

*В.М. Суслинов, Н.Г. Максимович, В.Н. Иванов,  
В.А. Шкляев*

**ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ  
КРАТКОВРЕМЕННЫХ ВЫБРОСОВ БОЛЬШОЙ  
МОЩНОСТИ**



Воздействие на окружающую среду кратковременных выбросов большой мощности: Учеб. пособие / В.М. Суслонов, Н.Г. Максимович, В.Н. Иванов, В.А. Шкляев. - Перм. ун-т. – Пермь, 2005. – 126 с.

МИНИСТЕРСТВА ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОУВПО «Пермский государственный университет»

Научно-образовательный центр  
«Неравновесные переходы в сплошных средах»

*В.М. Суслонов, Н.Г. Максимович, В.Н. Иванов,*  
*В.А. Шкляев*

**ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**  
**КРАТКОВРЕМЕННЫХ ВЫБРОСОВ БОЛЬШОЙ**  
**МОЩНОСТИ**

Учебное пособие

Пермь 2005

**ББК 20.18**

**В641**

**УДК 504.03.054**

**Суслонов В.М.**

**В641** Воздействие на окружающую среду кратковременных выбросов большой мощности: Учеб. пособие / В.М. Суслонов, Н.Г. Максимович, В.Н. Иванов, В.А. Шкляев; Перм. ун-т. - Пермь, 2005. - 126 с.

**ISBN 5-7944-0504-X**

В учебном пособии дается представление о воздействии на окружающую среду кратковременных выбросов большой мощности. На примере испытаний ракетных двигателей на твердом топливе рассмотрены особенности математического моделирования рассеивания продуктов сгорания, условия, способствующие накоплению примесей в атмосфере. Для одного из объектов показаны возможные варианты организации экологического мониторинга и приведены его конкретные результаты.

Пособие предназначено студентам механико-математического, географического и геологического факультетов, а также широкому кругу специалистов в области моделирования рассеивания продуктов сгорания и охраны окружающей среды.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Пермского государственного университета

*Рецензенты:* Федеральное государственное учреждение Уральский государственный научно-исследовательский институт региональных экологических проблем (ФГУ УралНИИ «Экология»); д-р техн. наук, проф. В.Н. Аликин, д-р геол.-мин. наук, проф., Б.М. Осовецкий

**ISBN 5-7944-0504-X**

© В.М. Суслонов, Н.Г. Максимович, 2005

© В.Н. Иванов, В.А. Шкляев, 2005

© ГОУВПО «Пермский государственный университет», 2005

## Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>5</b>
<b>1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЙВАНИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ВЫБРОСАХ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ</b> .....	<b>7</b>
1.1. Существующие модели формирования и подъема облака нагретого газа .....	7
1.1.1. <i>Модель подъема термика</i> .....	9
1.1.2. <i>Модель подъема облака продуктов сжигания топлив ракетных двигателей</i> .....	11
1.1.3. <i>Использование полной системы уравнений гидротермодинамики</i> .....	14
1.2. Модели формирования облаков продуктов сгорания твердых ракетных топлив .....	16
1.2.1. <i>Первый этап: истечение горячей сверхзвуковой струи из сопла до отбойной стенки стенда</i> .....	17
1.2.2. <i>Второй этап: отражение газовой дозвуковой струи от отбойной стенки в атмосферу и формирование облака продуктов сгорания</i> .....	23
1.3. Модели перемещения и рассеивания облака загрязняющих веществ .....	26
1.3.1. <i>Эйлеров подход при моделировании перемещения облака</i> .....	26
1.3.2. <i>Лагранжевы модели перемещения облака</i> .....	27
1.3.3. <i>Моделирование перемещения облака в случаях большой высоты подъема и дальнего переноса</i> .....	28
1.4. Модели метеорологических параметров, используемых в расчетах. Особенности моделирования в условиях НМУ .....	30
1.5. Результаты тестирования моделей .....	35
<b>2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ</b> .....	<b>38</b>
2.1. Атмосфера .....	39
2.2. Снежный покров .....	44
2.3. Поверхностные воды .....	45
2.4. Геологические условия .....	47
2.5. Подземные воды .....	50
2.6. Почвы .....	54

2.7. Растительность.....	56
2.8. Животный мир.....	60
2.9. Физические поля.....	60
<b>3. ХАРАКТЕРИСТИКА УСЛОВИЙ, СПОСОБСТВУЮЩИХ НАКОПЛЕНИЮ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ .....</b>	<b>62</b>
3.1. Характеристика ветрового режима .....	65
3.2. Характеристика приземных и приподнятых инверсий .....	69
3.3. Особенности вертикальных профилей ветра при АНМУ .....	76
3.4. Анализ синоптических условий, способствующих переносу примесей от испытательного стенда .....	83
3.5. Прогноз неблагоприятных погодных условий, способствующих накоплению примесей в атмосфере .....	87
<b>4. ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ..</b>	<b>89</b>
4.1. Основы организации пунктов мониторинга .....	89
4.2. Наблюдения за перемещением облака.....	90
4.3. Наблюдения за выпадением загрязнителей из облака на земную поверхность.....	95
4.4. Изучение состава твердой фазы выбросов.....	96
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>109</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>111</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ .....</b>	<b>116</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Прогресс человеческого общества неизбежно связан с созданием различных технических устройств, обладающих большими запасами энергии. Преднамеренное или непреднамеренное высвобождение энергии и усиление миграции вещества при работе этих устройств обуславливает необходимость решения ряда взаимосвязанных задач, наиболее важной из которых является оценка экологических последствий. Интерес к этой проблеме в последние годы значительно возрос [4; 5; 23-25; 28; 33].

Примерами явлений с кратковременными выбросами большой мощности могут служить взрывы емкостей с горючими веществами, взрывы боеприпасов, запуски ракет, стендовые испытания и уничтожение ракетных двигателей и т.д. Протекающие при этом явления не вписываются в существующие математические модели, а образующиеся выбросы характеризуются тем, что 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 окружающую среду, что не позволяет разрабатывать эффективные способы ее защиты.

В рамках данной работы выполнено исследование воздействия кратковременных выбросов большой мощности на окружающую среду на примере испытаний ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ). В качестве объекта был выбран открытый стенд для сжигания твердых ракетных топлив в г. Перми.

В ходе выполнения работы решались теоретические и прикладные задачи:

- Математическое моделирование явления и отдельных его этапов, в частности, формирования облака продуктов сгорания, подъема облака, рассеивания облака и выпадения примесей с учетом метеорологических параметров.

- Разработка методического обеспечения и проведение натуральных работ для оценки влияния выбросов на окружающую среду.
- Разработка рекомендаций по формированию планов испытаний, нормированию объемов и регулярности выбросов, с учетом метеорологических условий и других условий с целью минимизации воздействия испытаний на окружающую среду.
- Разработка рекомендаций по организации мониторинга.

Авторы выражают благодарность А.Ю. Заповрову, М.В. Рогозину, Ю.А. Килину за предоставленные материалы, В.Г. Шлыкову и Н.П. Воложаниновой – за проведение анализов грунтов и воды, С.В. Казакевичу - за техническую помощь в оформлении пособия.

# **1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЙВАНИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ВЫБРОСАХ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ**

## **1.1. Существующие модели формирования и подъема облака нагретого газа**

В результате производственной деятельности в атмосферу выбрасывается большое количество газообразных и твердых веществ, вступающих между собой в реакции и образующих опасные химические соединения. Атмосферная диффузия приводит к быстрому распространению примесей вблизи их источников, а воздушные течения могут переносить их на значительные расстояния. Необходимой отправной точкой для оценки диффузии примеси является форма источника и характер выброса загрязняющих веществ. По времени воздействия источники выбросов условно делятся на «мгновенные» и «непрерывные» или «постоянные». Первые являются общепризнанной реализацией, связанной с очень кратковременным выбросом материала в атмосферу, например взрывом. Термин «мгновенный» является весьма условным, поскольку даже небольшой взрыв длится доли секунды. В этом случае удобнее применять термин «кратковременный», который будет указывать на малую, но конечную продолжительность действия источника в интервале времени от долей секунды до 1-2 мин.

«Непрерывные» источники можно рассматривать как последовательно выпускающие бесконечную серию клубов с бесконечно малым временным интервалом между ними.

Опасность воздействия источника на природную среду зависит также от массы выброса загрязняющих веществ (мощности источника). Количественные характеристики мощности выбросов могут изменяться в очень широких пределах. Анализ стационарных источников выбросов, действующих в промышленности, показывает, что мощность выбросов в несколько килограммов в секунду можно считать большой. Количество таких источников в крупных городах не превышает 5 % общего количества источников.

Рассмотрим случай мгновенного поступления в атмосферу большой массы нагретого воздуха, содержащего водяной пар, а также



твердые и газообразные примеси. В результате первоначального перегрева возникает процесс конвекции – упорядоченного движения воздуха по вертикали. Процесс подъема облака сопровождается изменением температуры, атмосферного давления и приводит к фазовым переходам водяного пара. Кроме того, сопутствующая примесь может поглощаться образовавшимися каплями воды.

Различие температур облака и окружающей среды является одним из параметров, определяющих процесс подъема. При кратковременном воздействии и различии температур в сотни градусов образуется облако, которое начинает подниматься с большой скоростью. Такие процессы образования облака могут быть связаны с авариями, сопровождающимися взрывом, с проведением испытаний ракетных двигателей на открытых стендах, с ликвидацией ступеней ракет с твердым топливом и др.

При небольшом различии температур облака и окружающей среды процесс конвекции, вызванный термической неоднородностью, приводит к подъему отдельных порций «пузырей» воздуха, называемых термиками. Процессы струйной конвекции, характерные для длительно действующих источников, здесь рассматриваться не будут.

Рассмотрим модели формирования и подъема облака нагретого газа. В зависимости от постановки задачи и способов ее решения имеющиеся модели можно отнести к двум группам:

1. Модели, в которых выделяются отдельные стадии образования, подъема и рассеивания облака. Каждая стадия описывается соответствующей математической моделью, а модель последующего этапа использует результаты моделирования предыдущего в качестве начальных или граничных условий. Для каждой стадии процесса может быть введена своя локальная система координат. Обычно для моделирования процессов подъема облака достаточно использовать законы сохранения импульса, тепла, а также учесть изменение массы облака при подъеме.
2. Прямое численное интегрирование уравнений гидротермодинамики в турбулентной атмосфере. В этом случае процессы образования, развития и рассеивания облака описываются

единой системой уравнений, а область интегрирования включает зону образования, переноса и рассеивания облака. Модели этой группы могут быть трехмерными или плоскими.

### *1.1.1. Модель подъема термика*

В поднимающемся облаке плотность и состав воздуха принимаются постоянными во всем объеме. Давление в облаке равно давлению окружающей среды. При подъеме термика происходит изменение его массы, зависящее от трех следующих процессов: вовлечение окружающего воздуха при движении термика; выпадение аэрозолей или твердых частиц под действием силы тяжести; турбулентный обмен на границе термика, приводящий к выбросу потока примеси в окружающий воздух.

Вовлечение воздуха представляет собой результат турбулентности, генерируемой при подъеме горячего облака и при значительной скорости подъема. Кроме того, облако поднимается в реальной турбулентной атмосфере. Далее, при подъеме облака, имеющего большие линейные размеры, за ним остается турбулизированный след. Все эти процессы будут приводить к турбулентной диффузии примеси [1].

Примем потоки массы примеси в окружающую среду (кроме гравитационного оседания) пропорциональными общему потоку массы и удельному содержанию примеси в облаке и окружающей среде. В свою очередь, потоки массы пропорциональны площади поверхности облака и скорости его движения относительно окружающего воздуха [6]. Таким образом, поток массы от среды к облаку выражается следующей формулой:

$$M_1 = b_1 \rho_n S \left| \overline{V^e} \right|, \quad (1)$$

а поток массы от облака к окружающей среде

$$M_2 = b_2 \rho_e S \left| \overline{V^e} \right|, \quad (2)$$

где  $b_1$ ,  $b_2$  – коэффициенты пропорциональности,  $S$  – площадь поверхности облака,  $\left| \overline{V^e} \right|$  – относительная скорость движения облака

$(\bar{V}^e = \bar{V} - \bar{V}_n)$ ,  $\bar{V}_n$  – скорость ветра в атмосфере,  $\rho_n$  – плотность среды,  $\rho_e$  – плотность облака.

Вследствие вовлечения окружающего воздуха масса термика  $m$  при его перемещении увеличивается, причем коэффициент вовлечения  $\alpha$ , определяемый соотношением

$$\alpha = \frac{1}{m} \frac{dm}{dz}, \quad (3)$$

обратно пропорционален линейному размеру термика. Численное значение коэффициента пропорциональности обычно принимают равным 0,15, однако его значение увеличивается с ростом неустойчивости атмосферы [22]. Установлено также, что время подъема термика пропорционально квадрату высоты его подъема [41].

Изменение массы облака определяется из условия баланса

$$\frac{dm}{dt} = M_1 - M_2. \quad (4)$$

При лабораторных исследованиях и наблюдениях за развитием кучевой облачности выявлено, что радиус термика меняется приблизительно по линейному закону. Изменение импульса термика происходит в результате притока импульса из окружающей среды, а также действия силы плавучести. В результате уравнение баланса импульса имеет вид [28]

$$\left(1 + \frac{1}{\rho_o}\right) \frac{d\bar{V}}{dt} = \frac{M_1}{m} \bar{V}^e + \left(1 - \frac{1}{\rho_o}\right) \bar{g}, \quad (5)$$

где  $\rho_o$  – относительная плотность облака (по отношению к плотности среды),  $\bar{V}$  – скорость облака,  $t$  – время,  $\bar{g}$  – ускорение свободного падения.

Уравнение притока тепла может быть записано с учетом адиабатического расширения облака при подъеме и притока воздуха, имеющего температуру окружающей среды

$$c_p \frac{dT}{dt} = \zeta \frac{dp_n}{dt} + c_p (T_n - T) M_1 + Q_{\phi}, \quad (6)$$

где  $T$  – температура облака,  $T_n$  – температура окружающей среды,  $p_n$  – давление атмосферы (облака) на высоте подъема,  $c_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $\varsigma$  – объем облака,  $Q_{\phi}$  – скорость выделения тепла при фазовых переходах (конденсации).

Система (4)-(6), а также уравнение для вертикальной координаты центра облака

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = \bar{V} \quad (7)$$

решается при метеорологических условиях, которые могут быть определены из выбранной модели пограничного слоя атмосферы. Начальные условия соответствуют образованию облака у поверхности Земли (начальная высота и скорость равны 0, а относительная плотность  $\rho = \rho_0$ ). При неядерном взрыве  $\rho_0 = 0,126$  [19].

### ***1.1.2. Модель подъема облака продуктов сжигания топлив ракетных двигателей***

Рассмотрим процесс подъема облака, образующегося при сжигании топлива ракетного двигателя (всплытие газового пузыря).

Следуя [6; 28], разобьем все облако продуктов сгорания РДТТ на последовательность шаров (клубов) и опишем всплытие каждого такого клуба (алгоритм разбивки описан ниже в п. 1.2.2). При всплытии клуба необходимо учитывать физико-кинематические процессы, происходящие в облаке (образование капель жидкости, выпадение твердой и жидкой фаз из облака).

Обозначим:

$\vec{g}$  – вектор ускорения свободного падения,

$a$  – радиус клуба,

$\rho_n$  – плотность атмосферного воздуха.

Используя закон сохранения количества движения, для центра масс клуба можно написать следующее уравнение [6; 28]:

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = -\frac{3}{8} \cdot C_d \cdot \frac{\rho_n}{\rho \cdot a} \cdot |\bar{V}^e| \cdot \bar{V}^e - 3 \cdot \left( \alpha \cdot \frac{\rho_n}{\rho \cdot a} \cdot |\bar{V}^e| + \frac{\rho_n \cdot \alpha_1 \cdot k_1}{\rho \cdot a^2} \right) \cdot \bar{U}^e + \vec{g} \cdot \frac{T - T_n}{T}, \quad (8)$$

где  $\bar{V}$  – скорость центра масс клуба;

$\bar{V}^e$  – относительная скорость клуба ( $\bar{V}^e = \bar{V} - \bar{V}^n$ , где  $\bar{V}^n$  – скорость ветра);

$\bar{U}^e$  – относительная скорость вовлечения набегающего потока в клуб ( $\bar{U}^e = \bar{V}^e \cdot \alpha^e$ , где  $\alpha^e \approx 0,1 \div 1$ );

$\rho = \rho_g + \rho_z$  – плотность клуба;

$\rho_g$  – плотность жидкой фазы в клубе (капель соляной кислоты);

$\rho_z$  – плотность газа в клубе.

Для расширяющегося радиуса клуба справедливо уравнение

$$\frac{da}{dt} = \alpha \cdot |\bar{V}^e| + \frac{\alpha_1 \cdot k_1}{a} - \frac{a}{3} \cdot \frac{d \ln \rho_n}{dt} \cdot w, \quad (9)$$

которое является уравнением сохранения массы с учетом вовлечения в клуб окружающих масс воздуха. В этом уравнении

$w$  – значение вертикальной составляющей вектора скорости центра масс клуба;

$\alpha$  – коэффициент вовлечения набегающего потока воздуха ( $\alpha \approx 0,1$ , при классе устойчивости атмосферы - В);

$\alpha_1$  – коэффициент, учитывающий диффузионное расширение клуба ( $\alpha_1 \approx 0,25$ );

$k_1$  – коэффициент диффузии.

При этом принимается следующая гипотеза: скорость изменения массы клуба  $\frac{dm_z}{dt}$  (скорость вовлечения окружающего воздуха) пропорциональна его относительной скорости [22] и скорости турбулентной диффузии:

$$\frac{dm_z}{dt} = 4\pi a^2 \rho_n \cdot |\bar{V}^e| + 4\pi a \rho_n \alpha_1 k_1. \quad (10)$$

Для газовой фазы, учитывая вовлечение воздуха в клуб и процесс каплеобразования (конденсации паров соляной кислоты), будем иметь

$$\frac{d\rho_z}{dt} = \frac{3\alpha}{a} \cdot (\rho_n - \rho_z) \cdot |\bar{V}^e| + \frac{3\alpha_1}{a} \cdot (\rho_n - \rho_z) \cdot \frac{k_1}{a} + \rho_z \cdot \frac{d \ln \rho_n}{dt} \cdot w - q, \quad (11)$$

где  $q$  – скорость конденсации паров соляной кислоты.

Газовая фаза состоит из атмосферного воздуха, водяного пара, хлористого водорода и других газообразных продуктов сгорания топлива. Водяной пар и хлористый водород участвуют в фазовых переходах с образованием паров, а затем и капель соляной кислоты. Поэтому для них необходимо выписать уравнения сохранения массы. Для водяного пара

$$\frac{d\rho_{\text{нап}}}{dt} = -\frac{3\rho_{\text{нап}}}{a} \cdot \frac{da}{dt} + k_o \cdot \frac{3\alpha}{a} \cdot \rho_n \cdot |\bar{V}^e| + k_o \cdot \frac{3\alpha_1}{a} \cdot \rho_n \cdot \frac{k_1}{a} - q, \quad (12)$$

где  $k_o$  – процентное содержание водяного пара в атмосферном воздухе,

$$k_o = 0,622 \frac{E}{p},$$

$$E = f \cdot E(T),$$

$E, E(T)$  - парциальные давления паров воды,

$f$  - относительная влажность воздуха.

Для хлористого водорода

$$\frac{d\rho_{\text{HCl}}}{dt} = -\frac{3\rho_{\text{HCl}}}{a} \cdot \frac{da}{dt} - \beta \cdot q, \quad (13)$$

где  $\beta$  – процентное содержание соляной кислоты в капле. При расчетах принимается гипотеза, что при тех больших концентрациях хлористого водорода, которые наблюдаются в облаке продуктов сгорания, в образующейся капле содержится близкий к насыщенному раствор соляной кислоты.

В этих уравнениях фазовые переходы описываются функцией  $q$

$$q = \begin{cases} \frac{E}{R_{\text{нап}} T^2} \cdot \left( \frac{L}{R_{\text{нап}} T} - 1 \right) \cdot \frac{dT}{dt}, & E \geq E(T), \\ 0, & E < E(T), \end{cases} \quad (14)$$

где  $E(T) = E(273) \cdot \exp\left(\frac{17,1 \cdot (T - 273)}{235 + T - 273}\right)$  – парциальное давление

насыщенного водяного пара,

$R_{\text{нап}}$  – удельная газовая постоянная водяного пара,

$$R_{нар} = 1,608 \cdot R ;$$

$R$  – удельная газовая постоянная сухого воздуха,  $R = 287$  [Дж/кг·К];

$$L – \text{скрытая теплота парообразования, } L = L_o - 2,72 \cdot (T - 273),$$

$$L_o = 2500 \text{ [кДж/кг];}$$

$E = R_{нар} \cdot \rho_{нар} \cdot T$  – парциальное давление паров воды (соляной кислоты) в облаке.

Скорость изменения плотности капель соляной кислоты за счет процессов каплеобразования и разбавления при расширении облака вычисляем по следующей формуле (описание коэффициентов см. ниже в п.1.3.3):

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} = \text{div}(k_1^e \nabla \rho_e) + \bar{k} \cdot \nabla(k_2^e \rho_e) - \bar{V}_n \cdot \nabla \rho_e + q, \quad (15)$$

где  $\bar{k}$  – орт вертикальной оси (Oz), направлен вертикально вверх.

В случае, когда расчетная точка находится в клубе, в качестве скорости ветра берется скорость клуба.

Скорость изменения плотности твердых частиц на данной стадии расчета также описывается диффузионным уравнением вида (15).

Температуру облака, в силу его изобаричности, можно определить по формуле

$$T = \frac{\rho_n \cdot T_n}{\rho_e}. \quad (16)$$

Продифференцировав выражение для температуры облака, получим формулу для вычисления скорости ее изменения при подъеме облака

$$\frac{dT}{dt} = T \left( \frac{d \ln \rho_n}{dz} + \frac{d \ln T_n}{dz} \right) \cdot w - T \cdot \frac{d \ln \rho_e}{dt}. \quad (17)$$

### **1.1.3. Использование полной системы уравнений гидротермодинамики**

Решение задачи о переносе примеси в пограничном слое атмосферы от источника может быть получено на основе полуэмпириче-

ского уравнения турбулентной диффузии примеси [31]. Считая коэффициент турбулентной диффузии постоянным, получим

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla c = k \Delta c, \quad (18)$$

где  $c$  – плотность примеси,  $\bar{V}$  – вектор скорости,  $k$  – коэффициент турбулентной диффузии,  $\Delta$  – оператор Лапласа.

Для определения необходимых динамических и термических характеристик пограничного слоя используется система уравнений. Она включает уравнение динамики атмосферы, являющееся следствием закона сохранения импульса (Навье-Стокса), вывод которого приведен в [22; 41]. В данной постановке это уравнение может быть записано без учета силы Кориолиса:

$$\rho \frac{d\bar{V}}{dt} = \rho \bar{F} - \nabla p + \mu(\Delta \bar{V} + 1/3 \nabla \operatorname{div} \bar{V}), \quad (19)$$

где  $\bar{F}$  – вектор массовых сил (сила тяжести),  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости. Последнее слагаемое для квазинесжимаемой среды ввиду малости может быть отброшено.

Уравнение неразрывности, которое является следствием закона сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \bar{V} = 0.$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E \bar{V} + \bar{J}_E) = 0,$$

где  $E$  – полная удельная энергия,  $\bar{J}_E$  – поток полной удельной энергии.

Для адиабатического процесса к этой системе добавляется уравнение, связывающее атмосферное давление и плотность среды:

$$p = \rho (\chi - 1)(E - \bar{V}^2 / 2). \quad (22)$$

Здесь  $\chi$  – показатель адиабаты.

Эта система уравнений дополняется краевыми и начальными условиями. Вычисление  $k$  представляет определенную сложность. В случае, когда этот коэффициент считается неизвестным, уравнение (18) записывается в другом виде [22]:



$$\frac{\partial \rho c}{\partial t} + \frac{\partial \rho c u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho k_j \frac{\partial c}{\partial x_j} \right). \quad (23)$$

Здесь по повторяющемуся индексу  $j$  осуществляется суммирование.

В этом случае для решения системы используются различные замыкающие гипотезы и привлекаются дополнительные уравнения.

При решении задачи переноса примеси, связанной с испытаниями ракетных двигателей, параметры источника задаются как граничные условия, например, в [14] решалась плоская задача, а коэффициент диффузии  $\mu$  принимался постоянным.

## **1.2. Модели формирования облаков продуктов сгорания твердых ракетных топлив**

В настоящем параграфе описываются модели формирования облака продуктов сгорания, образующихся при сжигании крупногабаритных твердотопливных ракетных двигателей.

Испытания и отжиг РДТТ осуществляются в большинстве случаев на специально оборудованных открытых стендах с горизонтальным расположением двигателя и наклонной отбойной стенкой, что обуславливает выброс продуктов сгорания в атмосферу на большую высоту и их осаждение на значительную территорию. Процесс сгорания топлива крупногабаритных РДТТ (массой от 10 до 50 т) быстропротекающий (10-100 с). При этом образуются высокотемпературные продукты сгорания (1500-3500°K) со сверхзвуковыми скоростями истечения из сопла и большими, как следствие, массовыми расходами загрязняющих веществ (100-700 кг/с). Струя продуктов сгорания, вышедшая из сопла, при своем движении в атмосфере проходит многоэтапный процесс развития и изменения своих газотермодинамических, физико-химических, геометрических параметров. В продуктах сгорания содержатся следующие твердые, газообразные и жидкие токсичные соединения: окись алюминия, хлористый водород, окислы азота, диоксид углерода и др.

Наиболее эффективным способом определения распределения загрязняющих веществ в результате испытаний, учитывающим конкрет-

ную конструкцию стенда, является разбивка всего процесса на характерные этапы (модули), построение для каждого из них упрощенной, но достаточно адекватной для практических приложений модели, учитывающей теоретические и эмпирические данные.

Выделим следующие основные этапы:

1. Истечение горячей сверхзвуковой струи из сопла, а затем дозвуковой до отбойной стенки стенда в горизонтальном направлении.
2. Истечение газовой дозвуковой струи от отбойной стенки под заданным углом в атмосферу и формирование облака (или клубов) продуктов сгорания.

Приведенная разбивка всего процесса образования и рассеивания облака продуктов сгорания РДТТ при его испытании на открытом стенде составлена по результатам многолетних натуральных наблюдений за фактическими процессами испытаний двигателей различных масс.

### ***1.2.1. Первый этап: истечение горячей сверхзвуковой струи из сопла до отбойной стенки стенда***

Следуя [1] на горизонтальном этапе формирования, струю разбиваем на три участка: начальный  $[0, x_n]$ , переходный  $[x_n, x_n]$  и основной  $[x_n, L]$  (см. рис. 1.1).

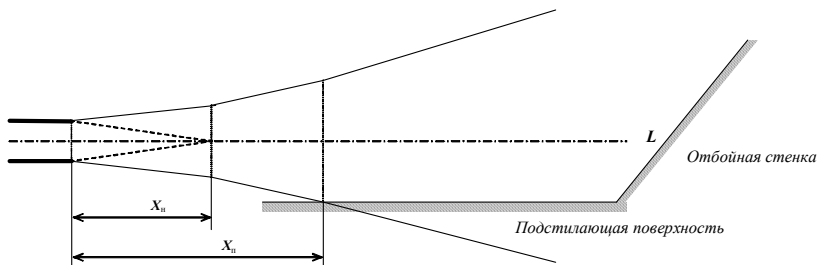


Рис. 1.1. Участки развития струи на горизонтальном этапе

Начальный участок характеризуется постоянной скоростью в ядре течения, так называемой "бочке". На переходном участке в точке  $x_n$  течение приобретает вид струи, истекающей из источника бесконечно

малого диаметра [1]. На основном участке струя является круглой изобарической, истекающей из некоторого фиктивного отверстия бесконечно малого диаметра, расположенного за срезом сопла вверх по течению струи.

Характерная особенность таких струй – малость поперечной составляющей скорости по сравнению с продольной, что позволяет использовать модель свободного пограничного слоя [1; 2; 57].

Введем следующие обозначения:

$i_-$  – теплосодержание,

$T$  – температура,

$u$  – продольная скорость на расстоянии  $y$  от оси струи,

$\psi$  – относительная массовая концентрация газовой примеси,

$L$  – расстояние до отбойной стенки,

$m$  – индекс, соответствующий оси струи,

$n$  – индекс, соответствующий внешней среде,

$o$  – индекс, соответствующий срезу сопла,

$\rho$  – плотность,

$b$  – ширина струи,

$\delta$  – ширина пристеночного пограничного слоя,

$\rho_p$  – плотность твердых частиц (массовое содержание),

$x$  – продольная координата вдоль струи,

$p$  – давление.

Рассматриваемая струя является затопленной на участках 1 (начальный) и 2 (переходный). На третьем участке (основном) необходимо учитывать наличие подстилающей поверхности. На начальном участке струи профили избыточных скоростей, температур, концентраций газовой примеси имеют универсальную форму [1; 17; 57] и хорошо описываются формулами

$$\frac{u_o - u}{u_o - u_n} = \left( 1 - \eta_n^{\frac{3}{2}} \right)^2, \quad (24)$$

$$\frac{T - T_n}{T_o - T_n} \approx \frac{i - i_n}{i_o - i_n} = \eta_n, \quad (25)$$

$$\frac{\psi - \psi_n}{\psi_o - \psi_n} = \frac{i - i_n}{i_o - i_n} \approx \frac{T - T_n}{T_o - T_n}, \quad (26)$$

$\eta_n$  – безразмерная переменная, имеющая вид

$$\eta_n = \frac{y - y_2}{y_1 - y_2}, \quad (27)$$

где  $y_2$  – внешняя граница струи,

$y_1$  – граница ядра потока на начальном участке.

Многочисленные экспериментальные данные, приведенные в [1; 2], и теоретические соображения [1; 17; 57] позволяют положить

$$\begin{aligned} y_1 &= 0,98 \cdot 0,09 \cdot x, \\ y_2 &= -0,98 \cdot 2,04 \cdot x. \end{aligned} \quad (28)$$

Если через  $b$  обозначить радиус струи на начальном участке и учесть, что скорость внешней среды равна нулю (мала по сравнению со скоростью струи), то с учетом (27), (28) формулы (24)-(25) примут вид

$$\frac{u_o - u}{u_o} = \left( 1 - \left( \frac{y + 0,09 \cdot 2,04 \cdot x}{b} \right)^{\frac{3}{2}} \right)^2, \quad (29)$$

$$\frac{T - T_n}{T_o - T_n} = \frac{y + 0,09 \cdot 2,04 \cdot x}{b}, \quad (30)$$

$$\frac{\psi}{\psi_o} = \frac{y + 0,09 \cdot 2,04 \cdot x}{b}. \quad (31)$$

Для переходного участка, следуя [1], можно оценить продольную координату сечения и толщину этого сечения.

Толщина переходного сечения  $b_n$  определяется формулой

$$b_n = b_o \cdot 2,48, \quad (32)$$

где  $b_o$  – диаметр сопла.

Абсцисса переходного сечения  $x_n$  (для полуограниченной струи) имеет вид

$$x_n = b_o \cdot 13,5. \quad (33)$$

Для основного участка справедливы следующие гипотезы [1]:

- 1) наличие твердой стенки мало влияет на толщину струи;
- 2) скорость на оси струи затухает медленнее, чем в свободной струе.

В пристеночном пограничном слое профиль скорости подчиняется закону "одна седьмая" [57]:

$$\frac{u}{u_m} = \left( \frac{y}{\delta} \right)^{1/7}. \quad (34)$$

Профиль скорости вне пристеночного слоя, как установлено в [1; 17], имеет вид

$$\frac{u}{u_m} = \left( 1 - \left( \frac{y - \delta}{b} \right)^{3/2} \right)^2, \quad (35)$$

где  $\delta$  – толщина пристеночного слоя.

В нашем случае  $\delta$  – расстояние от стенки до искривленной оси струи. Обычно принимают, что толщина пограничного слоя равна одной десятой толщины струи. Поэтому в данном случае следует положить

$$b_c = b + 0,1 \cdot b \approx 1,1 \cdot b.$$

Величина  $y$  (ордината) отсчитывается от подстилающей поверхности, а толщина струи описывается в соответствии с [1] величиной

$$b = 0,22 \cdot (x - 13,5 \cdot b_o) + 2,48 \cdot b_o. \quad (36)$$

На поперечных сечениях основного участка

$$\frac{\psi}{\psi_m} = \frac{T - T_n}{T_m - T_n} = \left( \frac{u}{u_m} \right)^{Pr_{rt}}. \quad (37)$$

Величину числа Прандтля для рассматриваемых струй [1] полагаем равной

$$Pr_{rt} = 0,7 \div 0,8.$$

Вычислим изменения параметров струи на оси в зависимости от расстояния от среза сопла.

Следуя многочисленным исследованиям, примем на переходном участке

$$\frac{\hat{u}_m}{u_{om}} = \left( \frac{x_n}{x} \right)^2,$$

где  $u_{om}$  – скорость на оси начального участка.

Для скорости на оси полуограниченной струи справедлива полуэмпирическая формула [1; 2]

$$\frac{u_m}{\hat{u}_m} = \left( \frac{b_n}{b} \right)^{1,8}, \quad (38)$$

где  $\hat{u}_m$  – скорость на оси переходного участка.

Для температур на оси основного участка справедливо соотношение

$$\frac{T_m - T_n}{T_{om} - T_n} = K_T \cdot \frac{u_m}{\hat{u}_m}. \quad (39)$$

Значение концентрации газовой примеси на оси струи определим из условия равенства массы примеси, прошедшей через сопло и находящейся в струе:

$$M_{np} = Q_{np} \cdot T_{зала} = Q_{np} \cdot \int_0^l \frac{dx}{u_m} = \int_0^l \left( \frac{Q_{np}}{u_m} \right) dx,$$

где  $Q_{np}$  – расход примеси на срезе сопла,

$M_{np}$  – масса образовавшейся примеси,

$\frac{Q_{np}}{u_m}$  – погонная масса примеси в струе.

С другой стороны,

$$\frac{Q_{np}}{u_m} = \int_s \psi \rho \cdot ds.$$

Концентрация примеси  $\psi$  в силу формулы (31) имеет вид

$$\psi = \psi_m \cdot \left( \frac{u}{u_m} \right)^{Pr t}. \quad (40)$$

В силу изобаричности струи на основном участке, используя формулу (37), можно получить следующее выражение для плотности струи:

$$\rho = \frac{\rho_n \cdot T_n}{\left(\frac{u}{u_m}\right)^{Pr} (T_m - T_n) + T_n}.$$

Таким образом,

$$\frac{Q_{np}}{u_m} = \int_S \psi_m \cdot \left(\frac{u}{u_m}\right)^{Pr} \cdot \frac{\rho_n \cdot T_n}{\left(\frac{u}{u_m}\right)^{Pr} (T_m - T_n) + T_n} ds.$$

Отсюда

$$\psi_m = \frac{Q_{np}}{\rho_n \cdot T_n \cdot u_m} \cdot J^{-1}, \quad (41)$$

$$\text{где } J = \int_S \frac{\left(\frac{u}{u_m}\right)^{Pr}}{\left(\frac{u}{u_m}\right)^{Pr} (T_m - T_n) + T_n} ds.$$

**Учет многофазности струи.** До отбойной стенки можно считать, что частицы достаточно малы и их скорость совпадает со скоростью газовой фазы. Тогда, следуя [1; 51], будем считать, что массовая концентрация  $\sigma$  твердой фазы удовлетворяет гипотезе

$$\sigma = \sigma_m \cdot \left(1 - \left(\frac{y + 0,09 \cdot 2,04 \cdot x}{b}\right)^{\frac{3}{2}}\right)^2, \quad (42)$$

где  $b$  – толщина струи,  $\sigma_m$  – концентрация твердых частиц на оси струи.

В пристеночном пограничном слое [57]

$$\sigma = \sigma_m \cdot \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{7}}.$$

Экспериментальные данные, приведенные в [1; 57], позволяют считать, что

$$\sigma_m = \frac{0,75 \cdot u_m}{\frac{1}{s} \cdot u_o - 0,6 \cdot u_m}, \quad (43)$$

где  $u_m$  – скорость на оси струи,  $u_o$  – скорость на срезе сопла,

$$s = \frac{G_p \cdot u_o}{I_o \cdot g},$$

$I_o$  – начальный импульс струи,  $I_o = \frac{G_z}{g} u_z + \frac{G_p}{g} u_p$ ,  $G_z$  и  $G_p$  – начальные секундные расходы газа и твердой примеси соответственно.

Зная  $\sigma$  и учитывая изобаричность струи, можно определить плотность твердой фазы. Действительно,  $\sigma = \frac{\rho_p}{\rho_p + \rho_z}$ . Откуда  $\rho_p = \frac{\sigma \cdot \rho_z}{1 - \sigma}$ ,

где  $\rho_z$  – плотность газовой фазы.

В силу изобаричности ( $\rho_z T = \rho_n T_n$ ) окончательно получим

$$\rho_p = \frac{\sigma}{1 - \sigma} \cdot \frac{\rho_n \cdot T_n}{T}. \quad (44)$$

### ***1.2.2. Второй этап: отражение газовой дозвуковой струи от отбойной стенки в атмосферу и формирование облака продуктов сгорания***

На втором этапе (движение струи от отбойной стенки под углом к горизонту) течение будем описывать как течение круглой струи с условиями на входе, определенными в конце предыдущего этапа.

Полуширина струи (радиус)  $b$ , так же как и на первом этапе, вычисляется по формуле  $b = cx + b_o$ , где  $b_o$  – начальный на втором этапе радиус струи,  $c = 0,22$ .

Поскольку струя на втором этапе является дозвуковой, то

$$\frac{u}{u_m} = \left( 1 - \left( \frac{y}{b} \right)^{3/2} \right)^2, \quad (45)$$

$$\frac{u_m}{u_o} = \left( \frac{b_o}{b} \right)^2, \quad (46)$$

$$\frac{\psi}{\psi_m} = \frac{T - T_n}{T_m - T_n} = \left( \frac{u}{u_m} \right)^{Pr} t, \quad (47)$$



$$\frac{T_m - T_n}{T_{om} - T_n} = K_T \cdot \frac{u_m}{u_o}, \quad (48)$$

где  $\psi_m$  определяется по формуле (41).

В этих формулах индекс "о" означает, что соответствующие параметры вычислены в конце горизонтального участка.

**Учет многофазности струи.** Поскольку струя является низкоскоростной, то здесь уже нельзя считать, что скорость твердых частиц и газовой фазы совпадают. Поэтому, следуя [51], будем считать, что массовая концентрация  $\sigma$  твердой фазы удовлетворяет гипотезе

$$\sigma = \sigma_m \cdot \left(1 + \beta \cdot \xi^{3/2}\right)^{-2}, \quad (49)$$

где  $\xi = r/(x+L)$ ,  $\sigma_m$  – концентрация твердых частиц на оси струи,  $\beta=0,24$ .

Тогда, используя формулу (38), можно выписать следующую последовательность соотношений, связывающих секундный расход твердых частиц на срезе сопла и их концентрацию по оси струи:

$$M_p = \rho_{po} u_o S_o T \quad \rho_{po} u_o S_o \int_{L_z} \frac{dz}{u_m} \quad \int_{L_z} \frac{\rho_{po} u_o S_o dz}{u_m} \quad \int_{L_z} \left( \int \rho_p ds \right) dz, \quad (50)$$

откуда

$$\frac{\rho_{po} u_o S_o}{u_m} = \int_S \rho_p ds \quad \int_S \frac{\sigma}{1-\sigma} \cdot \frac{\rho_n \cdot T_n}{T} ds \quad \sigma_m \cdot \rho_n \cdot T_n \cdot \int_S \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{\left(1 + \beta \cdot \xi^{3/2}\right)^2 - \sigma_m} ds. \quad (51)$$

Разрешая (51), получим рекуррентную формулу, которая позволяет приближенно вычислять значение  $\sigma_m$  с любой заданной точностью:

$$\sigma_m^{k+1} = \frac{\rho_{po} u_o S_o}{u_m \cdot \rho_n \cdot T_n \cdot \int_S \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{\left(1 + \beta \cdot \xi^{3/2}\right)^2 - \sigma_m^k} ds}. \quad (52)$$

Для вычисления  $\sigma_m$  с точность до восьми знаков достаточно выполнить пять итераций.

**Разбивка облака продуктов сгорания РДТТ на последовательность клубов.** Первоначально облако, имеющее форму струи, делится

на криволинейные цилиндры при условии равенства поперечных диаметров цилиндров в среднем сечении их высотам (рис. 1.2). Разбивка идет от вершины струи к ее основанию. Вычисляются средние плотности загрязняющих веществ, скорости и координаты центров масс цилиндров. Затем каждый цилиндр заменяется шаром (клубом) того же объема.

$$C_k C'_k = d_k, A_k A_{k+1} = h_k,$$

Условия разбивки:

$$d_k = h_k, V_{к,шара} = V_{к,цилиндра}, k=1, \dots, N.$$

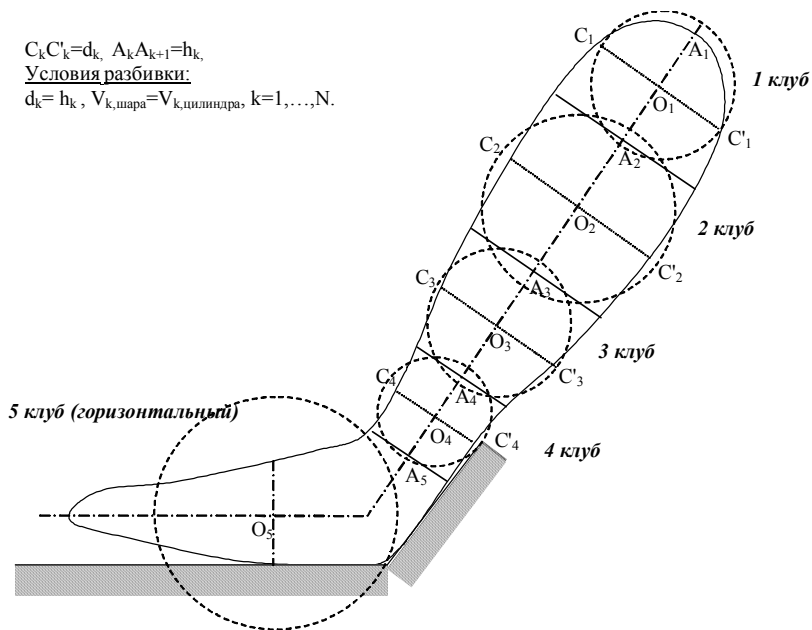


Рис. 1.2. Разбивка облака продуктов сгорания РДТТ на последовательность клубов

Часть струи, оставшаяся после отсечки двигателя на горизонтальном участке, заменяется одним шаром (клубом), который в начальный момент располагается на расстоянии его радиуса от отбойной стенки.

В процессе подъема и диффузии клубов может происходить их пересечение (в силу различия конвективных сил, составляющих ветрового переноса и атмосферной турбулентности, действующих на клубы). В этом случае на каждом шаге интегрирования выполняется новая разбивка облака на клубы. Для этого вначале клубы заменяются цилиндрами того же объема, высоты которых равны их диаметрам. Вы-

числяются массы и объемы частей цилиндров, находящихся в областях их пересечения. Затем вычисленные массы и объемы передаются из меньших цилиндров в большие. Полученные цилиндры заново пересчитываются в клубы.

При уменьшении объема какого-либо клуба до  $1 \text{ м}^3$  он исключается из последующего расчета.

Указанный алгоритм пересчета поднимающегося облака в клубы учитывает закон сохранения массы и импульса.

### **1.3. Модели перемещения и рассеивания облака загрязняющих веществ**

После достижения высоты стабилизации, которая может составлять 1-2 км, облако начинает перемещаться с потоком воздуха. При таком перемещении происходит рассеивание облака примеси вследствие турбулентной диффузии, ослабленной на этой высоте, продолжается гравитационное оседание аэрозоля или оставшихся твердых частиц. Основным уравнением для расчетов является уравнение турбулентной диффузии в виде (18) или (23) с добавлением механизмов выведения примеси за счет выпадения или вымывания осадками, а также ее трансформации. Если не считать аналитического способа решения этого уравнения, получаемого при соблюдении некоторых допущений, то существуют два различных подхода численного решения этого уравнения: эйлеров и лагранжев.

#### ***1.3.1. Эйлеров подход при моделировании перемещения облака***

При этом подходе используются переменные Эйлера. Метод расчета распространения примеси в этом случае основан на решении уравнения турбулентной диффузии в виде

$$\frac{\partial c}{\partial t} = F(x, y, z, t) \cdot \quad (53)$$

Это уравнение решается для всей сеточной области с соответствующими краевыми условиями, причем распределения компонент вектора скорости воздушного потока считаются заданными или находятся из решения системы уравнений гидротермодинамики, записанных для

пограничного слоя атмосферы или свободной атмосферы. Это зависит от высоты подъема и распространения облака. Таким образом, подход Эйлера заключается в прослеживании изменений концентраций примеси в облаке и вне его в каждой точке сетки.

### 1.3.2. Лагранжевы модели перемещения облака

Построение моделей переноса и рассеяния примесей с использованием лагранжева подхода основано на использовании уравнения турбулентной диффузии в виде

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (k_j \frac{\partial c}{\partial x_j}) + I_c, \quad (54)$$

где  $I_c$  описывает механизмы вымывания, выпадения или трансформации примеси. При таком подходе прослеживаются изменения примеси в движущемся объеме воздуха. Обязательным этапом лагранжева подхода является предварительный расчет траектории движения облака частиц. Ввиду этого модели переноса примесей, основанные на таком подходе, называют траекторными.

Положение элементарного объема примеси в пространстве находится интегрированием уравнения движения вида

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = \bar{V}(\bar{X}(t)), \quad (55)$$

где  $\bar{X}$  – вектор, определяющий положение облака в момент времени  $t$ ,  $\bar{V}$  – вектор скорости, представляющий сумму макро-, мезомасштабной и турбулентной (микромасштабной) компонент.

Подобный подход изложен в [58]. Макро- и мезомасштабные компоненты скорости определяются как фоновые характеристики при решении соответствующих систем уравнений. Эволюция турбулентной составляющей скорости может быть определена на основе стохастического уравнения Ланжевена:

$$\frac{dv_i}{dt} = -\frac{v_i}{T_L} + \xi_i, \quad (56)$$

где  $v_i$  – декартова компонента составляющей скорости,  $\xi_i$  – дельта-коррелированные случайные числа с некоторой заданной матрицей. Зависимость  $v_i(t)$ , полученная в результате интегрирования (56) с уче-

том отмеченного свойства, имеет автокорреляционную функцию в виде затухающей экспоненты с характерным временным масштабом  $T_L$ .

Несмотря на некоторые преимущества лагранжевых моделей при воспроизведении структуры турбулентности, они обладают существенными ограничениями при моделировании процессов рассеивания большого числа реагирующих примесей. Эйлеровы модели позволяют описать процесс рассеивания нескольких десятков или сотен реагирующих примесей и учесть их трансформацию. В эйлеровых моделях достаточно качественно описывается поведение всплывающей примеси. Использование лагранжевых моделей в этих случаях затруднено необходимостью пересчета некоторых величин на эйлерову сетку.

### **1.3.3. Моделирование перемещения облака в случаях большой высоты подъема и дальнего переноса**

На рассеивание облака влияют несколько физических процессов: диффузия, осаждение, перенос ветром. Учитывая эти факторы, можно записать следующие уравнения распространения газовой примеси, включающей, например, хлористый водород, а также твердую (частицы окиси алюминия) и жидкую фазы (капли соляной кислоты) [11]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \text{div}(k_1^c \nabla c) - \bar{V}_n \cdot \nabla c, \quad (57)$$

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} = \text{div}(k_1^p \nabla \rho_p) + \bar{k} \cdot \nabla (k_2^p \rho_p) - \bar{V}^n \cdot \nabla \rho_p, \quad (58)$$

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} = \text{div}(k_1^g \nabla \rho_g) + \bar{k} \cdot \nabla (k_2^g \rho_g) - \bar{V}^n \cdot \nabla \rho_g + q, \quad (59)$$

где  $\rho_{g,p}$  – плотность соответствующей фазы (капель соляной кислоты и алюминия) мг/м<sup>3</sup>,

$k_2$  – скорости оседания.

В правой части уравнений (57), (58), (59) первый член описывает диффузию частиц среды, второй – оседание, третий – перенос с ветром.

Коэффициент диффузии для газовых примесей задается по таблице из параграфа 1.4.

Для твердых частиц и капель аэрозоля коэффициенты  $k_1$ ,  $k_2$  вычисляются с использованием формулы Стокса скорости падения сферических частиц:

$$k_2^p = w = 1,3 \cdot 10^{-2} \cdot \rho_p \cdot r_p^2, \quad (60)$$

$$k_2^e = V_\infty \cdot \left[ 1 - \frac{64}{(2 + a \cdot r_m)^6} \right], \quad (61)$$

$$k_{1z}^{e,p} = \begin{cases} k_1 \cdot z_1^{\frac{k_2 z_1}{k_1}} \left( \frac{z}{z_1} \right)^{\frac{k_2 z_1}{k_1}}, & \text{при } z \leq h, \\ k_{1z}^{e,p}(h), & \text{при } z \geq h, \end{cases} \quad (62)$$

$$k_{1x}^{e,p} = k_{1y}^{e,p} = \tilde{k}_0 \cdot |V_H| \cdot \left( 1 - \frac{k_2 z_1}{k_1} \right), \quad (63)$$

где принято, что  $z_1 = 1$  м,  $k_1 = 0,1 \div 0,2$  м<sup>2</sup>/с,  $\tilde{k}_0 = 0,1 \div 1,0$  м при устойчивой атмосфере и  $0,5 \div 1,0$  м при неустойчивой,  $\rho_p$ ,  $r_p$ ,  $w$  задаются соответственно в г/см<sup>3</sup>, мкм и см/с,  $V_\infty = 995$  см/с,  $a = 12 \cdot 10^{-4}$  мкм<sup>-1</sup>,  $r_m = 3,2 \div 3,9$  мкм (как для слоисто-кучевых облаков).

Для окончательной постановки задачи необходимо описать начальные и краевые условия. Начальные условия формируются результатами вычислений на третьем этапе для газовой фазы и результатами вычислений на втором этапе для твердой и жидкой фаз.

В качестве краевых условий принимаем естественные условия:

$$c(x = \pm x_{\max}, y, z) = 0,$$

$$c(x, y = \pm y_{\max}, z) = 0,$$

$$c(x, y, z = z_{\max}) = 0,$$

$$\frac{\partial c}{\partial z}(x, y, z = 0) = 0,$$

$$\frac{\partial \rho_{e,p}}{\partial z}(x, y, z = 0) = \begin{cases} 0, & t \leq t_0, \\ k_2^{e,p} \cdot \rho_{e,p}, & t > t_0, \end{cases}$$

где  $t_0$  – время прихода к поверхности  $z = 0$  фронта примеси.

Условие отсутствия потока газовой примеси через поверхность почвы допустимо для расчетов по оценке сверху величин приземных концентраций. Последнее граничное условие обеспечивает равенства скоростей потоков через нижнюю границу твердых частиц и капель аэрозоля их скоростям вертикального осаждения (выпадение примеси без отражения).

Уравнения (57), (58), (59) параболического типа (в отличие уравнений диффузии для стационарного источника). Поэтому при их численном интегрировании пространственные производные, стоящие в правой части уравнений, представляются в конечных разностях и уравнения интегрируются по времени в каждой точке пространства (узлах сетки).

#### **1.4. Модели метеорологических параметров, используемых в расчетах. Особенности моделирования в условиях НМУ**

Важную часть моделирования переноса примеси в атмосфере составляет выбор необходимых метеорологических условий. В первую очередь это относится к вертикальным изменениям метеорологических величин: скорости и направления ветра, температуры воздуха, плотности, коэффициента турбулентного обмена. Наиболее распространенные функциональные зависимости перечисленных параметров следующие:

1. Скорость ветра изменяется с высотой в пределах пограничного слоя атмосферы по степенному закону, а выше остается постоянной [11]:

$$u(z) = \begin{cases} \left(\frac{z}{10}\right)^p \cdot u_{10}, & z \leq H, \\ \left(\frac{H}{10}\right)^p \cdot u_{10}, & z \geq H. \end{cases} \quad (64)$$

Направление ветра с высотой определяется углом полного поворота ветра в пограничном слое

$$\varphi(z) = \begin{cases} \varphi_{10} + \psi(z-10)/H, & z \leq H, \\ \varphi_{10} + \psi(H-10)/H, & z \geq H, \end{cases} \quad (65)$$

где  $u_{10}$  – скорость ветра на уровне флюгера (10 м);  $p$  – параметр, определяемый стратификацией атмосферы;  $\varphi_{10}$  – направление ветра на уровне флюгера;

$$\psi = [67,8 - 6,2 \cdot \log_{10}(RO)] \cdot \Phi;$$

$$RO = u(H) / (f \cdot z_o);$$

$$f = 2\omega \cdot \sin(\varphi);$$

$$\varphi = 58^\circ, \omega = 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ 1/с};$$

$h$  – высота приземного слоя;  $H$  – высота пограничного слоя,  $h = 0,05 H$ ;  $RO$  – число Россби;  $f$  – параметр Кориолиса;  $z_o$  – параметр шероховатости подстилающей поверхности.

Высота пограничного слоя, параметры  $p$  и  $\Phi$  зависят от состояния устойчивости (стратификации) атмосферы. Используя классификацию устойчивости Пэскуила, их можно определить по табл. 1.1.

Таблица 1.1. Высота пограничного слоя атмосферы, параметры  $p$  и  $\Phi$  при различных условиях устойчивости атмосферы

Характеристика состояния	Класс устойчивости						
	A	B	C	D	E	F	G
$H [M]$	2000	1500	1000	750	300	250	250
$\Phi$	0,42	0,73	0,88	1,15	1,35	1,47	1,6
$p$ (при $z_o=1m$ )	0,17	0,17	0,2	0,27	0,38	0,61	1,2

2. Коэффициент вертикальной турбулентной диффузии газовых примесей в приземном слое растет с высотой линейно, а выше приземного слоя остается постоянным [11]:

$$k_z(z) = \begin{cases} (z/h) \cdot k_h, & z \leq h, \\ k_h, & z \geq h, \end{cases} \quad (66)$$

где  $k_h$  – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии на высоте приземного слоя.

Коэффициент вовлечения окружающего воздуха в клуб определяется в соответствии с [22] по таблице 1.2.

Таблица 1.2. Коэффициент вертикальной турбулентной диффузии и коэффициент вовлечения при различных условиях устойчивости атмосферы

Характеристика состояния	Класс устойчивости						
	A	B	C	D	E	F	G
$k_h$	160	110	70	15	5	1,5	0,13
$\alpha$	0,3	0,2	0,17	0,15	0,1	0,05	0,02



3. Изменение с высотой температуры воздуха, плотности и атмосферного давления определяется следующими формулами [22]:

$$T(z) = \begin{cases} T(z_{10}) - \gamma z, & z \leq H, \\ T(H) - \gamma(z - H), & z > H, \end{cases} \quad (67)$$

$$\rho(z) = \rho(z_p) \left( \frac{T(z)}{T(z_{10})} \right)^{\frac{g}{R\gamma} - 1}, \quad (68)$$

$$p(z) = \frac{\rho(z) \cdot R \cdot T(z)}{1 - 0,378 \frac{e}{p(z)}}, \quad (69)$$

где

$$\rho(z_{10}) = \frac{1,013 \cdot 10^4}{R \cdot T(z_{10})}. \quad (70)$$

Учитывая незначительные изменения плотности с высотой, у поверхности земли (атмосфера близка к однородной) можно принять  $z_p = z_{10} = 2$  м (высота термометра в метеорологической будке). Значения температурного градиента  $\gamma = -dT/dz$  принимаются согласно [11; 22] (табл. 1.3, 1.4).

Таблица 1.3. Вертикальный температурный градиент ( $^{\circ}\text{C}/\text{м}$ ) при различных условиях устойчивости атмосферы и различной высоте слоя перемешивания

Условия рассеивания	Класс устойчивости						
	А	В	С	Д	Е	Ф	Г
$Z \leq 300$ м (лето)	0,014	0,013	0,01	0,008	-0,011	-0,015	-0,025
$Z \leq 300$ м (зима)	0,01	0,01	0,01	0,007	-0,006	-0,01	-0,02
$Z > 300$ м	0,006	0,006	0,006	0,006	-0,01	-0,015	-0,02

Таблица 1.4. Вертикальный температурный градиент при различной высоте приземного слоя

Градации высоты	Классы устойчивости						
	А	В	С	Д	Е	Ф	Г
$h \leq 120$ м (лето)	0,021	0,014	0,014	0,013	-0,001	-0,018	-0,026
$120 \leq h \leq 300$ м (лето)	0,014	0,014	0,01	0,009	0,002	-0,011	-0,014
$h \leq 120$ м (зима)	-	-	0,015	0,013	0,009	-0,018	-0,028
$120 \leq h \leq 300$ м (зима)	-	-	0,01	0,009	0,007	-0,013	-0,018

4. Для определения класса устойчивости по метеорологическим данным (по Пэскуилу) можно воспользоваться табл. 1.5 -1.7 [11]

Таблица 1.5. Классификация классов устойчивости

Тип категории	Тип стратификации	Тип погоды
A	Сильно неустойчивая	Очень солнечная летняя погода
B	Средне неустойчивая	Солнечно и тепло
C	Умеренно неустойчивая	Переменная облачность
D	Нейтральная	Облачный день или ночь
E	Умеренно устойчивая	Переменная облачность ночью
F	Среднеустойчивая	Ясная ночь
G	Сильноустойчивая	Ясная холодная ночь, ветер слабый

Таблица 1.6. Соответствие условий инсоляции, скорости ветра и классов устойчивости

Скорость ветра (м)	Инсоляция						
	День				Ночь		
	Интенсивная	Умеренная	Слабая	Облачно (n=8÷10)	Облачно (n=8+10)	Облачно (n=5+8)	Малооблачно (n<5)
U<2	A	A-B	B-C	D	D	E-F	F-G
2<U<3	A-B	B	C	D	D	E	E-F
3<U<5	B	B-C	C	D	D	D	E
5<U<6	C	C-D	D	D	D	D	D
U>6	C	D	D	D	D	D	D

Таблица 1.7. Типы инсоляции при различной высоте солнца и состоянии облачности

Облачность	Высота солнца		
	Лето и зима – утро/вечер	Лето с 9 <sup>00</sup> до 12 <sup>00</sup> и с 16 <sup>00</sup> до 20 <sup>00</sup> . Зима полдень	Лето полдень
n>7/8	Слабая	Слабая	Слабая
5/8<n<7/8	– " –	– " –	Умеренная
n<5/8	– " –	Умеренная	Интенсивная

**Особенности моделирования в условиях НМУ.** Здесь описаны погодные условия, при которых может нарушаться пространственно-временная однородность вертикальной стратификации атмосферы. В

этих условиях облако продуктов сгорания может создавать повышенные приземные концентрации загрязняющих веществ в произвольных точках области воздействия испытательного стенда.

Условия, способствующие накоплению примесей в атмосфере, можно разделить на несколько типов:

- 1) Ночные или утренние инверсии, которые образуются в нижнем, приземном слое атмосферы до высоты 100-200 м за счет радиационного выхолаживания земной поверхности.
- 2) Приподнятые инверсии, образующиеся в антициклоне или барическом гребне за счет оседания воздуха.
- 3) Приподнятые инверсии, представляющие собой атмосферный фронт.
- 4) Малоградиентное поле пониженного или повышенного давления, с которым связаны слабые скорости ветра, а при наличии облачности отсутствует интенсивная конвекция.
- 5) Осадки обложного типа.

Подобные условия обычно формируются при классах устойчивости атмосферы E, F и G.

По наземным сетевым данным достаточно надежно можно определить только условия 1 - , 4 - и 5 - го типов. Условия 2-го типа можно определить только с привлечением результатов вертикального зондирования атмосферы, а условия 3-го типа могут определяться по наземным данным, но только при достаточном опыте наблюдателя.

В связи с этим можно привести лишь косвенные признаки определения условий 1 - го и 4 - го типов:

- слабые скорости ветра, не превышающие 1-2 м/с; ветер может быть какого-либо одного направления либо переменным;
- в дневное время образуется облачность кучевых форм, но вертикального развития облака не получают; кроме облачности кучевых форм могут наблюдаться слоистообразные облака верхнего или среднего яруса (перисто-слоистые, высоко-слоистые) с баллом 3-5. К вечеру кучевые облака исчезают или, растекаясь, переходят в слоистые; количество кучевой облачности меняется от 4-6 баллов днем до 1-2 баллов в вечернее время и их полного отсутствия ночью;

- направление ветра у земли и на высоте кучевой облачности отличается незначительно (не более чем на  $30-40^\circ$ ); облака перемещаются медленно, со скоростью 5-10 км/ч.

Прогнозирование подобных метеорологических условий позволяет ограничить проведение испытаний в такие дни. В расчетной части методики эти условия также исключены из рассмотрения.

### 1.5. Результаты тестирования моделей

Все расчеты проведены по исходным данным, представленным специалистами НИИ ПМ. Выбиралось северное направление ветра, когда примесь могла перемещаться на жилые районы города (см. приложение).

Результаты включают:

- поля максимально разовых концентраций хлористого водорода, соляной кислоты и окиси алюминия для 4 типов метеорологических условий и 4 типов двигателей (отсутствие какого-либо графика в приложении говорит о том, что облако соответствующего загрязняющего вещества рассеялось, не достигнув приземного слоя);
- таблицы изменения высоты стабилизации, максимальных диаметров клубов и средней концентрации загрязняющих веществ в клубе в конце этапа подъема в зависимости от класса устойчивости атмосферы.

На всех рисунках испытательный стенд находится в начале координат. При построении полей концентраций не учитывались данные за первые 45с после отсечки двигателя.

Анализируя результаты численного моделирования, можно сделать следующие основные выводы:

1. В момент отсечки двигателя образуется вытянутое облако продуктов сгорания с концентрациями хлористого водорода порядка 10 – 20 тыс. мг/м<sup>3</sup>. В процессе первоначального подъема и расширения облака средняя концентрация хлористого водорода в нем за несколько первых минут уменьшается до 100 – 1000 мг/м<sup>3</sup>. Такая концентрация в центре облака может сохраняться продолжительное время (десять минут). Однако

высота стабилизации облака при всех расчетах оказывалась выше 200 м от уровня земли, и поэтому приземные концентрации на удалениях от стенда, превышающих СЗЗ предприятия, в большинстве расчетов меньше значения ПДК<sub>м.р.</sub>.

2. Области приземных концентраций и сами максимальные концентрации загрязняющих примесей варьируют в широких пределах и зависят как от метеорологических условий, так и от типов двигателей. При всех расчетах длительность распространения облака продуктов сгорания бралась равной 40 мин. За это время облако может удалиться от стенда на расстояние более 40 км, ширина следа облака не превышает в основном 2 - 4 км.
3. Результаты расчетов показывают, что при классах устойчивости атмосферы А, В и С за пределами 3 - километровой зоны от стенда приземные концентрации не превышают ПДК<sub>м.р.</sub> по хлористому водороду и окиси алюминия для всех рассмотренных типов двигателей.
4. Уровни приземных концентраций загрязняющих веществ в основном зависят от высоты стабилизации облака продуктов сгорания РДТТ. Высота стабилизации облака в основном определяется классом устойчивости атмосферы и типом двигателя.
5. Двигатели, при сгорании которых образуется большее количество загрязняющих веществ, не обязательно создают большие приземные концентрации.
6. При более высоком классе устойчивости атмосферы (D, E, F, G) облако продуктов сгорания рассеивается достаточно медленно и при наличии нисходящих потоков в атмосфере или пространственной неоднородности ее пограничного слоя может создать повышенные приземные концентрации на значительном удалении от стенда. Такие ситуации требуют дополнительного исследования и прогнозирования.
7. Максимальные приземные концентрации наблюдаются в основном при скоростях ветра 5 – 7 м/с на высоте флюгера. Однако длительность воздействия повышенных концентраций увеличивается при уменьшении скорости ветра.

8. При относительной влажности воздуха свыше 60 - 80 % и содержании водяных паров в продуктах сгорания свыше 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.

## **2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ**

В соответствии с законом Российской Федерации «Об охране окружающей природной среды» при проектировании, строительстве, реконструкции, эксплуатации и снятии с эксплуатации предприятий, зданий и сооружений в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте, в энергетике и жилищно-коммунальном хозяйстве должны предусматриваться мероприятия по охране природы, рациональному использованию и воспроизводству природных ресурсов, а также выполняться требования экологической безопасности проектируемых объектов и охраны здоровья населения.

В этом случае должны быть приведены природно-климатические характеристики района расположения объекта, виды и источники существующего техногенного воздействия в рассматриваемом районе; определены характер и интенсивность воздействия проектируемого объекта на компоненты окружающей среды; количество природных ресурсов, вовлекаемых в хозяйственный оборот; количество образующихся отходов производства и возможность их использования в других отраслях промышленности; дана оценка характера возможных аварийных ситуаций и их последствий.

Исследуемая территория находится в Кировском районе г. Перми. 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.

На территории, прилегающей непосредственно к открытому стенду испытаний НИИ ПМ, в связи с ее особым статусом специализированные экологические комплексные наблюдения, связанные с влиянием изучаемого объекта на окружающую среду, ранее практически не проводились.

## 2.1. Атмосфера

Климат района исследований умеренно-континентальный, с продолжительной зимой и коротким летом, характеризуется большой годовой амплитудой колебаний температуры воздуха. Циркуляционные условия территории определяются Уральскими горами, расположенными на востоке Пермской области. Перед горами происходит замедление скорости перемещения циклонов, что способствует увеличению количества осадков и облачности, оказывает влияние на ветровой режим территории. Уральские горы ослабляют влияние Азиатского антициклона в зимнее время.

*Радиационный режим* территории характеризуется поступлением прямой, рассеянной и суммарной радиации, а также радиационным балансом. В течение года поступление к земной поверхности прямой радиации при ясном небе незначительно превышает долю суммарной радиации при облачной атмосфере: 4234 и 3718 МДж/м<sup>2</sup> соответственно [32]. В отдельные месяцы это различие может быть значительным, что связано с наличием облачности, когда преобладающую роль играет рассеянная радиация, а также с низкой высотой солнца в зимние месяцы (октябрь – март), когда поступающая на горизонтальную поверхность прямая радиация близка нулю. В мае-июле с увеличением высоты солнца и уменьшением количества облачности доля прямой радиации является определяющей. В эти месяцы к земной поверхности поступает и значительная доля ультрафиолетовой радиации, которая будет приводить к разложению газообразных вредных веществ в воздухе, однако в целом за год наблюдается ее дефицит.

Радиационный баланс положительный в течение 8 мес, а его годовая сумма составляет 1348 МДж/м<sup>2</sup>. По сезонам года он распределяется крайне неравномерно: в холодное полугодие значение радиационного баланса отрицательно (до - 37 МДж/м<sup>2</sup> в месяц), с марта начинает увеличиваться приход солнечной радиации, и радиационный баланс в июне достигает максимума (344 МДж/м<sup>2</sup>) [Там же].

Продолжительность солнечного сияния на территории исследований составляет около 1770 ч в год; максимум наблюдается в июне-июле, около 290 ч, а минимум в декабре – 20 ч. В среднем за год число



дней без солнца составляет 108 [32].

*Температура воздуха.* Годовая амплитуда средней месячной температуры воздуха составляет 33,3°C. Средняя температура воздуха 1,5°C. Абсолютные максимум и минимум соответственно 37°C и -47°C (табл. 2.1). Продолжительность безморозного периода составляет около 119 дней [Там же].

Таблица 2.1. Температура воздуха на территории исследований, °С

Элемент	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Температура	-15,3	-13,4	-6,9	2,6	10,2	15,7	18,0	15,4	9,3	1,4	-6,3	-12,7	1,5
Абсолютный максимум	4	5	14	27	36	36	37	37	31	23	12	5	37
Абсолютный минимум	-45	-41	-35	-24	-13	-3	2	-1	-8	-25	-38	-47	-47

*Осадки.* Годовое количество осадков составляет 616 мм, с максимумом в июле – 76 мм и минимумом в феврале - 28 мм (см. рис. 2.1).

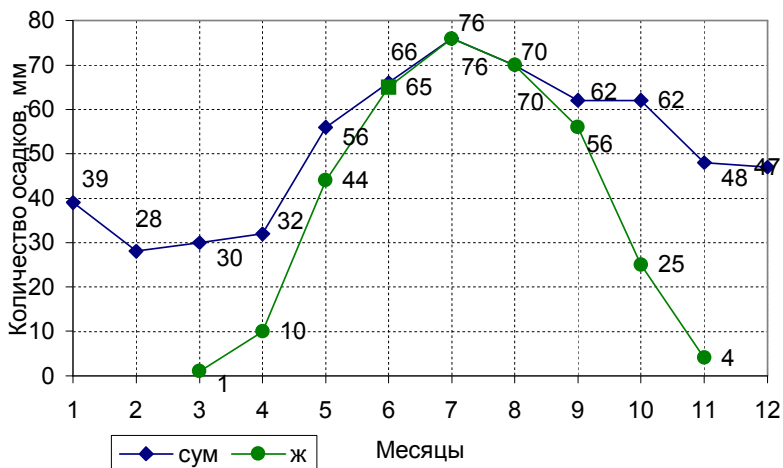


Рис. 2.1. Месячные суммы осадков (сум) и количество жидких осадков (ж) на территории исследований

Осадки, особенно жидкие, приводят к вымыванию загрязняющих веществ из атмосферы на земную поверхность. В течение года жидких осадков выпадает наибольшее количество – 351 мм, твердых и смешанных соответственно 186 и 79 мм. Максимальное число дней с осадками наблюдается в период с октября по январь – 20-22 дня за месяц, а минимальное в апреле – 11 дней (рис. 2.2) [32].

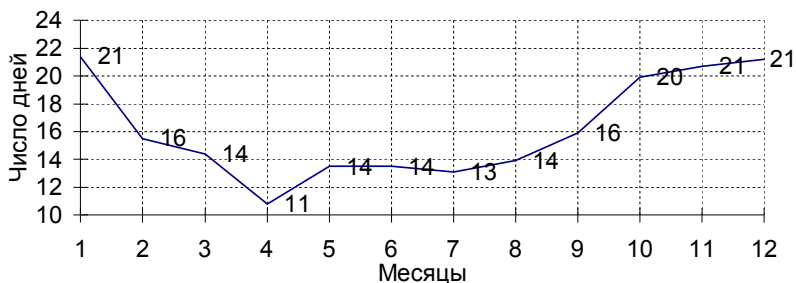


Рис. 2.2. Число дней с осадками на территории исследований

*Ветровой режим.* В течение года преобладают ветры юго-западного и южного направлений (по 20%), а наименьшая повторяемость приходится на северо-восточные и восточные ветры (см. рис. 2.3) [Там же].

В холодный период года (с октября по март) наиболее вероятны южные и юго-восточные ветры, а направления северо-западное, северное, северо-восточное и восточное наименее вероятны.

В теплый период года возрастает повторяемость ветров северо-западного и северного направлений и снижается повторяемость южного и юго-западного ветра. Повторяемость ветров сектора от юго-западного до северного составляет около 57 % (по 14-15 % на румб) (см. рис. 2.3) [Там же].

Скорость ветра в среднем равна 3,2 м/с, но летом, в июле и августе, она несколько меньше, примерно на 20%, чем в остальные месяцы. Максимальная скорость наблюдается в октябре – 3,6 м/с. Средняя за год повторяемость штилей – 14%, наиболее часто штили наблюдаются в июле-августе (17%), реже всего в апреле – 9% (см. рис. 2.4) [Там же].

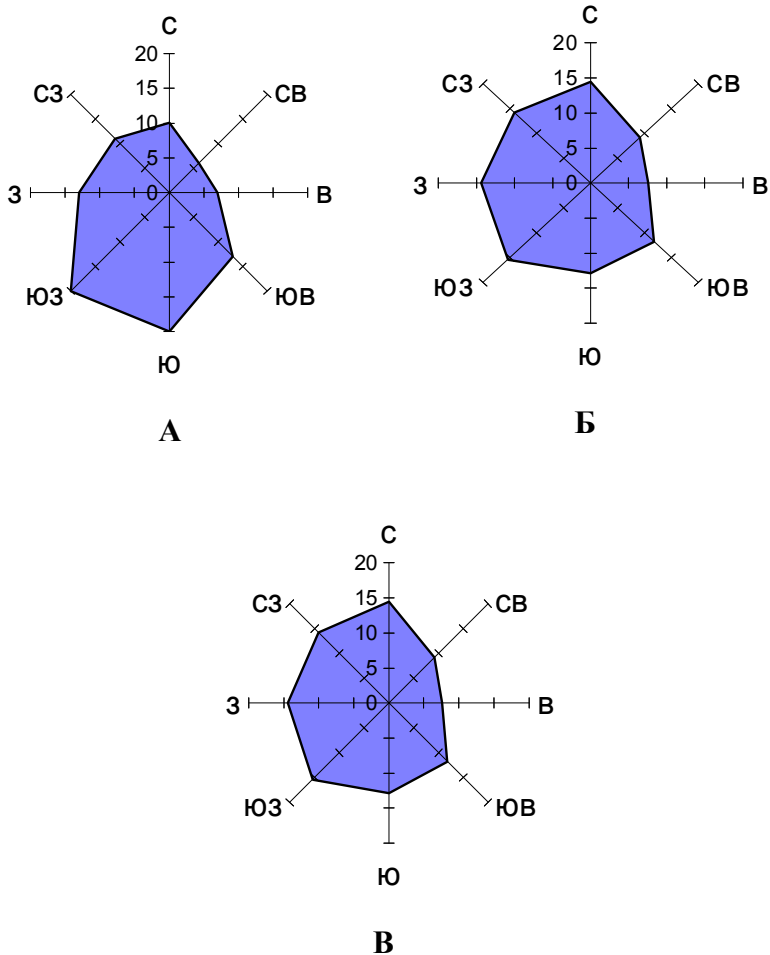


Рис. 2.3. Повторяемость направлений ветра на территории исследований за год (А), в холодный (Б) и теплый (В) периоды года

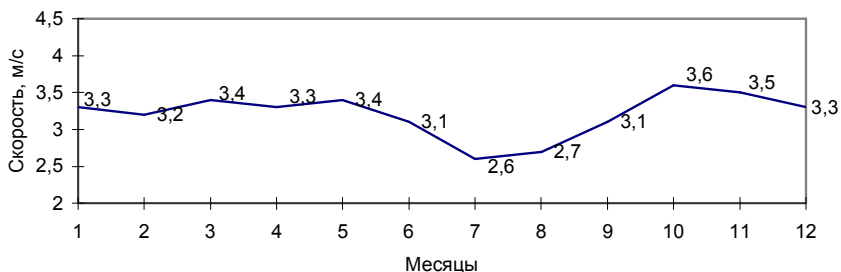


Рис. 2.4. Изменение средней скорости ветра на территории исследований в течение года

Следовательно, для рассматриваемой территории характерен значительный вынос загрязняющих веществ в северо-восточном и северном направлениях. В теплый период года к этим направлениям добавляются северо-западное, юго-восточное и восточное. Летом такой перенос ослаблен вследствие уменьшения скорости ветра и увеличения повторяемости штилей.

Средняя непрерывная продолжительность периодов штилей и слабого ветра (0-1 м/с) за месяц меняется от 13 до 25 ч, с минимумом в июне и с максимумом в январе (66 ч). В такие периоды происходит накопление загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы.

*Инверсии.* Максимальная мощность инверсий приходится на январь и февраль. Прежде всего, это связано с выхолаживанием подстилающей поверхности в зимнее время года. Наиболее мощными инверсии бывают в период с декабря по февраль (0,51-0,74 км), а в остальное время средняя мощность составляет около 0,43 км. Средняя глубина инверсий 3,6°C, с максимумом в январе - 6,5 °C. Максимальная глубина приходится на январь-февраль [32].

Для данной территории характерна высокая повторяемость штилевых и застойных ситуаций, что способствует накоплению примесей в нижнем слое атмосферы, снижает рассеивающую способность атмосферы и повышает потенциал загрязнения атмосферы (ПЗА). Рассматриваемую территорию следует отнести к зоне повышенного континентального значения ПЗА – до 3,0, что соответствует III классу.

*Загрязнение атмосферного воздуха.* Селитебные районы, прилегающие к исследуемой территории, характеризуются значительным уровнем загрязнения атмосферного воздуха. По данным ближайшего поста наблюдений (ПНЗ) загрязнение воздуха диоксидом азота, хлористым водородом и фтористым водородом превышает ПДКм.р. соответственно в 1,3; 1,45; 1,1 раза. Уровень загрязнения другими веществами ниже допустимых гигиенических нормативов: диоксидом серы – 0,04 ПДКм.р., оксидом углерода – 0,71 ПДКм.р., пылью – 0,56 ПДКм.р.

Учитывая значительную залесенность территории исследования, ее расположение по отношению к источникам загрязнения и преобладающее направление переноса в течение года (с запада и юго-запада), уровень загрязнения атмосферного воздуха территории будет значительно ниже, чем прилегающих селитебных районов.

## **2.2. Снежный покров**

Среднегодовое установление снежного покрова на территории исследования приходится на первую декаду ноября. Период снегонакопления до начала периода снеготаяния (середина марта) продолжается около четырех месяцев. Снежный покров является исключительно благоприятным объектом для изучения загрязнения природной среды. Обладая высокой сорбционной способностью, снег способен захватывать во время снегопада существенную часть продуктов техногенеза из атмосферы и откладывать их на поверхности земли. В снежном покрове аккумулируется также пыль, оседающая в период между снегопадами. Таким образом, в течение длительного времени (всего зимнего периода) загрязнение атмосферы как бы проецируется на однородном по свойствам естественном субстрате – снежном покрове, который сохраняет геохимическую информацию вплоть до начала снеготаяния.

Загрязнения снега макрокомпонентами и микроэлементами на территории объекта и зелёных зон примыкающей селитебной части не наблюдалось. По основным гидрохимическим характеристикам снежные воды с территории объекта и лесных массивов селитебной части удовлетворяют требованиям СанПиН для питьевых вод [3; 40].

В непосредственной близости к исследуемой территории расположены 7 из 28 опорных пунктов (площадок) лесоэкологического мониторинга отдела охраны природы Естественнонаучного института при Пермском государственном университете, на которых проводятся наблюдения за снежным покровом. По данным К.И. Малеева, С.А. Двинских и др. [29; 30] общая минерализация снега в непосредственной близости от исследования территории колеблется в очень широких пределах (от 40 до 350 мг/л), причём максимальные величины отмечены в северо-западной и северо-восточной частях района. Минимальная минерализация приурочена к юго-западной части, т. е. наиболее близко к исследуемой территории. Такая же картина характерна и для микроэлементов в снеге (см. рис. 2.5, 2.6).

Анализ основных гидрохимических характеристик снежных вод пунктов мониторинга показывает, что общая минерализация их весьма невысока и практически не превышает 20 мг/л. Сульфатная гидрохимическая фация стабильна для всех пунктов. Величина рН сильно варьирует как по годам для каждого пункта, так и между пунктами в один и тот же год. Сравнение водорастворимой и водонерастворимой (пылевой) фракции снежных вод указывает на преобладание последней. При этом наибольшее содержание микроэлементов приходится на растворимую фракцию. В целом содержание микроэлементов в снежных водах в районе исследуемой территории не превышает нормативов СанПиН [40].

### **2.3. Поверхностные воды**

На исследуемой территории поверхностные воды представлены старичными озерами, расположенными на широкой правобережной пойме Воткинского водохранилища, а также многочисленными болотами на пойме и в меньшей степени на террасах р. Камы.

На широкой до 1,5 км пойме правобережья Воткинского водохранилища ниже по течению от населенного пункта Оборино расположено более 10 озер старичного типа. Они вытянуты по направлению течения р. Камы. Протяженность самых крупных из них (оз. Бол. Ласьвинское, оз. Дикое, оз. Красное) составляет 1,5-2 км, для остальных озер – не более 500 м.

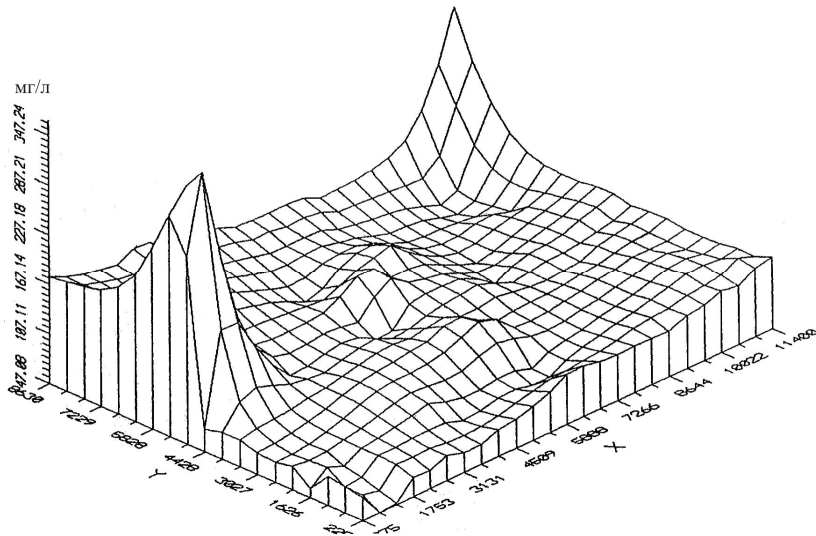


Рис. 2.5. Суммарная минерализация снега в районе, примыкающем к исследуемой территории [29]

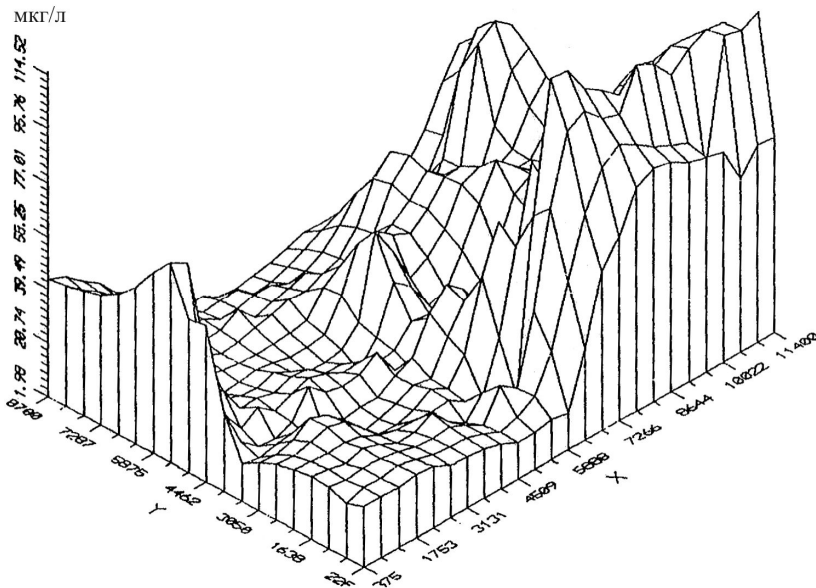


Рис. 2.6. Содержание марганца в снегу в районе, примыкающем к исследуемой территории [29]

Наибольшая ширина оз. Бол. Ласьвинского составляет около 300 м, для остальных озер ширина обычно не превышает 50-100 м. Глубина озер достигает 3-7 м. Превышение бровки берегов над урезом воды 1,0-1,5 м. Углы наклона берегов изменяются от 3 до 8°.

Один раз в два года в период весеннего половодья наблюдается затопление оборинской поймы водой Воткинского водохранилища.

Минерализация оз. Большого Ласьвинского составляет 0,2 г/л, оз. Красного – 0,15 г/л (табл. 2.2). Состав воды гидрокарбонатно-кальциево-натриевый.

Таблица 2.2. Химический состав озер оборинской поймы (сентябрь 1979), мг/л

Химический состав	Озеро	
	Бол. Ласьвинское	Красное
$\text{HCO}_3^-$	85,43	67,12
$\text{SO}_4^{2-}$	20,00	12,00
Cl <sup>-</sup>	35,46	24,82
$\text{NO}_2^-$	0,02	0,07
$\text{Ca}^{2+}$	26,05	14,03
$\text{Mg}^{2+}$	2,42	3,04
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	25,06	20,23
$\text{NH}_4^+$	3,90	1,70
$\text{Fe}^{3+}$	0,10	2,40
Минерализация	198,44	149,31
pH	6,40	6,42

## 2.4. Геологические условия

В тектоническом отношении Кировский район г. Перми расположен на Оханской возвышенности, входящей в состав сильно эродированной части Русской равнины, являющейся северным завершением обширной геоморфологической области - Плато высокого Заволжья [29].

В геологическом строении территории принимают участие аллювиальные отложения четвертичной системы (пойма) – суглинки, глины, иногда заторфованные, супеси, пески, гравийные грунты и отложения второй надпойменной террасы – пески, песчано-гравийные отложения, суглинки. Они подстилаются континентальными отложениями.



ми верхнего отдела пермской системы, представленными аргиллитами, песчаниками, известняками. Характерные геолого-литологические разрезы участка поймы представлены на рис. 2.7.

В геоморфологическом отношении территория исследований расположена на правобережной пойме и второй надпойменной террасе р. Камы. Рельеф поверхности поймы волнистый, осложнен многочисленными заболоченными старичными понижениями, узкими грядами, валами, озерами старичного происхождения.

Пойма в поперечном направлении четко подразделяется на три части – приусловую, центральную и притеррасную. Приусловая – наиболее возвышенная, наиболее сухая часть поймы шириной от 50 до 300 м. Центральная часть поймы с более ровной поверхностью заболочена во многих местах. Рельеф осложнен многочисленными линейно-вытянутыми грядами и валами, разделяющими широкие пониженные участки поверхности поймы, большей частью заболоченные. Для поймы характерно наличие многочисленных линейно-вытянутых вдоль русла р.Камы озер старичного происхождения. Для второй надпойменной террасы характерно наличие вытянутых вдоль р. Камы грив, а также куполообразных поднятий высотой 4-10 м. Река Кама на данном участке образует излучину. Берег в верхней части обрывистый, к урезу выполаживается, образуя песчаные пляжи шириной от 30 до 80 м.

Из инженерно-геологических процессов в пределах участка широкое распространение получили процессы заболачивания и боковая эрозия берега р. Камы. Заболачиванию подвержены в основном центральная и притеррасная части поймы. Болота низинные, глубина воды в болотах до 0,5 м. Четко выраженных границ болотных массивов нет. Заболачиванию способствует близкое стояние уровня грунтовых вод, затопливание территории паводковыми водами, наличие приуслового вала и линейно вытянутых валов в центральной части поймы, затрудняющих сток поверхностных вод, наличие большого количества старичных озер.

Боковая эрозия получила развитие на берегах р. Камы, сложенных легко размываемыми песчаными грунтами. Разрушение берегов происходит в основном в весенние паводки [35; 36].

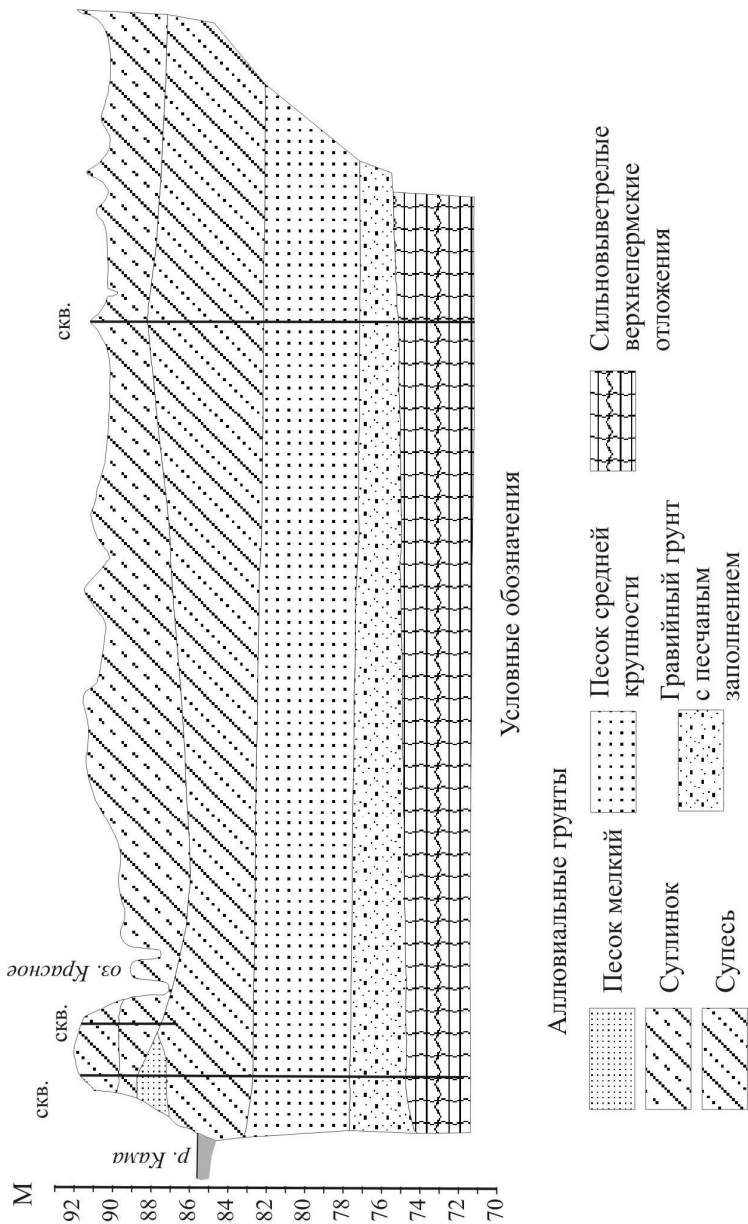


Рис. 2.7. Схематический геолого-литологический разрез территории

## 2.5. Подземные воды

В гидрогеологическом отношении территория исследований расположена в пределах Камской гидрогеологической области. В данном районе выделены два водоносных горизонта зоны активного водообмена: локально-слабоводоносный четвертичный аллювиальный горизонт и локально-водоносный шешминский терригенный комплекс [53].

**Локально-слабоводоносный четвертичный аллювиальный горизонт.** Водовмещающими грунтами являются преимущественно аллювиальные отложения современного отдела четвертичной системы – суглинки, супеси, пески, пески гравелистые, гравийные грунты; отложения среднечетвертичного отдела четвертичной системы – пески, песчано-гравийные отложения и отложения верхнего отдела пермской системы – сильновыветрелые, аргиллиты, песчаники с прослоями известняков.

Воды напорные или слабонапорные. В пределах поймы грунтовые воды вскрыты на глубине 0-3 м. Вскрытая мощность водообильной зоны составляет около 20 м. В пределах второй надпойменной террасы грунтовые воды залегают на глубинах 7 - 14 м (см. рис. 2.7).

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.

В паводковые периоды года возможен подъем уровня грунтовых вод на 1,5-2,0 м, в пределах понижений поймы – до поверхности. Питание грунтовых вод осуществляется за счет атмосферных осадков и вод шешминского водоносного комплекса. Разгрузка направлена в р. Каму.

Горизонт имеет практическое значение. Эксплуатируются два технических водозабора: «Закамск I и II» (см. рис. 2.8 А и 2.8 Б). Водозабор «Закамск I» эксплуатирует водоносный горизонт среднечетвертичных аллювиальных отложений и трещинно-грунтовые воды шешминского горизонта.

Водоносный четвертичный аллювиальный горизонт плохо защищен от поверхностного загрязнения, так как зона аэрации сложена песками с коэффициентом фильтрации от 0,2 до 3,2 м/сут [18].

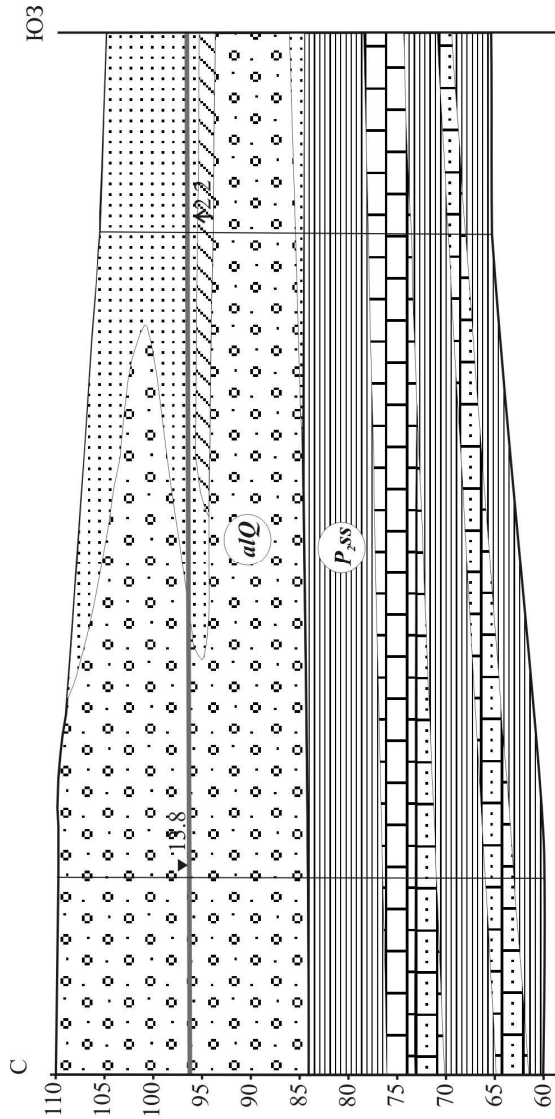


Рис. 2.8 А. Схематический гидрогеологический разрез водозабора «Закамск I»  
Условные обозначения находятся на рисунке 2.8 Б

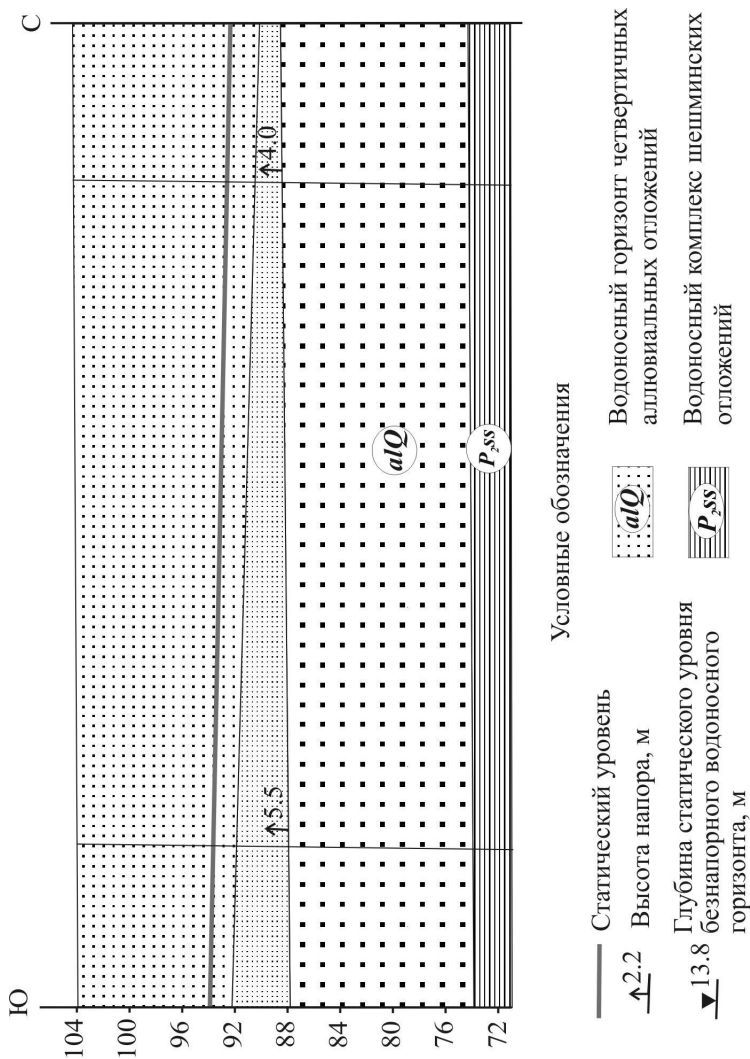


Рис. 2.8 Б. Схематический гидрогеологический разрез водозабора «Закамск II»

По данным К.И. Малеева, С.А. Двинских [30] родники, разгружающиеся на участке Нижняя Курья – Закамск, имеют минерализацию от 199 до 702 мг/л. Содержание сульфатного иона изменяется от 34 до 223 мг/л, хлоридного – от 21 до 85 мг/л. Нитратный ион присутствует во всех пробах – от 1,3 до 117 мг/л. Содержание нитритов изменяется от следов до 0,06 мг/л, аммония – от следов до 3,8 мг/л. Минерализация грунтовых вод, вскрытых колодцами, изменяется от 225 до 1030 мг/л, содержание нитратного иона находится в пределах 0,5 - 182,0 мг/л, сульфатного – 8 - 187 мг/л, хлоридного – 21 - 160 мг/л, нитритного – от следов до 1,4 мг/л, аммония – 0,0 – 15,0 мг/л [30].

*Локально-водоносный шешминский терригенный комплекс* представлен мощной толщей переслаивающихся песчаников, алевролитов и аргиллитов с прослоями и линзами известняков и мергелей, конгломератов. Характерной особенностью разреза является его загипсованность. Основные водоносные породы – песчаники, залегают в виде прослоев и линз различной мощности. Водоупорными отложениями служат аргиллиты и глинистые алевролиты. Мощность водоносных прослоев и линз не превышает 1-2 м. Общая мощность комплекса 80-340 м. По вертикальному разрезу водообильность неравномерна. Обычно она максимальна на глубинах 60-80 м и уменьшается с глубиной. В целом степень проницаемости шешминских отложений невысокая – коэффициент фильтрации обычно меньше 1 м/сут.

Движение подземных вод происходит к р. Каме. Трещинно-грунтовые воды комплекса в верхней части разреза имеют однотипный гидрокарбонатный кальциевый состав, минерализацию до 0,5 г/л.

Подземные воды комплекса, залегающие ниже эрозионного вреза, сульфатные (гидрокарбонатно-сульфатные, хлоридно-сульфатные), кальциевые, натриево-кальциевые с минерализацией от 1,5 до 14,2 г/л. Встречаются и хлоридно-натриевые и гидрокарбонатно-натриевые воды с минерализацией соответственно 16,5-24,4 г/л.

Основным источником питания подземных вод служат атмосферные осадки. Заметное влияние оказывает подток минерализованных вод из подстилающих горизонтов.

## 2.6. Почвы

Преобладающим типом почв на исследуемой территории является подзолистый, включающий несколько подтипов, различающихся, в основном, глубиной залегания, мощностью и выраженностью подзолистого горизонта. Примыкающая к пойме р. Камы часть исследуемой территории характеризуется болотно-подзолистым и болотным типами почв. По гранулометрическому составу доминируют песчаные и супесчаные разновидности.

Малая мощность органогенных горизонтов (лесная подстилка и гумусово-аккумулятивный горизонт) и светлая окраска верхних минеральных горизонтов у подавляющей части дренированных и слабодренированных почв свидетельствуют о незначительном запасе органического вещества и его специфической части – почвенного гумуса. Это наряду с лёгким гранулометрическим составом почв является показателем малой буферной способности почв, их лёгкой податливости к любому химическому загрязнению.

По результатам морфологических описаний почв, примыкающих к исследуемой территории, на первое место по встречаемости выходят модергумусные (грубогумусные) слабодифференцированные глубоко-слабоподзолистые супесчаные на глубоком древнеаллювиальном песке.

Анализ агрохимических свойств типичных фоновых лесных почв правобережья р. Камы в районе исследований показывает, что почвы имеют кислую реакцию среды, низкие степень насыщенности основаниями и ёмкость катионного обмена. Содержание гумуса в верхних горизонтах весьма невелико – менее двух процентов. Степень обеспеченности подвижным фосфором средняя и пониженная.

Близкие к токсичным для некоторых видов растений концентрации подвижного алюминия в почве носят точечный характер. Среднее содержание  $Al^{+3}$  на территории санитарно-защитной зоны объекта исследований ниже, чем среднее в почвах прилегающих территорий. На большей части территории санитарно-защитной зоны отмечаются повышенные валовые концентрации микроэлементов (титан, цинк, свинец), не выходящие за пределы 2 ПДК. По ряду микроэлементов (никель, хром, марганец, ванадий, медь) незначительное загрязнение но-

сит точечный характер. Валовое содержание микроэлементов в верхнем почвенном слое на исследуемой территории не выходит за рамки фонового по прилегающей селитебной территории в целом [59].

В пойменной части, примыкающей к территории санитарно-защитной зоны, распространены следующие разновидности почв.

Болотно-перегнойно-глеевые почвы занимают площадь 71,5 га. Они длительное время залегают на пониженных элементах рельефа в центральной и притеррасной частях поймы р. Камы. Характеризуются оторфованностью верхних горизонтов мощностью 0,2-1,2 м. Зольность заторфованных горизонтов от 48,2 до 59,2 %, торфяных горизонтов 25,7-27,4 %. Степень разложения последней 40-45 %. Естественная влажность 73,4-79,0 %. Величина рН КСl низкая и равна 3,8-4,5, что является характерным для почв всего данного района.

Иловато-болотные почвы занимают 164,9 га, залегают по вытянутым понижениям или по топким берегам озёр. Зольность верхних горизонтов 52,5 %, нижних оторфованных – 39,3-48,6 %. Грубый гумус в верхних горизонтах 3,6 - 25,2 %. Почвы имеют низкую величину рН КСl, равную 3,7-5,6, и низкую величину степени насыщенности основаниями – 45,0-62,0 % в верхних горизонтах. Эти величины почти не изменяются вниз по профилю почвы.

Аллювиально-дерново-глееватые зернистые ненасыщенные кислые почвы залегают в прирусловой и центральных частях поймы на возвышенном рельефе. Величина рН КСl 3,5-5,2. Степень насыщенности основаниями относительно небольшая – 76,3 %. Гумусовый горизонт бурой окраски, гумуса в нём 1,7-2,2 %.

Эти почвы аллювиальные слоистые оподзоленные занимают небольшую площадь. Они залегают на высоких грибовидных повышениях в притеррасной части поймы. У них маломощный гумусовый горизонт 8-15 см, под гумусовым горизонтом намечается слабая белесоватость. Почвы залегают под сосновым лесом. Данные почвы являются малоплодородными с невысокими агрохимическим потенциалом.

На примыкающих к рассматриваемой территории надпойменных террасах р. Камы сформировались зональные дерново-подзолистые, дерново-карбонатные и болотно-подзолистые почвы с полноразвитыми генетическими горизонтами и мощным профилем [42].



Специфика почвенного покрова, имеющего сложную литогенную структуру, определяется исключительным разнообразием материнских пород по генезису, минералогическому и гранулометрическому составу.

На сельскохозяйственных угодьях современная эволюция почв контролируется эрозионными процессами. Площадь смытых почв составляет от 18 до 30 % площади пашни.

## 2.7. Растительность

Растительность в пределах исследуемой территории представлена лесными, луговыми, болотными и антропогенными сообществами растений [27]. Леса, на которых расположена исследуемая территория, представляют собой компактный лесной массив, окружающий объект с севера, запада и юга. Весь массив представлен двумя биотопами: пойменным и террасовым. С севера на террасе произрастают сосновые и сосново-березовые леса на хорошо дренированных глубоких песках и супесях, с запада и юга высота террасы падает, леса заболочены, и в них появляется ель. На юго-западе терраса четко переходит в пойму, где произрастают в основном осиново-березовые заболоченные леса, а на дренированных повышениях – луговая растительность.

Лесом естественного происхождения покрыто 99,5 % лесных земель. Преобладают хвойные насаждения – 72,8 % покрытых лесом земель, в т.ч. сосна – 70,2 %; мягколиственные насаждения занимают 27,2 % покрытых лесом, в основном это березняки – 19,6 % покрытой лесом площади.

В хвойных насаждениях преобладают древостои V-IX классов возраста (101-200 лет), которые занимают 65,1 %, на долю молодняков (до 40 лет) приходится всего 2,8 %, а на леса в возрасте 41-100 лет – 31,9 %. В прошлом леса были пройдены рубками: в конце XVIII – начале XIX в. и повторно в первой половине XX в. Большая часть вырубок возобновилась, но на некоторых из них в 1960-х гг. были разбиты коллективные сады.

В лиственных насаждениях преобладают древостои 50-80-летнего возраста (75 % площади), молодняки занимают 3,1 % и древостои в возрасте 21-49 лет – 19,9 %.

К дренированным местообитаниям приурочены высокопроизводительные леса I-III классов бонитета (66,2 %). Третью часть площади занимают заболоченные леса на торфянистых почвах IV-V<sup>a</sup> классов бонитета (33,8 %).

Подлесок представлен типичными зональными видами. На дренированных почвах встречаются рябина обыкновенная, ива козья, можжевельник сибирский, ракитник русский, жимолость татарская, шиповник коричный и иглистый, калина, кручина слабительная и ломкая, малина лесная; вблизи садов часто встречается ирга колосистая как антропогенный вид. В понижениях и на заболоченных почвах под пологом леса часто встречается смородина чёрная, ольха серая и чёрная, ивы остролистная, полярная, серая и пепельная, черёмуха обыкновенная.

Напочвенный покров представлен в виде 11 групп типов леса, определяемых по растениям-доминантам напочвенного покрова (табл. 2.3).

Таблица 2.3. Группы типов леса по растениям-доминантам напочвенного покрова

Группа типов леса	Площадь, %
Сосняки:	
лишайниково-брусничные	19,7
зеленомошно-кисличные	26,5
травяно-липовые	8,6
долгомошно-багульниковые	3,1
осоково-сфагновые	14,9
Ельники:	
зеленомошно-кисличные	0,7
долгомошно-черничные	0,2
липово-травяные	5,1
осоково-сфагновые	0,2
Березняки:	
пойменно-сфагновые	19,2
Ольшаники:	
пойменно-таволговые	1,8
Итого:	100,0

Луговая растительность занимает значительную часть незанятой лесом и водными объектами поймы. По материалам отчёта Пермского института Пермгипроводхоз на территории «Оборинской поймы», прилегающей к объекту с южной и юго-западной стороны, в кв. 10, 12, 16, 17 муниципальных лесов ведомственного подчинения встречаются четыре типа лугов.

*Разнотравно-злаковые луга.* Злаковые составляют 60 % в составе травостоя и представлены мятликом, лисохвостом, тимофеевкой, овсяницей. Из разнотравья встречаются манжетка, подорожник, гусиная лапка, василёк фригийский, подмаренник. Проективное покрытие 70 %. Продуктивность данного типа лугов 3-7 ц/га.

*Осоково-разнотравные луга.* В составе этих лугов 70-80 % занимает разнотравье: лютики, купавка, хвощ, гравилат и другие. Осоки в основном узколистные. Урожай сена 7-10 ц/га.

*Разнотравно-осоковые луга.* Осоковые виды занимают преимущественное положение в ассоциации с содержанием до 70 %. На злаковые приходится 30-40 %. Продуктивность этих лугов 10-15 ц/га.

Осоковые луга получили на участке наибольшее распространение. Из осок встречаются узколистная, широколистная, лисья, пузырчатая, заячья. Проективное покрытие составляет 80-90 %. Урожайность в перёсчете на сено 15-18 ц/га. Отдельную группу, занимающую незначительную площадь участка, составляют луга с ивовым кустарником и отдельными деревьями ольхи и ивы. На момент обследования в 1979 г. общая площадь, занимаемая луговыми сообществами, составляла в «Оборинской пойме» 221,6 га, или 25,2 %. В настоящее время часть лугов занята под коллективные сады.

На незатронутых строительными работами территориях древесный ярус, подлесок и подрост в насаждениях на исследуемой территории находится в удовлетворительном состоянии и существенно не отличается от таковых в зеленой зоне примыкающих населенных пунктов.

Общее количество видов растений составляет 32, из них в напочвенном покрове по разным пунктам встречается от 10 до 23 видов (в среднем 16 видов). Среди последних доля собственно лесных состав-

ляет в среднем 7,6 шт., т. е. напочвенный покров обеднен растениями лесных местообитаний, которые замещены луговыми и антропогенными видами. Эти виды встречаются здесь в 1,3 раза чаще, чем в сравниваемых лесах зеленой зоны.

Моховой покров изрежен и сокращен до 1-2 видов против 2-4 видов мхов в таких же типах леса в зеленой зоне района.

Содержание микроэлементов в хвое сосны и клевере луговом и грибах не отличается от таковых в образцах из зеленой зоны района.

Санитарное состояние и устойчивость древостоев наиболее высоки в сосновых насаждениях, где 77 % площадей отнесены к первому классу; лиственные древостои, напротив, ослаблены и среди них большая часть (64 %) отнесена ко второму классу, а 11,7 % даже к третьему классу устойчивости (отмирающие насаждения).

По эстетическим и гигиеническим критериям оценки от 70 до 76 % площадей ландшафтов полностью или ограниченно пригодны для рекреационных целей без проведения каких-либо дорогостоящих мероприятий по их улучшению.

Современное состояние древесно-кустарниковой растительности в лесах зеленой зоны г. Перми характеризуется проявлением следующих тенденций [37]:

- Ремиссия лесных территорий при снижении уровня загрязнения с образованием вторичных фитоценозов и восстановлением основных жизненных функций у ослабленных ранее насаждений.
- Изменение характера нагрузки на леса зеленых зон от умеренно активной хозяйственной к пассивной рекреационной.
- Смена приоритетов нагрузки на леса зеленых зон привела к ухудшению рекреационных свойств лесных ландшафтов и зарастанию насаждений нежелательными сопутствующими породами.
- Слабое семеношение и заглушение всходов напочвенным покровом и подлеском усугубляют процессы естественного возобновления под пологом леса и приводят к замещению хвойных пород липой и осиной.

## 2.8. Животный мир

Для исследуемой территории, как и для всей зелёной зоны г. Перми, характерна высокая численность многих синантропных и полусинантропных видов птиц: ворон, сорок, галок и др. Из пушных зверей постоянно обитают в лесах в районе объекта белка, заяц беляк. Отмечены единичные посещения территории лосем. На примыкающих к территории озёрах гнездятся утки. Озёра являются базой для перелётных птиц.

Прилегающая к объекту исследований территория имеет режимный характер посещения. По этой причине целенаправленного, требующего длительных наблюдений в течение нескольких сезонов изучения животного мира не проводилось. Сведения как по наземной фауне, так и по ихтиофауне примыкающих к территории объекта водоёмов отрывочны, получены зачастую из устных источников и требуют тщательной проверки.

## 2.9. Физические поля

*Радиационная обстановка.* Радиационная обстановка на территории Кировского района, как и в г. Перми, в целом была обусловлена техногенными и естественными источниками ионизирующего излучения. Среднегодовое значение естественного гамма-излучения по г. Перми составляет 11,4 мкР/ч (находится в пределах естественного фона). Среднегодовое значение по Пермской области составляет 12 мкР/ч. В целом радиационная обстановка в г. Перми спокойная, уровень гамма-фона в пределах нормы [20; 21; 49; 50]. Средняя за год суммарная активность атмосферных выпадений составила от 0,3 до 0,5 Бк/м<sup>2</sup>\*сут при среднероссийском уровне за предыдущие годы – 1,5 Бк/м<sup>2</sup>\*сут [49].

*Шум.* Основными источниками городского шума являются автомобильный, железнодорожный и авиационный транспорт, промышленные предприятия, оборудование встроенно-пристроенных к жилым зданиям объектов. Наиболее интенсивным и распространенным источником внешнего шума является городской транспорт. Анализ здоровья населения города подтверждает наличие неблагоприятного воздействия шумового фактора [20; 21; 49; 50].

Внешняя шумовая нагрузка на население находится в пределах 46,0 – 78,6 дБ в 2000 г., а в 2001 г. 48 – 79,8 дБ при критерии шумового загрязнения в 55 дБ. Средние эквивалентные уровни на основных транспортных магистралях города в 2001 г. в 36,6 % случаев превышали установленные предельно допустимые нормативы (в 2000 г. – 62 %, в 1999 г. – 58 %) [20; 49; 50]. Увеличивается количество жалоб населения на шумовое загрязнение: 1999 г. – 28; 2000 – 36; 2001 – 42.

*Электромагнитное излучение.* Электромагнитный режим формируется за счет электромагнитного излучения в окружающую среду радиотехнических объектов, электропередачи, электрических трансформаторных подстанций, радиолокационных установок метеорологической службы, объектов гражданской и военной авиации, радио- и телевизионных передающих центров, базовых станций сотовой и спутниковой связи [49; 50].

Уровни электромагнитного излучения на территории жилых районов в 2001 г. находились в пределах допустимых значений и составляли от 0,5 до 2,6 В/м в высокочастотном диапазоне и от 1,0 до 3,0 мкВт/см<sup>2</sup> в СВЧ-диапазоне с увеличением на границах санитарно-защитных зон радиотехнических объектов до 9,6 В/м [20; 21; 49; 50].

Таким образом, имеющиеся сведения о состоянии окружающей среды в районе объекта не позволяют определить «вклад» в изменение экологической обстановки. В связи с этим был проведен комплекс специальных натурных исследований с использованием математического моделирования рассеивания продуктов сгорания (см. раздел 1), результаты которого изложены в разделе 4.

### **3. ХАРАКТЕРИСТИКА УСЛОВИЙ, СПОСОБСТВУЮЩИХ НАКОПЛЕНИЮ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ**

В настоящее время в Российской Федерации обеспечение чистоты воздушного бассейна базируется на нормировании выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, прогнозировании высоких уровней загрязнения воздуха и регулировании выбросов в периоды наступления аномально неблагоприятных метеорологических условий (АНМУ). Реализация поставленной цели осуществляется согласно методическим подходам, рекомендованным ГГО им. А.И.Воейкова и описанным в «Руководящих документах» [38].

Процедура прогнозирования высоких уровней загрязняющих веществ, появившихся после сгорания РД, отличается от общепринятой для типичных источников загрязнения атмосферы (ИЗА) ввиду специфичности условий выброса.

В связи с особенностью рассматриваемого ИЗА особую опасность должен представлять перенос облака потоком на высотах от 100 до 1500 м при наличии приподнятой инверсии. Таким образом, в комплексе аномальных неблагоприятных метеорологических условий определяющим должен быть прогноз направления и скорости ветра на высотах 100, 300, 600, 900, 1500 м. Этот прогноз следует предполагать первым этапом работы.

На втором этапе могут быть разработаны комплексы АНМУ.

Следует учесть, что метеоусловия, при которых создается опасное загрязнение воздуха для рассматриваемого ИЗА, могут существенно отличаться от обычных НМУ. Интенсивное загрязнение приземного слоя воздуха атмосферы выбросами при проведении испытаний в силу их особенностей, месторасположения по отношению к городу часто носит локальный характер, т.е. может создаваться тогда, когда в целом над городом обстановка не является неблагоприятной.

В связи с расположением ИЗА за городом целесообразно не просто выделять преобладающее направление ветра на селитебную территорию, а определять такие неблагоприятные направления ветра, при которых перенос примесей в приземные слои воздуха над городом осущест-

влялся бы на районы с плотной застройкой. Здесь под влиянием местной циркуляции, острова тепла, усиливается поступление примесей в нижележащие слои на участки со сложным рельефом (р. Кама). Общеизвестно, что в городе по сравнению с окрестностями заметно меняется как направление, так и скорость ветра. Искажение поля ветра в городе определяет повышенное поступление примесей к земле от высоких перегретых ИЗА вследствие усиления турбулентного обмена. Поэтому для корректной оценки переноса примесей от стенда целесообразно привлекать прежде всего метеоданные метеостанции Б. Савино.

Повышение температуры воздуха над городом вызывает усиление турбулентного обмена, что в дальнейшем приводит к разрушению в городе и над территорией района стенда приземных инверсий и к формированию приподнятых. Таким образом, когда за городом наблюдается приземная инверсия, в городе у земли, как правило, создается слой повышенного обмена. Согласно имеющимся данным [7; 14; 16] его толщина составляет 100-300 м, что лишний раз свидетельствует в пользу привлечения для прогноза ветра данных радиозондирования и шарпилота, оценки ветровых потоков на поверхности АТ-925гПа. Под приподнятой инверсией располагается основная часть загрязненного воздуха промузла и города. Таким образом, следует установить пределы высоты НГ приподнятой инверсии, ее повторяемость по месяцам, сезонам, в целом за год. Согласно рекомендациям Л.Р. Сонькина необходимо провести анализ всех случаев приподнятой инверсии с нижней границей не выше 200-300 м [46].

Важно определить, кроме того, интервалы скоростей ветра на уровне переноса облака, а также типичные вертикальные профили ветра для периодов АНМУ.

Жилые районы города оказываются наветренными для полигона в течение всех сезонов. При наличии такого расположения ИЗА характер влияния термической стратификации на уровень загрязнения атмосферы иной. Для наветренной части города Л.Р. Сонькиным были выделены следующие условия, которые можно использовать и для прогноза ЗА от стенда:

1. Примерно до 1,5 км от границы города максимальная приземная концентрация ( $C_m$ ) формируется при неустойчивой



стратификации (как и в случае отдельного точечного источника). Следует заметить, что такой тип стратификации является определяющим в г. Перми.

2. На расстоянии 1,5-5 км от границы города наибольшие концентрации формируются при безразличной термической стратификации.
3. На расстоянии более 5 км  $C_m$  формируется в инверсионных условиях.

Приведенные методические подходы выбраны из работ М.Е. Берлянда, Л.Р. Сонькина, Е.П. Гениховича [9; 10; 12; 47].

**Исходные данные.** Исследование АНМУ включает анализ и обобщение данных о ветровом режиме территории станда и об условиях перемешивания. Исходными данными для исследования могут служить ежечасные значения скорости и направления ветра у земли и на высоте 100 м, полученные по наблюдениям на АМСГ Б. Савино за десятилетний период (с 1990 по 1999 г.), а также характеристики ветра и условий стратификации в пограничном слое атмосферы (ПСА) от земли до изобарической поверхности 850 гПа (1,5 км). Последние включают значения скорости и направления ветра, параметры инверсий: глубина ( $\Delta T$  – разность температур на верхней и нижней границах инверсий) и мощность ( $\Delta H$  – разность высот на этих же границах) по наблюдениям станции радиозондирования г. Перми. Выбор начала периода исследования обусловлен доступностью метеорологических данных наблюдений ветрового режима.

Созданная выборка включала:

- скорость ветра у земли не более 1 м/с или ветер неустойчивый (застойная ситуация);
- слабый и неустойчивый ветер у земли в сочетании с юго-западным (200-230°) направлением ветра на высоте 100 м (перенос примеси на жилые районы города);
- скорость ветра у земли и на высоте 100 м 4-7 м/с, при направлении 180-240° (перенос примеси на жилые районы города).

Предпочтение юго-западного направления ветра было связано с переносом вредных примесей от испытательного стенда на жилой сектор Кировского района г. Перми. При таких метеорологических условиях может возрастать степень загрязнения атмосферы вредными примесями. Эти условия характеризуются слабым вертикальным обменом у земли, когда высокие концентрации вредных примесей сохраняются вблизи земной поверхности в течение длительного времени, а на высоте 100 м направление ветра благоприятствует переносу этих примесей на город.

### **3.1. Характеристика ветрового режима**

Наиболее оптимальные условия для интенсивного загрязнения приземного слоя воздуха возникают при слабых ветрах у земли (на уровне флюгера), поскольку упорядоченный горизонтальный перенос и турбулентная диффузия при этом ослаблены, а выпадение загрязняющих веществ из облака будет происходить длительное время на ограниченной территории.

Еще более опасны периоды слабого и неустойчивого ветра со скоростью 0-1 м/с продолжительностью более 12 ч, так как за это длительное время образуются застои воздуха и происходит накопление вредных примесей. Подобные условия характеризуются слабым вертикальным турбулентным обменом, и высокие концентрации вредных примесей от других источников поддерживаются в течение длительного времени.

Такие случаи чаще имеют место в январе, феврале и марте. В остальные месяцы года они появляются с меньшей регулярностью (см. табл. 3.1). Однако в 1995, 1997 и 1999 гг. периоды слабого и неустойчивого ветра наблюдались в каждом месяце.

Средняя продолжительность этих периодов за месяц изменяется от 13 до 25 ч, с минимумом в июне и с максимумом в январе (см. рис. 3.1). Максимальная продолжительность слабого неустойчивого ветра может достигать 66 ч в январе и 53 ч в феврале. Особое внимание уделялось периодам с продолжительностью застоя более 12 ч, а также периодам с продолжительностью 24, 26 и 32 ч.

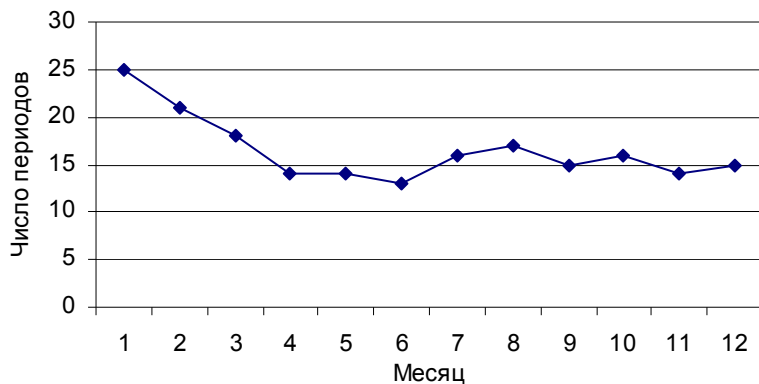
Таблица 3.1. Характеристики периодов слабого и неустойчивого ветра в 1990–1999 гг.

Месяц	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	Средняя продолжительность, ч	Общее число периодов
Январь	1	2	2	1	1	4 66	3 32	4 39			25	18
Февраль	1	3	4	2 26	1 39	1 53	1			2	21	15
Март	2	1		5 35	1	1	2	4	1	1	18	18
Апрель		1				2	2			2	14	7
Май						1			1		14	2
Июнь		1		1				1		1	13	4
Июль								1	4 24	2 24	16	7
Август	2			2 30		3 36	1	1	4		17	13
Сентябрь			1 26		1	5		3		1	15	11
Октябрь						1			1		16	2
Ноябрь						2	1	1	1	2	14	7
Декабрь				1	1	1	2	1		1 24	15	7
Средняя продолжительность по годам, часы	18	16	17	19	19	20	18	15	15	17		

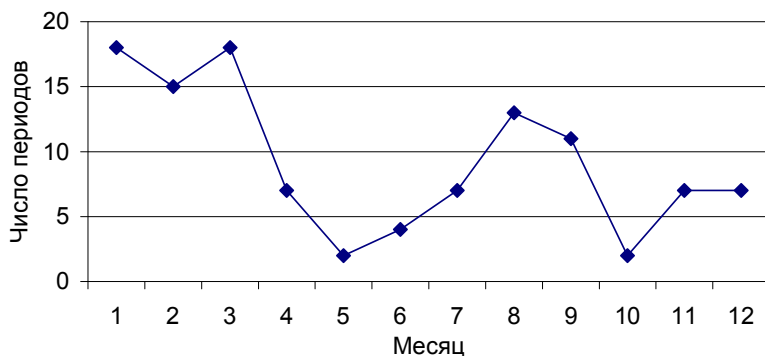
Примечание: первая строка – количество случаев, вторая – продолжительность, ч.

В периоды слабого и неустойчивого ветра со скоростью 0-1 м/с, когда образуются застои воздуха, Пермским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ПЦГМС) даются штормовые оповещения об АНМУ. Однако исследования показали, что такие условия прогнозируются недостаточно надежно.

Выделялись также периоды с юго-западным (200-240°) направлением ветра со скоростью 4-7 м/с у земли и на высоте 100 м продолжительностью более 6 ч. Как видно из сводной табл. 3.2, такие периоды наблюдаются достаточно регулярно.



А



Б

Рис. 3.1. Средняя продолжительность периодов слабого и неустойчивого ветра (А) и число периодов ситуаций застоя (Б)

Средняя продолжительность этих периодов за месяц может составлять от 9 до 15 ч, минимальное значение соответствует теплему периоду (с мая по август), а максимальное – декабрю (см. рис. 3.2).

Большая продолжительность периодов ветра юго-западного направления может наблюдаться также в ноябре (64 ч) и марте (61 ч). Февраль характеризуется наибольшей регулярностью таких периодов за 10 лет – 96. Их минимальное число приходится на июль и июнь (соответственно 35 и 37 случаев) – см. рис. 3.2.

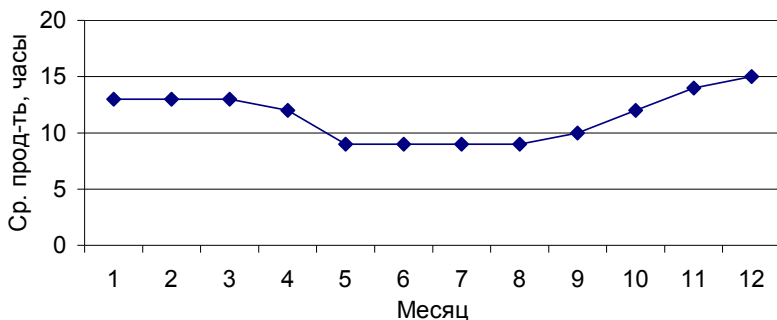
Таблица 3.2. Характеристики периодов со скоростью ветра 4-7 м/с в 1990–1999 гг.

Месяц	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	Средняя продолжительность, ч	Общее число периодов
Январь	9 25	9 33	11 25	11 48	10 35	8 30	9	5	8 36	4 25	13	84
Февраль	10 27	9 31	12 32	9 39	9	16 35	7	15	6	3	13	96
Март	8 27	8 26	14 61	11 25	14	11 44	10	6	2	8	13	92
Апрель	6	8 26	7 42	9 42	14	3	6	3	1	4	12	61
Май	12	10	8	5	8	4	8	3		6	9	64
Июнь	8	6	1	4	9	5	3			1	9	37
Июль	2	3	4	2		3	4	3	6	8	9	35
Август	5	2	5	5	5 33	7	7	8	6 26	6	9	56
Сентябрь	9	15	4	5	14 24	8 31	5	4	4	3	10	71
Октябрь	5	9 33	11	11 42	14 33	10	8	4	7 25	7	12	86
Ноябрь	13 37	9 64	7 39	2 30	12 26	3 43	8	5	4	5	14	68
Декабрь	14 54	11 72	16 71		15		6 30	2	6	5	15	75

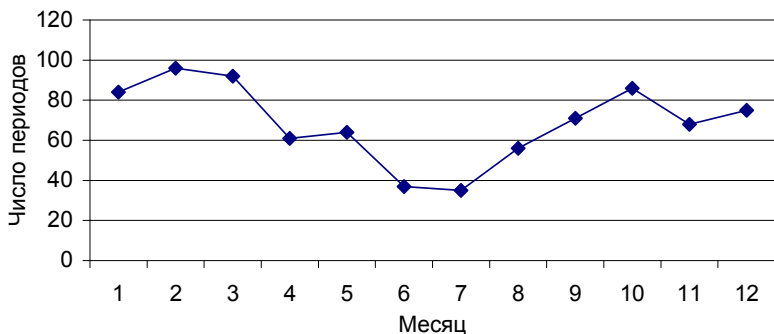
Примечание: первая строка – количество случаев, вторая – продолжительность, ч.

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- В январе-марте и августе встречается наибольшее количество случаев застоя воздуха и с наибольшей их продолжительностью. Максимальная продолжительность случаев застоя воздуха в январе составляет 66 ч.
- В мае, июне и октябре наблюдается наименьшее число ситуаций застоя.
- Периоды юго-западного ветра скоростью 4-7 м/с наиболее продолжительны в декабре (в среднем 15 ч) с максимумом 72 ч.
- Наименьшая продолжительность периодов юго-западного ветра скоростью 4-7 м/с приходится на май-август.



А



Б

Рис. 3.2. Средняя продолжительность периодов со скоростью ветра 4-7 м/с (А) и число периодов со скоростью ветра 4-7 м/с (Б)

### 3.2. Характеристика приземных и приподнятых инверсий

Особенности вертикального распределения характеристик ветра тесно связаны с характеристиками турбулентности – коэффициентами турбулентности и пульсациями скорости ветра. В случае сильноустойчивой (инверсионной) стратификации турбулентное перемешивание по вертикали сильно затруднено. Взаимодействие различных слоев воздуха при глубоких инверсиях крайне незначительно – турбулентность приобретает локальный характер, и продукты сгорания в начальной стадии подъема облака могут сохраняться в приземном слое, не рассеиваясь, длительное время.

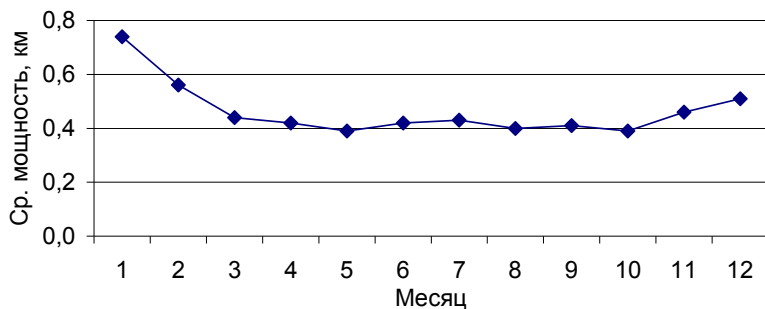
В среднем за год наблюдается около 95 случаев приземных и 46 случаев приподнятых инверсий, которые сопровождаются слабым и неустойчиво ветром (табл. 3.3). Максимальная мощность инверсий приходится на январь и февраль; так, 15 февраля и 30 января 1991 г. мощность инверсии составила 1,95 и 2,08 км соответственно. Это связано, прежде всего, с выхолаживанием подстилающей поверхности в зимнее время года.

Таблица 3.3. Характеристики инверсий при слабом и неустойчивом ветре в нижней атмосфере в 1990 – 1999 гг.

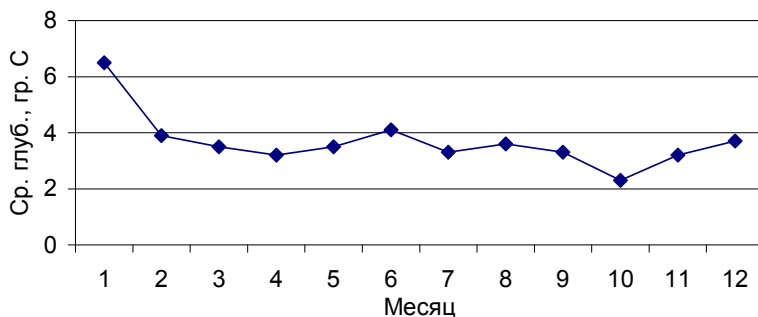
Ме- с- ц	Характеристики инверсий						Число случаев				Тип инверсий				
	Мощность, км			Глубина, °С			Срок 03 ч		Срок 15 ч	Все- го	Призем- ные		Приподня- тые		Изо- термия
	сред- няя	дис- персия	макси- маль- ная	сред- няя	дис- персия	макси- маль- ная	коли- че- ство	пов- то- ряе- мость, %			коли- че- ство	пов- то- ряе- мость, %	коли- че- ство	повто- ряе- мость, %	
Янв.	0,74	0,18	2,08	6,5	21,3	18,9	68	31	64	132	75	35	53	24	4
Февр.	0,56	0,12	1,95	3,9	12,0	18,8	83	37	58	141	65	29	73	33	3
Март	0,44	0,06	1,49	3,5	7,6	11,8	109	35	44	153	90	29	53	17	10
Апр.	0,42	0,03	0,84	3,2	5,0	8,9	129	43	20	149	109	36	31	10	9
Май	0,39	0,02	0,80	3,5	7,0	11,2	110	35	9	119	98	32	17	5	4
Июнь	0,42	0,02	0,80	4,1	4,7	9,0	118	44	10	128	113	42	13	5	2
Июль	0,43	0,02	0,95	3,3	4,0	8,0	162	58	11	173	149	53	19	7	5
Авг.	0,40	0,01	0,67	3,6	3,8	8,4	88	32	4	92	80	29	6	2	6
Сент.	0,41	0,03	1,21	3,3	5,7	9,2	79	29	17	96	71	26	19	7	6
Окт.	0,39	0,05	0,91	2,3	4,5	8,7	45	18	25	70	19	8	41	17	10
Нояб.	0,46	0,09	1,60	3,2	7,8	11,2	60	29	39	99	35	17	62	30	2
Дек.	0,51	0,10	1,40	3,7	8,3	11,5	65	35	49	114	42	23	71	38	1

Наибольшее значение средней мощности (см. рис. 3.3) приходится на период с декабря по февраль (0,51-0,74 км), а в остальное время наиболее вероятна средняя мощность (0,39 – 0,46 км).

Средняя глубина инверсий (рис. 3.3) почти во все месяцы колеблется в интервале 2 - 4°, и лишь в январе средняя глубина может достигать 6,5°. Максимальная глубина приходится на январь, февраль; так, 22 января 1995 г. она составила 18,9°, а 2 февраля 1991 г. – 18,8° при почти двухкилометровой мощности. В июле и августе максимум не превысил 8,4°.



А



Б

Рис. 3.3. Средняя мощность инверсий (А) и средняя глубина инверсий (Б)

Большой интерес представляют слои изотермии – слои с равномерным распределением температуры с высотой, они тоже играют роль задерживающих слоёв. Суммарная повторяемость изотермии в общем числе инверсий составляет 4%. Мощность их небольшая, колеблется в пределах от 10 до 60 м. Наиболее часто встречаются слои изотермии в переходное время года, в среднем по 1 случаю в марте-апреле и октябре.

В зависимости от начальной высоты инверсии выделяют приземные и приподнятые. На рис. 3.4 изображён ярко выраженный ход повторяемости тех или иных инверсий. В целом видно, что приземные инверсии встречаются чаще, чем приподнятые, повторяемость первых 53% приходится на июль, а вторых 38% - на декабрь. Минимум повторяемости приземных инверсий в октябре – 8%, а приподнятых в августе – 2%.



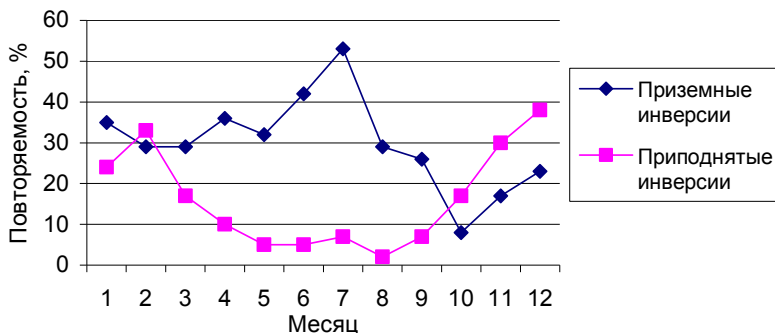


Рис. 3.4. Повторяемость приземных и приподнятых инверсий

Сочетания величины градиентов температуры при инверсиях с ее высотой в пограничном слое (в верхней и нижней частях пограничного слоя) позволили выделить следующие типы профилей:

- высокие инверсии – глубокие и слабые (последние включают состояния, близкие к изотермии, т. е. инверсию потенциальной температуры);
- низкие инверсии – глубокие и слабые (инверсия только в нижней части слоя); приподнятые инверсии, которые при более дробном делении «подпираются» снизу неустойчивым или слабоустойчивым слоем;
- состояния, близкие к безразличному;
- неустойчивость во всем слое.

По наличию инверсий можно судить об устойчивом состоянии атмосферы. Кроме устойчивого состояния стратификация атмосферы может иметь и другие характеристики. Самая простая классификация подразумевает наличие трех градаций: неустойчивой стратификации (н), безразличной (б) и устойчивой (у).

Неустойчивая стратификация наблюдается в основном летом днем, в июне в околополуденные часы ее повторяемость превышает 60 % (по данным Н.Л.Бывовой [15]). Инверсии летом наблюдаются ночью, причем низкие (приземные) как в первую половину ночи, так и во вторую, а высокие – преимущественно во вторую. В сумме повторяе-

мость инверсий всех градаций в 3 ч ночи летом превышает 70 % (см. рис. 3.3). Зимой инверсии наблюдаются также и днем, причем в любое время суток преобладают высокие. Приподнятые инверсии чаще всего связаны с временем после восхода солнца, но в связи с синоптическими процессами могут наблюдаться и в другое время суток; однако летом днем они крайне редки. Состояния, близкие к безразличному, наблюдаются в течение всего года, однако в светлое время суток преобладают случаи, когда градиент температуры близок к адиабатическому, а в темное – несколько менее его. Вечером в 10 - 15% случаев наблюдается изотермия или слабая инверсия внизу при сохранившейся от дневного времени неустойчивости в верхней части слоя.

Связь сочетаний температурной стратификации со скоростью ветра по результатам наблюдений на метеорологической мачте в Обнинске приведена в табл. 3.4 и 3.5 [15].

Таблица 3.4. Повторяемость (%) сочетаний температурной стратификации при заданной скорости ветра на уровне 300 м ( $V_{300}$ )

Температурная стратификация	Скорость ветра, м/с				
	<5	6-10	11-15	16-20	>20
Октябрь—март					
Инверсия					
высокая сильная	4,7	3,4	2,7	3,0	3,2
высокая слабая	20,4	18,0	17,9	19,3	17,3
приподнятая	6,7	9,9	11,6	14,6	21,5
низкая сильная	5,4	1,6	0,3		
низкая слабая	4,8	3,3	2,8	2,9	3,5
близкая к нейтральной	49,9	57,3	60,6	57,5	51,8
неустойчивая	8,4	6,6	4,3	2,7	2,2
Апрель—сентябрь					
Инверсия					
высокая сильная	0,5	0,9	1,2	0,6	
высокая слабая	20,9	25,1	30,4	38,0	38,5
приподнятая	3,6	5,6	10,4	12,0	18,8
низкая сильная	14,2	6,7	2,1	0,4	
низкая слабая	4,3	5,0	3,6	3,1	
близкая к нейтральной	34,4	38,2	41,8	42,1	40,4
неустойчивая	21,9	18,3	8,5	3,2	2,4
% числа случаев в сезон					
Октябрь—март	21,5	34,0	27,0	10,6	3,5
Апрель—сентябрь	34,4	38,5	16,2	5,5	0,7

Таблица 3.5. Повторяемость (%) сочетаний температурной стратификации при заданной скорости ветра на уровне 9 м ( $u_{\phi}$ )

Температурная стратификация	Скорость ветра, м/с				
	0-1	2-3	4-5	6-7	>8
Октябрь—март					
Инверсия					
высокая сильная	6,9	1,7	0,3		
высокая слабая	24,9	15,7	9,9	7,2	8,9
приподнятая	13,5	10,2	4,5	0,6	
низкая сильная	4,0	1,5	0,2	0,1	
низкая слабая	4,0	2,9	3,3	3,7	8,7
близкая к нейтральной	42,8	63,3	73,4	77,8	77,6
неустойчивая	4,0	6,4	8,6	10,7	4,9
Апрель-сентябрь					
Инверсия					
высокая сильная	1,4	0,33			
высокая слабая	34,4	19,22	7,66	5,7	1,3
приподнятая	7,5	6,44	1,22		
низкая сильная	14,4	0,88			
низкая слабая	6,0	3,11	3,00	1,7	
близкая к нейтральной	26,9	47,66	58,33	62,1	67,2
неустойчивая	9,6	22,66	31,99	30,5	31,4
% числа случаев в сезон					
Октябрь—март	40,7	40,2	12,9	2,5	0,6
Апрель—сентябрь	52,1	34,9	9,5	1,6	0,3

В этих таблицах общим является убывание доли низких инверсий с ростом скорости ветра, а также максимальная доля состояний, близких к безразличному. Прямо противоположно в этих двух вариантах ведут себя приподнятые инверсии, их доля растет с ростом  $V_{300}$  и убывает с ростом  $u_{\phi}$ ; обратное можно сказать о неустойчивой стратификации: она чаще встречается при малых  $V_{300}$  и достаточно часто при больших или умеренных  $u_{\phi}$ . Доля высоких инверсий резко падает с ростом  $u_{\phi}$ , но нерегулярно меняется с ростом  $V_{300}$ .

Структура состояний термической стратификации наиболее разнообразна при слабых ветрах, с ростом скорости ветра она обедняется, в первую очередь за счет выбывания случаев сильных инверсий. При этом большая скорость ветра на уровне 300 м далеко не всегда свидетельствует о безразличной температурной стратификации. При  $V_{300} > 15$

м/с только около половины случаев можно отнести к этому состоянию, весьма значительна также доля приподнятых и высоких инверсий. При отборе по  $u_{\phi}$  картина более определенная: при  $u_{\phi} \geq 6$  м/с встречаются только безразличные и неустойчивые состояния, а также изотермия.

Приведем теперь самый простой вариант способа определения знака устойчивости на основе обычных сетевых наблюдений. Такие упрощенные качественные правила определения устойчивости, составленные на основе способа Пэскуила-Гернера, выглядят следующим образом [54]:

1. Ночью стратификация бывает только устойчивой или безразличной, днем без снегового покрова - неустойчивой или безразличной, при полном снеговом покрове может быть любой.
2. Безразличной стратификация бывает при большом ветре у земли или же при полной низкой облачности в отсутствие снега.
3. Устойчивой стратификация бывает ночью при слабом или умеренном ветре, ясном или почти ясном небе. Если же есть снеговой покров, то также при слабом ветре в отсутствие очень низких облаков и тумана.
4. Наличие неустойчивости зависит от высоты солнца. При низком солнце она возможна только при слабых ветрах и ясном или почти ясном небе, а при снеговом покрове в этих случаях более вероятна устойчивость. При средней высоте солнца, если небо ясно или почти ясно, неустойчивость бывает при слабых и умеренных ветрах; если пасмурно, но облака высокие или с просветами, то при слабом ветре. При высоком солнце (днем в летнее время в средней полосе), если небо ясно или почти ясно, она наблюдается при слабых и умеренных ветрах. Наконец, при очень высоком солнце (днем в летнее время в южных широтах), если ясно или почти ясно она бывает всегда, а если пасмурно, но облака высокие или с просветами, то при любом ветре, кроме сильного.

### 3.3. Особенности вертикальных профилей ветра при АНМУ

Исходя из теории изменения ветра с высотой известно, что:

- вектор скорости с высотой растет, одновременно отклоняясь от наземного ветра вправо (северное полушарие);
- до высоты  $h$  направление ветра практически не изменяется, а выше начинается сравнительно быстрое отклонение ветра от наземного ( $h$ -приземный слой);
- на высоте  $H=4h$  вектор скорости продолжает расти, поворачиваясь вправо, затем рост скорости ветра прекращается, иногда скорость даже уменьшается и на высоте  $H=10h$  вектор ветра практически совпадает с вектором градиентного (геострофического) ветра.

Исследования ветрового режима показали, что универсальный логарифмический закон для небольших высот подтверждается экспериментальными данными.

Экспериментальные наблюдения позволили сформулировать следующие выводы:

- Летом в слое 700 м наблюдается довольно четко выраженный суточный ход скорости ветра с одним максимумом в 13-14 ч и минимумом в ночное время (в самом нижнем слое).
- В слое 200-700 м максимум наблюдается в 22 ч, а минимум - в 10 ч.
- В холодное время скорости обладают более слабовыраженным суточным ходом.
- Обращение скорости наблюдается на высоте 50 м.
- Вертикальный профиль ветра во все сезоны в среднем характеризуется быстрым ростом по высоте в нижнем 100-метровом слое, который затем замедляется, а в слое 500-800 м рост незначителен.
- Весной и осенью скорости ветра у земли минимальны, зимой - максимальны.
- Рост скорости ветра с высотой минимален в летнее время.

По исследованиям, выполненным Л.Р. Орленко [34], можно сделать следующие выводы:

1. Влияние скорости геострофического ветра и характера подстилающей поверхности состоит в следующем. С ростом  $V_g$  численные значения  $V_z/V_g$  существенно уменьшаются в пределах всего пограничного слоя. При  $V_g > 25$  м/с величины  $V_z/V_g$  практически перестают меняться. На рис. 3.5 видно, что влияние  $V_g$  на  $V_z/V_g$  наиболее существенно при слабых скоростях, с ростом  $V_g$  влияние уменьшается.

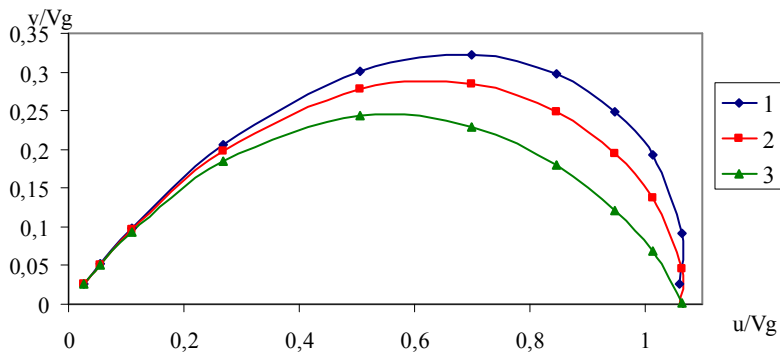


Рис. 3.5. Годографы вектора ветра при равновесных условиях для теплового периода: 1 —  $V_g=8$  м/с; 2 —  $V_g=12$  м/с; 3 —  $V_g=18$  м/с

2. Влияние стратификации на вертикальный профиль ветра заключается в следующем. В самых нижних слоях (приблизительно несколько десятков метров) наибольшие значения скорости ветра наблюдаются при неустойчивой стратификации, выше — соотношение обратное. Высота обращения скорости ветра составляет около 50 м и практически не зависит от сезона. От характера стратификации зависит высота, на которой составляющая скорости достигает максимальных значений. При устойчивой стратификации (инверсии) обращает на себя внимание усиление скорости ветра в некотором слое у верхней границы инверсии ( $h_{ин}$ ), которое носит характер струи (мезоструи). Высота максимума скорости в струе практически совпадает с высотой инверсии.

3. Влияние подстилающей поверхности определяется значением параметра шероховатости. Параметры шероховатости значительно меняются от лета к зиме, примерно в 25 раз. Уменьшение параметра шероховатости приводит к снижению турбулентного обмена в пограничном слое, а следовательно, к уменьшению его высоты и угла отклонения ветра от географического.

Город оказывает на распределение ветра как динамическое, так и термическое влияние (рис. 3.6).

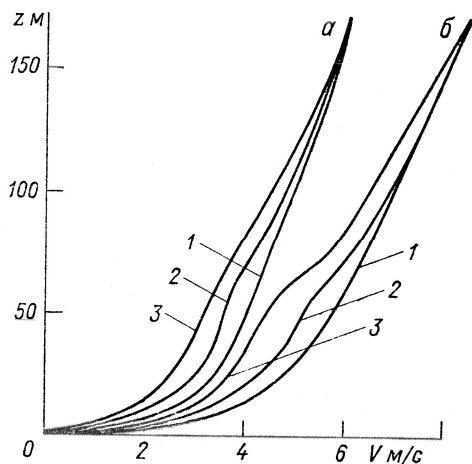


Рис. 3.6. Профили ветра над открытой местностью (1) и городом (3) для скорости ветра 7,5 м/с (а) и 12 м/с (б)

Приведенные данные иллюстрируют известное уменьшение скорости ветра над городом. Влияние города на скорость ветра остается большим на протяжении всего 200-метрового слоя.

При анализе профилей ветра в зависимости от стратификации атмосферы целесообразно выполнить нормирование скорости ветра. Ввиду неопределенности параметра шероховатости, связанной с неоднородностью подстилающей поверхности, модуль скорости ветра нормировался на скорость ветра на уровне 900 м. Поскольку значение  $V_{900}$  близко к  $V_g$ , по этим данным с известным приближением можно оценивать географический коэффициент трения.

Исходя из приведенного анализа можно констатировать, что на изменение скорости ветра с высотой оказывает влияние суточный ход и время года. Для исключения этого влияния профили ветра могут быть сгруппированы по срокам радиозондирования (утро, день) и по сезонам года. Приведем сгруппированные по ансамблю профили, полученные для условий приподнятых и приземных инверсий для г. Перми. Целесообразно было задавать их в виде непрерывных функций, обладающих гладкостью. Это может быть обеспечено при аппроксимации экспериментальных профилей кубическим сплайном. Кубический сплайн в точках наблюдений состыкован таким образом, что производные до второго порядка включительно непрерывны на всем рассматриваемом промежутке. Сплайн обеспечивает большую гладкость функции, чем кусочно-линейная интерполяция. В этом случае при использовании сглаженных профилей ветра в качестве начальных или граничных условий в моделях переноса примеси характеристики турбулентного обмена будут отражены более естественно, чем при задании профилей с изломом [11].

Для сглаживания профилей использовалась интерполяция кубическим сплайном с шагом 50 м от поверхности земли до высоты 900 м. Относительная скорость ветра соответствовала высотам 100, 300, 600 и 900 м над поверхностью земли. Общий вид кубического сплайна определяется следующей формулой:

$$U(z) = A + B(z - z_0) + C(z - z_0)^2 + D(z - z_0)^3,$$

т. к. на границе интервала 1-2 сплайна используется условие

$$\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)_1 = \left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)_2 \quad \text{и} \quad \left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right)_1 = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right)_2,$$

что означает непрерывность как самой функции, так первых и вторых производных. Следовательно, коэффициенты сплайна двух соседних интервалов будут связаны друг с другом. В этом случае можно ввести коэффициенты для каждого интервала:  $m_0; m_1; m_2; m_3; m_4$  для случая пяти высот и пяти величин скоростей ветра ( $U_0 \dots U_4$ ).

При определении коэффициентов ставится условие

$$m_0 = m_4 = 0.$$

Для определения этих коэффициентов используется система уравнений



$$\begin{cases} \frac{h_1 + h_2}{3} m_1 + \frac{h_2}{6} m_2 = \frac{U_0}{h_1} - 3 \left( \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right) U_1 + \frac{U_1}{h_1} \\ \frac{h_2}{6} m_1 + \frac{h_2 + h_3}{3} m_2 + \frac{h_3}{6} m_3 = \frac{U_1}{h_2} - \left( \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_3} \right) U_2 + \frac{U_3}{h_3} \\ \frac{h_3}{6} m_2 + \frac{h_3 + h_4}{3} m_3 + \frac{h_4}{6} m_4 = \frac{U_2}{h_3} - \left( \frac{1}{h_3} + \frac{1}{h_4} \right) U_3 + \frac{U_4}{h_4} \end{cases}$$

Здесь  $h_1=100$  м;  $h_2=300$  м;  $h_3=600$  м;  $h_4=900$  м.

После расчета коэффициентов скорость ветра на любой высоте  $z$  (от поверхности земли до 900 м) может быть определена по формуле

$$U(z) = m_i \frac{(z_{i+1} - z)^3}{6h_{i+1}} + m_{i+1} \frac{(z - z_i)^3}{6h_{i+1}} + \left( U_i - m_i \frac{h_{i+1}^2}{6} \right) \frac{z_{i+1} - z}{h_{i+1}} + \left( U_{i+1} - m_{i+1} \frac{h_{i+1}^2}{6} \right) \frac{z - z_i}{h_{i+1}},$$

где  $z_i$  – высота нижнего уровня,  $z_{i+1}$  – высота верхнего уровня,  $h_{i+1}$  – толщина слоя.

В результате интерполяции были получены коэффициенты сплайна для каждого из типов выбранной классификации [54].

Сглаженные профили ветра для различных типов инверсий в утренние и дневные сроки представлены на рис. 3.7. Анализ приведенных рисунков позволяет сформулировать следующие закономерности изменения ветра с высотой:

- Днем в летнее время происходит нарастание скорости ветра до высоты 300 м, затем скорость ветра остается неизменной. Весной рост наблюдается до высоты 150 м, затем после снижения скорости ветра происходит ее некоторое увеличение. Зимой и осенью профили ветра схожи. После роста скорости в приземном слое до высоты около 120 м либо наблюдается небольшой рост, либо скорость незначительно уменьшается и затем растет.
- В ночное время летом происходит значительное нарастание скорости ветра до значений выше геострофического (вследствие обращения ветра), затем отмечается снижение скорости ветра.
- Весной после быстрого роста скорости ветра до высоты 250 м она остается почти неизменной.
- Зимой и осенью профили ветра практически не отличаются. До высоты 150 м наблюдается рост скорости ветра, затем незначительное снижение и снова рост скорости.

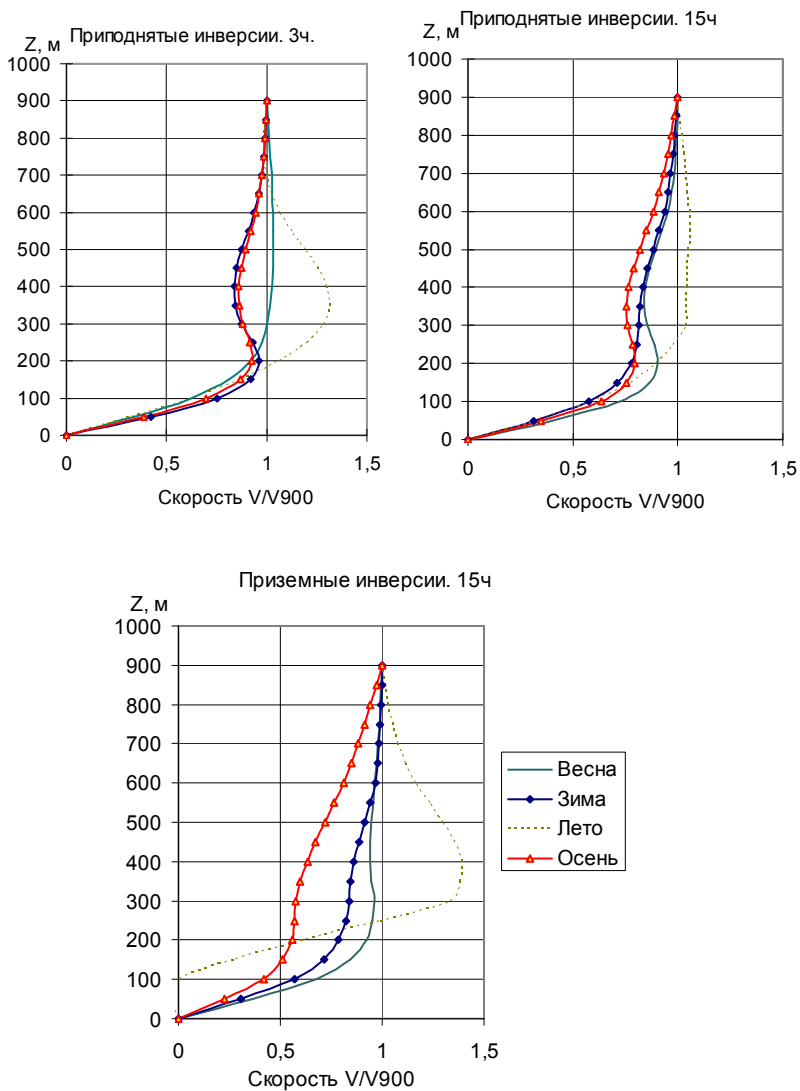


Рис. 3.7. Вертикальные профили ветра в различные сезоны при разных типах инверсий

Известно также, что характер изменения скорости ветра с высотой зависит от типа барического поля. В связи с этим исходные данные группировались по следующим категориям. Выделялось 5 типов барических полей: циклон, антициклон, малоградиентное поле, барическая ложбина, барический гребень. При анализе особенностей профилей по перечисленным типам барических полей учитывалось время суток (03 или 15 ч) для холодного (октябрь-март) и теплого (апрель-сентябрь) периода.

Профили ветра, построенные для различных типов барического поля, имеют ряд особенностей. В барической ложбине характерен быстрый рост скорости ветра с высотой до 8-10 м/с на высоте 270-300 м. Наиболее быстрый рост скорости ветра на нижних уровнях (до 300м) наблюдается в холодную половину года как утром, так и днем, что объясняется особенностями подстилающей поверхности в этот период (наиболее резкий изгиб на высотах 100-200 м.). Выше 300 м этот рост замедляется или прекращается. Для теплого периода года отмечается менее интенсивный рост скорости ветра на нижнем уровне (более плавный изгиб профиля) по сравнению с предыдущим случаем.

В барическом гребне характерен быстрый рост скорости ветра до 6-8 м/с на высотах 300-400 м. Наиболее интенсивный рост на нижнем уровне наблюдается в холодный период как утром, так и днем. Выше 800 м скорости с высотой практически не изменяются.

Профили ветра в циклоне подобны профилям для барической ложбины. До высоты 300 м наблюдается нарастание скоростей ветра до 9-12 м/с. Выше 300 м в теплый и холодный период днем скорости ветра продолжают расти, но медленнее. Профили ветра в антициклоне также подобны профилям для барической ложбины. Для этой ситуации характерен резкий рост скоростей ветра до значений 7-9 м/с на высоте около 300 м. Наиболее интенсивный рост скоростей наблюдается в холодный период, при этом на высоте выше 300 м происходит постепенный, медленный рост скоростей ветра с высотой.

В малоградиентном поле всегда отмечается быстрый рост скорости ветра с высотой до 6-8 м/с в слое до 300 м. В холодный период года этот рост чуть более интенсивнее, чем в теплый. Выше 300 м наблюдается постепенный рост скорости ветра.

Таким образом, в результате аппроксимации сплайном найденные коэффициенты разложения позволяют восстановить профили ветра и получить различные дифференциальные характеристики, используемые при моделировании переноса загрязняющих веществ в атмосфере.

### **3.4. Анализ синоптических условий, способствующих переносу примесей от испытательного стенда**

Анализ синоптической обусловленности загрязнения воздуха необходим в связи с тем, что с синоптической ситуацией и соответствующими ей условиями погоды связана интенсивность загрязнения воздуха [11; 55]. Синоптическая ситуация в определенной степени отражает сложное совместное влияние на уровень загрязнения атмосферы ряда метеофакторов.

Рассмотрим два типа условий накопления и переноса примесей от испытательного стенда:

- 1) способствующие переносу загрязнения от высоких источников;
- 2) благоприятствующие длительному накоплению примесей в районе испытательного стенда и их возможному переносу на жилые районы города.

В качестве обобщенной характеристики загрязнения воздуха по городу в целом используется рекомендованный ГГО им. Воейкова параметр  $P=m/n$ , где  $n$  – общее количество наблюдений за концентрациями примесей в городе в течение одного дня на всех стационарных пунктах,  $m$  – количество наблюдений в течение этого же дня при значениях  $q$ , превышающих среднесезонную величину  $q_{\text{ср}}$  более чем в 1,5 раза ( $q > 1,5 q_{\text{ср}}$ ). Таким образом, параметр  $P$  характеризует отношение повышенных концентраций к общему числу измерений в течение дня [56]. При  $P > 0,35$  уровень загрязнения воздуха считается высоким, при  $0,21 < P \leq 0,35$  – повышенным, при  $0,10 \leq P < 0,20$  – относительно пониженным, при  $P < 0,10$  – низким.

Наиболее неблагоприятными для г. Перми являются условия, сопровождаемые ветрами южной четверти, которые преобладают в городе в целом за год и в зимний сезон [56]. Высокому уровню загрязнения соответствуют средние скорости ветра (4-5 м/с), т. е. наибольший

«вклад» в загрязнение города вносят высокие источники (1-й тип условий повышенного загрязнения).

Рассматривались следующие типы синоптических полей:

1. Стационарный антициклон.
2. Западная, северо-западная периферии антициклона.
3. Малоградиентное поле повышенного или пониженного давления.
4. Ситуации 1, 2, 3 длительностью не более 1 сут.
5. Периферии антициклона.
6. Передняя часть циклона, теплый сектор.
7. Ложбина, центр циклона.
8. Тыл циклона.

Анализ данных ситуации показал, что наибольшая повторяемость (32%) соответствует типу 5 (периферии антициклона). Большая повторяемость характерна также для типа «центр» и «передняя часть циклона» (ситуации 6 и 7) – 20% и 17% соответственно (рис. 3.8), что подтверждает результаты, полученные Э.Ю. Безуглой и Л.Р. Сонькиным [43-45; 47; 48]. Ситуация 1 (стационарный антициклон) в период с 1997 по 1999 г. наблюдалась в одном случае.

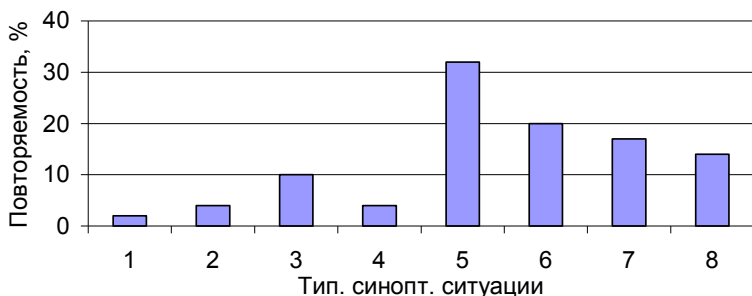


Рис. 3.8. Повторяемость типов синоптических условий, способствующих переносу от высоких источников

Наибольшая повторяемость периферии антициклона в отдельные месяцы приходится на зимний период, март, август, сентябрь и ноябрь. Для октября характерна передняя часть циклона, теплый сектор, а для июля – малоградиентные поля [55]. В апреле одинаково часто встре-

чаются периферии антициклона и его центр, передняя часть циклона (5, 6 и 7), так же как в мае, – малоградиентные поля и тыл циклона.

Высокая загрязненность отмечается в малоградиентных полях, где максимальное значение параметра  $P$  составило 0,37. На рис. 3.9 показаны повторяемости синоптических ситуаций, способствующие переносу от высоких источников при  $P > 0,20$ . Повышенное загрязнение воздуха наблюдается чаще всего на перифериях антициклона (38%), низкое загрязнение – в ложбине, центре циклона, а также в передней и тыловой частях циклона, в теплом секторе. Полученные результаты согласуются с выводами работ [9; 44]. При сохранении одного и того же типа более 3 дней происходит нарастание параметра  $P$ , т.е. рост загрязнения.

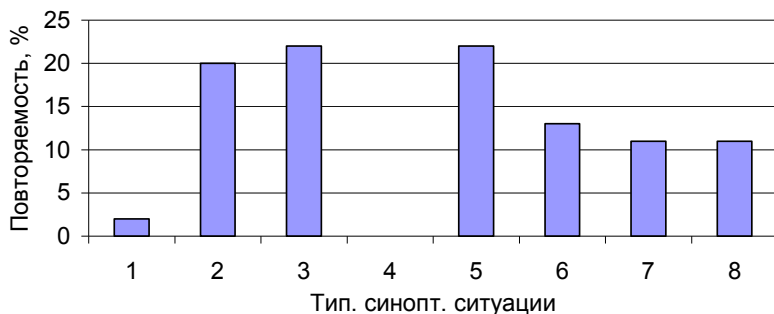


Рис. 3.9. Повторяемость типов синоптических условий, способствующих застою воздуха

Условия повышенного загрязнения 2-го типа характеризуются слабым и неустойчивым ветром у земли. Они благоприятствуют длительному накоплению примесей в промышленных районах и их возможному переносу на жилые районы города. Для анализа также привлекался параметр  $P$ , а типы синоптических условий выбирались прежние.

На рис. 3.9 показана повторяемость синоптических ситуаций, способствующих застою воздуха. Из рисунка видно, что наибольшая повторяемость (22%) соответствует малоградиентному полю и перифериям антициклона, 20% – второму типу (западная, северо-западная периферии антициклона).

Высокая загрязненность отмечается в малоградиентных полях и на перифериях антициклона (типы 3, 5 и 2), где максимальное значение параметра  $P$  составило 0,47. На рис. 3.10 показаны повторяемости синоптических ситуаций, способствующие застоям воздуха, при  $P > 0,20$ . Повышенное загрязнение воздуха чаще всего наблюдается на перифериях антициклона (40%) и в малоградиентных полях – 27% (типы 5 и 3). Низкое загрязнение воздуха чаще всего характерно для ложбин, центральной и тыловой части циклона.

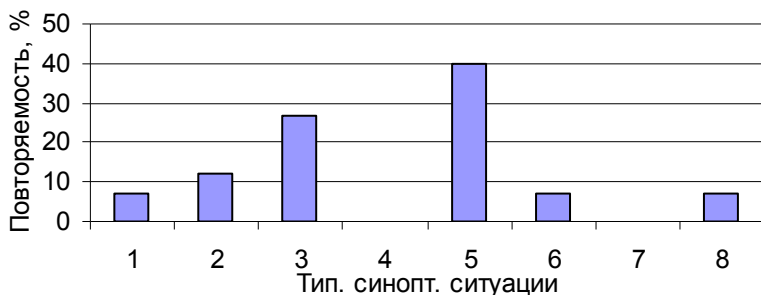


Рис. 3.10. Повторяемость типов синоптических условий, способствующих застоям воздуха, при  $P > 0,20$

В целом ряде работ [11; 34; 39; 44] указывается, что случаи опасного загрязнения отмечались в передней части и теплом секторе циклона, в малоградиентном поле пониженного давления. Для г. Перми также были отмечены нетипичные синоптические ситуации, при которых поддерживалось повышенное загрязнение в городе. В октябре 1998 г. при  $P=0,25$  наблюдалась передняя часть циклона и в январе 1997 г. при  $P=0,22$  – тыл циклона, что не соответствует общим представлениям о синоптических ситуациях, способствующих накоплению примесей. Одна из причин такой несогласованности – неправильное определение типов синоптических ситуаций.

Наибольшее загрязнение воздуха связано преимущественно с существованием антициклонального и малоградиентного поля повышенного давления [11; 34; 39; 44], это хорошо согласуется с полученными результатами для г. Перми. Из рассмотренных 2 типов условий накопления и переноса примесей от испытательного стенда в обоих случаях

наибольшая повторяемость соответствует типу 5 (периферии антициклона) в течение января, февраля, марта и ноября. Для октября характерна передняя часть циклона, теплый сектор, а для июля – малоградиентные поля. Высокая загрязненность отмечается в малоградиентных полях, повышенная – на перифериях антициклона и низкая – в ложбине, центре и тыловой части циклона. При сохранении одного и того же типа синоптической ситуации более 3 дней происходит нарастание параметра  $P$ , т.е. увеличение концентрации вредных примесей в атмосфере.

### **3.5. Прогноз неблагоприятных погодных условий, способствующих накоплению примесей в атмосфере**

В результате предварительного анализа можно определить условия, при которых возможно накопление примесей и их перенос на жилые районы от испытательного стенда.

Высокая загрязненность отмечается в малоградиентном поле повышенного давления. Повышенное загрязнение воздуха чаще всего наблюдается в стационарных антициклонах и на перифериях антициклонов. Наибольшее загрязнение связано преимущественно с существованием антициклонального и малоградиентного поля повышенного давления. Повышенное загрязнение воздуха можно также ожидать и при нетипичных синоптических ситуациях, при которых тоже возможно накопление примесей и их перенос на жилые районы от испытательного стенда, это теплый сектор и тыловая части циклона.

Наиболее оптимальные условия для интенсивного загрязнения приземного слоя воздуха возникают при слабых ветрах, поскольку упорядоченный горизонтальный перенос и турбулентная диффузия при этом ослаблены. В январе, феврале, марте и августе необходимо ожидать наибольшее количество случаев слабого и неустойчивого ветра со скоростью 0-1 м/с продолжительностью более 12 ч, так как за это длительное время образуются застои воздуха и происходит накопление вредных примесей. Такие условия характеризуются слабым вертикальным обменом, когда высокие концентрации вредных примесей поддерживаются в течение длительного времени (условия застоя). Они соответствуют следующей синоптической обстановке: малоградиентные поля повышенного или пониженного давления, ось барического гребня.



Наряду с этим могут быть выделены периоды с юго-западным (200-240°) направлением ветра со скоростью 4-7 м/с у земли и на высоте 100 м продолжительностью более 6 ч. Такие периоды наблюдаются в течение всего года, но максимальное число периодов отмечается в декабре.

## 4. ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ

### 4.1. Основы организации пунктов мониторинга

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 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. 4.1).

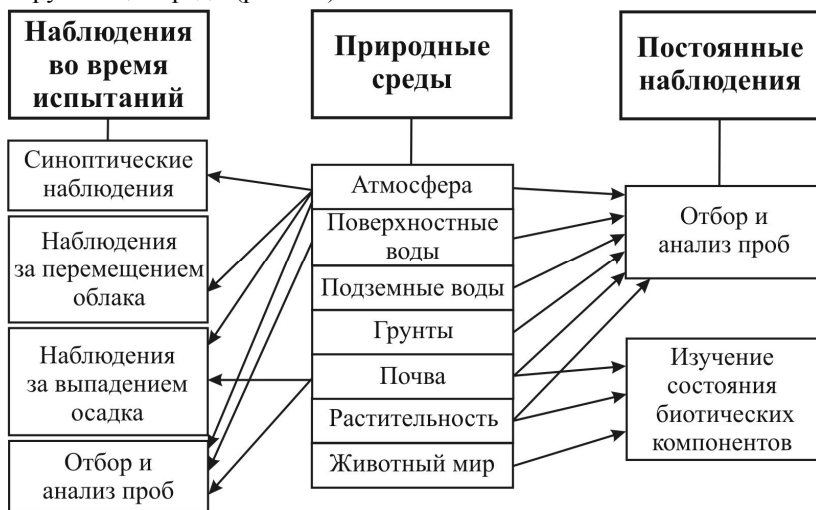


Рис. 4.1. Система наблюдений для оценки воздействия сжигания ракетного топлива на окружающую среду

Наблюдения во время испытаний позволяют определить степень, зону и продолжительность загрязнения атмосферы, характер 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 характер накопления загрязнения 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 особенности проведенных наблюдений и их предварительные результаты изложены ниже.

#### 4.2. Наблюдения за перемещением облака

Инструментальные наблюдения за перемещением облака, образующегося во время испытаний, позволяет определить скорость его перемещения, высоту заброса продуктов сгорания и др. По изменению формы облака можно получить некоторые представления о происходящих в нем процессах. Наряду с инструментальными наблюдениями полезную информацию дает фото- и видеосъемка.

При инструментальных наблюдениях определяется горизонтальное и вертикальное перемещение облака, для чего может быть использован шаропилотный теодолит. Ввиду того что облако имеет значительные размеры, определяется перемещение переднего фронта облака (рис. 4.2).

Схема наблюдений за облаком

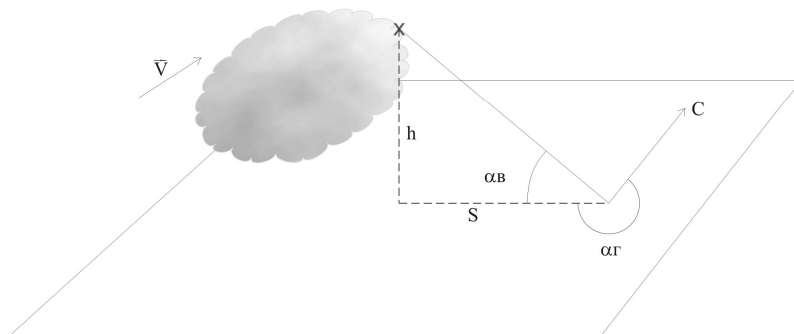


Рис. 4.2. Схема наблюдений за облаком

Горизонтальный угол  $\alpha_r$  представляет собой азимут переднего фронта облака. При обработке наблюдений привлекается дополнительная информация о расстоянии до точки выпуска облака и о направлении и скорости ветра на высоте 100 и 400 м. В этом случае, зная направление и скорость ветра, а также момент времени от начала движения облака до момента отсчета углов, можно определить приращения координат траектории облака по формуле

$$\Delta X_i = - \Delta t_i * V * \sin(dd); \quad \Delta Y_i = - \Delta t_i * V * \cos(dd),$$

где  $\Delta t_i$ - приращение времени с момента предыдущего ( $i$ -го отсчета),

$V$  - скорость ветра на данной высоте ( $\vec{V}$  - вектор ветра),

$dd$  - направление ветра (его азимут).

Кроме координат траектории облака определялось расстояние от точки наблюдений до облака  $S$ . Такие расстояния устанавливались для каждого наблюдения, после чего вычислялась текущая высота подъема облака  $h$ . Для этой цели использовались отсчеты вертикальных углов  $\alpha_B$ . Совместно с расчетом высоты подъема определялась средняя скорость подъема как частное от деления высоты на общее время подъема.

Инструментальные наблюдения за перемещением облака продуктов сгорания были проведены при 3 испытаниях (11 мая, 28 мая и 5 июня). В первых двух случаях точка наблюдения располагалась в 560 м от места проведения испытаний. Динамика изменения конфигурации облака представлена на рис. 4.3 и 4.4. Точка съемки совпадала с точкой инструментальных наблюдений. В третьем случае точка наблюдения располагалась в районе д. Трухинята, на расстоянии 3,7 км от стенда. Внешний вид облака с той же точки представлен на рис. 4.5. Пример результатов инструментальных наблюдений представлен в табл. 4.1.

Во всех трех испытаниях облако продуктов сгорания поднялось на высоту более 1 км от поверхности земли. Верхний край облака достигал высоты 1,5 км, а визуально наблюдаемый нижний край находился не ниже 0,8 – 1,0 км. Достигнутая высота подъема облака сохранялась на протяжении всего периода визуальных наблюдений (около 20 мин). При этом удаление облака от стенда достигало 20 км.

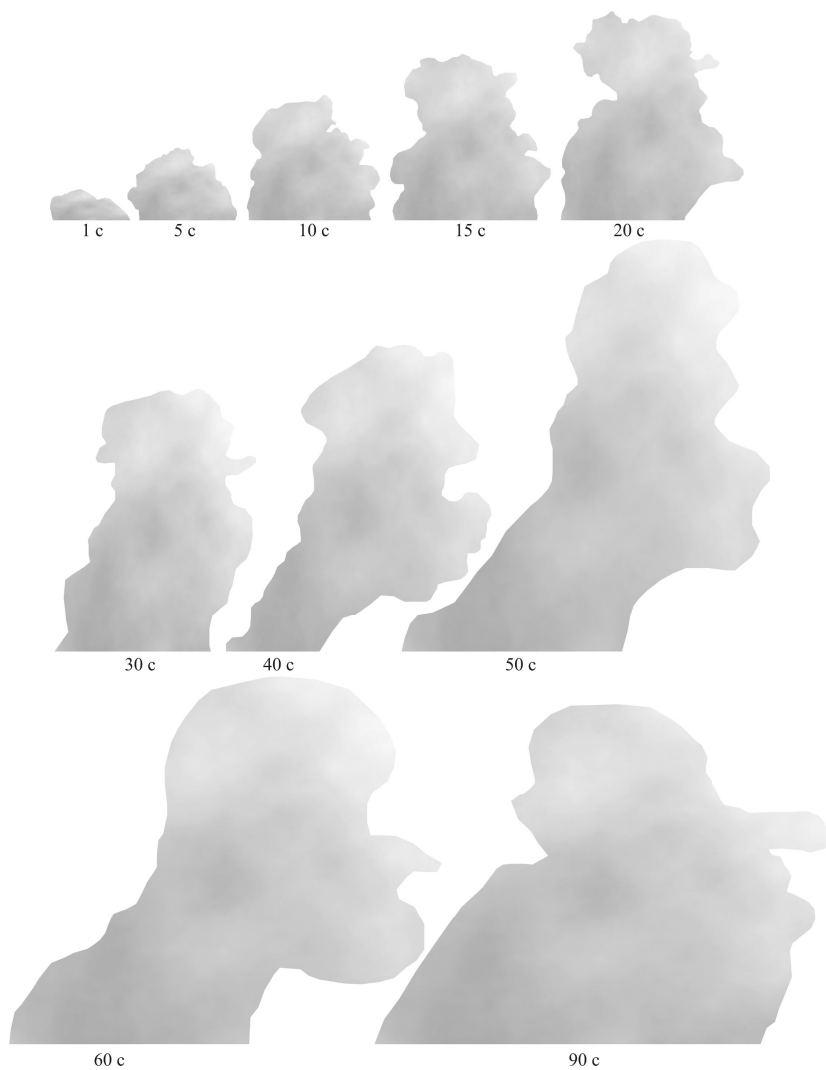


Рис. 4.3. Изменение формы облака во времени (испытание 11 мая)



Рис. 4.4. Изменение формы облака во времени (испытание 29 мая)



Рис. 4.5. Внешний вид облака, испытание 5 июня

Таблица 4.1. Результаты обработки наблюдений за перемещением облака

Время, с	Угол гор.	Угол вер.	L1	x	y	x набл.	y набл.	S,m	h, м	w, м/с
0	268,2	2,7	564	0	0	-560	-55			
30	350	35,5		180	312	-380	262	461	297	9,9
90	14	39,2		540	935	-20	885	886	655	7,3
135	26	33		1125	1273	565	1223	1347	787	5,8
180	31,8	27,5		1709	1610	1149	1560	1938	895	5,0
240	35,5	24,4		2489	2060	1929	2010	2786	1109	4,6
280	37,8	21,8		3008	2360	2448	2310	3366	1166	4,2
360	42	18,4		4047	2960	3487	2910	4542	1277	3,5
410	41,5	19		4697	3335	4137	3285	5283	1545	3,8
600	46,1	13,9		7165	4760	6605	4710	8113	1606	2,7

Примечания: L1- расстояние от точки наблюдений до точки пуска; x, y - координаты относительно точки пуска (траектория облака); x набл., y набл.- координаты облака относительно точки наблюдений; Sm- расстояние от точки наблюдений до переднего края облака; h - высота подъема верхнего края облака; w - средняя скорость подъема от момента выпуска до данного срока наблюдений.

### 4.3. Наблюдения за выпадением загрязнителей из облака на земную поверхность

Основными загрязнителями, выпадение которых возможно на земную поверхность в заметных количествах, являются HCl и окислы алюминия.

Для оценки величин выпадения HCl на земную поверхность разработана методика, заключающаяся в расстановке специальных ловушек по траектории движения облака.

Ловушки представляют собой емкости с одинаковой площадью открытой поверхности, заполненные дистиллированной водой или раствором 0,01 н Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Во время испытаний 28 и 29 мая ловушки были установлены в трех точках в районе стенда (рис. 4.6). Контроль осуществлялся по двум параметрам – pH и Cl<sup>-</sup>. Во время этих испытаний определялся также оптимальный объем растворов, заливаемых в ловушки (см. табл. 4.2).

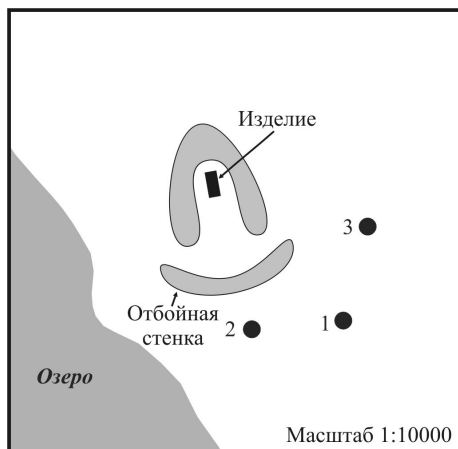


Рис. 4.6. Схема точек наблюдения во время испытаний 28 мая и 29 мая

За счет выпадения из облака в ловушке происходит увеличение содержания Cl<sup>-</sup> и снижение pH. Как показали испытания, использование 0,01 н раствора Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> объемом 0,25 л на одну ловушку позволяет повысить чувствительность метода. Указанные параметры ловушек были использованы во время испытаний 5 июня.



Таблица 4.2. Экспериментальные наблюдения по оценке возможности контроля выпадений хлористого водорода во время испытаний 28 и 29 мая

№ точки	28 мая (объем жидкости 0,50 л)				29 мая (объем жидкости 0,25 л)			
	H <sub>2</sub> O		Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		H <sub>2</sub> O		Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	
	pH	Cl <sup>-</sup>	pH	Cl <sup>-</sup>	pH	Cl <sup>-</sup>	pH	Cl <sup>-</sup>
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
Усл. фон	7,15	2,50	10,37	4,60	6,24	2,50	10,35	4,60

При испытаниях 5 июня ловушки были установлены в 13 точках в районе стенда по направлению ветра, фиксировавшегося до испытаний. К сожалению, раствор из двух ловушек на западной оконечности профиля был вылит местными жителями. Полученные значения pH и содержания Cl<sup>-</sup> показаны на рис. 4.7.

Увеличение содержания Cl<sup>-</sup> в ловушках показывает принципиальную возможность использования этого метода для контроля выпадений HCl. Для количественной оценки выпадения HCl из облака необходима разработка оптимальной сети наблюдения по его следу.

Отметим также, что предпринимались попытки обнаружения твердых частиц окиси алюминия в ловушках. Однако его концентрации оказались ниже чувствительности методов.

#### 4.4. Изучение состава твердой фазы выбросов

Основными компонентами твердой фазы выбросов, образующихся при испытаниях, являются различные модификации оксида алюминия, т.е. формы, имеющие одинаковый химический состав, но различное строение кристаллической решетки и, следовательно, различные свойства. Оксид алюминия как встречается в природных условиях, так и получен искусственно.

Как известно, стабильной формой безводного оксида алюминия в природных условиях является корунд  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – конечный продукт обезвоживания гидро- и оксигидроксидов алюминия.

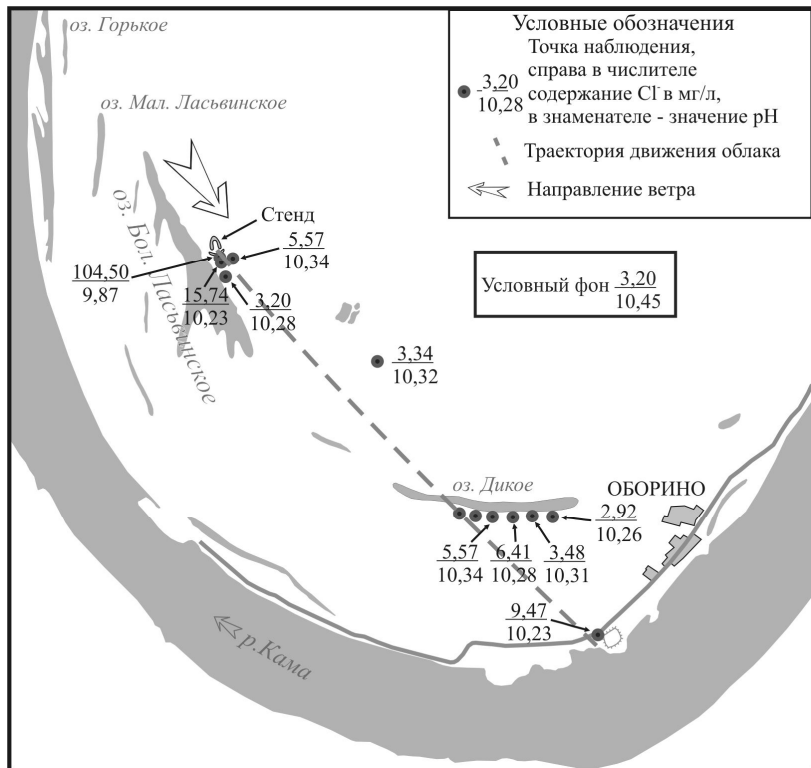


Рис. 4.7. Экспериментальные наблюдения за выпадением хлористого водорода в ловушки с раствором  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  во время испытания 5 июня

Корунд химически стоек по отношению ко многим химическим реагентам и расплавам. Он очень медленно реагирует с растворами щелочей и кислот даже при высоких температурах. Корунд обладает высокой твердостью (9 по шкале Мооса), практически не гигроскопичен, т. е. не поглощает влаги при хранении. Плотность  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$   $4 \text{ г/см}^3$ , температура плавления  $2050^\circ\text{C}$ , температура кипения около  $3500^\circ\text{C}$ . Теплота образования  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  по реакции  $2\text{Al}_{\text{тв}} + 1,5\text{O}_{2\text{газ}} = \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  составляет примерно  $1675 \text{ кДж/моль}$ , теплота плавления  $25 \text{ кДж/моль}$ , теплота испарения примерно  $630 \text{ кДж/моль}$  [13; 52].

Существуют также 5 промежуточных безводных фаз  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\chi\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\Theta\text{-Al}_2\text{O}_3$  и  $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ . При кристаллизации расплавленного

глинозема, содержащего примеси соединения щелочных и щелочноземельных металлов, может быть получена  $\beta$  - разновидность оксида алюминия. Исследованиями установлено, что  $\beta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  не является чистым оксидом алюминия, а представляет собой химическое соединение  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с оксидами щелочных и щелочноземельных металлов ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Твердость и плотность  $\beta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  меньше, чем корунда. При нагревании до температуры 1600 - 1700 °С происходит разложение  $\beta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  и превращение его в  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  [52].

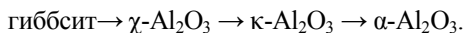
$\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  имеет кристаллическую решетку кубической сингонии (типа шпинели). В зависимости от температуры получения кристаллизуется как в скрытокристаллической (высокодисперсной), так и в явно кристаллической формах. В природе  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  не встречается, может быть получен при нагревании одноводного гидроксида алюминия (бемита) до 500°С. При дальнейшем нагревании  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  превращается в  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Температура превращения  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  в корунд зависит от химической природы стабилизирующего оксида. Если стабилизирующим оксидом является вода, то превращение происходит в температурном интервале 850 - 1050°С; в присутствии оксида лития  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  превращается в  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  при температуре выше 1500°С. Превращение  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  в  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  сопровождается уменьшением объема на 14,3 % и выделением 92 кДж/моль тепла. Оксид алюминия может получаться из других гидроксидов алюминия. По некоторым данным бемит трансформируется при нагревании ~ 430°С в  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; при этой температуре кристаллы обычно чрезвычайно мелкие. Дальнейшее нагревание до температуры около 950°С приводит к увеличению размера кристаллов, но структурные изменения ведут к образованию промежуточных метастабильных фаз  $\delta$ - и  $\Theta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Нагревание выше 1000°С ведет к образованию корунда [26; 52].

В отличие от  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$   $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  хорошо растворяется как в кислотах, так и в щелочах. При 400 - 500°С  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  легко взаимодействует с фтористым водородом, образуя  $\text{AlF}_3$ . Скрытокристаллический  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  обладает большой способностью поглощать влагу (сильно гигроскопичен), а также другие вещества. Плотность  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  3,42 г/см<sup>3</sup>, теплота образования 1583 кДж/моль [52].  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  входит в состав так называемого технического глинозема [8].

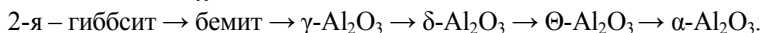
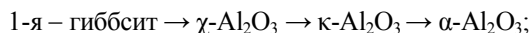
Оксид алюминия – соединение амфотерное, т.е. обладает одновременно основными и кислотными свойствами. Поэтому оксид, а также его гидроксиды растворяются как в кислотах, так и в щелочах.

Известны гидратированные (водные) формы  $Al_2O_3$  различного состава. Наиболее обычной является гиббсит –  $\gamma-Al(OH)_3$ . Две другие модификации, байерит и нордстрандит, более известны как синтетические минералы, хотя встречаются и в горных породах. Есть также два оксигидроксида алюминия, встречающиеся в природных условиях: диаспор  $\alpha-AlO(OH)$  и бемит  $\gamma-AlO(OH)$ .

Дегидратация диаспора ведет непосредственно к образованию корунда. Термические преобразования гиббсита зависят от многих факторов: размера кристаллов, скорости нагрева, характера атмосферы, в которой ведут нагрев, и т.п. Для кристаллов размером менее 1 мкм имеет место реакция



Для более крупных кристаллов гиббсита первым продуктом нагрева (до 200°C) является бемит. Поэтому обычно при нагревании гиббсита наблюдаются две параллельные серии:



Термическая трансформация байерита также включает 2 серии реакций. Тонкокристаллический байерит при 150-200°C переходит главным образом в  $\gamma-Al_2O_3$  с малым размером кристаллов. Более крупнозернистый материал дает смесь бемита и  $\gamma-Al_2O_3$ . При более высоких температурах все формы оксида алюминия превращаются в корунд.

Дифрактограммы различных модификаций оксида алюминия часто невыразительны, так как фазы слабо раскристаллизованы. Самые сильные их рефлексы имеют очень близкие межплоскостные расстояния, так как структуры этих фаз имеют схожие модели плотнейшей упаковки атомов кислорода. Если еще учесть зависимость продукта реакции от размера кристаллов и условий нагрева, в результате чего одновременно образуются две или более фаз, то рентгеноструктурным анализом разделение промежуточных фаз не всегда просто [60].

Действия на человека  $Al_2O_3$  заключаются, с одной стороны, в механическом раздражении легочной ткани, с другой – в осаждении бел-

ков и образовании необратимых белковых соединений в виде волокнистых субстанций без признаков воспаления. При вдыхании пыли оксида алюминия поражаются главным образом легкие, развивается заболевание, называемое алюминозом легких.

Для исследования состава твердой фазы твердых продуктов сгорания было отобрано 4 образца в районе отбойной стенки испытательного стенда. Состав их был изучен методом рентгеноструктурного анализа В.Г. Шлыковым. В пробах обнаружены кристаллические фазы  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (корунд) до 19 %, в меньших количествах  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\delta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\Theta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\kappa$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  – до 17 % суммарно.

Для двух проб выполнен анализ водной вытяжки. Водная вытяжка порошка имеет  $\text{pH} \sim 5,5$ - $5,8$  и хлоридно-кальциевый состав. Содержание водорастворимых компонентов составляет 0,7-2,1 г/кг (табл. 4.3). По этим данным основным компонентом, который может переходить в природные воды и мигрировать в водной среде, является  $\text{Cl}^-$  – 289-968 мг/кг. В меньших количествах в водорастворимых формах присутствуют сульфаты, кальций, натрий и соединения азота. Алюминий в водные растворы переходит незначительно ввиду небольшой кислотности вытяжки. Его содержание составляет 0,3-1,2 мг/кг грунта.

Таблица 4.3. Химический состав водной вытяжки твердых продуктов сгорания, мг/кг грунта

№ проб.	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{NO}_2^-$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{Fe}^{3+}$	$\text{Fe}_{\text{общ}}$	$\text{Al}^{3+}$	Сум-ма	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

**Изучение загрязнения почвогрунтов.** Для изучения загрязнения почвогрунтов проводился отбор как непосредственно в районе стенда, так и по трем профилям протяженностью до 4.1 км от стенда (см. рис. 4.8). Отобранные на трех профилях в районе стенда пробы представлены почвенно-растительным слоем мощностью до 10 см и подстилающим песком. Исключение составляют пробы 21-23 и 25, расположенные на профиле 3, в которых почвенно-растительный слой подстилается суглинком. Из грунтов проводились водные вытяжки, в которых определялись  $\text{pH}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cl}^-$ . Твердая фаза исследовалась рентгеноскопически для выявления твердых техногенных компонентов, прежде всего оксидов алюминия.



Рис. 4.8. Схема опробования почвогрунтов в районе открытого стенда

Для проб почвогрунтов 4, 7, 10 и 13 был выполнен рентгеноструктурный анализ, которому предшествовала специальная подготовка проб для обогащения их  $Al_2O_3$ .

Рентгеноструктурный анализ показал, что минеральный состав большинства проб, подготовленных по специальной методике, весьма схож. Они содержат кварц, плагиоклаз, примесь калиевых полевых шпатов. В пробе 13 присутствует небольшое количество доломита. Из глинистых минералов в пробе 4 есть смектит, в пробах 7 и 10 – смектит, хлорит и гидрослюда, а в пробе 13 – смектит, каолинит, хлорит и иллит.

Техногенные продукты обнаружены только в пробе 4, расположенной в 150 м от отбойной стенки. В ее составе обнаружено значительное количество техногенного оксида алюминия: 17-18%  $\alpha-Al_2O_3$  (корунда) и 10-11%  $\delta-Al_2O_3$  (не исключена и  $\gamma$ -форма). В остальных пробах искусственных кристаллических образований не установлено.

Содержание хлоридов, алюминия и значения рН водной вытяжки почвогрунтов в районе стенда представлены на рис. 4.9. 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 в районе стенда содержание Cl незначительно и в среднем составляет около 20 мг/кг. 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 почвогрунтов и содержание в них подвижных форм алюминия не выявлено. Изменение значения водородного показателя почво-грунтов на профилях объясняется естественными условиями. Снижение рН наблюдается на заболоченных участках, с чем связано некоторое увеличение в вытяжке содержания алюминия, подвижного в кислой среде.

**Состав водопроявлений в районе стенда.** 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 лужи перед отбойной стеной и западнее стенда (см. рис. 4.10).

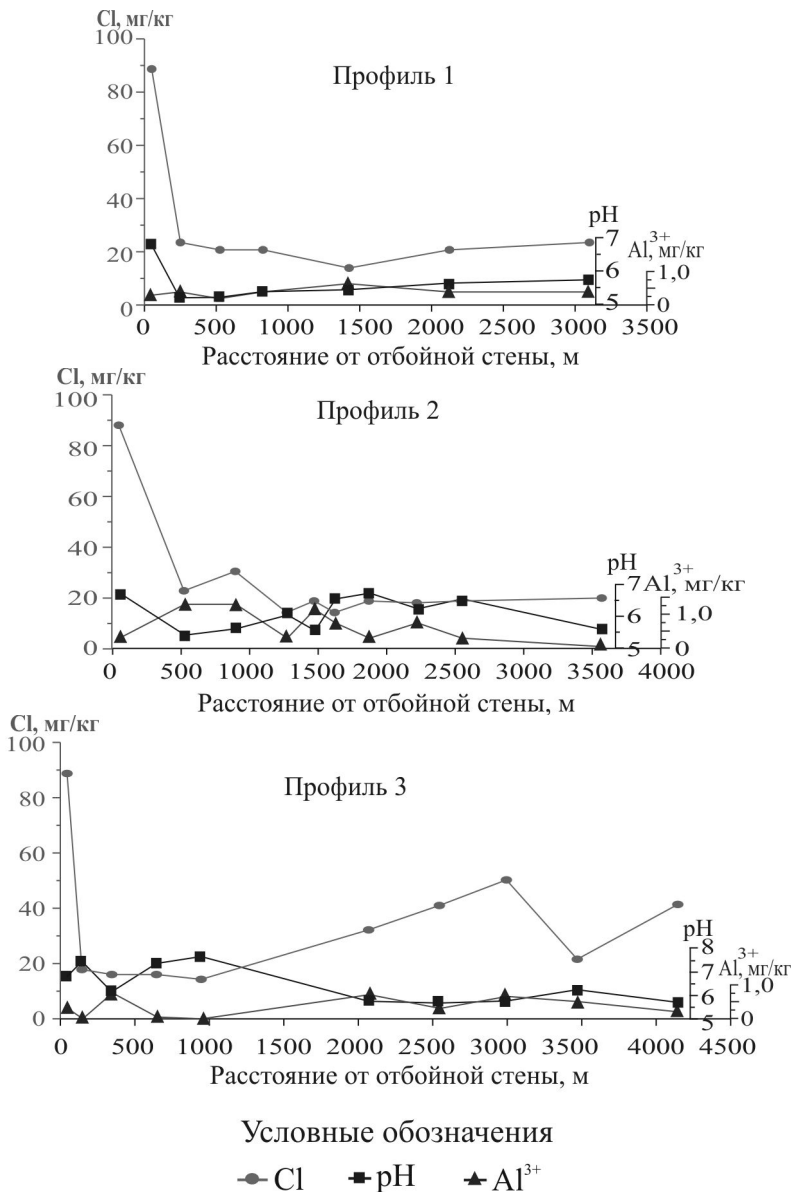


Рис. 4.9. Содержание Cl<sup>-</sup>, Al<sup>3+</sup> и значения pH в водной вытяжке почвогрунта района открытого стенда



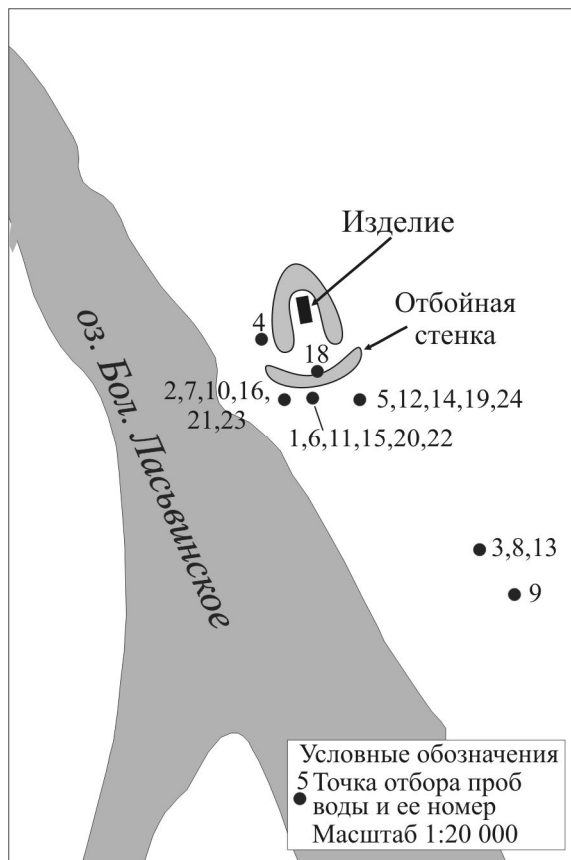


Рис. 4.10. Схема расположения точек отбора проб воды

Из водопроявлений в районе стенда наиболее загрязнена вода лужи перед отбойной стеной, которая имела непосредственный контакт с реактивной струей при испытании. По водородному показателю вода относится к сильнокислым ( $\text{pH} \sim 1,9$ ), минерализация составляет 5,2 г/л (см. табл. 4.4). Состав воды хлоридно-кальциевый, причем содержание  $\text{Cl}^-$  составляет 3,9 г/л. В воде присутствует значительное количество ионов алюминия – 0,219 г/л и трехвалентного железа – 0,13 г/л, которые подвижны в кислой среде.

Таблица 4.4. Химический состав водопроводялений района стенда, мг/л

№ пробы	Дата	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sub>общ</sub>	Al <sup>3+</sup>	Минерализация	pH
1	11. май	109,83	47,07	85,44	н.о.	0,02	74,2	9,72	15,63	0,04	н.о.	0,11	1,13	н.о.	342,01	6,7
2	11. май	122,03	37,46	77,64	н.о.	0,02	26,1	9,72	65,98	0,04	н.о.	0,06	0,74	н.о.	339	7,7
3	11. май	24,41	9,61	8,16	2,1	н.о.	8,02	1,22	4,83	1,2	н.о.	0,46	1,26	н.о.	60,01	6
4	22. май	183,05	37,46	22,34	н.о.	н.о.	52,1	7,29	26,21	0,72	н.о.	0,52	0,68	0,12	329,81	7,4
5	22. май	146,44	37,46	78	н.о.	н.о.	76,2	12,15	12,18	0,68	н.о.	0,1	0,2	н.о.	363,16	7,1
6	22. май	109,83	47,07	82,25	н.о.	н.о.	70,1	10,94	14,71	0,58	н.о.	0,55	2,5	н.о.	336,07	6,6
7	22. май	146,44	47,07	88,99	н.о.	н.о.	26,1	9,11	84,37	0,18	н.о.	0,16	0,72	н.о.	402,38	7,7
8	22. май	18,3	9,61	7,09	н.о.	н.о.	8,02	1,21	1,61	0,06	2,08	1,15	3,25	0,14	49,27	5,3
18	01. июн	н.о.	н.о.	3901	5,2	н.о.	952	н.о.	31,41*	1,75	н.о.	131,2	172	219	5240,5	1,9
9	22. май	24,41	13,93	13,83	5,6	н.о.	12	1,22	6,9	0,74	0,94	0,1	1,05	0,05	79,74	6,1
10	28. май	152,54	37,46	94,72	н.о.	н.о.	28,1	6,26	92,65	0,4	н.о.	0,07	0,98	0,02	412,18	7,6
11	28. май	183,05	65,8	84,97	1,8	н.о.	86,2	17,01	24,14	0,74	н.о.	0,16	4,1	0,03	463,87	6,8
12	28. май	176,95	47,07	69,65	н.о.	н.о.	82,2	7,29	25,06	0,88	н.о.	н.о.	0,28	н.о.	409,06	7,1
13	28. май	12,2	1,87	5,57	1,3	н.о.	6,01	1,22	2,07	3,9	0,86	0,56	3,5	0,1	35,66	5,6
14	29. май	146,44	37,46	69,65	н.о.	н.о.	75,2	9,11	13,56	0,88	н.о.	н.о.	0,2	н.о.	352,25	7
15	29. май	158,64	47,07	82,19	н.о.	н.о.	76,2	14,58	20	0,34	н.о.	0,25	4	0,06	399,28	6,6
16	29. май	146,44	37,46	97,51	н.о.	н.о.	28,1	4,86	94,49	0,22	н.о.	0,11	0,89	0,04	409,19	7,6
19	01. июн	146,44	37,46	73,83	н.о.	н.о.	80,2	6,08	16,55	0,52	н.о.	0,14	0,26	0,08	361,26	7,3
20	01. июн	134,24	47,07	78,01	н.о.	н.о.	68,1	13,37	18,85	0,4	н.о.	0,66	8	0,04	360,78	6,5
21	01. июн	158,64	47,07	94,72	н.о.	0,01	30,1	5,47	98,63	0,22	н.о.	0,05	0,81	н.о.	434,87	7,5
22	05. июн	97,63	47,07	93,33	н.о.	0,01	70,1	10,33	18,62	0,74	н.о.	0,24	2,75	н.о.	338,11	6,6
23	05. июн	158,64	47,07	98,9	н.о.	0,01	29,1	5,47	102,07	0,6	н.о.	0,08	1,06	0,12	442,02	7,7
24	05. июн	170,85	37,46	90,55	н.о.	0,01	87,2	9,11	22,07	1	н.о.	0,11	0,43	н.о.	418,33	6,9

Примечание: н.о. – компонент анализом не обнаружен; \* - содержание Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>+H<sup>+</sup>

Остальные водопроявления в районе стенда можно подразделить на две группы. Первая группа расположена непосредственно за отбойной стеной и подвержена воздействию стенда. Состав воды в ней преимущественно гидрокарбонатно-кальциевый. Водородный показатель изменяется от 6,5 до 7,7. Минерализация составляет 0,3-0,6 г/л. Вода характеризуется относительно высоким содержанием хлора – 70-99 мг/л. Наблюдаются также повышенные концентрации сульфатов, гидрокарбонатов, кальция и натрия. Содержание ионов алюминия (0,12 мг/л) и железа (0,7 мг/л) незначительно ввиду значений рН среды, близких к нейтральным.

Вторая группа водопроявлений 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  $\text{Cl}^-$  невысоко и составляет 6-14 мг/л. Содержание остальных компонентов также в 5-10 раз ниже, чем в водопроявлениях за отбойной стеной. Для болотной воды характерны естественные низкие значения водородного показателя (рН ~ 5,3-6,1). Повышенная кислотность приводит к увеличению миграционной активности железа и алюминия, содержание которых достигает  $\text{Fe}^{3+}$  - 1,15 и  $\text{Al}$  - 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 водопроявлениях, находящихся за отбойной стеной, наблюдается рост содержания отдельных компонентов, в первую очередь хлора (см. рис. 4.11), несмотря на осадки в виде дождей, характерных для этого времени года. Тогда как в болоте, расположенном в 400 м за отбойной стеной, напротив, наблюдается снижение концентраций всех компонентов, что объясняется разбавлением дождевой водой.

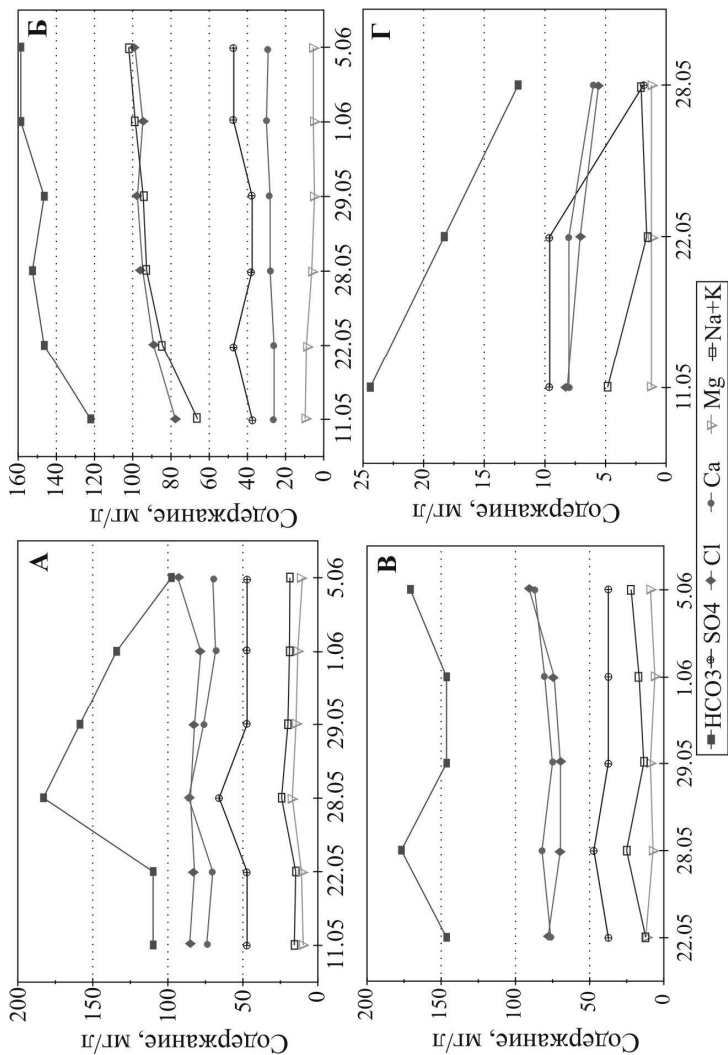


Рис. 4.11. Содержание компонентов в водопровляниях около отбойной стены (А, Б, В) и в болоте на расстоянии 400 м от отбойной стены (Г) в период испытаний в мае-июне

Выполненные исследования позволили предварительно оценить воздействие выбросов продуктов сгорания на природные объекты в районе стенда и на прилегающих территориях:

- Накопление выбрасываемых загрязнителей фиксируется лишь на небольшом участке, в пределах 50-100-метровой зоне за отбойной стеной. Здесь воздействие при проведении испытаний оказывается постоянно и в меньшей степени зависит от скорости и направления ветра. В водопроявлениях этой зоны наблюдается увеличение содержания хлора и водорода после проведения очередного испытания. В почвогрунтах этой зоны также наблюдается их повышенное содержание. С удалением от отбойной стены более чем на 100 м состав водопроявлений и водорастворимой части почвогрунтов, исследованных на территории радиусом 3-4 км от стенда, практически соответствует природному.
- Выпадающий порошок оксида алюминия различных модификаций ( $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\chi$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\delta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\Theta$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\kappa$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) на природные воды практически не влияет, так как алюминий обладает низкой миграционной способностью в условиях реакции среды, близкой к нейтральной. Накопление различных модификаций  $\text{Al}_2\text{O}_3$  зафиксировано в почвогрунтах непосредственно за отбойной стеной. На остальной территории  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , поступающий за счет выбросов при испытаниях, не обнаружен. Для выявления микроколичеств техногенного  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на остальной территории требуются специальные методические подходы, например, снегомерная съемка, поиск методов выделения его из природных грунтов и т.д.

Таким образом, разработанные методические приемы и выполненные натурные исследования дали возможность выявить влияние испытаний на компоненты окружающей среды. Эти результаты могут лечь в основу системы экологического мониторинга, позволяющего количественно оценить влияние испытаний на окружающую среду и внести корректировку в математическую модель рассеивания продуктов сгорания. Все это может послужить основой для разработки природоохранных мероприятий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненных исследований разработаны подходы к методическому обеспечению снижения экологических последствий при сжигании твердых ракетных топлив.

К результатам общетеоретического характера можно отнести следующие:

- Разработана математическая модель явления сгорания ракетного топлива и стадий образования и перемещения облака загрязняющих веществ. Выделено 4 стадии процесса: истечение струи горящего топлива до отбойной стенки стенда при наличии и отсутствии сопла; отражение газовой дозвуковой струи от отбойной стенки в атмосферу и формирование облака продуктов сгорания; подъем облака и рассеивание облака и выпадения примесей из него.
- Выделены категории определяющих метеорологических параметров, их вертикального распределения, которые могут быть использованы в расчетах. В качестве основы для выделения типов условий рассеивания примесей приняты данные как обычных сетевых наблюдений, так и радиозондирования.
- На основе модельных расчетов с различными исходными параметрами РДГТ определены метеорологические условия, неблагоприятные для рассеивания примесей от исследуемых источников большой мощности и большой высоты подъема.

К основным результатам прикладного характера относятся:

- Разработана методика организации и проведения экологического мониторинга за параметрами облака, содержащего продукты горения твердого ракетного топлива, а также за состоянием компонентов окружающей среды, включая определение точек взятия проб в зависимости от метеоусловий, подбор количества проб, методов их подготовки и анализа и т.д.
- Охарактеризованы сезонные особенности неблагоприятных метеорологических условий, способствующих появлению повышенных концентраций загрязняющих веществ у поверхно-

сти земли, включающих подробный анализ температурных инверсий, вертикальных профилей ветра в пограничном слое атмосферы и выявление наиболее благоприятных периодов года для проведения испытаний.

- Оценено воздействие выбросов продуктов сгорания РДТТ на окружающую среду и на прилегающие территории для конкретного объекта.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Абрамович Г.Н.* Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960. 715 с.
2. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1991. Ч.1. 597 с.
3. *Аликин В.Н. и др.* Опыт комплексной оценки состояния среды в районе объекта по утилизации РДДТ// Научно-технический потенциал Западного Урала в области конверсии военно-промышленного комплекса: Тезисы докл. междунар. семинара. Пермь, 2001. 9 с.
4. *Аликин В.Н., Милехин Ю.М., Пак З.П.* Пороха, топлива, заряды. М.: Химия, 2003. Т. 1. Методы математического моделирования для исследования зарядов твердого топлива. 216 с.
5. *Аликин В.Н. и др.* Пороха, топлива, заряды. М.: Химия, 2004. Т. 2. Заряды народнохозяйственного назначения. 204 с.
6. *Андреев В., Панчев С.* Динамика атмосферных термиков. Л.: Гидрометеоздат. 1975. 152 с.
7. *Безуглая Э.Ю.* Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 183 с.
8. *Белянкин Д.С. и др.* Петрография технического камня. М: Изд-во АН СССР, 1952, 586 с.
9. *Берлянд М.Е. и др.* Численное исследование атмосферной диффузии при нормальных и аномальных условиях//Тр. ГГО. 1964. Вып. 158. С.22-23.
10. Берлянд М.Е. Об опасных условиях загрязнения атмосферы промышленными выбросами// Там же. 1966. Вып. 185. С.37-42.
11. *Берлянд М.Е.* Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 448 с.
12. *Берлянд М.Е., Соломатина И.И., Сонькин Л.Р.* О прогнозировании загрязнения воздуха // Метеорология и гидрология. 1972. № 9. С.11-18.
13. *Бетехтин А.Г.* Курс минералогии. М: Госгеолиздат, 1951. 544 с.



14. *Бояришинов М. Г., Харченко А. В.* Процесс распространения газовой струи при испытаниях ракетного двигателя // Математическое моделирование. 2000. Т. 12, №12. С. 66-78.
15. *Бызова Н.Л. и др.* Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 236 с.
16. *Вагер Б.Г., Надеждина Е.Д.* Пограничный слой атмосферы в условиях горизонтальной неоднородности. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 136 с.
17. *Гинзбург И.П.* Теория сопротивления и теплопередачи. Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1970. 375 с.
18. *Гольдберг В.М., Газда С.* Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения М.: Недра, 1984. 262 с.
19. *Гончаров Е.А., Пискунов В.Н., Харченко А.И. и др.* Модель, описывающая динамику подъема облака неядерного взрыва // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1995. Вып. 3/1. С. 59-68.
20. *Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей природной среды Пермской области в 2003 году”* / Управление природных ресурсов и охраны окружающей среды МПР России по Пермской области. Пермь, 2004. 84 с.
21. *Государственный доклад “Состояние и охрана окружающей среды в Пермской области в 2001 году”* / Главное управление по охране окружающей среды Пермской области. Пермь, 2002. 190 с.
22. *Динамическая метеорология* / Под ред. Д.Л. Лайхтмана. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 607 с.
23. *Дмитриев А.Н., Шитов А.В.* Техногенное воздействие на природные процессы Земли. Проблемы глобальной экологии. Новосибирск: Изд. дом «Манускрипт», 2003. 140 с.
24. *Забелин Л.В.* Технологическая безопасность в производствах порохов: Справ. пособие. М.: ООО «Недра - Бизнесцентр», 2002. 143 с.
25. *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.

26. *Ивакин Ю.Д., Зуй А.И., Муравьева Г.П. и др.* Зарождение и рост микрокристаллов корунда при термообработке гидраргиллита в атмосфере пара воды // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2001. Т. 42, № 4, С. 258-262.
27. *Иванова Е.Н.* Классификация почв СССР. М., 1976. 227с.
28. *Количественная оценка риска химических аварий* / Под ред. В.М. Колодкина. Ижевск. Изд-во «Удмуртский ун-т», 2001. 228с.
29. *Малеев К.И. и др.* Закамск. Экология и здоровье. Пермь, 1993. 96 с.
30. *Малеев К.И., Двинских С.А.* Экологическое краеведение. Пермская область. Пермь: Книжный мир, 2003. 224 с.
31. *Марчук Г.И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.:Наука, 1982. 320 с.
32. *Научно-прикладной справочник по климату СССР.* Л.: Гидрометеоиздат 1990. Сер. 3. Ч. 1-6, вып.9. 557 с.
33. *Научно-технический потенциал Западного Урала в области конверсии военно-промышленного комплекса: Докл. Междунар. семинара.* Пермь, 2001. 112 с.
34. *Орленко Л.Р.* Строение планетарного приграничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 270 с.
35. *Печеркин И.А.* Геодинамика побережий Камских водохранилищ. Пермь, 1966 Ч. I. Инженерно-геологические условия. 199 с.
36. *Печеркин И.А.* Геодинамика побережий Камских водохранилищ. Пермь, 1969 Ч. II. Геологические процессы. 308 с.
37. *Прокопьев М.Н. и др.* Состояние и сукцессии лесной растительности в зеленой зоне Пермско-Краснокамской ГПА // Перспективы развития естественных наук в высшей школе: Труды междунар. науч. конф / Перм. ун-т; ЕНИ при Перм. ун-те. Пермь, 2001. Т.3. Экология. Предпринимательство в научно - технической сфере. С. 12-15.
38. *РД.52.04.52-85:* Методические указания. Регулирование выбросов при неблагоприятных метеорологических условиях / ГГО им.Воейкова. Новосибирск.: Изд. ЗапСибНИИ, 1987. 57с.
39. *Руководство по контролю загрязнения атмосферы.* Л.: Гидрометеоиздат, 1976. С.362-364.

40. *СанПиН 2.1.4.559-96*. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества: Санитарные правила и нормы. М.: Информационно-издательский центр Госкомсанэпиднадзора России, 1996. 111 с.
41. *Скорер Р.С.* Аэрогидродинамика окружающей среды. М.: Мир, 1980. 549 с.
42. *Скрябина О.А.* Почвы надпойменных террас р. Камы в пределах Краснокамского района Пермской области // Вопросы физической географии и геоэкологии Урала: Межвуз. сб. науч. трудов / Перм. ун-т. Пермь, 1998. С.56-64.
43. *Сонькин Л.Р.* Вопросы прогнозирования фоновое загрязнения воздуха в городах// Тр. ГГО. 1974. Вып. 314. С.42-51.
44. *Сонькин Л.Р.* Некоторые возможности прогноза содержания примесей в городском воздухе// Там же. 1971. Вып. 254. С. 122.
45. *Сонькин Л.Р.* Некоторые результаты синоптико-климатического анализа загрязнения воздуха в городах// Там же. 1973. Вып. 314. С.42-45.
46. *Сонькин Л.Р.* Синоптические условия формирования инверсий в нижнем 500-метровом слое// Там же.1965. Вып. 172. С.79-85.
47. *Сонькин Л.Р., Багряцова А.И.* Синоптические условия формирования периодов высокого загрязнения в различных районах СССР// Там же. 1979. Вып. 436. С.49-54.
48. *Сонькин Л.Р., Липовка А.В.* О влиянии метеорологических условий на загрязнение воздуха в различных городах// Там же. 1975. Вып. 325. С.55-56.
49. *Состояние и охрана окружающей среды г. Перми в 2000 г.:* Справочно-информационные материалы / Муниципальное управление по экологии и природопользованию. Пермь, 2001. 58 с.
50. *Состояние и охрана окружающей среды г. Перми в 2001 г.:* Справочно-информационные материалы / Муниципальное управление по экологии и природопользованию. Пермь, 2002. 60 с.
51. *Соу С.* Гидродинамика многофазных систем. М.: Мир, 1971. 369 с.
52. *Троицкий И.А., Железнов В.А.* Металлургия алюминия. Справочник. Альфа-Металл. (<http://www.alfametal.ru>).

53. *Шимановский Л.А., Шимановская И.А.* Пресные подземные воды Пермской области. Пермь, 1973. 247 с.
54. *Шкляев В.А., Шкляева Л.С.* Аппроксимация вертикальных профилей ветра в пограничном слое атмосферы и их использование при моделировании переноса загрязняющих веществ // Вестник Том. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле (геология, география, метеорология, геодезия). Прилож. № 3 (IV) Апрель 2003: Материалы научных конференций, симпозиумов, школ, проводимых в ТГУ. Проблемы геологии и географии Сибири: Материалы науч. конф. / Том. ун-т. Томск, 2003. С. 236-237.
55. *Шкляева Л.С.* Загрязнение воздуха в Перми при прохождении циклонов// Вопросы микро- и мезоклимата, циркуляции и загрязнения атмосферы: Межвуз. сб. науч. трудов / Перм. ун-т. Пермь, 1985. С.129-137.
56. *Шкляева Л.С.* Характеристика загрязнения воздуха и его связь с метеорологическими условиями в г. Перми// Вопросы гидрометеорологии Урала: Межвуз. сб. науч. трудов/ Перм. ун-т. Пермь, 1984. С.137-144.
57. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.
58. *Экологический программный комплекс для персональных ЭВМ. Теоретические основы и руководство пользователя ЭПК "Zone"* / Под ред. А.С. Гаврилова. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 168 с.
59. *Alikin B.N., Melnikov S.I., Rogozin M.V., Zhekin A.V., Zaporov A.Yu.* Experience of Complex Environmental Assessment in the Region of SPRE Utilization// Abstracts of International Seminar "Scientific-technical potential of the Western Urals for Conversion of Military Complex". Perm, 2001. P.12.
60. *Rooksby H.P.* Oxides and hydroxides of iron and aluminium // X-ray identification and crystal structures of clay minerals / Miner. Society. London, 1961.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ**

### **Результаты расчетов приземных концентраций в районе испытательного стенда при ОСИ РДТТ**

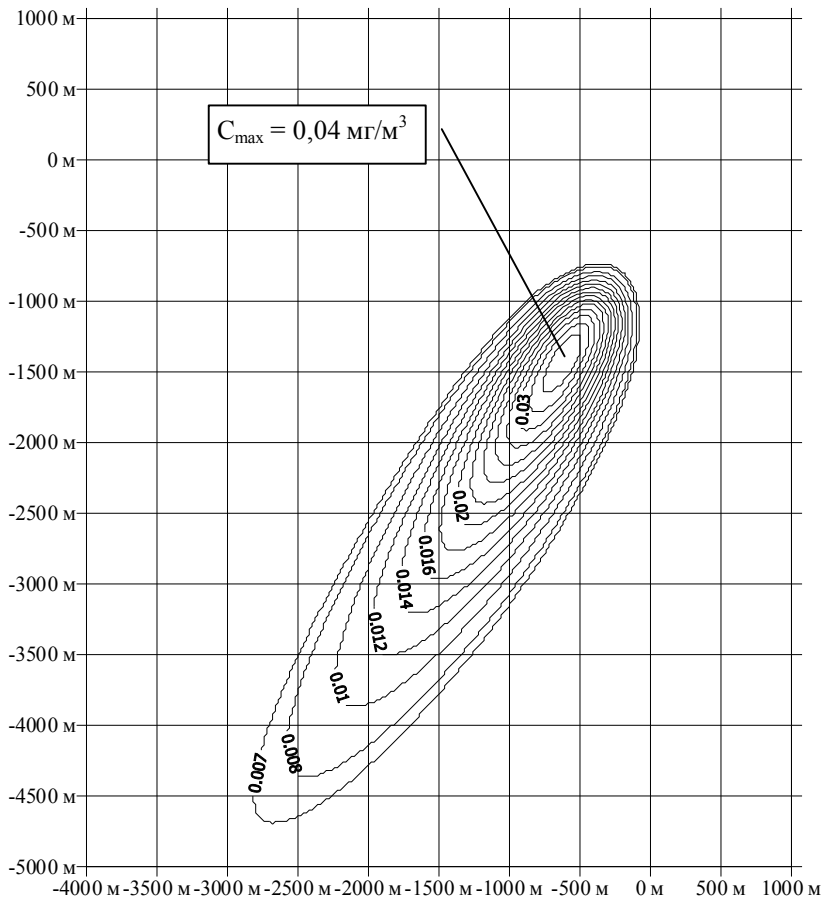
Поле приземной максимально разовой концентрации,  $\text{мг}/\text{м}^3$   
 (Хлористый водород, ПДК м.р. =  $0,2 \text{ мг}/\text{м}^3$ )

Параметры источника выброса

Масса АГВС, т	12,45
Продолжительность выброса, с	80,0
Диаметр, м	1,3

Метеорологические параметры

Класс устойчивости	D
Скорость ветра, м	0,5
Относительная влажность, %	80



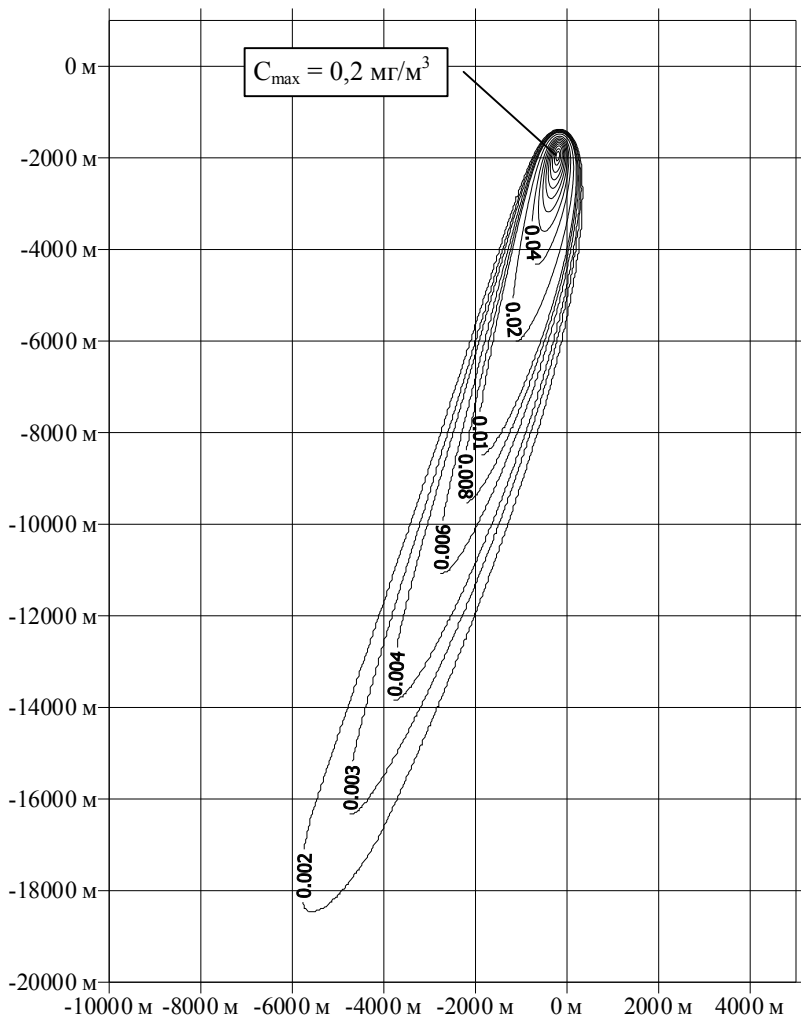
Поле приземной максимально разовой концентрации,  $\text{мг}/\text{м}^3$   
(Хлористый водород, ПДК м.р. =  $0,2 \text{ мг}/\text{м}^3$ )

Параметры источника выброса

Масса АГВС, т	12,45
Продолжительность выброса, с	80,0
Диаметр, м	1,3

Метеорологические параметры

Класс устойчивости	C
Скорость ветра, м	5,0
Относительная влажность, %	80



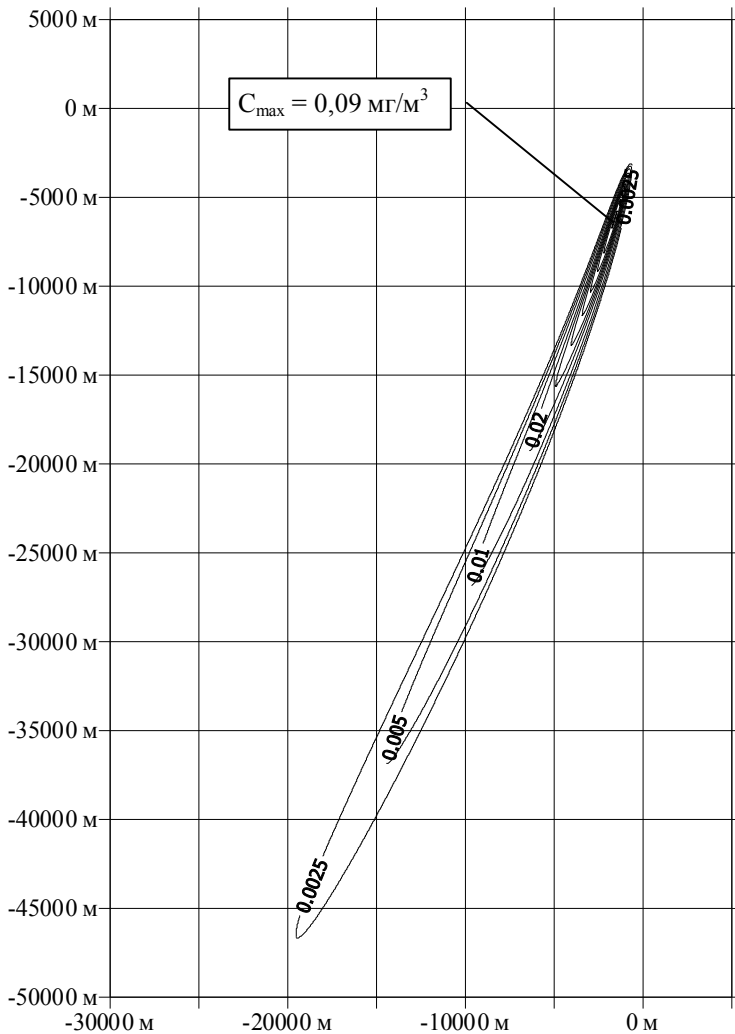
Поле приземной максимально разовой концентрации,  $\text{мг}/\text{м}^3$   
 (Хлористый водород, ПДК м.р. =  $0,2 \text{ мг}/\text{м}^3$ )

Параметры источника выброса

Масса АГВС, т	12,45
Продолжительность выброса, с	80,0
Диаметр, м	1,3

Метеорологические параметры

Класс устойчивости	D
Скорость ветра, м	5,0
Относительная влажность, %	80





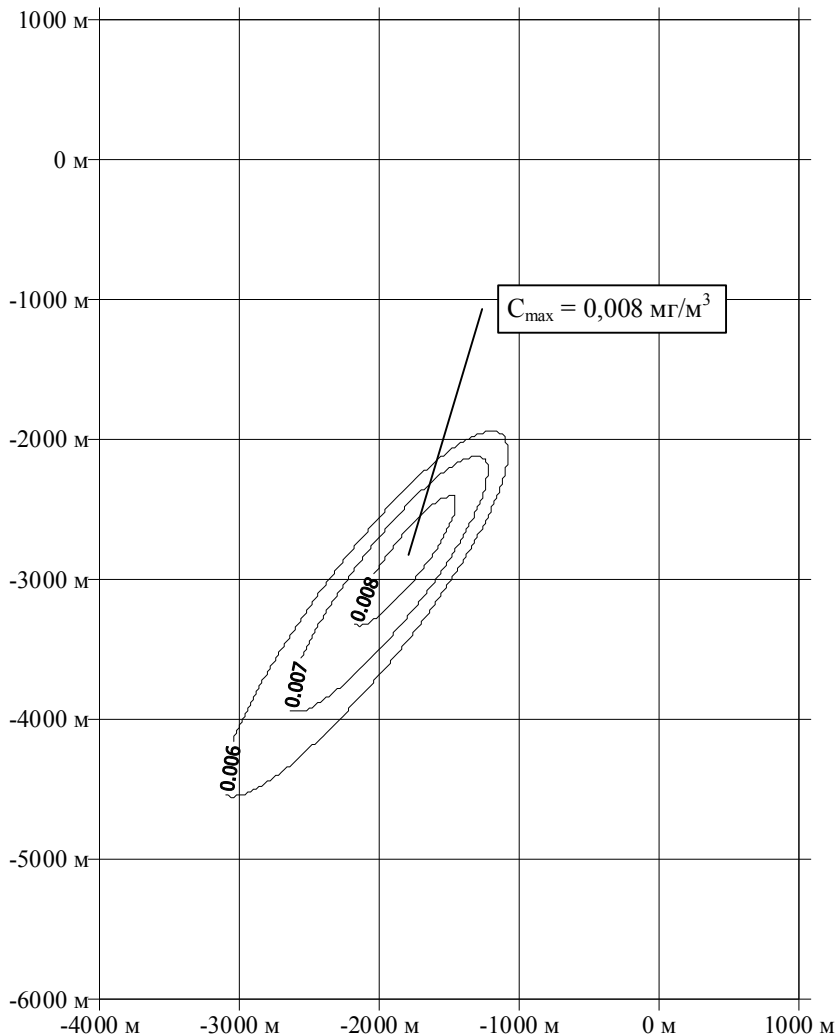
Поле приземной максимально разовой концентрации,  $\text{мг}/\text{м}^3$   
(Хлористый водород, ПДК м.р. =  $0,2 \text{ мг}/\text{м}^3$ )

Параметры источника выброса

Масса АГВС, т	29,88
Продолжительность выброса, с	80,0
Диаметр, м	1,8

Метеорологические параметры

Класс устойчивости	D
Скорость ветра, м	0,5
Относительная влажность, %	80



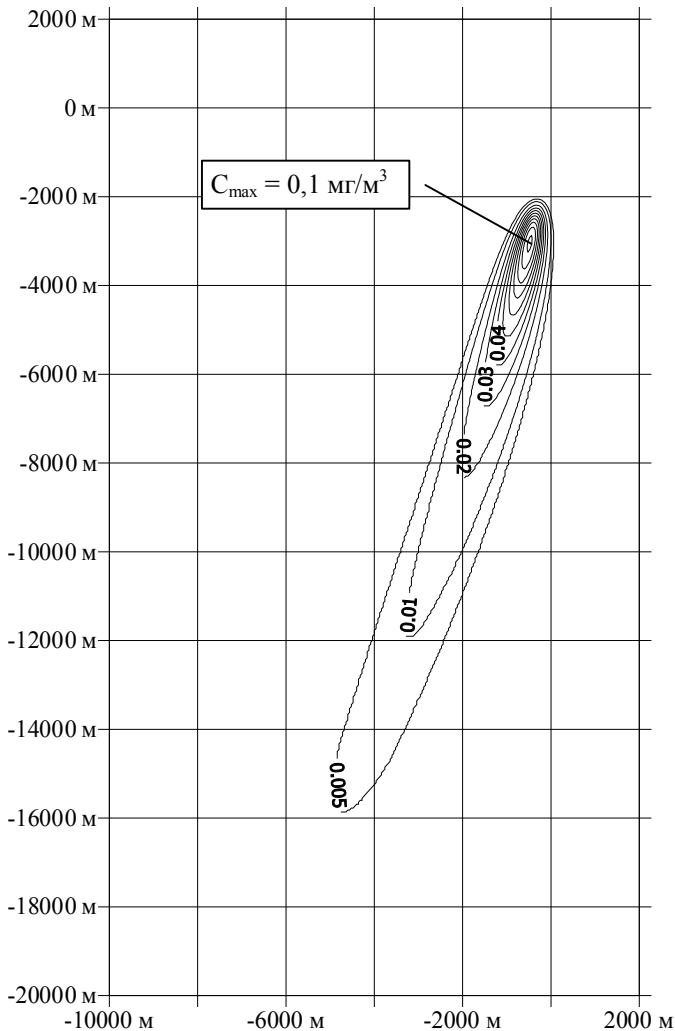
Поле приземной максимально разовой концентрации,  $\text{мг/м}^3$   
 (Хлористый водород, ПДК м.р. =  $0,2 \text{ мг/м}^3$ )

Параметры источника выброса

Масса АГВС, т	29,88
Продолжительность выброса, с	80,0
Диаметр, м	1,8

Метеорологические параметры

Класс устойчивости	C
Скорость ветра, м	5,0
Относительная влажность, %	80



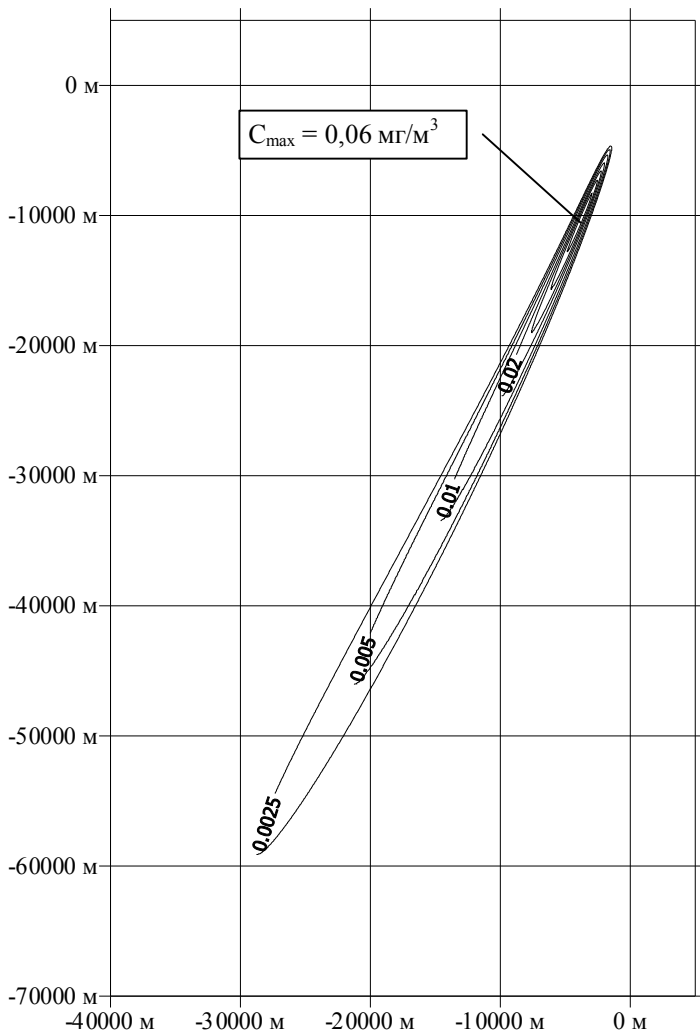
Поле приземной максимально разовой концентрации,  $\text{мг/м}^3$   
 (Хлористый водород, ПДК м.р. =  $0,2 \text{ мг/м}^3$ )

Параметры источника выброса

Масса АГВС, т	29,88
Продолжительность выброса, с	80,0
Диаметр, м	1,8

Метеорологические параметры

Класс устойчивости	D
Скорость ветра, м	5,0
Относительная влажность, %	80



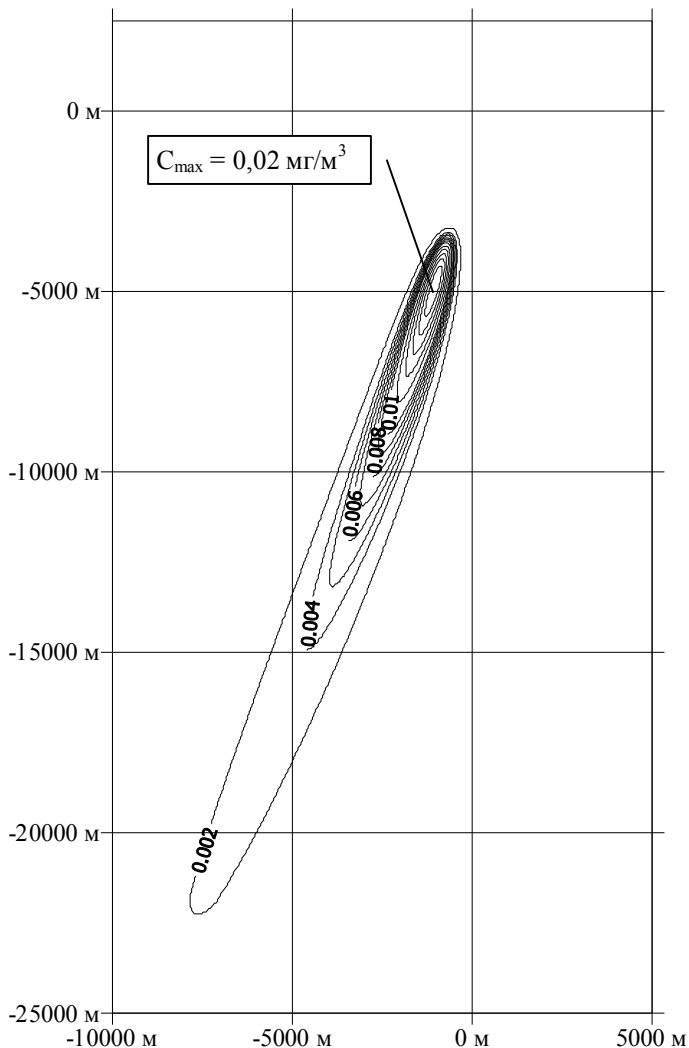
Поле приземной максимально разовой концентрации,  $\text{мг}/\text{м}^3$   
(Хлористый водород, ПДК м.р. =  $0,2 \text{ мг}/\text{м}^3$ )

Параметры источника выброса

Масса АГВС, т	47,3
Продолжительность выброса, с	60,0
Диаметр, м	2,0

Метеорологические параметры

Класс устойчивости	C
Скорость ветра, м	5,0
Относительная влажность, %	80



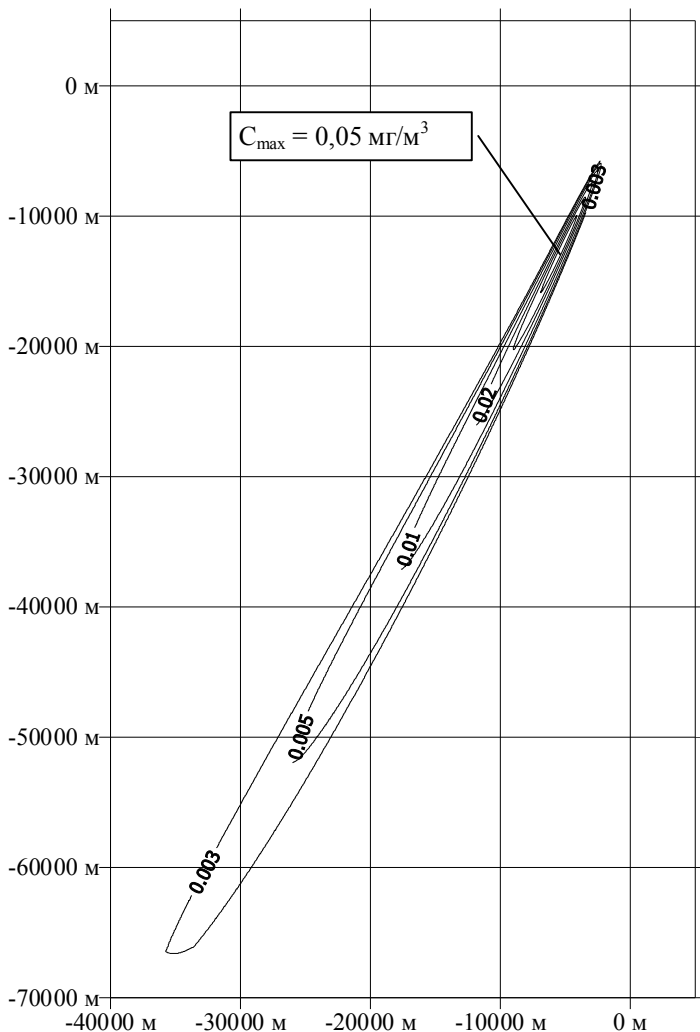
Поле приземной максимально разовой концентрации,  $\text{мг/м}^3$   
 (Хлористый водород, ПДК м.р. =  $0,2 \text{ мг/м}^3$ )

Параметры источника выброса

Масса АГВС, т	47,3
Продолжительность выброса, с	60,0
Диаметр, м	2,0

Метеорологические параметры

Класс устойчивости	D
Скорость ветра, м	5,0
Относительная влажность, %	80



**Таблица зависимости параметров сформированного облака продуктов сгорания РДТТ от класса устойчивости атмосферы**

Источник выброса:

Масса АГВС - 5 т

Продолжительность выброса - 30 с

Показатель	Класс устойчивости атмосферы						
	A	B	C	D	E	F	G
Время подъема облака, с	332	326	316	317	251	276	404
Верхняя граница облака, м	571	534	502	471	389	368	401
Максимальный диаметр клубов, м	394	318	258	158	109	84	64
Максимальная концентрация HCl, мг/м <sup>3</sup>	34	64	121	529	1586	3395	7482
Средняя концентрация HCl, мг/м <sup>3</sup>	15	27	50	237	794	1997	4868

Источник выброса:

Масса АГВС - 7,6 т

Продолжительность выброса - 3,5 с

Показатель	Класс устойчивости атмосферы						
	A	B	C	D	E	F	G
Время подъема облака, с	316	306	302	313	285	366	589
Верхняя граница облака, м	1138	957	904	858	780	901	1154
Максимальный диаметр клубов, м	534	376	304	208	142	106	80
Максимальная концентрация HCl, мг/м <sup>3</sup>	16	45	86	265	822	1977	4665
Средняя концентрация HCl, мг/м <sup>3</sup>	10	23	43	141	436	1019	2279

Источник выброса:

Масса АГВС - 18,8 т

Продолжительность выброса - 25 с

Показатель	Класс устойчивости атмосферы						
	A	B	C	D	E	F	G
Время подъема облака, с	335	324	324	336	282	312	502
Верхняя граница облака, м	757	719	701	693	596	593	604
Максимальный диаметр клубов, м	431	342	284	194	138	108	86
Максимальная концентрация HCl, мг/м <sup>3</sup>	87	179	308	985	2717	5572	10962
Средняя концентрация HCl, мг/м <sup>3</sup>	36	74	130	445	1370	3240	7018

Источник выброса:

Масса АГВС - 47,3 т

Продолжительность выброса - 40,5 с

Показатель	Класс устойчивости атмосферы						
	A	B	C	D	E	F	G
Время подъема облака, с	350	360	368	390	341	402	601
Верхняя граница облака, м	969	995	1020	1091	1012	1094	1142
Максимальный диаметр клубов, м	474	394	340	252	182	144	116
Максимальная концентрация HCl, мг/м <sup>3</sup>	180	314	489	1190	3106	6226	11867
Средняя концентрация HCl, мг/м <sup>3</sup>	73	134	218	558	1572	3495	7106

Воздействие на окружающую среду кратковременных выбросов большой мощности: Учеб. пособие / В.М. Суслонов, Н.Г. Максимович, В.Н. Иванов, В.А. Шкляев. - Перм. ун-т. - Пермь, 2005. - 126 с.

*Учебное издание*

*Суслонов Владимир Михайлович  
Максимович Николай Георгиевич  
Иванов Владимир Николаевич  
Шкляев Владимир Александрович*

***ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ  
КРАТКОВРЕМЕННЫХ ВЫБРОСОВ  
БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ***

Редактор *Л.А. Богданова*

Корректор *Л.И. Семицветова*

Компьютерное исполнение *С.В. Казакевич*

ИБ № 635

Подписано в печать 31.03.2005. Формат 60 x 84 1/16. Печать офсетная.

Бум. офс. Усл. печ. л. 7,44 Уч.-изд. л. 6,5. Тираж 600 экз. Заказ

Редакционно-издательский отдел Пермского университета

614990, Пермь, ул. Букирева, 15

Типография Пермского университета

614990, Пермь, ул. Букирева, 15