

## Проектирование системы экологического мониторинга особо опасных промышленных объектов

© 2010. М.Г. Кургузкин<sup>1</sup>, к.т.н., министр, М.А. Корепанов<sup>2</sup>, д.т.н., с.н.с.,  
В.А. Тенев<sup>3</sup>, д.ф.-м.н, профессор,

<sup>1</sup>Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Удмуртской Республики,

<sup>2</sup>Институт прикладной механики Уральского отделения РАН,

<sup>3</sup>Ижевский государственный технический университет,  
e-mail: mpr@udmnet.ru, miko@rbcmail.ru, tenenev@istu.ru

Предложена методика выбора точек экологического мониторинга окрестностей опасного промышленного объекта, основанная на расчёте переноса загрязняющих веществ с газообразными выбросами, их осаждения и стока по поверхности, имеющей определённый рельеф. В качестве примера рассмотрен объект по уничтожению химического оружия в г.Камбарка Удмуртской Республики.

Methods of choice of sites for ecological monitoring in the vicinity of a dangerous industrial object are offered. They are based on calculating the transfer of poisonous substances with gas wastes, their landing and drainage around the surface with a definite relief. The chemical weapons decommission plant in the town Kambarka in the Udmurt republic is considered as an example.

Ключевые слова: экологический мониторинг, распространение загрязнения, объект утилизации, пункт мониторинга, пробоотбор

Key words: ecological monitoring, pollution spread, utilization plant, monitoring site, sample collecting

Объекты утилизации (ОУ) систем вооружения, военной техники, боевых отравляющих веществ относятся к опасным промышленным объектам, поэтому к их экологической безопасности предъявляются повышенные требования.

Экологический мониторинг наряду с нормированием негативных воздействий и экологическим контролем является основным инструментом обеспечения экологической безопасности.

Полнота и достоверность мониторинговой информации зависит от множества факторов, к важнейшим из которых следует отнести расположение пунктов мониторинга на обследуемой территории. Под пунктами мониторинга (ПМ) далее понимаются точки отбора проб воздуха, почвы, воды, донных отложений и т. д. для количественного химического анализа (КХА) или биотестирования, а также площадки биомониторинга.

От выбора расположения ПМ зависит и их количество. При оптимальном расположении достичь требуемой достоверности и информативности результатов исследований можно при относительно небольшом количестве ПМ. Вместе с тем очевидно, что основой для оптимизации сетки ПМ могут

быть лишь результаты самих мониторинговых исследований.

В работе [1] в качестве проектной основы для расположения ПМ объектов по хранению и уничтожению химического оружия (ОХХО и ОУХО) предлагается регулярная сетка, образованная при пересечении концентрических окружностей и радиусов (румбов). Это наиболее простой и логически понятный подход, у которого есть лишь один недостаток. Для того чтобы обеспечить требуемую информативность системы экологического мониторинга, количество ПМ (узлов сетки) должно быть весьма значительным. При этом затраты на проведение пробоотбора и анализов могут превысить реальные возможности проектируемой системы мониторинга, имея в виду как материальный, так и временной аспекты. Кроме того, при таком подходе априори предполагается, что центр (максимум) загрязнения совпадает с источником загрязнения, то есть с самим объектом утилизации.

С целью уменьшения затрат авторами [2] предлагается следующий алгоритм проведения мониторинговых исследований. Отбор проб для анализов производится не во всех точках регулярной сетки, а лишь в определённой области (зоне). Указанная область

определяется на основе оперативной информации о метеопараметрах (направление ветра, его скорость и т. д.) и результатах расчёта рассеяния загрязняющих веществ в приземных слоях атмосферы.

Предложенный алгоритм, безусловно, может рассматриваться как вариант практической реализации системы пробоотбора. Вместе с тем следует признать, что в данном случае задача экологического мониторинга сводится к определению текущих концентраций загрязняющих веществ и их сравнению с предельно допустимыми. Практические возможности выявления и корректного анализа трендов, а также прогнозирования изменения состояния окружающей среды на всей территории мониторинговых исследований при таком подходе существенно снижаются.

Рассматривая экологический мониторинг прежде всего как инструмент выявления возможного влияния объектов утилизации на окружающую среду при их эксплуатации в штатном режиме, следует отметить одну существенную особенность. Она заключается в необходимости обеспечения регистрации весьма малых изменений концентраций веществ и параметров или отсутствия этих изменений на протяжении всего времени существования объектов утилизации. С учётом этого обстоятельства, а также реальной периодичности пробоотбора и погрешности используемых методов КХА наиболее корректным представляется проведение начального объёма исследований во всех ПМ исходной сетки.

При этом возможность последующей корректировки системы экологического мониторинга, включая изменение количества и расположения точек пробоотбора, а также перечня контролируемых веществ, безусловно, не исключается. Однако вывод о её целесообразности может быть сделан лишь на основе анализа определённой совокупности результатов исследований, накопленных при неизменной исходной сетке ПМ. При этом объём указанной совокупности должен соответствовать требованиям, предъявляемым к выборкам для корректного использования методов статистики.

Возможность выбора оптимальной сетки ПМ не исключается и на этапе проектирования системы экологического мониторинга в целом. На этом этапе оптимизацию следует понимать как необходимость выявления и учёта особенностей территории, а также факторов, определяющих распространение загрязняющих веществ в окружающей среде.

Указанные факторы можно разделить на две большие группы. В состав первой группы входят характеристики территории, на которой находится объект утилизации. К ним прежде всего относятся климатические характеристики местности, её рельеф, преобладающее направление ветров, типичные биогеоценозы, а также уровни загрязнения окружающей среды, накопленные за весь период хозяйственной деятельности на рассматриваемой территории.

Ко второй группе относятся факторы, связанные непосредственно с ОУ, например, вещества, выделяемые в окружающую среду, связанные с технологией утилизации и вовлекаемыми в технологический процесс материалами. Подлежит учёту также способ попадания выделяемых веществ в окружающую среду.

Очевидно, что для рассматриваемых ОУ преобладающим видом загрязнения окружающей среды являются выбросы в атмосферу, поскольку на таких объектах используются, как правило, замкнутые циклы технологического водоснабжения, а способ захоронения твёрдых отходов исключает контакт с окружающей средой.

Нами рассмотрена методика расчёта переноса загрязняющих веществ с газообразными выбросами, их осаждение и сток по поверхности, имеющей определённый рельеф. Использование разработанной методики позволяет более обоснованно подходить к выбору точек мониторинга на местности в зоне влияния рассматриваемого ОУ.

Математическая модель переноса газообразных примесей в атмосфере основана на решении пространственного нестационарного уравнения диффузии [3–5] для концентрации  $C$  исследуемого вещества:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1).$$

Коэффициенты диффузии рассчитываются по соотношениям, приведённым в [4, 5]. Уравнение переноса (1) дополняется начальными и граничными условиями.

Начальные условия:

$$C(t = 0, x = X, y = Y, z = Z) = C_0, \quad (2)$$

где  $X, Y, Z$  – координаты соответствующие источнику загрязнения;  $C_0$  – концентра-

ция опасного вещества в источнике (может задаваться в долях ПДК). В остальных точках расчётной области в момент времени  $t=0$   $C(0, x, y, z)=0$ .

Граничные условия:

$- C(t, x = X, y = Y, z = Z) = C_0$  – в источнике,

$$-\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = 0, \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} = 0, \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = 0 \text{ – на остальных}$$

соответствующих границах расчётной области.

Для численного решения уравнения (1) применялась факторизованная неявная разностная схема [6].

Результаты расчётов могут быть представлены в виде линий равных концентраций на подстилающей поверхности в различные моменты времени, а также в виде зависимости максимальной концентрации от продольной координаты в направлении ветра также в различные моменты времени.

Для начала расчёта программа считывает характеристики одного или нескольких источников распространения примесей: начальные условия (2) и координаты соответствующие источникам загрязнения. Задаются также метеоусловия: направление и скорость ветра на высоте флюгера; температура воздуха; степень устойчивости атмосферы. Серия предварительных расчётов для области  $H=10000$ ,  $H=1000$  и  $H=200$  с различным количеством узлов сетки и шагом по времени показала, что приемлемая точность обеспечивается при сетке  $50 \times 50 \times 50$  и шаге по времени  $t = 1$  с.

Распространение примесей в атмосфере имеет вид, показанный на рисунках 1, 2. На рисунке 1 показано распределение линий равной концентрации в приземном слое (сечение  $xy$ ). На рисунке 2 показано вертикальное сечение  $xz$ . В результате расчётов

было установлено, что через 80–100 мин. от начала выброса устанавливается стационарная картина распределения загрязнения в приземном слое.

Выпавшие на поверхность земли примеси могут накапливаться либо транспортироваться поверхностными водами. При образовании снежного покрова все примеси накапливаются в нём до начала таяния. При таянии снега вода, содержащая примеси, переносит их в соответствии с рельефом местности. В сухое летнее время выпавшие из атмосферы примеси накапливаются и могут просачиваться в нижние слои почвы. При высокой интенсивности осадков может происходить одновременный перенос примеси как по поверхности, так и вглубь почвы. Для учёта этого явления необходимо совместное решение задачи фильтрации жидкой фазы в поверхностном слое почвы и задачи растекания жидкости по поверхности.

В случае однородного слоя почвы компоненты скорости фильтрации определяются в соответствии с законом Дарси:

$$u = \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, v = \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y}, w = \frac{k}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \right), \quad (3)$$

где  $k, \mu$  – коэффициенты проницаемости почвы и вязкости жидкости;  $p, \rho$  – давление и плотность жидкости.

При подстановке в уравнение неразрывности получается уравнение неустановившейся фильтрации [7]:

$$\frac{\partial(\rho m S)}{\partial t} = \text{div} \left[ \frac{k}{\mu} \rho S (\nabla p + \rho g \nabla h) \right] + J, \quad (4)$$

где  $m, S$  – пористость почвы и насыщенность влагой;  $J$  – поток жидкой фазы на поверхности. При отсутствии градиента давления движение жидкости в пористой среде определяется

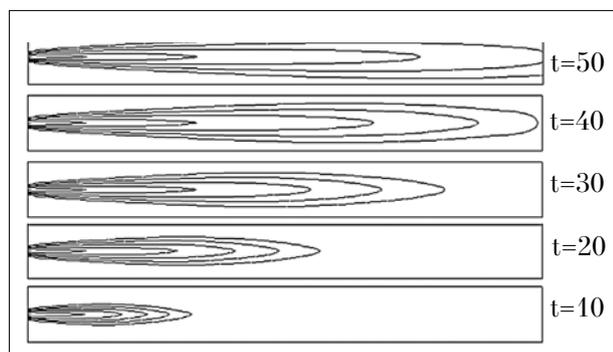


Рис. 1. Распространение облака загрязняющих веществ от начала выброса (горизонтальное сечение)

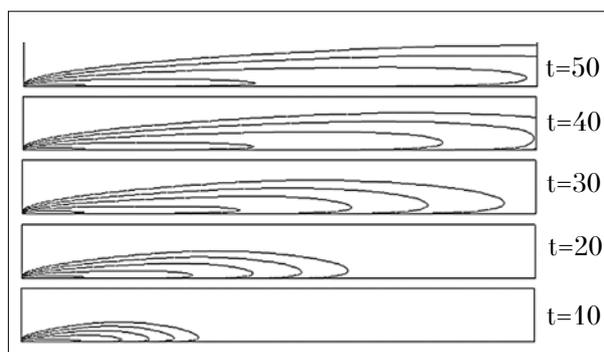


Рис. 2. Распространение облака загрязняющих веществ от начала выброса (вертикальное сечение)

силой тяжести. Основным фактором, определяющим движение жидкости в поверхностном слое почвы, является рельеф местности.

Неустановившееся движение жидкости по склону можно описать уравнением [8]:

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial \xi} + \frac{\partial q}{\partial \eta} = J^+ + J^-, \quad q = a\delta^\beta, \quad (5)$$

где  $\delta$  – толщина жидкого слоя;  $q$  – расход жидкости в поперечном сечении;  $\xi, \eta$  – координаты, направленные по поверхности слоя;  $J^+, J^-$  – потоки жидкости, связанные с выпадением осадков и фильтрацией жидкости;  $a, \beta$  – эмпирические коэффициенты.

Для удобства численного решения уравнения, описывающие процесс переноса, должны быть записаны в системе координат, сопряженной с рельефом. Для обеспечения точности и сходимости численного метода решения требуется применение ортогональных конечно-разностных сеток. При этом отправной точкой для построения криволинейной ортогональной сетки в поверхностном слое с произвольной геометрией является ортогональная сетка, нанесенная на поверхность.

Методика построения криволинейной ортогональной сетки в произвольной области интегрирования приведена в работах [9, 10].

В качестве примера приведена ортогональная сетка на поверхности (рисунок 3) для рельефа местности, соответствующего географической карте окрестностей объекта по уничтожению химического оружия (ОУХО) в г. Камбарка Удмуртской Республики.

Эта сетка используется при решении уравнения растекания жидкости по поверхности (5). Таким же образом строится пространственная криволинейная разностная сетка. Метод заключается в послойном построении трёхмерной сетки, начиная с поверхности обтекаемого тела. Узлы последующего слоя расположены на нормалях к предыдущей поверхности [10]. Полученная

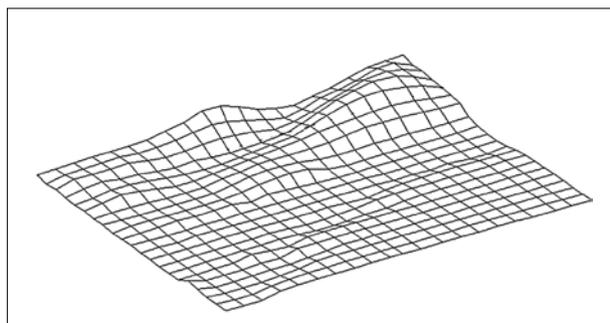


Рис. 3. Криволинейная сетка на поверхности

сетка используется при решении уравнения фильтрации (4).

На рисунке 4 приведены графики ожидаемых концентраций загрязнённости воздуха по азимуту при распространении загрязнения по ветру (летний период – апрель–октябрь, зимний период – ноябрь–март). Выделение зимнего периода обусловлено существованием в это время устойчивого снежного покрова.

На рисунках 5 и 6 приведены графики массовых потоков осаждения примесей на поверхность для летнего и зимнего периодов соответственно.

Результаты расчётов, приведённые на рисунках 5 и 6, соответствуют единичной интенсивности выброса  $Q \left[ \frac{1}{m^2} \right]$ . При известной интенсивности выбросов в атмосферу  $M \left[ \frac{kg}{s} \right]$  массовый поток на поверхность равен  $MQ$ .

Из рисунков следует, что в зависимости от направления ветра один и тот же уровень концентрации загрязнения достигается на различном расстоянии от источника. При этом чем ниже ожидаемый уровень, тем более он растянут по радиальной координате в зависимости от направления ветра.

Простой учёт распространения загрязнения в атмосфере и осаждения на поверхность является недостаточным, необходимо также учесть возможность его переноса с поверхностными водами, для чего необходимо провести расчёт распространения загрязнения по рельефу.

Предполагается, что в летний период осадки выпадают с периодичностью один раз в неделю и их продолжительность 2 часа. Исходя из этих предположений и данных метеорологических наблюдений, определялся массовый поток воды на поверхность земли. Например, для июля:

$$J^+ = \frac{61 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 7200} 10^3 = 2,1 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{m^2 \cdot s}.$$

В зимний период все осадки накапливаются в виде снега. В период таяния снегов все твердые осадки переходят в жидкую фазу и  $J^+ = 3,2 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{m^2 \cdot s}$ .

Особенностью весеннего периода является то, что земля является мерзлой, коэффициент пористости принимается равным нулю, поток  $J^- = 0$ , и решается только уравнение (5).

С учётом имеющихся исходных данных проведены расчёты годового накопления примеси, распространяющейся от источника единичной интенсивности. Количество накопленной примеси относится к единице площади поверхности. Размерность данной величины

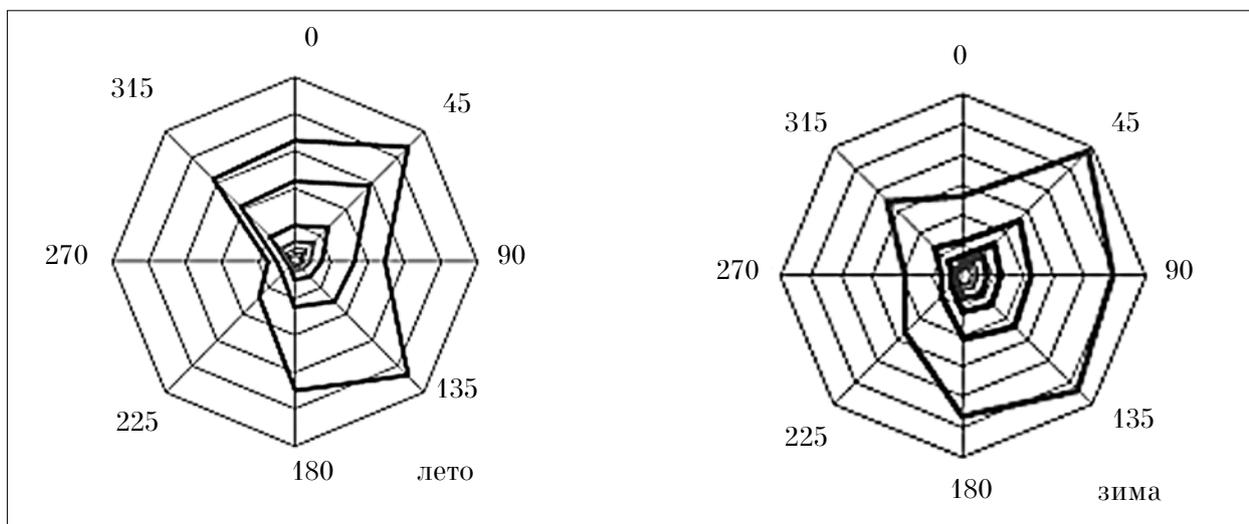


Рис. 4. Распределение ожидаемых концентраций при распространении загрязнения по азимуту

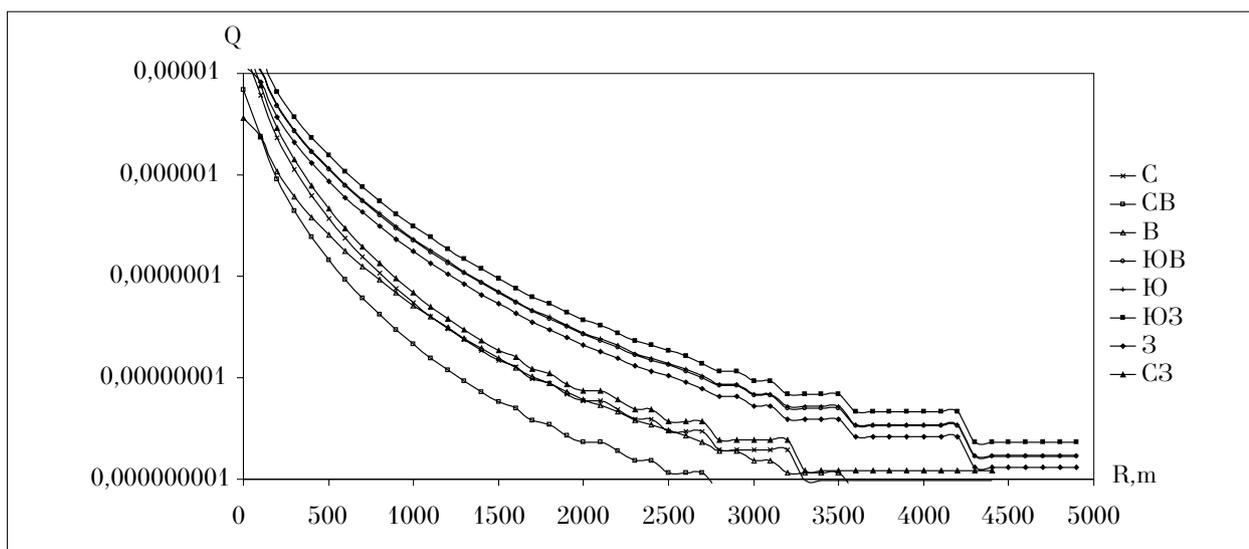


Рис. 5. Массовые потоки осаждения примесей на поверхность по направлениям ветра (летний период – апрель–октябрь)

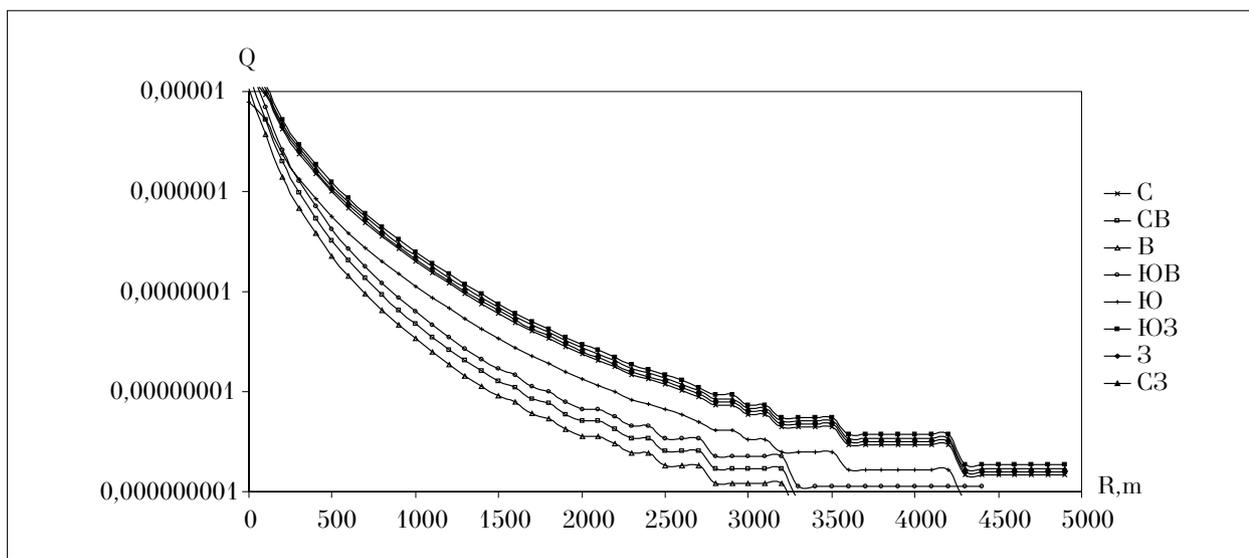
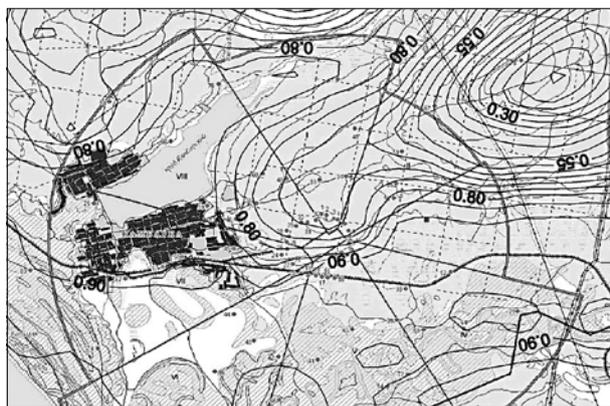
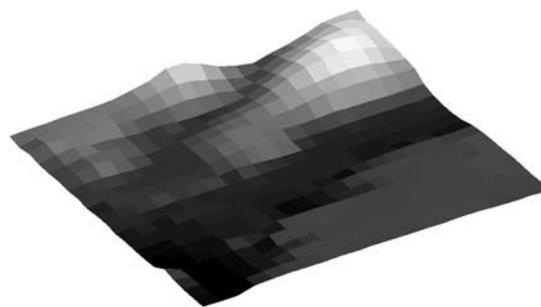


Рис. 6. Массовые потоки осаждения примесей на поверхность по направлениям ветра (зимний период – ноябрь–март)



А – схема расположения пунктов мониторинга



Б – ожидаемое накопление примесей

**Рис. 7.** Ситуационный план системы экологического мониторинга ОУХО в г. Камбарка в сравнении с ожидаемым накоплением загрязнения на рельефе

$V [\frac{с}{m^2}]$ . После умножения на интенсивность выбросов  $M [\frac{kg}{с}]$  получается количество  $K=MB [\frac{kg}{m^2}]$ . На рисунке 7 Б приведена визуализация количества накопленной примеси.

Белый цвет соответствует минимальному количеству накопления загрязнения в  $9 \cdot 10^{-5} \frac{1}{m^2}$ , а чёрный – максимальному  $9,9 \cdot 10^{-4} \frac{1}{m^2}$ .

Из рисунка 7Б следует, что минимальный ожидаемый уровень наблюдается к северо-востоку от объекта, что объясняется особенностями розы ветров и рельефом местности. Южное направление ветра преобладает зимой, когда загрязнение накапливается в снежном покрове, а затем при таянии снега стекает с возвышенности, расположенной к северо-востоку от объекта, в поймы рек Буй и Камбарка, где и наблюдается повышенный уровень концентрации загрязнения.

Сравнение расположения расчетных изолиний концентрации загрязнения почвы и существующих точек пробоотбора (рисунок 7А) показывает возможности и направления оптимизации сетки ПМ.

Кроме того, построение изолиний ожидаемых концентраций на основе описанной расчётной методики даёт возможность обоснованного выбора площадок биомониторинга, результаты которого в совокупности с количественным химическим анализом позволят более достоверно отслеживать изменение состояния окружающей среды в результате функционирования техногенного объекта.

### Литература

1. Чупис В.Н. Экологический мониторинг объектов уничтожения химического оружия – опыт создания и

перспективы развития // Теоретическая и прикладная экология. № 2. 2007. С. 35–41.

2. Чупис В.Н., Мартынов В.И., Быстренина В.В., Шляпин В.В., Бардина Т.В. Единая система сбора, обработки и анализа информации в интересах государственного и производственного экологического мониторинга объектов по хранению, перевозке и уничтожению химического оружия // Теоретическая и прикладная экология. № 4. 2008. С.16–23.

3. Разработка программного комплекса по статистической обработке, анализу и визуализации результатов мониторинга окружающей среды. Научно-техн. отчет по госконтракту №14-Э от 3 апреля 2007 г. Ижевск: ИжГТУ, 2007. 62 с.

4. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнение атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 448 с.

5. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 272 с.

6. Марчук Г.И. Методы расщепления. М.: Наука, 1988. 264 с.

7. Закиров Э.С. Трёхмерные многофазные задачи прогнозирования, анализа и регулирования разработки месторождений нефти и газа. М.: «Грааль», 2001. 302 с.

8. Прогноз последствий аварий на объекте хранения боевых отравляющих веществ в районе г. Камбарка УР / Под ред. В.М. Колодкина Ижевск: Изд-во УдГУ, 1995. 110 с.

9. Тенев В.А., Шухардин М.В. Трёхмерные течения продуктов сгорания в энергетических установках // Проблемы энерго-ресурсосбережения и охраны окружающей среды. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 1998. С. 65–70.

10. Разработка программного комплекса по выбору и обоснованию сети точек экологического мониторинга (применительно к объектам уничтожения химического оружия). Научно-техн. отчет по госконтракту №32-Э от 5 мая 2008 г. Ижевск: ИПМ УрО РАН, 2008. 44 с.