

ОПТИМАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ СЕТИ ТОЧЕК ПРОБООТБОРА ПРИ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

О. В. Базарский*, А. А. Курышев**, В. В. Шабанов*

*Воронежский военный инженерный авиационный университет

**Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 15 сентября 2010 г.

Аннотация. В статье рассматриваются особенности формирования сети проботбора при эколого-геологических исследованиях. Предлагается методика оптимизации сети с учетом априорной информации. Представлены практические примеры ее реализации.

Ключевые слова: сеть проботбора, спектр функции, теорема выборки, фурье-образ, эколого-геологические исследования.

Abstract. In article a network sampling formation features are considered at ecological geology researches. The technique considering information aspects is offered and allowing optimum to place points. Practical examples of its realization are presented.

Key words: a network sampling, a spectrum of function of pollution, the choice theorem, a fure-image, ecological geology researches

Существующие рекомендации по выбору сети проботборов [1] основаны на практическом опыте. Они не учитывают теоретических информационных аспектов проблемы. Поэтому невозможно оценить степень оптимальности существующих методик и потери информации, возникающие в эколого-геологических исследованиях.

Известна теорема выборки [2], позволяющая рассчитать дискретную сеть выборок, по которым без потерь информации можно восстановить исходную функцию $C(x,y)$. Выборочный сигнал записывается следующим образом:

$$C_n = \text{comb}\left(\frac{x}{\Delta X}\right) \text{comb}\left(\frac{y}{\Delta Y}\right) C(x, y), \quad (1)$$

где comb – дискретная функция выборок, состоящая из дельта-функций (рис. 1 в одномерном варианте).

Шаг дискретизации ΔX . Величина функции $C_i(x)$ в пределах дискретной выборки считается постоянной и описывается единичной функцией $\text{rect}(x)$ – пунктирный прямоугольник на рис. 1.

Теорема выборки справедлива, если фурье-образ исходной функции $C(x,y)$ не равен нулю в пределах некоторой конечной области. Фурье-образ конечной функции можно найти путем свертки единичных функций на интервале ΔX . В результате

имеем набор треугольных функций шириной Δf_x , Δf_y в области пространственного спектра функции $F[C(x,y)]$, где F – оператор Фурье преобразования. Эти фурье-образы в виде треугольных функций

разделяются, если $\Delta x \leq \frac{1}{2f_x}$. Аналогично для оси y $\Delta y \leq \frac{1}{2f_y}$. Это максимально возможные

интервалы дискретизации, когда еще возможно точное восстановление функции $C(x,y)$. Восстановление реализуется, если полученные выборочные значения пропустить через линейный фильтр с передаточной функцией $H(f_x, f_y)$. Тогда

$$\begin{aligned} C(x, y) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} C\left(\frac{n}{2f_x}, \frac{m}{2f_y}\right) \times \\ &\times \sin c\left[2f_x\left(x - \frac{n}{2f_x}\right)\right] \cdot \sin c\left[2f_y\left(y - \frac{m}{2f_y}\right)\right] = \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} C\left(\frac{n}{2f_x}, \frac{m}{2f_y}\right) H(f_x, f_y). \quad (2) \end{aligned}$$

В эколого-геологических исследованиях невозможно оценить пространственный спектр функции загрязнения территории $C(x,y)$ и его максимальную пространственную частоту, как это делается в теореме выборки. Доступная информация, которую можно получить путем предварительно-

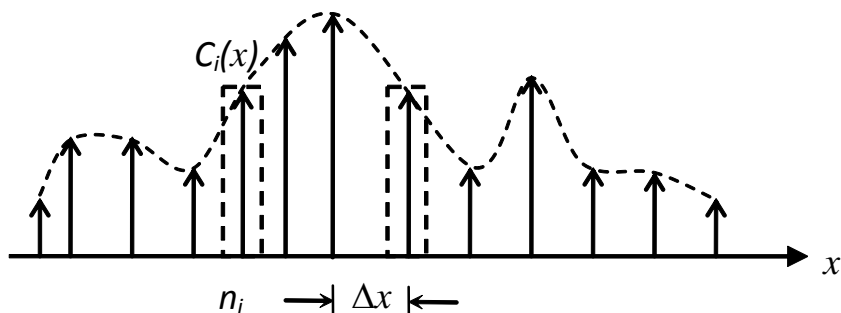


Рис. 1. Схема выборок линейной сети

го опробования территории площадью $S = L^2$, где L – ее линейный размер, – это максимальный C_{\max} и минимальный C_{\min} уровень линейного загрязнения (кг/м). Этой информации недостаточно для точного восстановления функции $C(x, y)$, однако можно сделать оценку максимально возможного шага дискретизации сети наблюдений, ΔX_{\max} , превышение которого может привести к полной потере информации.

Рассмотрим два предельных случая. Пусть имеется равномерное фоновое загрязнение территории. Тогда величина $C_{\min} \cdot L$ (кг) – это масса загрязняющего вещества по координате x . Математически это свертка профиля L с уровнем фонового загрязнения территории. Теперь представим другой, самый неприемлемый случай, когда все это загрязнение сосредоточилось в одном пятне с линейным размером ΔX . В этом случае эту же массу загрязняющего вещества можно рассчитать как свертку величин C_{\max} и ΔX , где C_{\max} – загрязнение в пятне. Свертка этих величин дает треугольную функцию площадью $C_{\max} \cdot 2\Delta X$. Очевидно, что шаг пробоотбора для первого случая не имеет принципиального значения. Во втором случае эколого-геологическую неоднородность можно обнаружить только при условии $\Delta X_{\max} \leq \Delta X$, т. е. шаг дискретизации не должен превышать линейного размера неоднородности. Из закона сохранения масс следует, что $C_{\min} \cdot L = C_{\max} \cdot 2\Delta X$.

Тогда предельно возможный шаг опробования в эколого-геологических изысканиях определяется следующим образом:

$$\Delta X_{\max} \leq \frac{L}{2C_{\max}/C_{\min}}, \quad (3)$$

а число точек пробоотбора

$$n \geq \frac{L}{\Delta X_{\max}} = 2 \frac{C_{\max}}{C_{\min}}. \quad (4)$$

Реально, резкие скачки градиента концентрации на ограниченной территории маловероятны.

При экологическом опробовании зоны влияния техногенного источника градиент концентрации обычно изменяется квазилинейно, и количество точек пробоотбора можно уменьшить в несколько раз.

Аналогично рассчитывается число точек пробоотбора m по оси y . Тогда по всей площади $N = n \cdot m$.

То есть число точек пробоотбора определяется степенью неоднородности участка. Если $C_{\max} = C_{\min}$, т. е. участок однороден, то теоретически достаточно двух точек пробоотбора, из которых одна является контрольной.

Рассмотрим три практических примера, подтверждающих развитую методику.

1. Основным загрязняющим веществом в процессе деятельности ОАО «Павловскгранит» является пыль.

На каждую частицу по вертикали действуют сила тяжести $mg = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho g$, где ρ – плотность частицы гранитной пыли, R – ее радиус, сила сопротивления Стокса $F_c = 6\pi\eta Rv$, где η – коэффициент динамической вязкости воздуха, v – скорости падения частиц. По горизонтали перенос частиц осуществляется за счет ветра, скорость которого U . Решение уравнения движения частиц показывает, что 2 % самой крупной пыли с радиусом $R = 215$ мкм падает с ускорением и при средних скоростях ветра 2 м/с переносится на расстояния, не превышающие 10 м. 77 % крупнодисперсной пыли с радиусом частиц свыше 25 мкм и до 215 мкм падает равномерно и переносится на расстояния до 500 м. 8 % среднедисперсных частиц с радиусами $5 \text{ мкм} \leq R \leq 25 \text{ мкм}$ разносятся на расстояния от 500 м до 10 км.

Мелкодисперсные частицы с радиусами, меньшими 5 мкм, длительное время присутствуют в атмосфере и разносятся на десятки и сотни километров. За время существования этих частиц метеосостояния могут существенно изменяться, да

и количество этих частиц незначительное. Поэтому зону влияния комбината ограничим радиусом 10 км.

На предприятии имеются 2 источника пыли: буровзрывные работы в карьере и дробление гранита на промплощадке. Эти источники находятся на расстоянии 2 км друг от друга, с точкой условного центра предприятия между ними. Тогда крупнодисперсная пыль массой 1035 т/год, составляющей 79 % выброса предприятия, оседает в прямоугольнике 3×1 км² и площадью $3 \cdot 10^6$ м². Среднедисперсная пыль массой 160 т/год оседает в зоне влияния радиусом 10 км площадью $311 \cdot 10^6$ м². Учитывая годовое усреднение, можно оценить поверхностную концентрацию осаждающейся пыли в этих двух областях: $C_{\max} = 0,34$ кг/м²год и $C_{\min} = 5 \cdot 10^{-4}$ кг/м²год. Экспериментальная проверка величин C_{\max} и C_{\min} по накоплению пыли в снежном покрове в пересчете на год дала близкие к расчетным значения.

Для восстановления профиля концентрации осаждающейся пыли по радиусу от условного центра предприятия измерения необходимо проводить с шагом $\Delta X_{\max} = 7$ м согласно уравнению (3). Это очень частый шаг дискретизации, т. к. градиент концентрации пыли по лучу изменяется нелинейным образом.

Если проанализировать только первую зону осадения крупнодисперсной пыли, составляющей основную массу годового выброса, то на границе 2,5 км от условного центра $C_{\min} = 7 \cdot 10^{-3}$ кг/м²год, что требует максимально 100 точек пробоотбора с шагом 25 м. Поскольку в этой зоне градиент концентрации изменяется квазилинейно, то шаг пробоотбора можно увеличить до 150 м. При этом реализуется достоверное пространственное восстановление профиля концентрации осаждающейся пыли, что подтверждено экспериментально.

2. Для оценки радиационного состояния почв на территории Хлевицкого района Липецкой области в 2008 г. были произведены замеры эффективной эквивалентной дозы излучения на поверхности земли. Измерения проводились по равномерной сети наблюдений в узловых точках. Общая площадь обследуемой территории составила 93,3 км². Точки наблюдения располагались на расстоянии 3,5 км друг от друга. Всего было произведено 46 измерений, причем $C_{\max} = 0,13$ мЗв и $C_{\min} = 0,27$ мЗв, $L = \sqrt{S} = 9,66$ км.

Следовательно, шаг пробоотбора $\Delta X = 3,3$ км, что требует максимально 15 точек наблюдений. В 2009 г. проведено детальное крупномасштабное

исследование уровня радиационного поля на той же территории с шагом пробоотбора 113 м.

Сопоставление карт радиационного фона почвенного покрова за 2008 и 2009 гг. показывает их практически полную идентичность (рис. 2), т. е. увеличение точек пробоотбора относительно оптимального с шагом 3,3 км не дало никакой новой информации.

3. Для районов размещения крупных металлургических предприятий характерно комплексное загрязнение приповерхностных отложений тяжелыми металлами. Согласно методике ЦРГУ [3], оценка уровня загрязнения в этом случае проводится по суммарному показателю загрязнения (СПЗ):

$$СПЗ = \sum_{i=1}^n K_{\kappa} - (n - 1), \quad (5)$$

где n – количество элементов, для которых $K_{\kappa} \geq 1$; K_{κ} – коэффициент концентрации элемента в пробе относительно ПДК.

В зоне влияния ОАО «ОЭМК» в качестве основных загрязняющих компонентов для приповерхностных отложений выделены Mn, Cr, Cu, Pb, Zn. По результатам расчетов СПЗ в 17 точках наблюдения установлено $C_{\max} = 2,78$ и $C_{\min} = 1,43$. Линейные размеры участка обследования $6 \times 7,2$ км и общая площадь $S = 43,2$ км². Проведем расчет отдельно по осям x и y .

$$\Delta X = \frac{L \cdot C_{\min}}{2C_{\max}} = \frac{6000}{4} \frac{\text{м}}{\text{кг/м}^2\text{год}} = 1,5 \text{ км}, \quad n_x = 4;$$

$$\Delta Y = \frac{L \cdot C_{\min}}{2C_{\max}} = \frac{7200}{4} \frac{\text{м}}{\text{кг/м}^2\text{год}} = 1,8 \text{ км}, \quad n_y = 4.$$

Общее количество точек наблюдения $N = n_x \cdot n_y = 16$.

Таким образом, проведенный в зоне влияния ОАО «ОЭМК» пробоотбор позволяет установить уровень загрязнения по показателю СПЗ без потери информации. На рис. 3 приведена карта комплексного загрязнения территории, построенная по 17 точкам. Контрольные измерения в 4 дополнительных точках дали результаты, соответствующие построенной карте.

Поэлементная оценка, где наблюдаются отдельные пятна существенного загрязнения территории с нелинейным изменением градиента концентраций, показала, что необходимо на порядок увеличивать количество точек пробоотбора относительно сглаженного СПЗ.

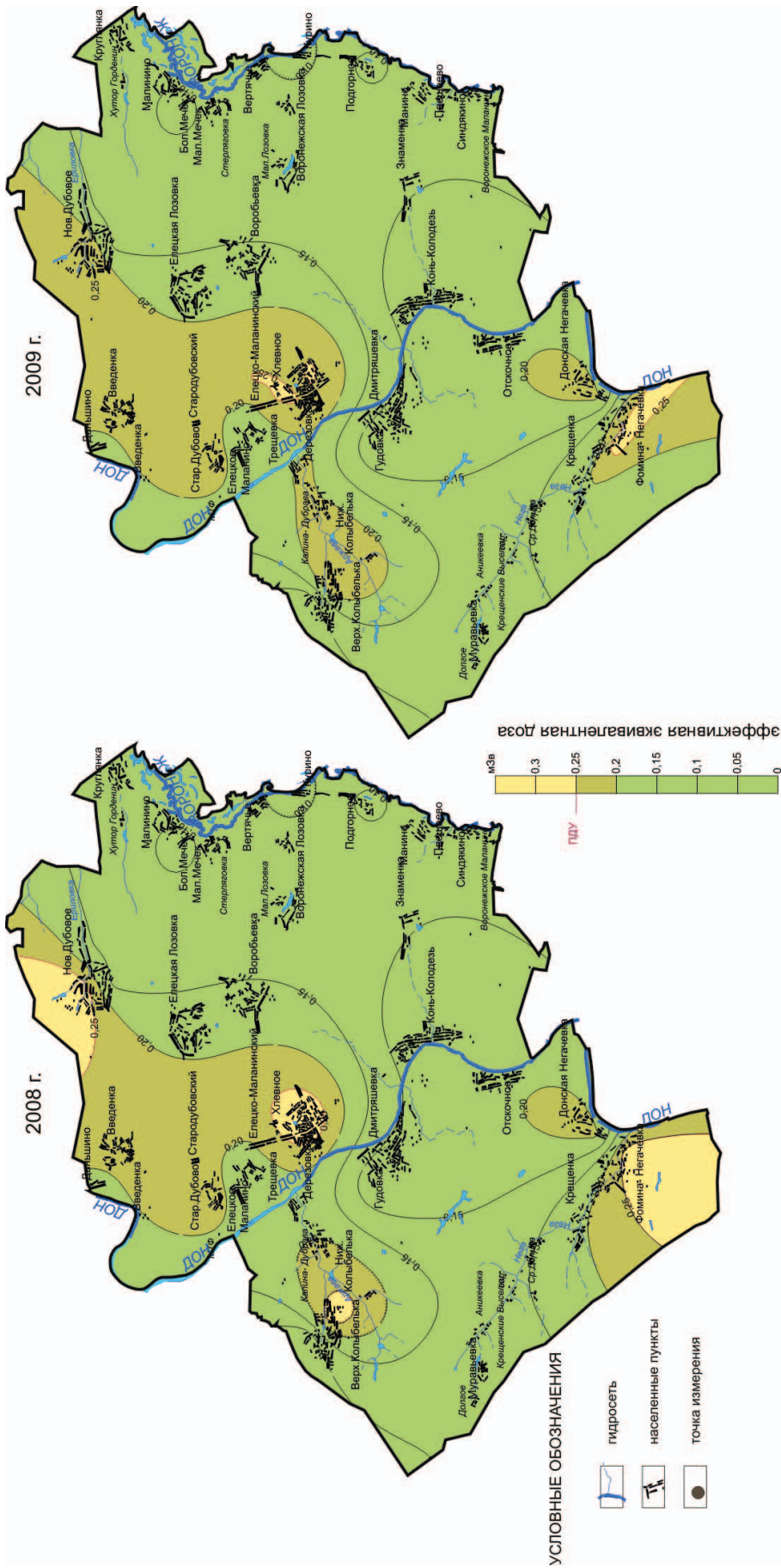
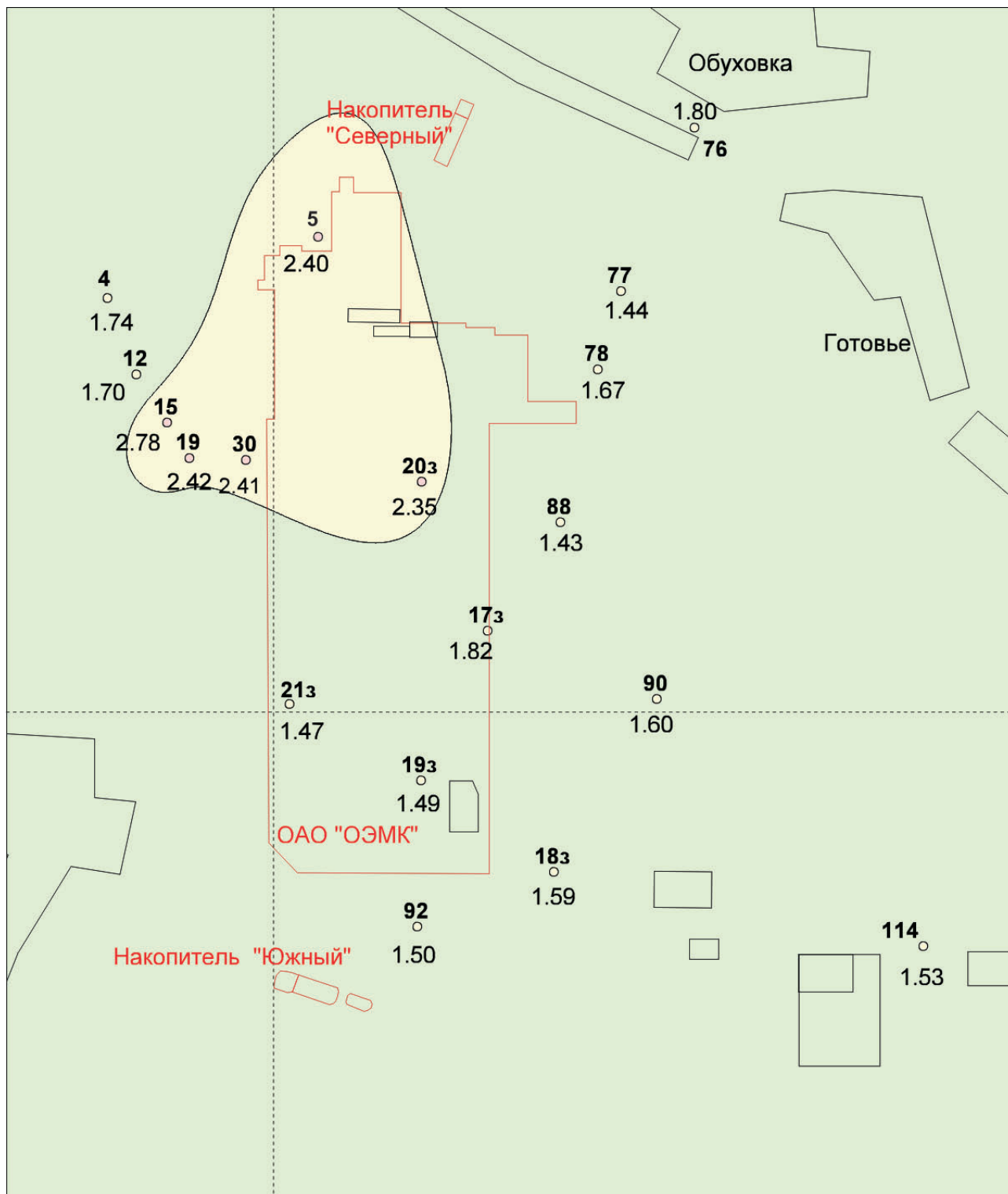


Рис. 2. Карта радиационного фона почвенного покрова Хлевенского района за 2008 и 2009 гг. (М 1 : 500 000)



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- 76 - номер пробы
- 1,8 - значение СПЗ
- изолинии

Категории оценки

- Экологическая норма
- Экологический риск

Рис. 3. Схематическая карта комплексного загрязнения промплощадки ОАО «ОЭМК» (М 1 : 50 000)

Выводы

1. Развита методика формирования сети пробоотбора приповерхностных отложений, позволяющая оценить максимальный шаг дискретизации, превышение которого приводит к полной потере информации об объекте исследования.

2. Рассмотрены три практических примера, подтверждающих развитую методику. Показано, что увеличение числа точек пробоотбора свыше оптимального не дает дополнительной эколого-геологической информации об объекте исследования.

Воронежский военный инженерный авиационный университет

О. В. Базарский, профессор, доктор физико-математических наук
Тел. 8 (473) 220-82-89

Воронежский государственный университет

А. А. Курьшев, преподаватель кафедры экологической геологии
kaa@geol.vsu.ru
Тел. 8 (473) 220-82-89

Воронежский военный инженерный авиационный университет

В. В. Шабанов, соискатель ВИАУ
Тел. 8 (473) 220-82-89

ЛИТЕРАТУРА

1. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы. СанПиН 2.1.7.1287-03.

2. Гудман Дж. Введение в Фурье-оптику / Дж. Гудман. – М. : Мир, 1970.

3. Легенда Воронежской серии листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 200 000 : эколог. геол. карта / под ред. В. В. Петрухина ; Мин-во природн. ресурсов РФ, ЦРГУ. – 2-е изд. – М., 1998.

Voronezh Military Engineering Aviation University

O. V. Bazarsky, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences
Tel. 8 (473) 220-82-89

Voronezh State University

A. A. Kuryshev, teacher of Chair Ecological Geology
kaa@geol.vsu.ru
Tel. 8 (473) 220-82-89

Voronezh Military Engineering Aviation University

V. V. Shabanov, post-graduate student, MEAU
Tel. 8 (473) 220-82-89