких часов. В водных системах [1] продуктами превращения диметилгидразина является диметилнитрозоамин, формальдегид, диметиламин. Время полупревращения составляет десятки дней и зависит от наличия в водной среде ионов металлов, органических соединений, температуры. Из продуктов превращения НДМГ наибольшую опасность представляет диметилнитрозоамин, обладающий ярко выраженными канцерогенным и мутагенным действием. Таким образом, проблема экологической безопасности районов падения ракет-носителей включает по крайней мере три аспекта:

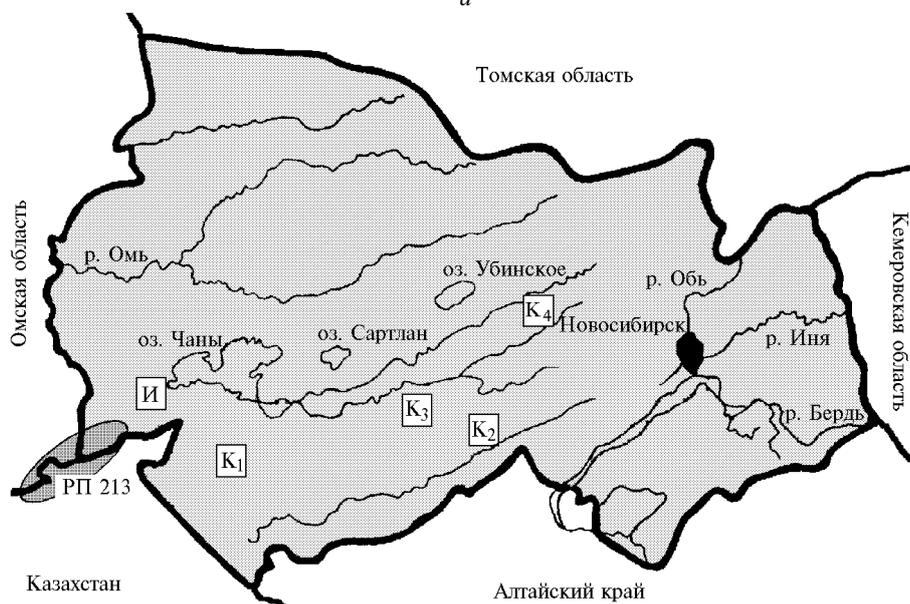
1. Разработка и совершенствование химико-аналитических методов обнаружения НДМГ и продуктов его превращения в объектах окружающей среды.
2. Изучение возможных путей транспорта НДМГ и продуктов его превращения в окружающей среде.
3. Эколого-эпидемиологические исследования в районах падения и установление причинно-следственных связей.

В настоящем сообщении делается попытка частично ответить на поставленные вопросы. Исследования проводились в интересах военно-космических сил на основании технического задания, составленного специалистами географического факультета МГУ. Объектами исследования являлись Чистоозерный и Северный районы в Новосибирской области (НСО). Существующая до настоящего момента система контроля за районами падения базируется на анализах содержания гептила в почве, водных системах, растительности. Проблема аэрозолирования гептила в нижних слоях атмосферы и возможные пути распространения в атмосфере до сих пор оставались вне рамок рассмотрения и не входили в систему контроля.

## Химико-аналитические исследования загрязнения гептилом объектов окружающей среды

По существующей схеме выполнены работы по обследованию объектов окружающей природной среды

в районе падения отделяющихся частей ракет-носителей на территории Чистоозерного района Новосибирской области (РП 213, местность «Цыганский берег») и проведен сравнительный анализ заболеваемости населения, проживающего вблизи этого района падения.



Условные обозначения

- |   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| – район падения отделяемых частей ракет-носителей | – контрольный район (Кочковский)  |
| – исследуемый район (Чистоозерный)                | – контрольный район (Доволенский) |
| – контрольный район (Баганский)                   | – контрольный район (Чулымский)   |

Рис. 1. Схема расположения точек пробоотбора в районе падения РП 213 отделяемых частей ракет-носителей (а) и схема взаимного расположения исследуемого и контрольных районов (б)

Территория РП 213 располагается в южной части Западно-Сибирской равнины. Рельеф района падения неоднороден, обследованная в данной работе его северо-восточная часть представляет собой пониженную слабо-волнистую равнину с редкими узкими гривами высотой от 3 до 8 м. Речная сеть на территории РП практически отсутствует. Значимую часть площади РП занимают озера, неглубокие, плоскдонные, часто пересыхающие в летнее время. Минерализация озерной воды различна: соленая, горько-соленая. По причине засоленности почвообразующих пород в районе РП 213 широко развиты почвы засоленного ряда: лугово-черноземные, черноземы солонцеватые, солонцы, солончаки.

При выборе объектов среды и мест отбора проб принимали во внимание собственный опыт подобных работ в НСО и результаты предыдущих исследований РП 213. Было отобрано 17 проб поверхностных вод, 21 проба почвы и 21 проба растительности. Схема отбора проб прилагается (рис. 1, а). Пробы воды консервировались соляной кислотой (из расчета 5 мл 33% HCl на 1 л воды).

Несимметричный диметилгидразин (гептил) в отобранных пробах определяли в виде их пентафторбензоилхлоридных производных методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием.

В табл. 1 представлены результаты анализов. Предел обнаружения гептила в применяемом нами методе соответствует 0,1 мкг/кг, а значения ПДК гептила составляют для воды 10 мкг/л и для почвы – 100 мкг/кг.

Таблица 1

Содержание 1,1-диметилгидразина (мкг/л, мкг/кг) в пробах поверхностных вод, почве, отобранных в РП 213 («Цыганский берег»)

Номер точки на схеме отбора проб	Содержание НДМГ, мкг/л	
	Вода	Растительность
1	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>
2	< 0,1	< 0,1
3	< 0,1	< 0,1
4	< 0,1	< 0,1
5	< 0,1	< 0,1
6	< 0,1	< 0,1
7	< 0,1	< 0,1
8	<b>0,3</b>	< 0,1
9	–	<b>0,2</b>
10	–	< 0,1
11	–	< 0,1
12	< 0,1	< 0,1
13	<b>0,2</b>	< 0,1
14	< 0,1	< 0,1
15	< 0,1	< 0,1
16	< 0,1	< 0,1
17	< 0,1	<b>0,3</b>
18	<b>0,4</b>	<b>0,9</b>
19	–	< 0,1
20	< 0,1	< 0,1
21	< 0,1	< 0,1

Примечание. Содержание гептила в почве во всех пробах составляет < 0,1 мкг/кг.

Как видно из табл. 1, только в единичных точках удалось обнаружить значимые концентрации гептила (отмечены жирным шрифтом), но они существенно меньше значений ПДК.

Таким образом, с большой долей вероятности можно исключить воздействие гептила на здоровье человека через такие среды, как почва, вода, растительность.

## Эколого-эпидемиологический анализ в зоне, прилегающей к району падения

По данным штабов гражданской обороны (МЧС) за последние 13–15 лет на территории Чистоозерного района Новосибирской области упало около 100 отделяющихся частей ракет-носителей, запускаемых с космодрома Байконур. Вторая ступень при падении содержит в себе 600–1500 кг неизрасходованного гептила. Таким образом, за указанный период в Чистоозерный район падения отделяющимися частями ракет было внесено около 100 т гептила. Если учесть, что 1,1-диметилгидразин в атмосфере достаточно быстро переходит в диметилнитрозоамин, то можно предположить, что попадание такого количества опасных токсикантов в экосистему районов падения должно отразиться на показателях здоровья населения, проживающего вблизи указанного района.

Человеческая популяция является важнейшим элементом экосистемы и отличается наибольшей информативностью, поскольку учреждения системы здравоохранения регулярно фиксируют параметры структуры здоровья населения. Последствия воздействия компонентов ракетного топлива и продуктов его превращения на среду обитания человека можно проследить по данным эколого-эпидемиологического анализа структуры здоровья населения соответствующих районов. Токсичное воздействие компонентов ракетного топлива (КРТ) на организм человека выражается в развитии заболеваний нервной системы, печени, почек, крови. Но наибольший риск для здоровья представляют продукты превращения несимметричного диметилгидразина в диметилнитрозоамин, обладающий четко выраженными канцерогенным и мутагенным воздействиями.

Проведение эколого-эпидемиологического анализа в районах падения было выполнено по следующей схеме. В Новосибирской области выбраны четыре контрольных района (Баганский, Доволенский, Кочковский, Чулымский), имеющие относительно района падения схожие климатические и географические характеристики, аналогичную промышленную инфраструктуру, близкие уровни медицинского обслуживания и социальные показатели, но отстоящие достаточно далеко от района падения. Далее по данным Новосибирского областного комитета охраны окружающей среды и природных ресурсов и данным Новосибирского областного комитета по здравоохранению был проведен сравнительный анализ по целому ряду медико-демографических показателей для районов падения и для районов сравнения. На рис. 1, б представлена схема расположения исследуемого района и районов сравнения.

На рис. 2 представлены результаты сравнения двух показателей: врожденные аномалии у детей и уровень новообразований. Использованы выборки на отрезке в 5 лет. Как видно из представленных гистограмм, по обоим показателям районы падения заметно отличаются от контрольных районов в сторону ухудшения показателей. Данный факт согласуется с наличием «гептильного фактора» в районах падения и может быть объяснен присутствием в среде обитания диметилнитрозоамина, продук-

та превращения диметилгидразина, обладающего канцерогенным и мутагенным воздействиями.

Таблица 2

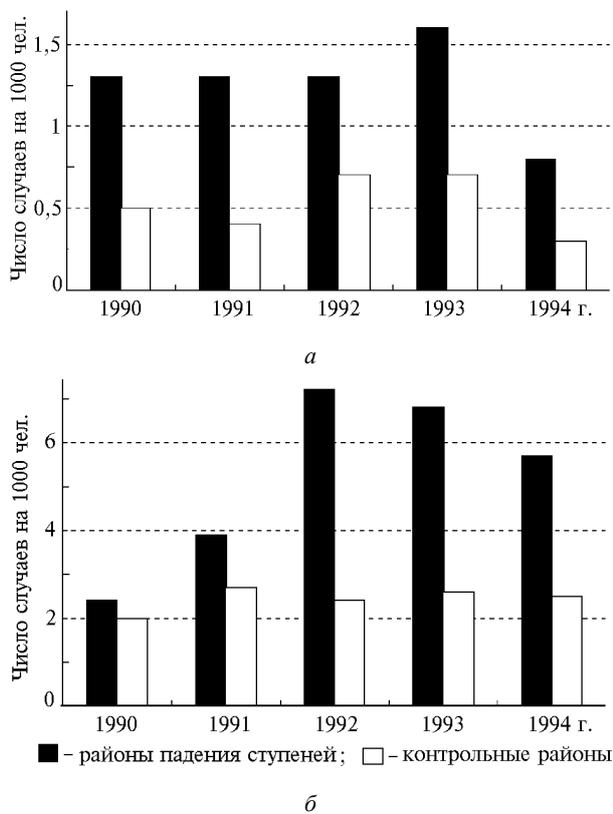


Рис. 2. Результаты сравнительного медико-демографического анализа для исследуемого и контрольных районов: а – уровень общей заболеваемости детей (новообразования), проживавших в Новосибирской области в районах падения ступеней ракет-носителей; б – случаи врожденных аномалий у детей, проживавших в Новосибирской области в районах падения ступеней ракет-носителей

Еще более заметное различие между районами падения и контрольными районами обнаруживается при сопоставлении результатов корреляционного анализа для ряда основных медико-демографических показателей. Анализ проводился по следующей схеме.

Рассматривалась динамика показателей здоровья за последние 20 лет (1976–1996 гг.) в целом для Новосибирской области, которая в дальнейшем использовалась как база сравнения; далее по отношению к базе сравнения проводилось сопоставление аналогичных показателей за тот же промежуток времени для контрольных районов и для районов, прилегающих к зоне падения. В табл. 2 представлены результаты проведенного корреляционного анализа.

Видно, что динамика показателей для контрольных районов хорошо коррелирует с показателем в целом по Новосибирской области (коэффициент корреляции составляет 0,8–0,9) и в то же время имеется низкая корреляция для районов падения или ее полное отсутствие. Таким образом, можно сделать вывод о том, что наличие «гептильного фактора» в среде обитания человека заметно сказывается на структуре здоровья населения, причем не в лучшую сторону.

Медико-демографические особенности районов падения отделяющихся частей ракет-носителей (ОЧРН) и контрольных районов Новосибирской области по данным за период 1976–1996 гг.

Медицинские и демографические относительные показатели	Значения коэффициента корреляции $r$	
	Районы падения ОЧРН – контрольные районы	Область в целом – контрольные районы
Общая заболеваемость детей первого года жизни	-0,2*	0,9**
Уровень заболеваемости детей в связи с врожденными аномалиями	0,3*	0,8**
Замедление роста детей	0,4*	0,9**
Заболеваемость рожениц и родильниц (аномалии родовой деятельности)	-0,3*	0,8**
Обращаемость населения к врачам скорой помощи	0,2*	0,8**
Болезни нервной системы	0,1*	0,9**
Заболеваемость злокачественными новообразованиями	-0,1*	0,9**
Удельный вес больных с запущенными формами злокачественных новообразований	0,2*	0,9**
Младенческая смертность	-0,3*	0,8**
Доля умерших лиц	0,1*	0,8**

\*  $p > 0,05$ ,

\*\*  $p < 0,05$ , достоверность корреляционных связей.

Сопоставляя схему расположения исследуемого района (Чистоозерный) и контрольных районов (см. рис. 1, б), а также данные табл. 1, можно прийти к заключению, что такие среды, как почва, поверхностные воды, растительность, можно исключить как возможные маршруты распространения гептила в окружающей среде, приводящие к негативному воздействию на здоровье населения. Как уже отмечалось выше, вне рамок контроля остается аэрозольный путь распространения гептила в воздушной среде.

Есть достаточно оснований предположить, что данный маршрут распространения является основным воздействием на здоровье населения. Это прежде всего данные медико-демографических показателей для исследуемого района и контрольных районов. Если предположить, что на траектории падения отделяющихся частей ракет-носителей происходит аэрозолирование оставшегося в баках неизрасходованного гептила, то наблюдаемые медико-биологические эффекты поддаются пониманию и объяснению. Экспериментальных фактов, относящихся к процессу аэрозолирования гептила, очень мало, что в первую очередь объясняется огромными техническими трудностями изучения этого процесса.

Известно, что на высотах порядка 30 км происходит разрушение конструкций отделяющейся части ракеты-носителя. Известно также, что некоторое количество гептила вместе с обломками конструкций достигает поверхности земли. Выброс в атмосферу происходит на траектории снижения. Совершенно нет данных относительно количества и динамики выброса в атмосферу гептила, механизма аэрозолирования, спектрального состава частиц по размерам их агрегатного состояния. Наиболее адекватным методом решения данной проблемы является метод

математического моделирования с совместным рассмотрением некоторых наблюдаемых экспериментальных фактов.

### Возможные подходы в моделировании процесса аэрозолирования гептила

В этом разделе обозначим основные подходы к решению задачи распространения аэрозольной примеси от высотных источников. В зависимости от уровня входной информации возможны постановки как прямых, так и обратных задач переноса примеси в атмосфере. Для прямого моделирования необходимо корректное описание параметров источника, к которым относится эмиссия примеси, положение источника в пространстве и во времени, физико-химические свойства аэрозольной примеси. Необходимо также задание гидрометеорологических условий. Здесь в зависимости от преследуемых целей возможны следующие варианты задания метеоусловий:

1. Описание скорости ветра, температуры, давления и плотности воздуха на основе динамических уравнений мезосферы, стратосферы и тропосферы [2, 3].

2. Задание реальных статистических характеристик атмосферы в слое распространения аэрозольных частиц [4–6].

3. Использование текущих значений основных метеопараметров, полученных путем непосредственных наблюдений.

Третий вариант является наиболее предпочтительным, поскольку на его основе можно получить наибольшую точность определения полей аэрозольного загрязнения. Однако его реализация сталкивается с большими техническими трудностями. Первые два варианта задания метеоусловий удобнее применять при решении сценарных задач аэрозольного загрязнения местности при высотных выбросах примеси. При прямом моделировании процессов переноса ракетного топлива в атмосфере не следует ожидать высокой точности, поскольку на данном этапе исследования присутствует очень большая неопределенность в задании положения источника выброса ракетного топлива, режима его функционирования, аэрозольного дробления гептила в атмосфере.

На наш взгляд, наиболее реалистичным является комплексный подход, использующий экспериментальные исследования загрязнения гептилом территорий и теоретические представления о распространении аэрозольной примеси от высотных источников с включением дополнительной априорной информации качественного и количественного характера о возможных зонах загрязнения. Этот подход удобнее описать в рамках постановок соответствующих обратных задач [7, 8].

Рассмотрим на примере движения второй ступени ракеты-носителя «Протон» возможные варианты аэрозолирования гептила в атмосфере. Движение второй ступени имеет активный и пассивный участки полета. Время активного полета составляет около 3,5 мин. За это время ракета перемещается с высоты 44 до 144 км и приобретает скорость 4,4 км/с. Затем на этой высоте происходит отделение второй ступени и начинается пассивный участок полета. Остатки топлива в баках могут составлять более полутонны. На пассивном участке полета второй ступени более вероятно аэрозолирование гептила.

На рис. 3 показано изменение скорости в зависимости от высоты на пассивном участке полета второй ступени.

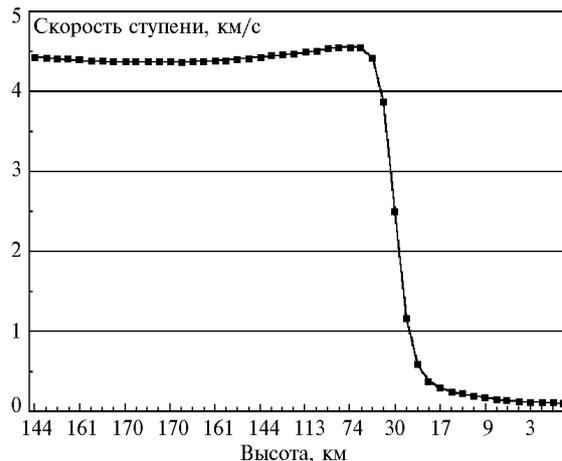


Рис. 3. Изменение скорости второй ступени ракеты с высотой на пассивном участке полета

Как видно из рис. 3, в верхних слоях атмосферы движение происходит по баллистической траектории. При входе в более плотные слои атмосферы происходит за счет трения заметное снижение скорости ступени ракеты и на высоте 25–30 км ее скорость резко падает, происходит взрыв баков с горючим и окислителем, что может привести к разрушению ступени и интенсивному выбросу гептила на этих и меньших высотах. Дальнейший атмосферный перенос гептила в значительной степени зависит от результатов его аэрозолирования. Следует отметить два крайних случая, отвечающие следующим скоростям оседания [9]:

$$\text{а) } U_{\text{cp}}/W \leq 10, \quad \text{б) } U_{\text{cp}}/W > 60,$$

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

В случае «а» максимальные выпадения гептила следует ожидать на расстоянии  $X_{\text{max}}$  в направлении среднего ветра  $U_{\text{cp}}$  от места взрыва баков. Значение  $X_{\text{max}}$  оценивается следующим соотношением [9]:

$$X_{\text{max}} \leq H U_{\text{cp}}/W,$$

где  $H$  – высота выброса. Если предположить  $U_{\text{cp}}/W \leq 10$ ,  $H = 30$  км, то положение  $X_{\text{max}}$  может варьироваться в пределах 300 км.

В случае «б» процессы вертикальной и горизонтальной турбулентной диффузии оказывают существенное влияние на рассеяние примеси. Выпадения гептила следует ожидать на очень большой территории, причем значение  $X_{\text{max}}$  может составить более 1000 км [10]. Плотность аэрозольных выпадений будет соответственно очень низкой и слабо меняться в пределах этой территории.

На рис. 4 представлена зона  $S$  возможного кинематического выпадения ракетного топлива ( $U_{\text{cp}}/W \leq 10$ ) в случае непрерывного истечения гептила. Здесь горизонтальная ось является проекцией на поверхность земли траектории падения ступени ракеты. Начало координат соответствует точке на поверхности земли, над которой произошел взрыв баков. Точка пересечения кривой, огибающей область  $S$  с горизонтальной осью, соответствует месту падения ступени. Направление вертикальной оси совпадает с вектором скорости среднего ветра в слое выпадения гептила.

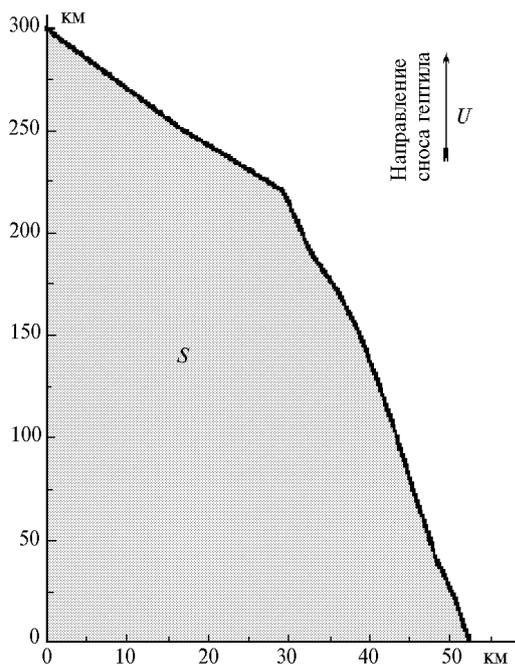


Рис. 4. Область  $S$  возможного кинематического выпадения гептила

Представленная на рис. 4 область возможного выпадения гептила является оценкой сверху, поскольку при оседании на больших высотах скорость  $W$  существенно больше, чем в плотных слоях атмосферы. Более адекватное математическое описание условий оседания и диспергирования гептила может привести к дальнейшему уточнению зоны его возможного выпадения. Следует отметить, что наиболее выгодно проведение экспериментального обследования загрязнения территории в случае близости направления среднего ветра и направления падения ступени

ракеты. В этом случае площадь возможного загрязнения может оказаться минимальной.

В заключение сделаем акцент на следующем положении. В свете анализа результатов загрязнения почвы, воды, растительности, указывающих, с одной стороны, на минимальные негативные эффекты воздействия на экосистему, и с другой стороны, на ощутимые изменения, наблюдаемые в структуре здоровья населения, проживающего в прилегающих районах, можно сделать вывод, что вопрос об аэрозолировании гептила в зоне падения и районах, прилегающих к нему, выходит на ведущее место в системе контроля за районами падения.

1. Choudhary G., Hansen H. // *Chemosphere*. 1998. V. 37. N 5. P. 801–843.
2. Холтон Дж.Р. Динамическая метеорология стратосферы и мезосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1979. 224 с.
3. Динамическая метеорология / Под ред. Д.Л. Лайхмана. Л.: Гидрометеониздат, 1976. 608 с.
4. Школьный Е.П., Майборода Л.А. Атмосфера и управление движением летательных аппаратов. Л.: Гидрометеониздат, 1973. 307 с.
5. Charles B.N. Empirical models of interlevel correlation of winds // *J. Meteorol.* 1959. V. 16. N 5. P. 581–593.
6. Кудрявцева Л.В. Турбулентное рассеяние облака тяжелых частиц, осаждающихся с больших высот // *Метеорология и гидрология*. 1982. № 3. С. 41–50.
7. Крылова А.И., Рапута В.Ф., Суторихин И.А. Планирование и анализ подфакельных наблюдений концентрации примеси в атмосфере // *Метеорология и гидрология*. 1993. № 5. С. 5–13.
8. Рапута В.Ф., Крылова А.И. // *Метеорология и гидрология*. 1995. № 2. С. 49–58.
9. Петрова Г.М., Мирошкина А.Н. Закономерности рассеяния аэрозольных частиц в свободной атмосфере // *Труды ИПГ*. 1967. Вып. 7. С. 5–40.
10. Израэль Ю.А., Волков А.С., Ковалев А.Ф. Радиоактивное загрязнение территории бывшего Советского Союза от испытательных ядерных взрывов на Новой Земле осенью 1961 г. // *Метеорология и гидрология*. 1995. № 5. С. 5–11.

*A.P. Sadovskii, V.F. Raputa, S.E. Olkin, S.V. Zykov, I.K. Reznikova.* **Heptyl aerosolization in the areas of falling of rocket separated parts.**

The falling area of separated parts of rockets launched from Baikonur space-vehicle launching site on the territory of Russia is about 4.5 million hectares. Control for the falling areas contamination with the rocket fuel «heptyl» is performed in soil, surface water pools and plants. However, heptyl atmospheric transfer due to aerosolization processes is not subjected to the control. The conducted studies of the ecosystem state in the vicinity of the falling area N 213 in Novosibirsk region revealed disturbances in the health structure of the population of regions situated in the vicinity of the falling area N 213. It has been supposed that the above event is caused by the processes of heptyl aerosolization in atmosphere. Some approaches to the study of heptyl aerosolization phenomenon at falling of the rocket separated parts are proposed.