

XVI Всероссийская Конференция-школа молодых исследователей  
“Современные проблемы математического моделирования”

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСЧЁТА ДОЗ  
ОБЛУЧЕНИЯ ОТ РАДИОАКТИВНОГО ОБЛАКА  
ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ С УЧЕТОМ  
ЭКРАНИРОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗДАНИЯМИ



*Дзама Д.В., Лозинг Н.М., Сороковикова О.С.  
ИБРАЭ РАН, МОСКВА, 2015*

# Введение

Для строящихся и проектируемых ОИЯЭ (Объектах использования Ядерной Энергии) актуальной является задача обоснования безопасности, поддержка принятия решений при возникновении аварийной ситуации разной степени тяжести в пределах самого промышленного объекта.

Решение этой задачи производится в два этапа:

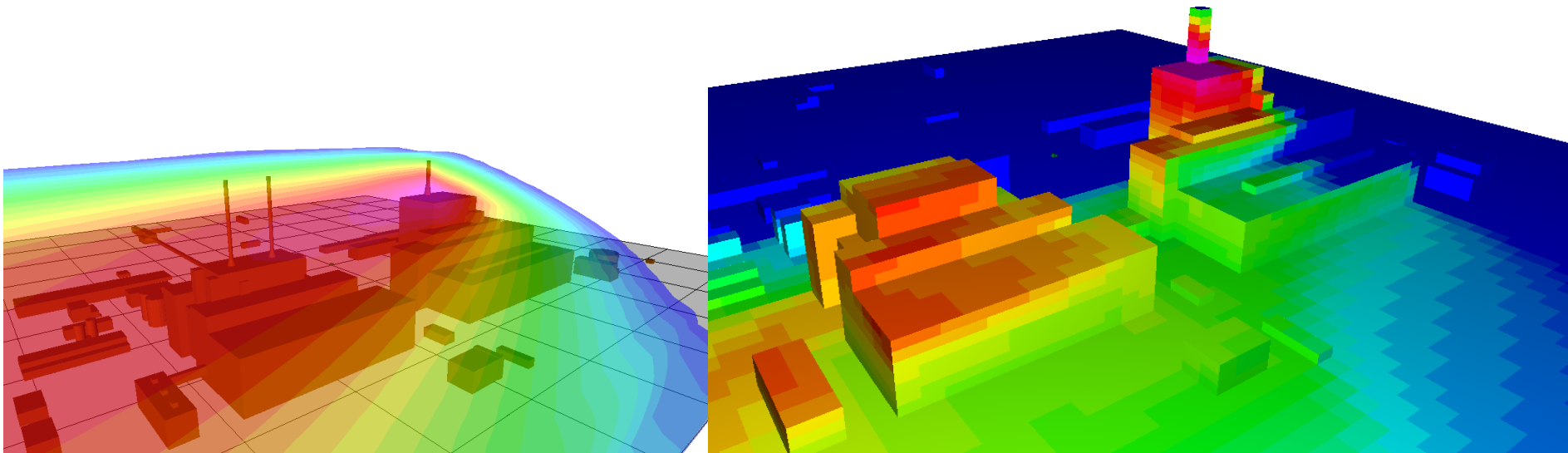
- 1) Моделирование процессов атмосферной дисперсии (аэротермодинамика атмосферы + перенос примеси).
- 2) Оценка радиационной обстановки.

# Постановка задачи

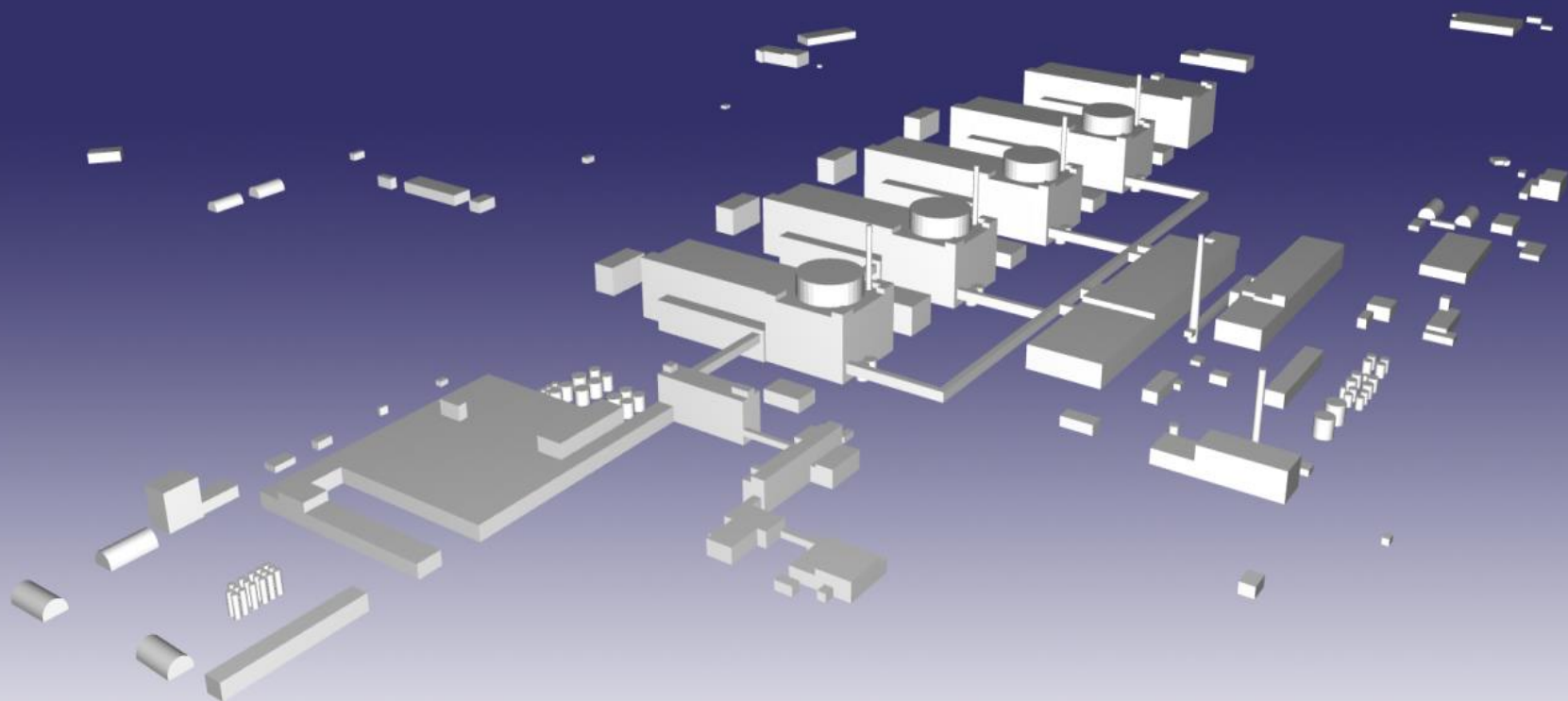
Входные параметры задачи:

- 1) трёхмерная модель застройки;
- 2) переменные во времени 3-мерные поля объёмной концентрации радионуклидов;
- 3) поверхностной концентрации на подстилающей поверхности и поверхностях застройки.

Необходимо рассчитать мощность дозы от облака, поверхностного загрязнения и ингаляции в произвольной точке расчётной области.



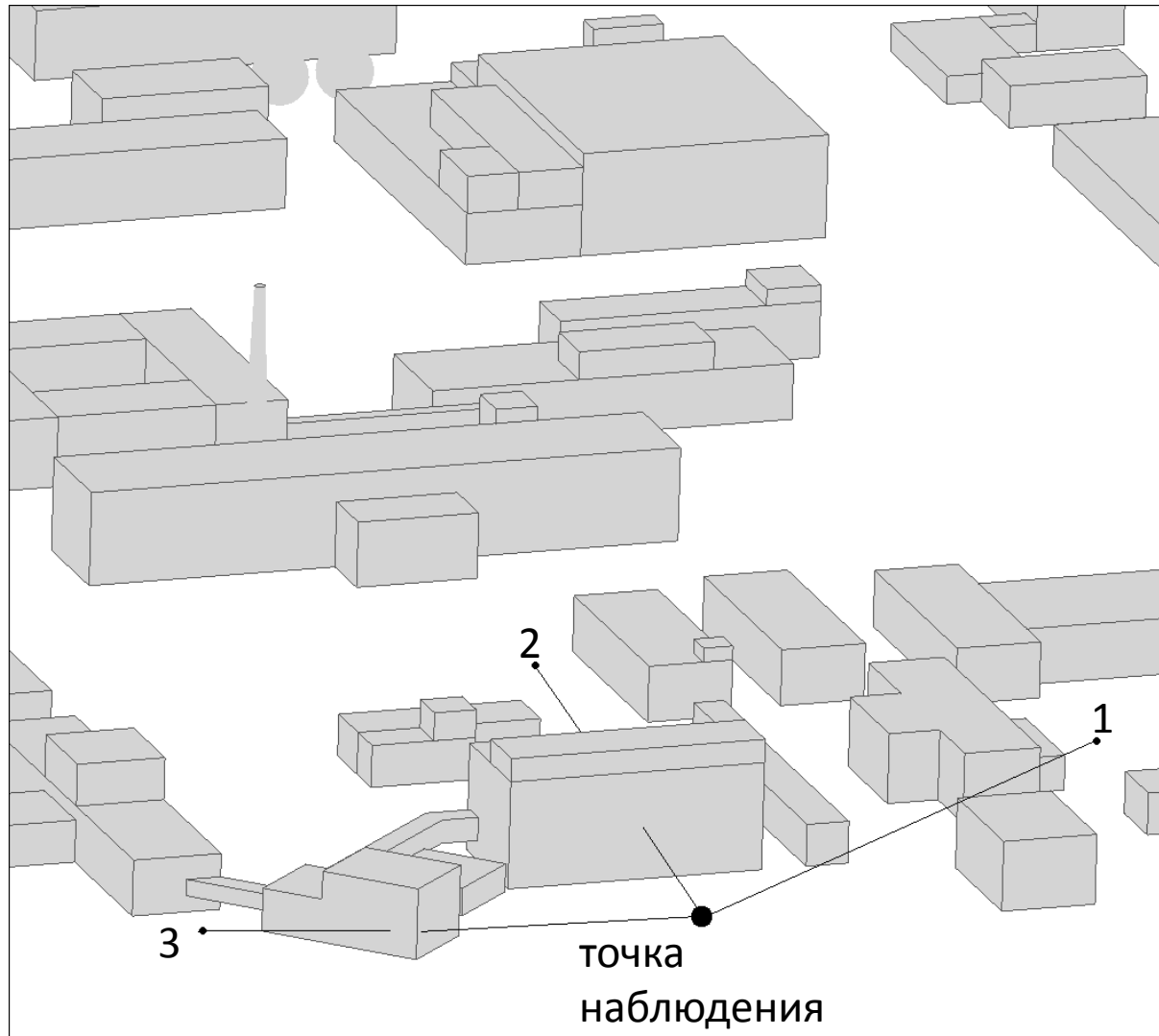
# Геометрия застройки (Балаковская АЭС)



# Дозиметрическая модель

1. Реальная оценка радиационной обстановки на территории промышленного объекта или города не может быть произведена с применением стандартных методик (для бесконечного облака, линейного распределения, других частных случаев).
2. Для её оценки необходимо в каждой точке приземного слоя проинтегрировать вклад в мощность дозы от всех точек 3-мерной расчётной области с учётом эффекта экранирования.
3. Зависимость мощности дозы от расстояния до точечного источника зависит от нуклида и определяется по двум методикам: нормативные методики МАГАТЭ (без учёта поглощения в воздухе) и по методике, разработанной в ИБРАЭ РАН (с учётом поглощения). Рассеяние излучения в условиях сложной геометрии объекта является сложной задачей и в настоящий момент не учитывается.
4. Крупные строения, представленные в трёхмерной геометрической модели считаются непроницаемыми для излучения.

# Учёт эффекта экранирования



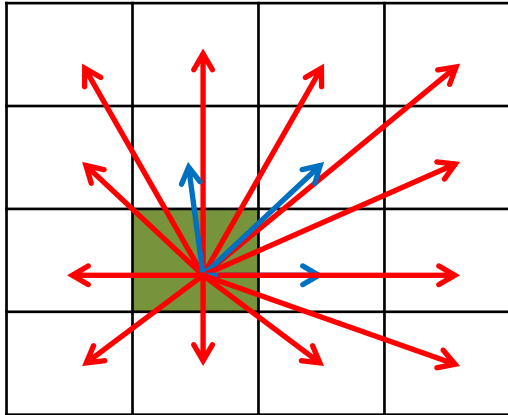
# Дозиметрическая модель

$d_{p,v}(\vec{r}_0) = \gamma^P \iiint \frac{O(\vec{r}, \vec{r}_0) C^V(\vec{r})}{|\vec{r} - \vec{r}_0|^2} dx dy dz$  – мощность дозы от распределённого в трёхмерном ограниченном пространстве облака.

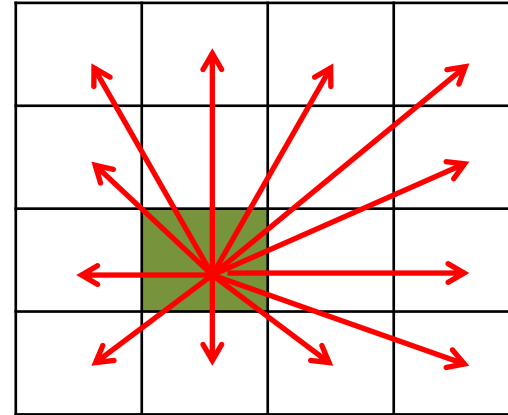
$d_{p,s}(\vec{r}_0) = \gamma^P \iint \frac{O(\vec{r}, \vec{r}_0) C^S(\vec{r})}{|\vec{r} - \vec{r}_0|^2} dS$  – мощность дозы от распределённого на подстилающей поверхности и поверхности зданий загрязнения.

В этих формулах:  $\gamma^P$  – дозовый коэффициент, численно равный мощности дозы облучения от точечного источника, расположенного на расстоянии 1 м от точки наблюдения;  $C^V(\vec{r})$  и  $C^S(\vec{r})$  – объёмная и поверхностная концентрация радионуклида;  $O(\vec{r}, \vec{r}_0)$  – индикатор взаимной видимости точек  $\vec{r}$  и  $\vec{r}_0$ .

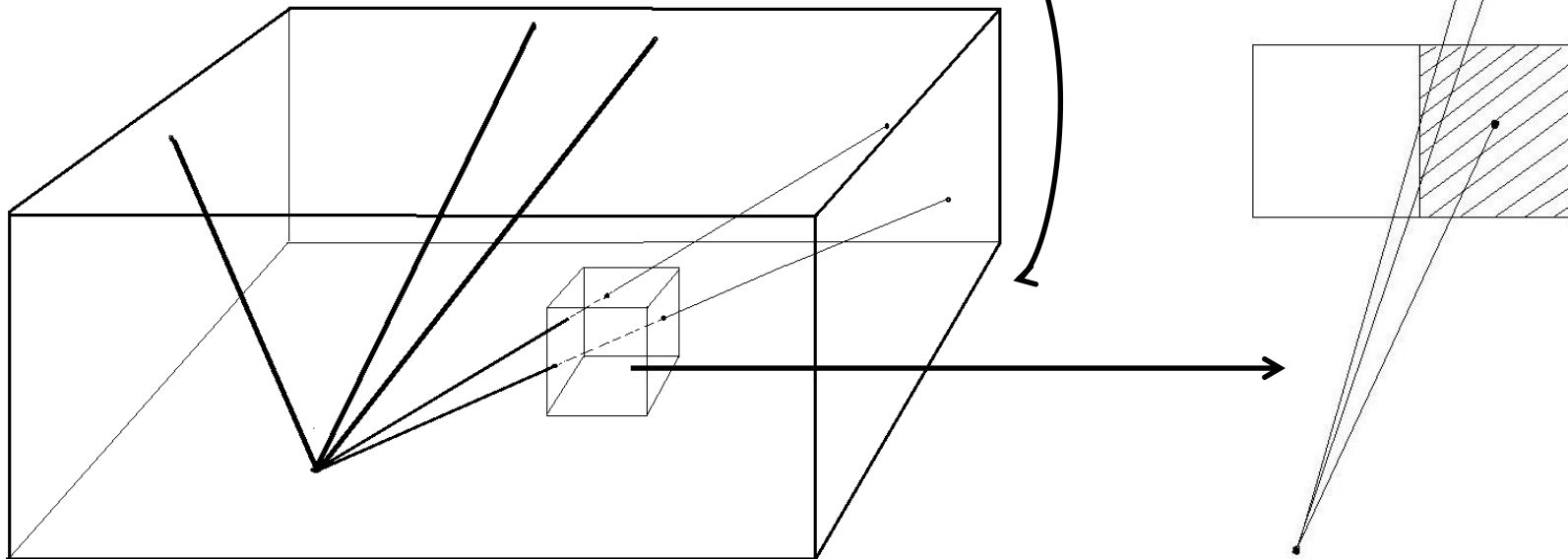
# Две версии алгоритма



I

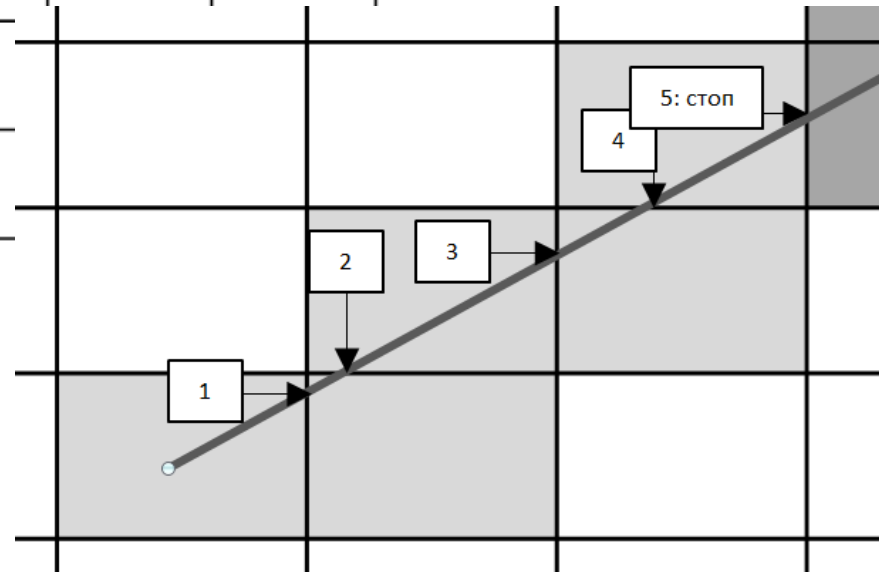
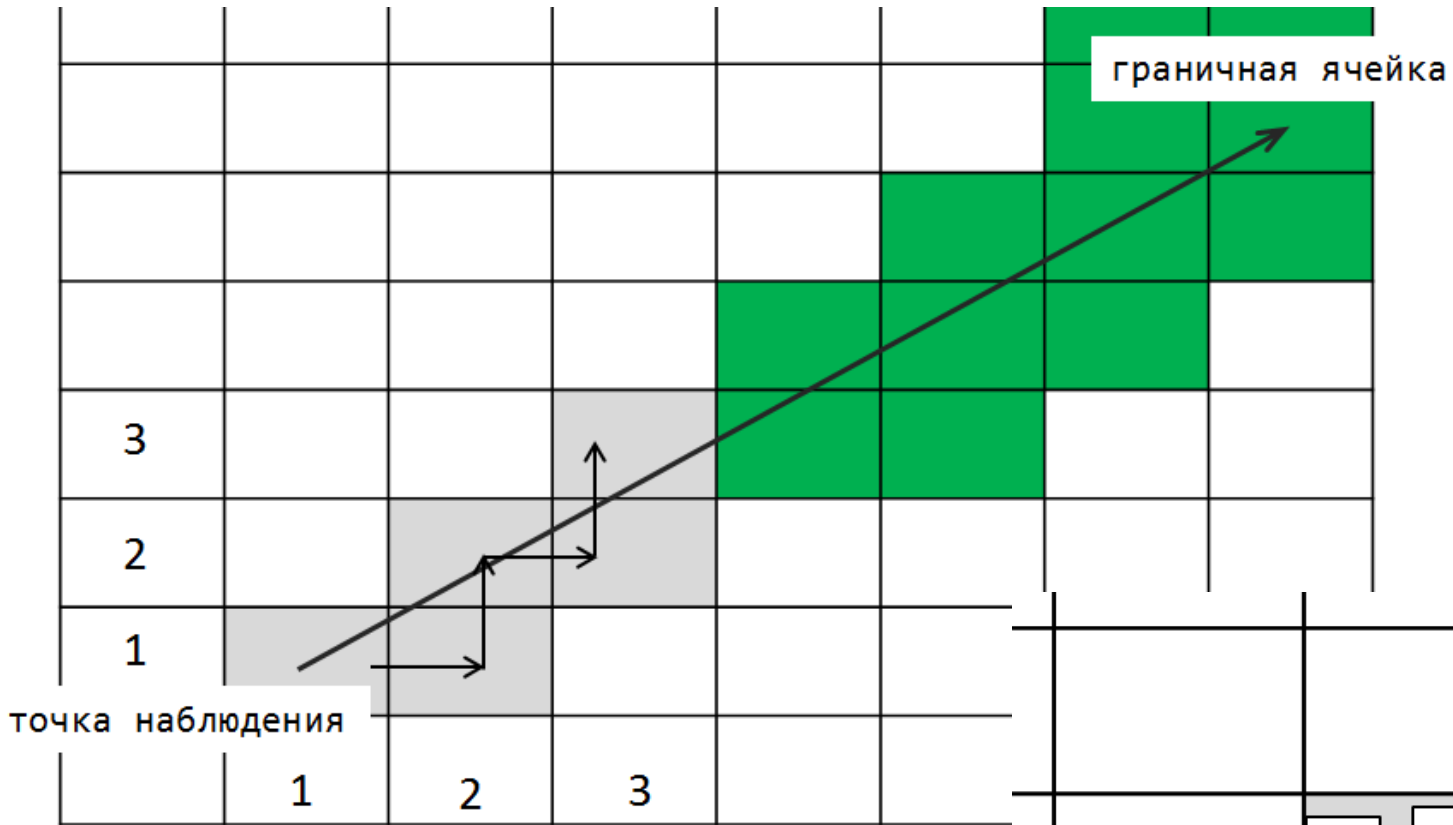


II

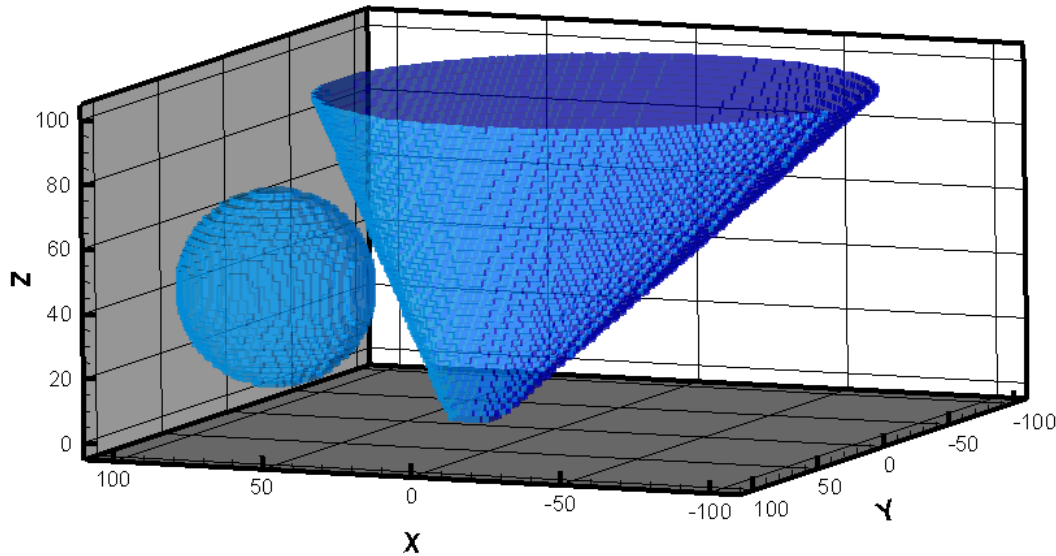




# Оперативная версия алгоритма

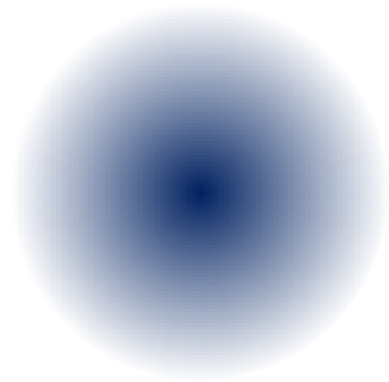


# Верификационные эксперименты



**I эксперимент** – шаровидное облако в расчётной области без препятствий.

**II эксперимент** – то же облако, но в присутствии конического препятствия.

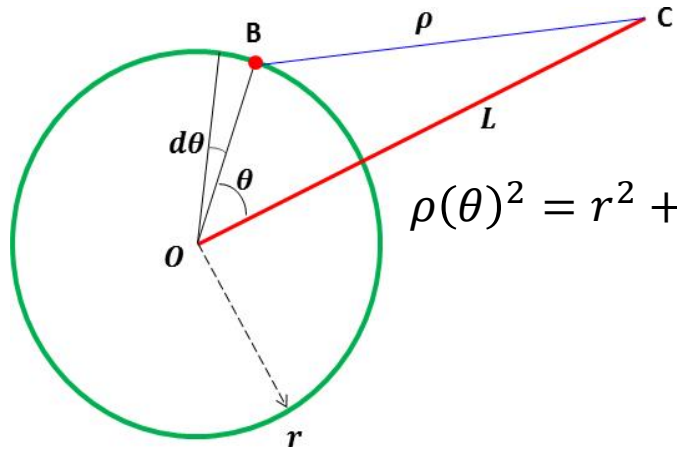


$$\Rightarrow c(\vec{r}') = \exp\left\{-\frac{|\vec{r}' - \vec{r}_0|^2}{2\left(\frac{r}{2}\right)^2}\right\}$$

вне шара концентрация равна 0

$r = 30$  м – радиус шара,  $\vec{r}_0 = (66; 59; 45)$  – центр шара

# I эксперимент



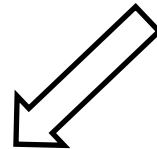
$$\rho(\theta)^2 = r^2 + L^2 - 2rL\cos\theta$$

$$\delta\dot{d} = \frac{\gamma^P \delta A}{\rho(\theta)^2} = \frac{\gamma^P A \sin\theta \delta\theta}{2\rho(\theta)^2} = \frac{\gamma^P A}{2Lr} \frac{\delta\rho}{\rho(\theta)}$$



$$\dot{d}(L) = \frac{\gamma^P A}{2Lr} \ln\left(\frac{L+r}{L-r}\right)$$

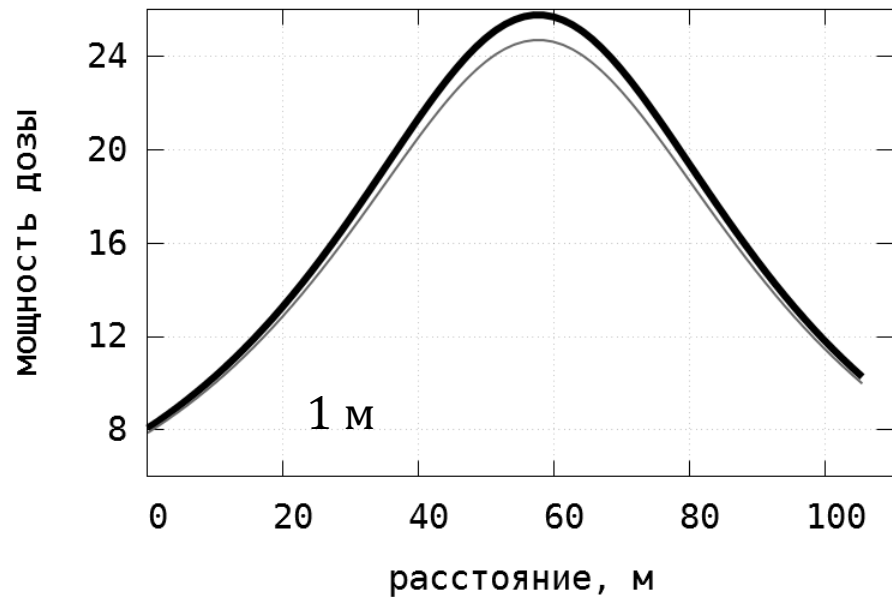
— мощность дозы от сферы



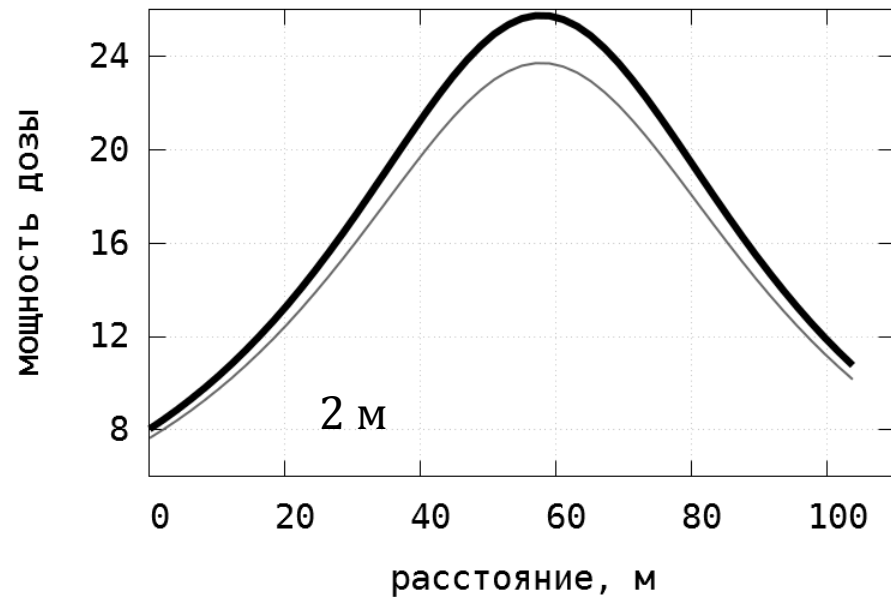
$$\dot{d}(L) = \sum_{i,j,k} \frac{O_{i_0,j_0,k_0}^{i,j,k} \cdot C_{i,j,k}^V \cdot V_{i,j,k} \cdot \gamma^P}{\left(r_{i_0,j_0,k_0}^{i,j,k}\right)^2} \quad \text{— мощность дозы сеточного аналога шара}$$

$$\dot{d}(L) = \frac{2\pi\gamma^P}{L} \int_0^r r' c(r') \ln\left(\frac{L+r'}{L-r'}\right) \delta r' \quad \text{— мощность дозы от шара}$$

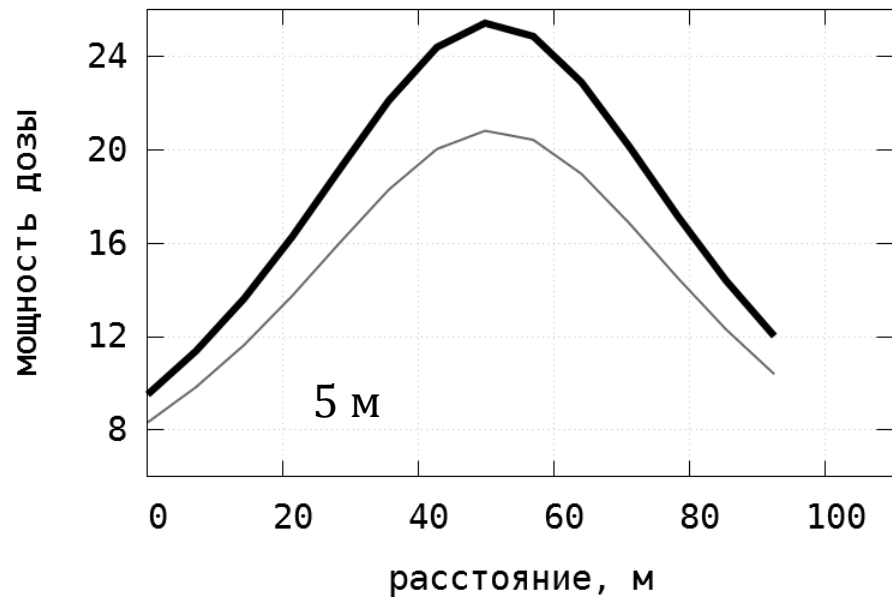
(a)



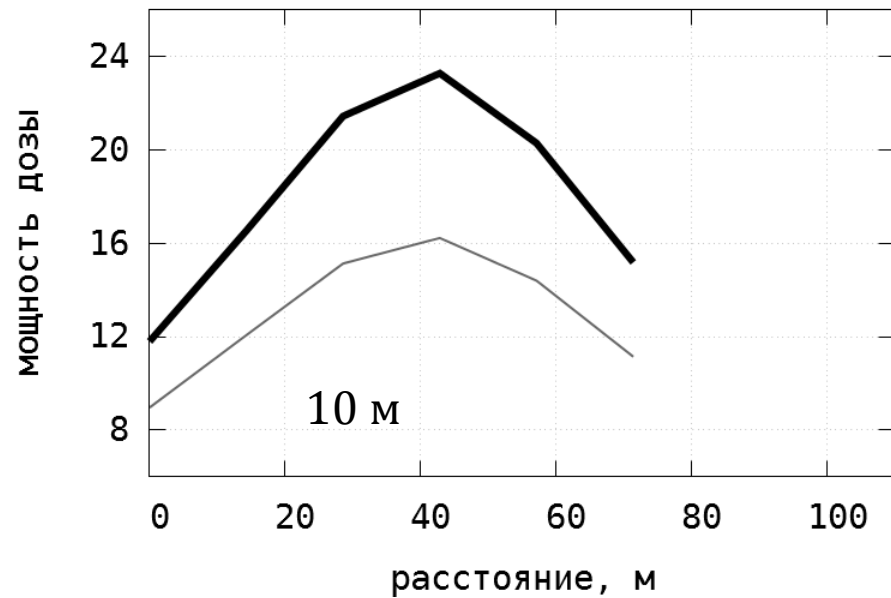
(б)



(в)



(г)



# II эксперимент

В расчётной области присутствовал конус:

$$|(\vec{r} - \vec{r}_O, \vec{n})| \geq |\vec{r} - \vec{r}_O| |\vec{n}| \cos \theta, \text{ где}$$

$$\vec{r}_O = (21; 20; -10) - \text{вершина конуса,}$$

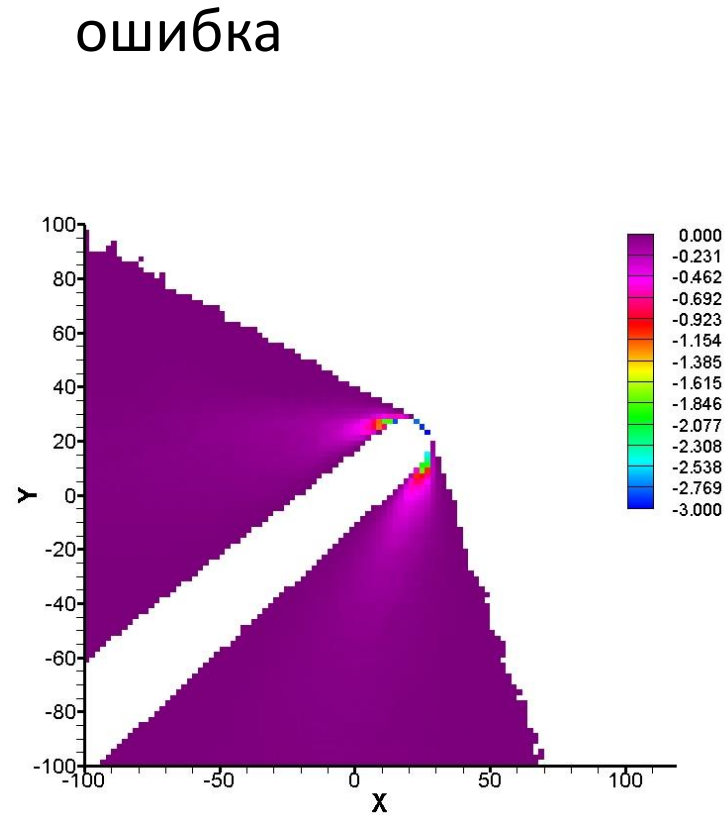
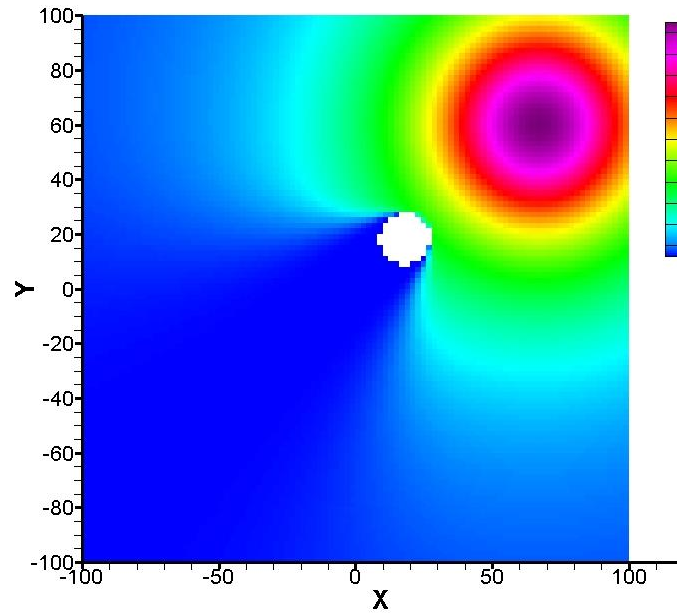
$$\vec{n} \text{ коллинеарен } (-0,2; -0,15; 1),$$

$$\theta = \pi/5$$

1-ый подход: матрица видимости вычислялась по ускоренному алгоритму, количество отрезков минимально.

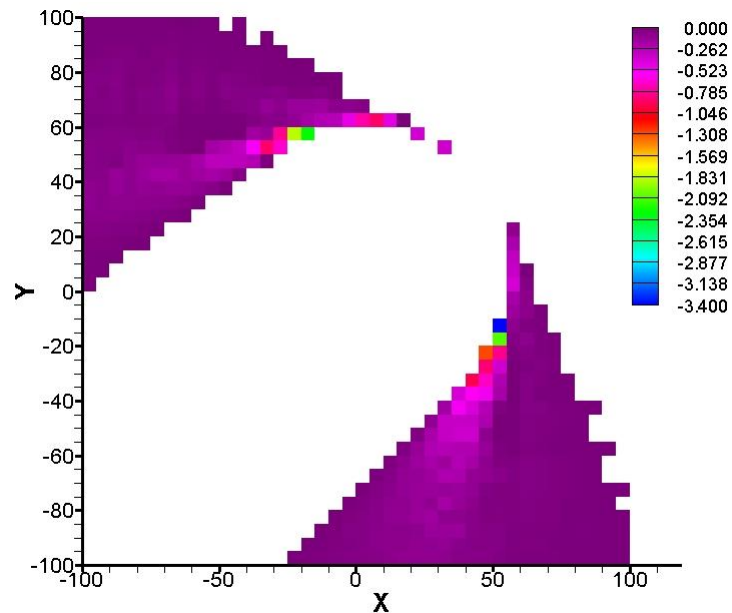
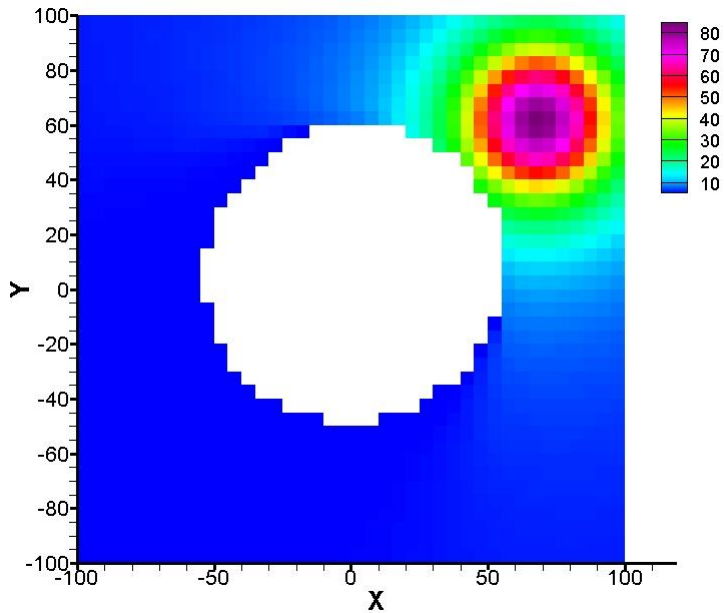
2-ой подход: для вычисления матрицы видимости рассматривался полный набор отрезков (количество отрезков равно количеству ячеек). В качестве застройки фигурировал круговой конус.

# II эксперимент – результаты расчёта для разрешения сетки 2 м: мощность дозы и её абсолютная ошибка



Расстояние до центра шара по  
вертикали: -43 м

# II эксперимент – результаты расчёта для разрешения сетки 5 м: мощность дозы и её абсолютная ошибка



Расстояние до центра шара по  
вертикали: 15 м

# Заключение

Задача расчёта радиационной обстановки в трёхмерной области с застройкой произвольно сложности требует значительных вычислительных ресурсов. Это связано с несколькими факторами: большое количество точек разбиения облака (количество ячеек расчётной сетки), большое количество точек, в которых считается сама мощность дозы (количество ячеек в горизонтальном сечении), необходимость пересчёта матрицы видимости при изменении точки наблюдения, вообще говоря большое количество радионуклидов в выбросе, множество слоёв по времени, в которые рассчитывается мощность дозы.

Была необходимость разработки оптимального алгоритма, который бы позволил производить расчёт за приемлемое время без существенной потери в точности получаемых результатов.

Был разработан и верифицирован такой алгоритм. Он позволил сократить по порядку величины время расчёта доз облучения от облака произвольной формы с учётом экранирования зданиями. Была проведена верификация алгоритма расчёта доз облучения в условиях 3-мерной геометрии объекта. Предложенный алгоритм обладает высокой точностью и позволяет ускорить расчёт по порядку величины и сделать реалистичной возможность оценки радиационной обстановки за доступное время.





**СПАСИБО  
ЗА  
ВНИМАНИЕ**

