ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 519.2:504(043)

ДУРДЫЕВ
Керимиухамед

ОПТИМИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КРИТЕРИЕВ

Специальность: 05.13.16- применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико- математических наук

Дубна 1992

Работа выполнена в Московском государственном инженерно-физическом институте (техническом университете)

Научные руководители:

Доктор физико- математических наук, профессор — Крянев Александр Витальевич

Кандидат физико- математических наук, доцент — Некрасов Валентин Иванович

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник — Писарев Алексей Федорович

Кандидат физико-математических наук, доцент — Федотов Сергей Николаевич

Ведущая организация:

Российский Университет дружбы народов

Защита диссертации состоится "17" июня 1994г. в 10^{30} часов на заседании Специализированного ученого совета Д047.01.04 при лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ, г.Дубна, Московской области, конференц-зал ЛВТА.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "16" мая 1994 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета
кандидат физико-математических наук — З.М.Иванченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В связи с антропогенным загрязнением природной среды необходимость мониторинга загрязнений становится с каждым годом все более актуальной. Увеличение масштабов хозяйственной деятельности и осуществление крупных народнохозяйственных проектов связаны с воздействиями на окружающую среду локального и глобального характера. При оценке возможных последствий этой деятельности существенную роль играют математические модели, поскольку с их помощью можно оценить возмущения основных параметров, характеризующих изменения состояния окружающей среды под влиянием естественных и антропогенных факторов. С позиций математического моделирования влияние деятельности человека можно интерпретировать как реализацию некоторых экспериментов. Постановка же экспериментов в реальных условиях на практике оказывается слишком дорогостоящей. Следует также иметь в виду, что многие натурные эксперименты в экологии и социально экономических областях не реализуемы, поскольку могут привести к необратимым последствиям.

Информация, полученная в результате измерений, позволяет в определенном смысле следить за поведением исследуемой системы, однако основная задача заключается в оценке возможных последствий тех или иных воздействий и в поиске оптимальных решений при планировании хозяйственной деятельности с учетом допустимых нагрузок на окружающую среду и социально-экономических критериев. Поэтому только с помощью экспериментальных исследований в сочетании с методами математического моделирования можно сформулировать эффективные подходы к решению данного класса задач.

Во многих случаях, особенно при локальном загрязнении природной среды, стоит задача оптимальной организации измерений уровня загрязнений, в частности, задача оптимального расположения измерительных точек в мониторируемой области. Эта задача относится к математической теории планирования эксперимента.

Построение математической теории определяется постановкой задачи- выбором критерия оптимизации. Однако не существует универсальных оптимальных планов, которые одновременно удовлетворяли бы всем критериям оптимальности. Поэтому выбор критериев оптимальности должен определяться прежде всего конечной целью эксперимента. Следовательно, в настоящее время актуальной является разработка методов для некоторых важных частных случаев оптимизации, например,решение задачи оптимизации при заданных ресурсах.

Целью настоящей работы является разработка методов и создание вычислительных программ для определения оптимального расположения точек измерений при мониторинге загрязнений природной среды на основе интегральных критериев, а также разработка алгоритмов и программ оптимизации траектории при непрерывном измерении в задачах восстановления полей загрязнения.

Научная новизна. В работе предложены критерии оптимального расположения точек мониторинга, отражающие воздействие загрязнения на популяцию в целом. На основе этих (интегральных) критериев разработаны методы определения оптимального расположения точек измерения при мониторинге окружающей среды.

Рассмотрены методы оптимизации траектории при непрерывном измерении (измерительная аппаратура находится на транспортном средстве) в задачах восстановления поля загрязнения. В случае нелинейной параметризации поля загрязнения, используя специфику задачи, предложен метод оптимизации траектории для эффективной оценки неизвестных параметров с помощью метода наименьших квадратов (МНК).

Практическая значимость работы. Разработанная методика оптимального расположения точек при мониторинге загрязнений позволяет значительно увеличить точность прогноза воздействия этих загрязнений на популяцию.

При помощи разработанных прикладных программ решена задача восстановления полей загрязнения нуклидами Zr^{95}, Ru^{103}, Cs^{137} в районе Чернобыльской АЭС, на основе выборочных измеренных значений. На рисунке I,2 показаны некоторые результаты восстановления полей загрязнения. Полученные результаты показывают, что метод разделения переменных дает возможность

экономии средств в процессе измерений в 4-5 раз.

Апробация работы и публикации. Результаты исследований, составившие содержание диссертации, доложены автором на 3 международных конференциях (г. Москва,I992г, г.С.Петербург, I992г, г. Н.Новгород,I993г), на 28 научной конференции факультета физико- математических и естественных наук Российского университета дружбы народов(I992г) и на научном семинаре Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ (г.Дубна,I994г).

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [I-8], список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на I26 страницах, состоит из введения, трех глав, заключения и приложений. Содержит 3 таблицы, II рисунков и список литературы из 87 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении приводится обзор литературы по планированию при измерениях уровня загрязнения окружающей среды, обосновывается актуальность выбранной темы и дается краткое содержание диссертационной работы.

Первая глава посвящена формулировке критериев оптимального расположения точек мониторинга, отражающие воздействие на популяцию в целом.

Под полем загрязнений в настоящей работе понимается поле концентрации различных (в том числе радиоактивных) веществ, т.е. количество (масса) вещества на единицу подстилающей поверхности в точке x. Через x обозначен двумерный вектор, компонентами которого являются координаты (x_1,x_2) точки на подстилающей поверхности. Вместо массы могут использоваться другие связанные с нею единицы (например, активность). Обозначим через $\xi(x)$ концентрацию загрязняющего вещества в точке x. Эта величина в общем случае является случайной, т.е. поле $\xi(x)$, рассматриваемое как функция переменной x, является случайным полем. Мы будем предполагать в дальнейшем, что все рассматриваемые нами поля являются гауссовскими, и поэтому их описание исчерпывается указанием среднего значения $m(x)=\overline{\xi(x)}$ в каждой точке и ковариационной функции

$$B_\xi(x,y)=\overline{(\xi(x)-\overline{\xi}(x))(\xi(y)-\overline{\xi}(y))} \; . \qquad (1)$$

Функции $m(x)$ и $B_\xi(x,y)$ при оптимизации считаются известными. Они могут быть получены путем построения математической модели распространения загрязнений или могут быть оценены по результатам предыдущих измерений. В последнем случае до оптимизации должны быть проведены прикидочные измерения с целью оценки указанных функций.

Кроме поля $\xi(x)$ вводится в рассмотрение измеренное поле $\eta(x)$:

$$\eta(x)=\xi(x)+\theta(x) \; , \qquad (2)$$

где $\theta(x)$-случайная погрешность измерений, распределенная по нормальному закону.Если не оговорено иное, погрешности измерений, соответствующие разным точкам,считаются независимыми, т.е. ковариационная функция поля $\theta(x)$ равна

$$B_\theta(x)=\sigma^2(x)\delta(x-y) \; , \qquad (3)$$

где $\sigma^2(x)$-дисперсия измеренного значения в точке x, $\delta(s)$-δ-функция Дирака. Кроме того,

$$\overline{\theta(x)}=0 \; , \qquad (4)$$

а $\xi(x)$ и $\theta(x)$ независимы.

Обратимся к критериям оптимизации. С математической точки зрения естественным критерием является следующий: в результате проведения мониторинга и оценки $\tilde{\xi}(x)$ поля $\xi(x)$,мы получим дисперсию этой оценки $D\tilde{\xi}(x)$. Если мы введем некоторую норму $\|f(x)\|$ в пространстве функций переменной x, то в качестве критерия оптимальности можно выбрать минимум нормы дисперсии $D\tilde{\xi}(x)$:

$$\|D\tilde{\xi}(x)\| \Rightarrow \min \; . \qquad (5)$$

Однако выбор нормы произволен и в данном случае не диктуется какими-либо практическими обстоятельствами. Поэтому в качестве критерия оптимальности выбираем критерий, основанный на прогнозе суммарного количества эффектов, вызванных загрязнением, для населения или иных популяций, существующих на данной территории. Примерами таких эффектов могут служить, например, коллективная доза, полученная группой людей при радиоактивном загрязнении, количество заболеваний в данном регионе вследствие загрязнения, уменьшение рыбных запасов вследствие загрязнений водоемов, и т.д. Социально значимой целью мониторинга является контроль за подобными величинами. Поэтому в качестве критерия оптимизации целесообразно выбрать критерий, связанный с максимальной точностью определения указанных эффектов.

С математической точки зрения эти эффекты представляют собой функционалы от поля $\xi(x)$ вида

$$R=\int_D p(x)f(\xi(x))dx, \qquad (6)$$

где $f(\xi(x))$ -вероятность появления эффекта у отдельной особи популяции вследствие загрязнения величиной ξ, $p(x)$-плотность популяции в точке x, D-мониторируемая область. Интеграл R, т.е. количество эффектов, вызванных загрязнением $\xi(x)$, есть случайная величина, реализация которой определяется равенством

$$R=\int_D p(x)f(\Xi(x))dx, \qquad (7)$$

где $\Xi(x)$- какая-либо реализация $\xi(x)$ (предполагается, что интегралы (7) существуют для всех реализаций $\Xi(x)$).

В качестве критерия оптимизации следует выбрать критерий, связанный с минимумом дисперсии оценки функционала (6).

Оценка $\tilde{R}$ функционала R вычисляется с использованием измеренных значений $\eta(x_i)$ поля в точках x_i:

$$\tilde{R} = \sum_i c_i p(x_i)f(\tilde{\xi}(x_i)) \; , \qquad (8)$$

где $\tilde{\xi}(x_i)$ - оценка значения $\xi(x_i)$ по совокупности значений $\eta(x_i)$, c_i-квадратурные коэффициенты. Поскольку мы рассматриваем гауссовские поля, наилучшей оценкой $\tilde{\xi}(x_i)$ является результат усреднения поля $\eta(x)$ по некоторой области. В качестве меры отклонения оценки $\tilde{R}$ от фактического значения R выберем величину

$$S = \overline{(\tilde{R} - R)^2}. \qquad (9)$$

Эта величина может быть выражена через ковариационные функции $B_\xi(x,y)$ и $B_\eta(x,y)$. На основе этой величины можно сформулировать математическую задачу оптимизации мониторинга:

требуется выбрать точки измерений $\{x_i\}$ и способ оценки $\{\tilde{\xi}(x_i)\}$ на основе совокупности $\{\eta(x_i)\}$ таким образом, чтобы величина S, характеризующая точность оценки функционала R, была минимальной. Возможны и иные формулировки, являющиеся вариантами приведенной. Так поле $\xi(x)$ может задаваться параметрически, и в этом случае формула (8) видоизменяется.

Многие результаты настоящей работы получены в приближении непрерывного плана измерений, т.е. предполагается, что количество измерений столь велико, что можно говорить о плотности точек измерений на данном элементе области. В этом случае выражение (8) преобразуется в интеграл

$$R = \int_D p(x) f(\tilde{\xi}(x)) dx. \qquad (10)$$

В §1.2. рассматривается решение задачи оптимизации для детерминированного поля. В этом случае поле загрязнений $\xi(x)$ является детерминированным и

$$B_\xi(x,y) \equiv 0. \qquad (11)$$

Случайность возникает вследствие измерительной погрешности. Пусть $n(x)$ – плотность точек измерения, т.е. $n(x)dx$ – число измерений на площадке dx с центром в точке x. Общее число измерений фиксировано:

$$\int_D n(x) dx = N = \text{const}. \qquad (12)$$

Выберем элемент площади Δx с центром в точке x (величина Δx одинакова для всех x). Количество точек измерений в этом элементе площади равно $n(x)\Delta x$. Если дисперсия одного измерения равна $\sigma^2(x)$, то вследствие независимости (см.(3)) дисперсия оценки $\tilde{\xi}(x)$ равна

$$D\tilde{\xi}(x) = \frac{\sigma^2(x)}{n(x)\Delta x}, \qquad (13)$$

а дисперсия оценки $\tilde{R}$, на основании формулы переноса ошибок дается равенством

$$D\tilde{R} = \frac{1}{\Delta x} \int_D p^2(x) \left[\frac{df(x)}{d\xi} (\tilde{\xi}(x)) \right]^2 \frac{\sigma^2(x)}{n(x)\Delta x} dx. \qquad (14)$$

Варьируя $n(x)$, ищем минимум функционала (14) при условии (12). Методом неопределенных множителей Лагранжа получаем

$$n(x) = \frac{p(x) \left| \frac{df(x)}{d\xi} (\tilde{\xi}(x)) \right| \sigma(x)}{\int_D p(x) \left| \frac{df(x)}{d\xi} (\tilde{\xi}(x)) \right| \sigma(x) dx} * N. \qquad (15)$$

Этот результат получен в приближении непрерывного плана. Фактически, число N обычно не настолько велико, чтобы можно было использовать непрерывную модель и говорить о плотности измерений. В этом случае используется приближенный подход, основанный на формуле (15). Вся мониторируемая область разбивается на N участков, площадь каждого из которых равна

$$S_i = \frac{S_o}{n(x_i)} \left[\sum_{j=1}^{N} \frac{1}{n(x_j)} \right]^{-1}, \qquad (16)$$

где S_o – величина мониторируемой площади, x_i – внутренняя точка площадки S_i, в которой проводится измерение. Величины $n(x_i)$ вычисляются по формуле (15).

Задача нахождения оптимального расположения точек измерений рассмотрена в случае, когда поле загрязнения параметризуется, т.е. его можно представить в виде известной функции от неизвестных параметров. В случае линейной параметризации получено выражение для дисперсии $D\tilde{R}$ оценки функционала R, являющейся функцией от координат точек измерений. Для этого случая проведена численная реализация задачи оптимизации. Численно проверена чувствительность критерия к отклонениям от оптимального расположения точек.

Во второй главе рассматривается задача оптимизации в случае стохастического поля. В приближении непрерывного плана получена формула для оптимальной относительной частоты измерений в зависимости от координаты.

Обозначим через $n(x)$-число измерений на единичной площади в окрестности точки x за заданное время

$$\int_D n(x)dx = N , \tag{17}$$

Пусть далее

$$\eta(x,s)=\xi(x)+\theta(x,s) \tag{18}$$

-реализация измеренного поля в точке x,s-номер измерения. Здесь $\theta(x)$-случайная погрешность измерений, распределенная по нормальному закону. Различные реализации считаются независимыми между собой, т.е.

$$B_\eta(x,y,s_1,s_2)=\overline{\left[\eta(x,s_1)-\overline{\eta(x)}\right]\left[\eta(y,s_2)-\overline{\eta(y)}\right]}=$$

$$= B_\eta(x,y)\,\delta(s_1-s_2) , \tag{19}$$

где $B_\eta(x,y)$-ковариационная функция реализаций $\eta(x,y)$ при фиксированном s. Это имеет место, если между последовательными измерениями проходит достаточно большой промежуток времени. Задачу решаем в приближении непрерывного плана, поэтому s считается непрерывной переменной.

Все поля считаются гауссовскими и следовательно в качестве оценки поля $\xi(x)$ следует взять усреднения поля $\eta(x)$ по

реализациям

$$\tilde{\xi}(x) = \frac{1}{n(x)}\int_0^{n(x)} \eta(x,s)ds = \int_0^{\infty} K(x,s)\,\eta(x,s)ds , \tag{20}$$

Оценкой функционала (6) будет

$$\tilde{R} = \int_D p(x)f(\tilde{\xi}(x))dx . \tag{21}$$

Имеем

$$D\tilde{R} = \int_D p(x)\frac{df}{d\xi}\left[\overline{\xi(x)}\right]\frac{G(x)}{n(x)}dx , \tag{22}$$

где

$$G(x) = \int_D p(y)\frac{df}{d\xi}\left[\overline{\xi(y)}\right] B_\eta(x,y)\,dy . \tag{23}$$

Используя метод неопределенных множителей Лагранжа, находим минимум (22) при условии (17)

$$\hat{n}(x) = \frac{\sqrt{p(x)\frac{df}{d\xi}\left[\overline{\xi(x)}\right] G(x)}}{\int_D \sqrt{p(x)\frac{df}{d\xi}\left[\overline{\xi(x)}\right] G(x)}} * N . \tag{24}$$

(Можно доказать неотрицательность подкоренного выражения формулы (24)).

Исследован вопрос устойчивости критерия к отклонениям от оптимального расположения точек измерений. Получена оценка выражения для добавки к дисперсии, вызванной отклонением от оптимального расположения точек измерений.

Обратимся к случаю мониторинга случайного поля с известной ковариационной функцией $B_\xi(x,y)$. Как и раньше, требуется найти плотность расположения точек измерения, оптимальную в смысле наиболее точной оценки функционала (6).

Пусть, как и ранее, $n(x)$ – плотность точек измерения в точке x. Т.к. мы
предполагаем, что поле $\xi(x)$ гауссово, то в качестве оценки этого поля возьмем усреднение измеренного поля в некоторой области Δx вокруг точки x :

$$\tilde{\xi}(x) = \frac{1}{n(x)S_{\Delta x}} \int\limits_{\Delta x} \eta(x+s)ds = \int\limits_D K(x,s)\, \eta(x+s)ds , \tag{25}$$

где $S_{\Delta x}$– площадь области Δx, $\eta(x+s)$– измеренное значение поля загрязнения в точке x+s,

$$K(x,s) = \begin{cases} \dfrac{1}{n(x)\Delta x} & , s \in \Delta x \\ 0 & , s \notin \Delta x . \end{cases} \tag{26}$$

Если среднее значение поля $\overline{\xi(x)}$ медленно меняется с изменением x, то можно считать, что

$$\overline{\tilde{\xi}}(x) = \overline{\xi(x)} = \overline{\eta(x)} . \tag{27}$$

Оценкой R является выражение

$$\tilde{R} = \int\limits_D p(x)\, f\,(\tilde{\xi}(x))\, dx \tag{28}$$

В качестве критерия оптимальности выберем минимум величины

$$\overline{\left[\tilde{R} - R\right]^2} . \tag{29}$$

Имеем

$$\overline{\left[\tilde{R} - R\right]^2} \approx \iint\limits_{DD} p(x)\frac{df}{d\xi}\left[\overline{\xi(x)}\right]p(y)\frac{df}{d\xi}\left[\overline{\xi(y)}\right] *$$

$$* \Big[B_\xi(x,y) - 2\int\limits_D K(y,s)B_\xi(y+s)ds + \iint\limits_{DD} K(x,s)K(y,t)B_\xi(x+s,y+t)dsdt +$$

$$+ \int\limits_D K(x,s)K(y,x-y+s)\,\sigma^2(x+s)ds\Big]dxdy . \tag{30}$$

Для решения исходной задачи оптимизации необходимо решить экстремальную задачу

$$\overline{\left[\tilde{R} - R\right]^2} \Rightarrow \min \tag{31}$$

при условии

$$\int\limits_D n(x)dx = N \tag{32}$$

Выражение для $\overline{\left[\tilde{R} - R\right]^2}$ получено в приближении непрерывного плана. Т.к. на практике число N, как правило, невелико, то в таких случаях приходится численно решать задачу минимизации функционала $\overline{\left[\tilde{R} - R\right]^2}$ в предположении дискретного плана. При этом используются прямые методы (метод Эйлера, метод Ритца, градиентные методы и т.д.).

Третья глава посвящена разработке методов оптимизации траектории при непрерывном измерении (измерительная аппаратура находится на транспортном средстве) в задачах восстановления поля загрязнения.

Традиционные методы восстановления полей загрязнения при "непрерывном" измерении включают в себя измерения в узлах равномерной сетки и дальнейшее интерполирование в промежуточные точки. Используя априорную информацию о поле загрязнения предложена процедура оптимизации траектории, основанная на разделении переменных.

Предположим, что мониторируемая область D представляет собой прямоугольник размерами M и N, стороны которого параллельны осям координат и функция f(x,y)- плотность загрязнения имеет вид:

$$f(x,y)= p(x)* q(y) . \qquad (33)$$

В этом случае, если мы имеем измеренные значения поля на линиях x=a и y=b, то в любой точке (x,y) мониторируемой области

$$f(x,y) = \frac{f(a,y)* f(x,b)}{f(a,b)} . \qquad (34)$$

т.е. для восстановления поля во всей мониторируемой области достаточно измерить поле на двух перпендикулярных линиях. Эта процедура дает достаточно эффективные результаты, если правильно выбрано направление разделения переменных. По результатам предварительных измерений предложен метод, позволяющий с высокой точностью определять направления разделения переменных. В диссертации приведены некоторые приемы для улучшения точности восстановления.

В случае нелинейной параметризации поля загрязнения задача восстановления поля загрязнения сводится к оценке неизвестных параметров. Используя специфику задачи, предложен метод оптимизации траектории для эффективной оценки неизвестных параметров с помощью МНК.

Численные расчеты, проведенные на основе методов, разработанных в третьей главе, показали их достаточную эффективность для модельных и реальных полей.

Основные результаты, защищаемые в диссертации:

I. Сформулированы критерии оптимального расположения точек мониторинга, отражающие воздействие на популяцию в целом.

2. В приближении непрерывного плана получена формула для оптимальной плотности точек измерений.

3. Получена формула для оптимальной относительной частоты измерений в зависимости от координаты.

4. Проведен анализ чувствительности дисперсии целевого функционала к отклонениям от оптимального расположения точек измерений.

5. Получено выражение для дисперсии целевого функционала в случае стохастического поля загрязнения. Это выражение может служить основой для численной оптимизации расположения точек измерений при мониторинге случайного поля загрязнений.

6. При заданных направлениях разделения переменных предложена процедура оптимизации траектории. Предложен подход для определения направления разделения переменных на основе предварительно измеренных значений поля загрязнения.

7. При нелинейной параметризации поля загрязнения предложен метод оптимизации траектории для оценки неизвестных параметров с помощью МНК.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

I. Волков Н.Г., Дурдыев К. Оптимальное планирование эксперимента при мониторинге загрязнений природной среды. Препринт, Москва, МИФИ, I993.

2. Волков Н.Г., Дурдыев К. Оптимизация мониторинга поля загрязнения окружающей среды. Тез. докл. 28 научной конференции фак. физ.-мат. и естеств. наук Рос. УДН , I8-25 мая, I992.

3. Волков Н.Г., Дурдыев К. Оптимизация относительной частоты измерений в точках случайного поля по интегральному критерию.- Труды научно- практической конференции "Дифференциальные уравнения и их приложения" , г.Ашгабат, II-I4 мая, I993, стр.39-43.

4. Волков Н.Г., Дурдыев К. Оптимальное планирование эксперимента при решении некоторых задач мониторинга

окружающей среды. Известия АНТ, сер. физико-математических, технических, химических и геологических наук, 1993, 3.

5. Дурдыев К., Крянев А.В., Некрасов В.И. Оптимизация мониторинга при восстановлении полей загрязнения. Препринт, Москва, МИФИ, 1994.

6. Дурдыев К., Крянев А.В., Некрасов В.И. Использование метода разделения переменных для восстановления поля загрязнений, В кн:. Экология регионов АЭС, изд. инс. Атомэнергопроект, вып.2 , 1993.

7. Durdyev K., Volkov N.G. The optimization of the radiation pollution field on the integral criterion. 3th Annual scientific & technical conference of the nuclear society St.-Petersburg, 14-18 september, 1992.

8. Durdyev K., Volkov N.G. The optimization of measurements releative frequency in the stochastic field points on the integral criterion. 4th Annual scientific & technical conference of the nuclear society "Nuclear energy and human safety" , N. Novgorod, 28 june - 2 july, 1993.

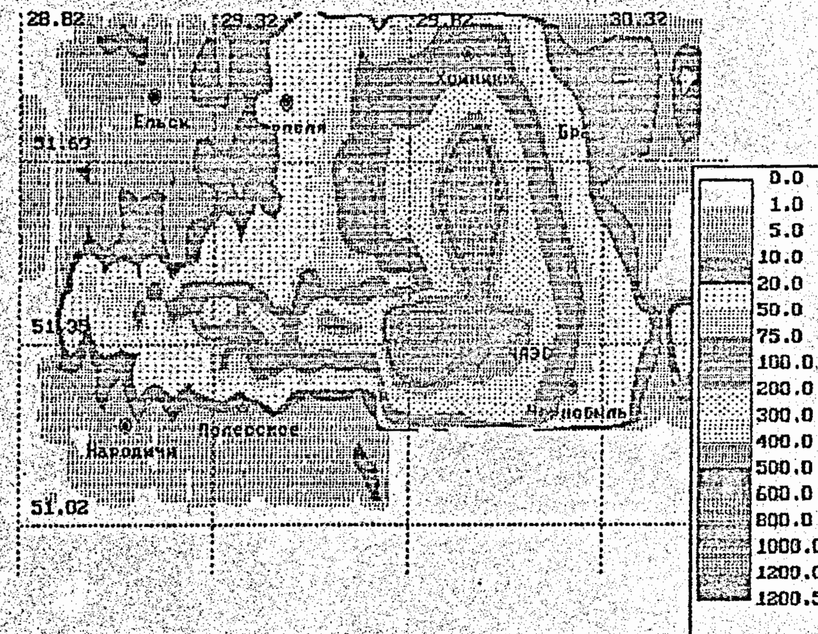

Рис.П.I. Изолинии уровней концентрации Zr^{95}

(экспериментальные измерения).

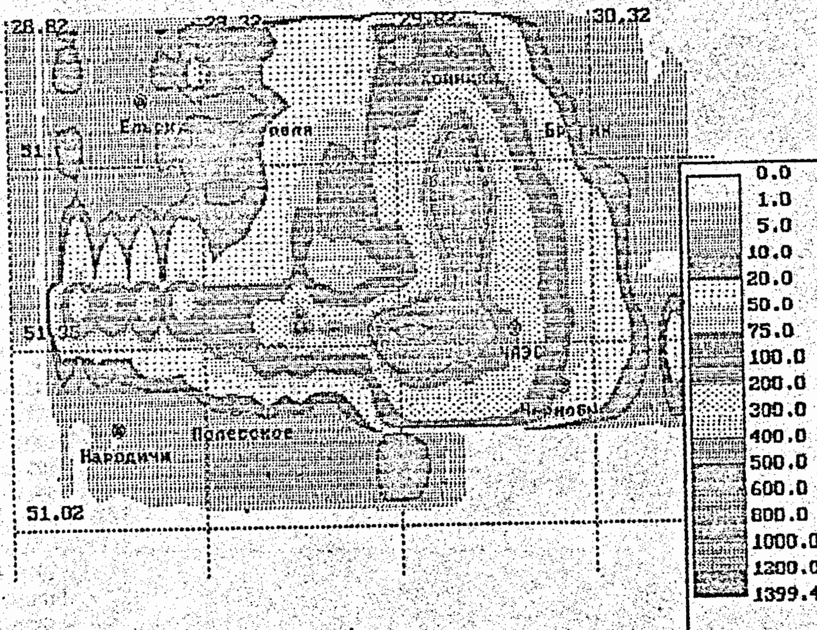

Рис.П.2. Изолинии уровней концентрации Zr^{95}

(восстановленные значения)

Подписано в печать 25.04.94 Заказ 591 Тираж 80 экз.

Типография МИФИ, Каширское шоссе, 31