

## Расчет рассеивания и выпадения хлороводород из атмосферы при сжигании РДТТ на открытом стенде

В.А. Шкляев, А.С. Кожевников

Ракетные двигатели с твердым топливом (РДТТ) можно отнести к источникам вредных химических веществ большой мощности. Их выбросы могут подниматься на значительную высоту и переноситься на расстояния, сравнимые с региональным масштабом. При сжигании РДТТ образуются следующие соединения: окись алюминия, хлористый водород, окислы азота, диоксид углерода и др. [7]. В настоящее время испытания и отжиг РДТТ осуществляются на специально оборудованном открытом стенде ФГУП НИИПМ (с горизонтальным расположением двигателя и наклонной отбойной стенкой), что обуславливает выброс продуктов сгорания в атмосферу на большую высоту. В процессе подъема формируется облако продуктов сгорания, при этом часть вредных веществ выпадает из него на поверхность земли. Теория образования и подъема облака подробно изложена в [5, 7]. После стабилизации высоты облако переносится ветром, при этом примеси, содержащиеся в нем, продолжают рассеиваться и осаждаться на поверхность земли.

Целью данной работы является расчет рассеивания и выпадения хлороводорода в процессе дальнего переноса облака загрязняющих веществ, образующихся при сжигании РДТТ в г. Перми.

Известны два подхода к моделированию переноса примесей. Первый подход заключается в решении уравнений диффузии при помощи численных методов [2, 6], второй основан на использовании траектории [1, 3]. Модели, в которых используется уравнение диффузии, с формальной точки зрения являются более «элегантными», в определенной мере – более общими, однако на практике они гораздо сложнее, дороже и менее оперативны, чем модели, основанные на расчетах траекторий частиц. Затруднения в использовании уравнений диффузии заключаются в проблеме их достаточно точного решения, поскольку они являются уравнениями с частными производными второго порядка. Таким образом, различные модели переноса примесей являются модификациями двух указанных подходов. Например, в методе, реализованном в [7], для расчета распространения и выпадения примесей использовано решение конечно-разностных уравнений в узлах сетки, в другом методе [1] – дисперсионные характеристики распределения примеси в пространстве и времени. В восточно-европейском центре (программа ЕМЕП) используется траекторная модель лагранжевого типа [4]. При построении такой модели учитываются процессы химических преобразований примесей, выведения их из атмосферы за счет осаждения на подстилающую поверхность, вымывания осадками и т. п. При этом следует помнить, что определение параметров химических превращений, коэффициентов турбулентного рассеяния, сухого и мокрого выпадения, а также скоростей осаждения примесей на подстилающей поверхности является сложной экспериментальной и теоретической проблемой. Весьма сложен и объективный анализ полей наблюдаемых скоростей ветра, которые используются в моделях для определения траекторий распространения примесей. Поэтому оценки, полученные с помощью указанных моделей, могут носить лишь ориентировочный характер. Модель восточно-европейского центра может использоваться в двух вариантах: модель с имитацией эволюции струй примесей и имитацией эволюции порций примесей. Последняя и была по-

ложена в основу нашей методики расчета.

Отметим несколько особенностей и проблем, связанных с проведением расчетов по данной методике:

- распределение примеси по центрам квадратов от порции считается равномерным;
- способ построения траектории движения облака через введение поправки на отклонение от прямой траектории является альтернативным и может быть заменен. Однако в условиях регионального масштаба нам представляется нецелесообразным использование поля геопотенциала для построения траектории;
- скорость и направление ветра на высоте и у земли различаются, поэтому траектория выпадения примесей с высоты будет наклонной, а, следовательно, координаты порции примесей определенного возраста на поверхности земли будут отличны от высотных координат. Это необходимо учитывать для повышения точности расчетов.

Рассмотрим специфику расчета выпадений примесей для ракетных двигателей и основные отличия данной методики от [4].

Начальные размеры облака  $500 \times 500 \text{ м}^2$ . За начало координат была принята начальная точка его переноса. Траектория движения облака рассчитывается следующим образом:

- определяется скорость и направление ветра по карте АТ<sub>850</sub> в начальной точке;
- по этой же карте строится траектория частицы на 12 ч или более (в зависимости от положения конечной точки: если точка выходит за пределы Пермской области, то траектория дальше не строится);
- из конечной точки траектории восстанавливается перпендикуляр на касательную к изогипсе, проходящей через начальную точку;
- вычисляются расстояние от начальной точки по прямой до перпендикуляра (S) и отклонение от этой прямой траектории (dS). Это необходимо для введения поправки в изменение направления ветра, определяемой так:  $\Delta\alpha = \arctg(dS/S)/t \cdot \Delta t$ , где t – время, на которое строится траектория,  $\Delta t$  – шаг по времени;
- определяется кривизна изогипс (циклоническая или антициклоническая) вдоль траектории. От кривизны зависит знак поправки на изменение направления ветра;
- траектория строится с шагом по времени  $\Delta t = 0,5 \text{ ч}$ .

После построения траектории движения облака на высоте и вычисления выпадений строится приземная траектория, для чего используются направление и скорость ветра у земли в начальной точке движения облака. Скорость ветра как на высоте, так и у земли, а также отклонение приземного ветра от высотного считаются одинаковыми по всей траектории движения облака. Таким образом, приземная траектория нужна лишь для определения местоположения выпадений у поверхности земли, тогда как размеры самого облака определяются по направлению и скорости ветра на высоте.

Предварительно был рассчитан так называемый радиус влияния источника – расстояние, на котором приземная концентрация примеси составляет 5% ПДК. Расчет производился для двигателей с максимальной массой около 50 т. Высота источника, определяемая замерами (высота подъема облака), принималась равной 1000 м. Скорость ветра на высоте 900 м, вероятность превышения которой составляет 5%, была вычислена по данным радиозонда за пять лет (1997–2001) и составила 17 м/с. В соответствии с [4] были приняты средние значения скорости сухого осаждения НСЛ  $V_d = 0,008 \text{ м/с}$  и коэффициента вертикальной турбулентной диффузии  $K_z = 50 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{ч}$ .

Радиус влияния составил около 750 км, а это означает, что облако примеси может переноситься, при определенных условиях, далеко за пределы Пермской области.

Для расчета выпадений хлороводорода были выбраны следующие исходные

данные: скорость и направление ветра на высоте  $AT_{850}$  в начальной точке траектории составили соответственно 52 км/ч и  $230^\circ$ , а у земли 14 км/ч и  $200^\circ$ . Кривизна изогипс – антициклональная. Поправка  $\Delta\alpha$  на направление ветра составила  $0,23^\circ$ . Интенсивность атмосферных осадков, вымывающих примесь, принималась равной 1 мм/ч. Характеристики сжигаемого двигателя принимались в соответствии с [7]. Масса двигателя 29,88 т. Начальная масса поступившей в атмосферу HCL – 4,3 т.

При сжигании РДТТ образуются водяные пары, которые вступают в химическое взаимодействие с хлороводородом, образуя соляную кислоту. Считалось, что 30% от массы водяного пара (1,2 т) превратилось в соляную кислоту еще при подъеме облака [8]. Таким образом, масса HCL в начальной точке движения составила 3,94 т.

Расчет выпадений производился для центров квадратов расчетной сетки размером  $425 \times 650$  км с шагом 6,25 км. Размер сетки определялся размерами Пермской области. На рис. 1–3 представлены результаты расчетов выпадений в виде полей рассеивания.

Как видно из рис. 1, область наибольших значений сухих выпадений расположена на расстоянии около 60 км от источника с максимумом  $236 \text{ г/км}^2$ . На рис. 2 изображены поля мокрых выпадений. Как видно из сравнения рис. 1 и 2, при вымывании примесей происходит гораздо более быстрое выведение их из атмосферы, чем при сухом. Наибольшие значения мокрых выпадений находятся в непосредственной близости от источника, с максимумом  $13905 \text{ г/км}^2$  на расстоянии от него около 9–10 км.

Поле суммарных выпадений хлористого водорода (рис. 3) практически не отличается от поля мокрых выпадений, так как в значения суммарных выпадений основной вклад вносит вымывание с осадками. Значение максимума суммарных выпадений незначительно больше значения максимума мокрых выпадений и составляет  $13910 \text{ г/км}^2$ .

В заключение остановимся на основных результатах, полученных в работе:

- вычислен возможный радиус действия облака примесей, образующегося при сжигании РДТТ, который составил 750 км;
- расчет координат порций осевшей примеси необходимо производить с учетом приземного ветра. Так, в нашем примере при построении 12-часовой траектории на высоте по потоку конечная точка оказалась за пределами Пермской области, а с введением поправки на приземный ветер эта точка находилась еще внутри исследуемой территории;
- оценено осаждение хлористого водорода на территории Пермской области в результате сжигания РДТТ.

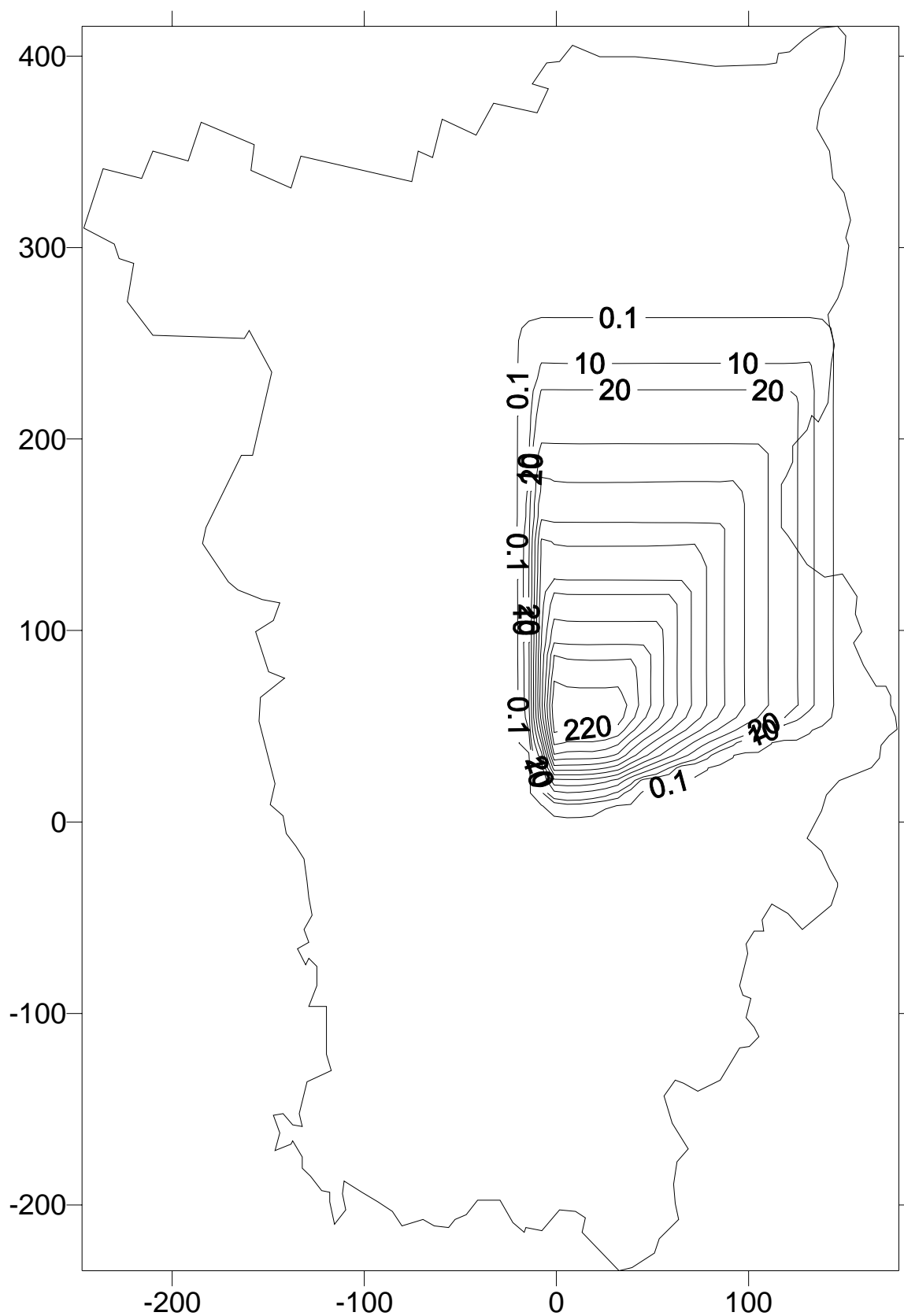


Рис. 1. Поле «сухих» выпадений хлороводорода,  $\text{г}/\text{км}^2$

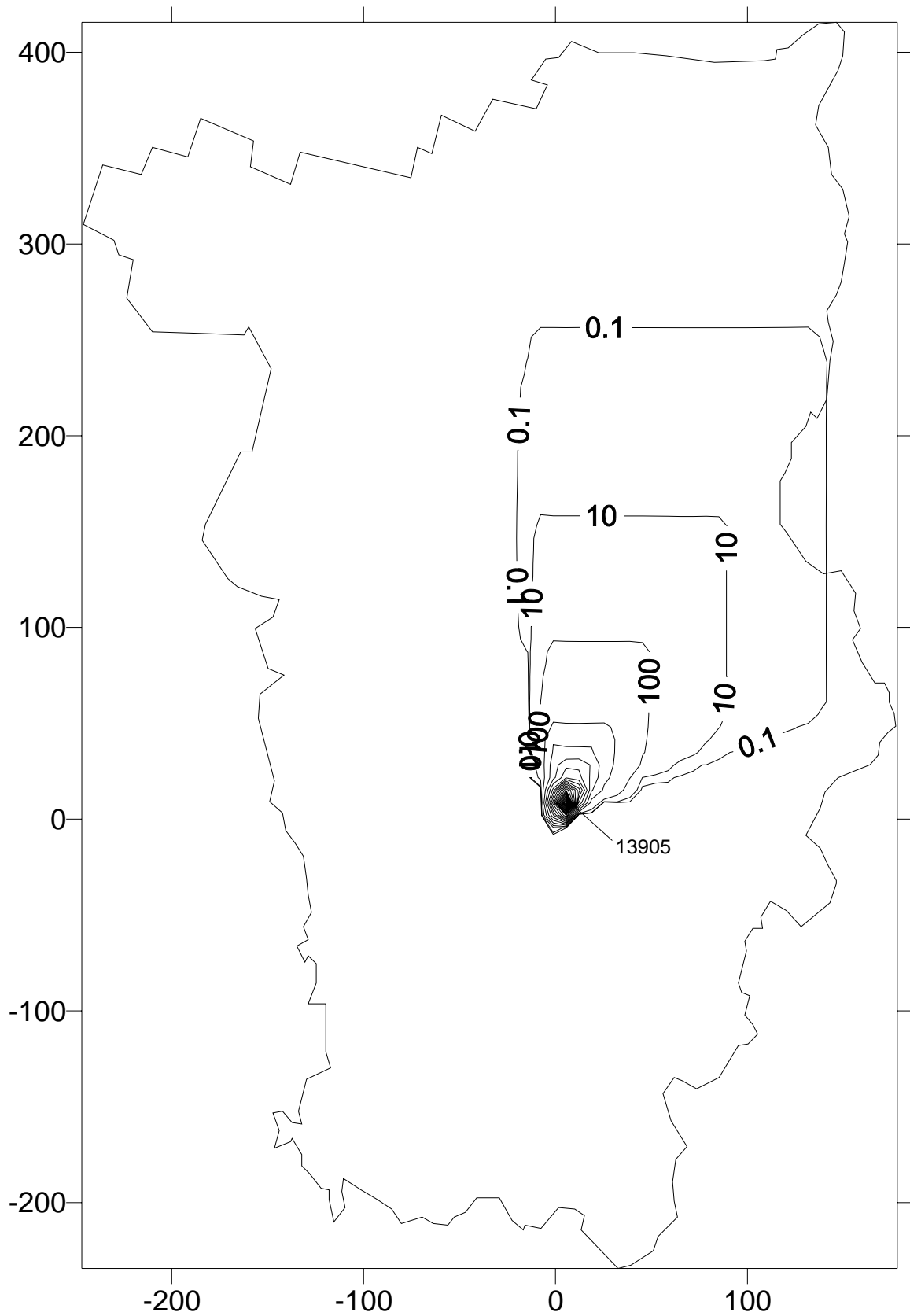


Рис. 2. Поле «мокрых» выпадений хлороводорода, г/км<sup>2</sup>

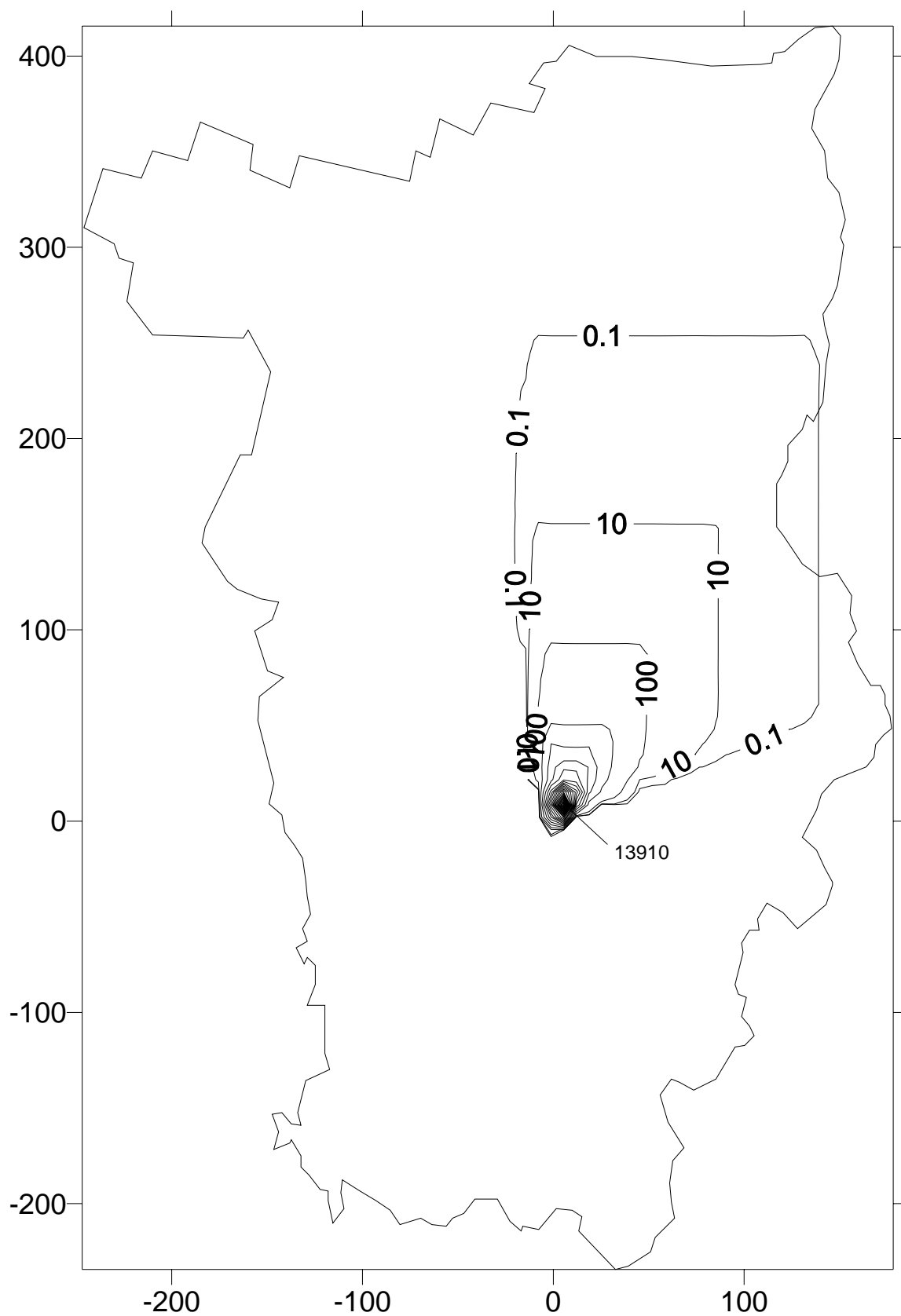


Рис. 3. Поле суммарных выпадений хлороводорода,  $\text{г/км}^2$

### Библиографический список

1. *Батка М.* Дисперсионная модель для оценки переноса загрязняющих воздух веществ на средние расстояния / М. Батка, Я. Беднар, И. Брехлер, Я. Копачек // Проблемы фоновго мониторинга состояния природной среды. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. Вып. 4. С. 155–165.
2. *Дишер Х.-Ю.* Описание оперативной региональной модели распространения примесей и опыта, накопленного при ее использовании в ГДР / Х.-Ю. Дишер., У. Дамрат, У. Дишер // Там же. С. 130–142.
3. *Заводски Д.* Региональный перенос серы в центральной Европе в 1980 г. Оценка переноса с помощью математической модели / Д. Заводски // Там же. С. 173–180.
4. *Израэль Ю.А.* Модель для оперативной оценки трансграничных потоков антропогенных примесей / Ю.А. Израэль., Ф.Я. Прессман, Ж.Э. Михайлова // ДАН СССР. 1980. Т. 253, № 4. С. 848–852.
5. *Научное обоснование методики расчета распространения примеси в атмосфере при испытаниях на открытых стендах.* Отчет ИПГ по теме. Пермь, 1993.
6. *Перкаускас Д.* Региональная модель распространения SO<sub>2</sub> над территорией Литовской ССР / Д. Перкаускас, К. Сенута // Проблемы фоновго мониторинга состояния природной среды. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. Вып. 6. С. 244–251.
7. *Разработка плана природоохранных мероприятий при обращении с ракетоносителями и РДТТ.* Т.3. Расчет удельных выбросов загрязняющих веществ от открытого стенда НИИ ПМ. Отчет о научно-исследовательской работе по теме. Пермь, 2002.
8. *Тищенко Н.Ф.* Охрана атмосферного воздуха. Расчет содержания вредных веществ и их распределение в воздухе. Справочное изд. / Н.Ф. Тищенко. М.: Химия, 1991. 368 с.