

О концентрации малых газовых составляющих в атмосфере

П.Б. Руткевич, Б.П. Руткевич

Распределение малых газов в атмосфере определяется многими факторами, такими как нахождение источников данного малого газа, горизонтальными и вертикальными движениями воздуха и т. д.

Компонент	% объемные	% массовые
N ₂	78,09	75,50
O ₂	20,95	23,15
Ar	0,933	1,292
CO ₂	0,03	0,046
Ne	1,8 10 ⁻³	1,4 10 ⁻³
H ₂	5 10 ⁻⁵	8 10 ⁻⁵
N ₂ O	5 10 ⁻⁵	8 10 ⁻⁵

Однако, хорошо известно, что эти малые газы оказывают значительное влияние на атмосферу. Для Земли характерен естественный парниковый эффект, являющийся залогом жизни. Без него средняя температура Земли была бы невысокой, -18° по Цельсию. Естественный парниковый эффект обусловлен незначительным количеством водяного пара (H_2O), диоксида углерода (CO_2), метана (CH_4) и закиси азота (N_2O) в атмосфере. Эти газы пропускают солнечную радиацию, которая достигает поверхности Земли, но поглощают инфракрасное излучение, испускаемое Землей. Это ведет к нагреванию поверхности планеты до средней приземной температуры, которая на 33° по Цельсию выше, чем это было бы в отсутствие естественного парникового эффекта.

Диоксид азота NO_2 выступает важнейшим загрязнителем атмосферного воздуха, так как оказывает токсичное воздействие на организм человека. Основным источником газа — антропогенная деятельность, хотя существуют и природные источники. Главным антропогенным источником NO_2 на территориях городов становится различный транспорт (в частности, автомобильный). Несмотря на стремление правительств стран к уменьшению выбросов оксидов азота в атмосферу — переход на новый вид топлива, применение катализаторов, внедрение электрического транспорта, подобные действия применяются в разных странах с заметно различающейся скоростью.

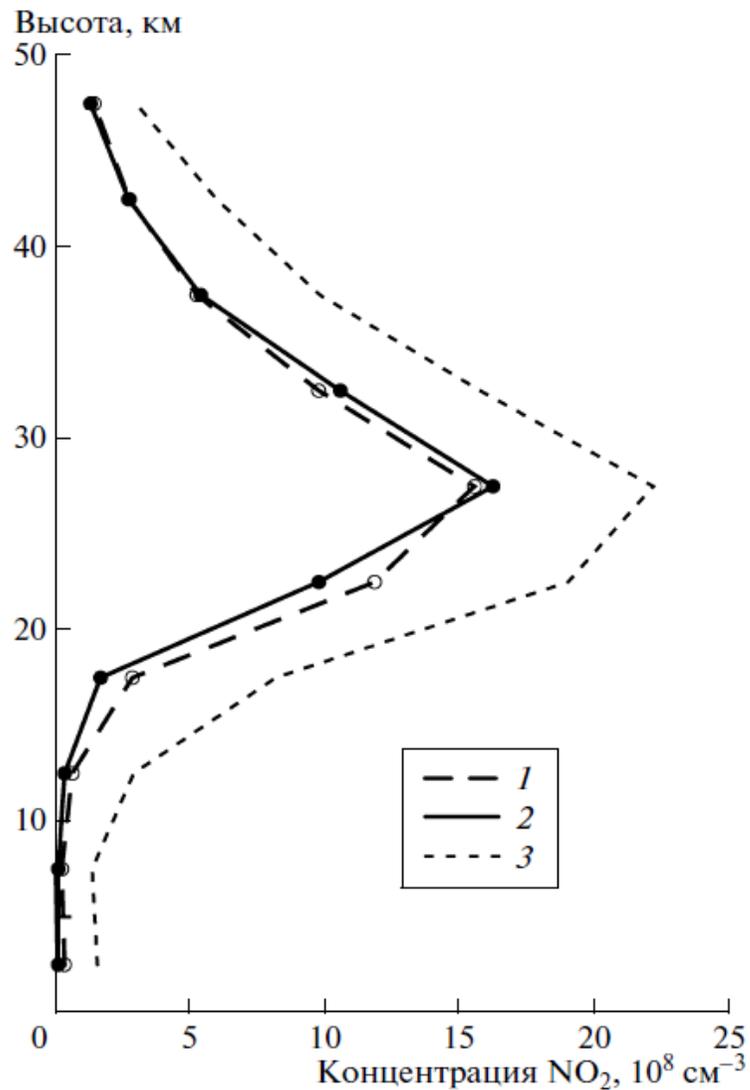


Рис. 2. Вертикальные профили NO_2 на Звенигородской станции по вечерним измерениям 25 марта 2010 г. (1), 30 марта 2011 г. (2) и многолетний средний профиль, соответствующий концу марта (3).

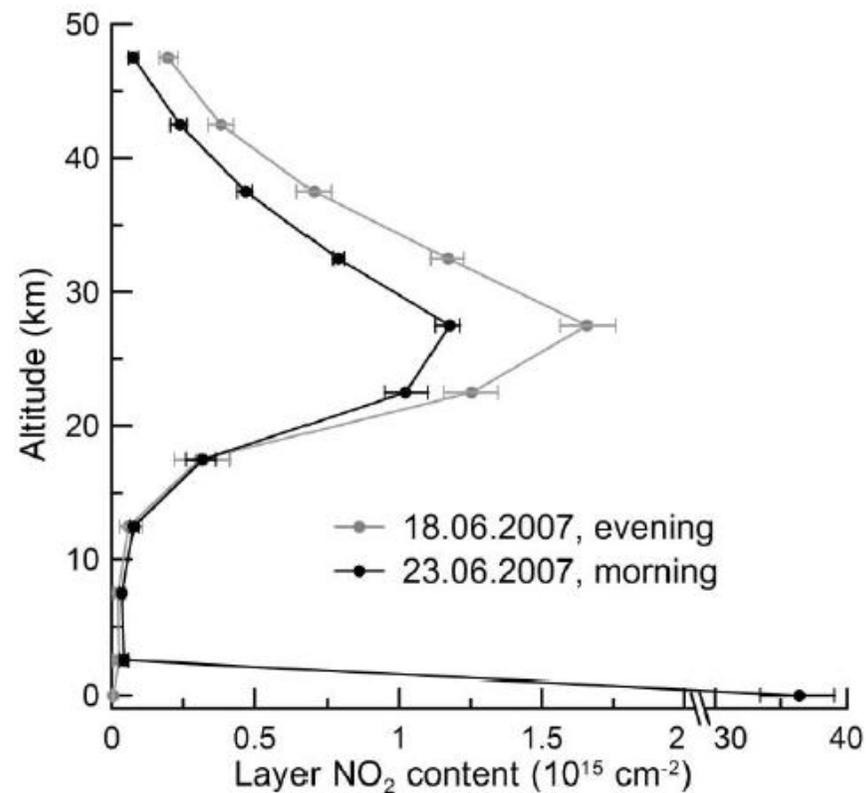


Figure 1. Examples of vertical NO_2 profiles and their standard deviations measured under polluted (black) and unpolluted (gray) near-surface layer. The horizontal axis is broken.



Новости

Диоксид азота (NO_2), входящий в общую группу оксидов азота

Тематические разделы

Диоксид азота (NO_2), входящий в общую группу оксидов азота (NO_x), является основным компонентом загрязнения воздуха в городской среде. Он образуется в результате высокотемпературного горения. Основными антропогенными (произведенными человеком) источниками выбросов этого вредного вещества являются газовые и угольные электростанции а также городской транспорт. Кроме того, существуют и природные источники выбросов NO_2 , например, лесные пожары, а также молнии, но их роль на общем фоне объемов выбросов является минимальной.



Задача о нахождении функции концентрации, $q(t, x, y, z)$ которая образуется при мгновенном выбросе в некоторый момент времени с начальным условием $q(0, x, y, z) = q_0(x, y, z)$. Модель распространения примеси при однородности проекций вектора скорости по пространственным координатам задается уравнением параболического типа

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} - K \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} - K \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} - K \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} = 0$$

Упростим уравнение. Направим ось x вдоль горизонтального направления ветра.

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + w \frac{\partial q}{\partial z} - K \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} - K \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} = 0$$

Запишем уравнение для фундаментального решения этого уравнения.

$$\frac{\partial E}{\partial t} + u \frac{\partial E}{\partial x} + w \frac{\partial q}{\partial z} - K_x \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - K_z \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \delta(x)\delta(z)$$

Делаем преобразование Фурье по координатам:

$$\frac{\partial E(t, \zeta_x, \zeta_z)}{\partial t} + iu\zeta_x E + iw\zeta_z E + K_x \zeta_x^2 E + K_z \zeta_z^2 E = 1(x)1(z)$$

Решение уравнения имеет вид:

$$E(t, \zeta_x, \zeta_z) = \theta(t) \exp\left(\left(-i\zeta_x u - i\zeta_z w - K_x \zeta_x^2 - K_z \zeta_z^2\right)t\right)$$

Далее применяем обратное преобразование Фурье.

$$E(t, x, z) = \frac{\theta(t)}{(2\pi)^2} \int d\zeta_x \int d\zeta_z e^{-i(\zeta_x x + \zeta_z z)} \exp\left(\left(-i\zeta_x u - i\zeta_z w + K_x \zeta_x^2 + K_z \zeta_z^2\right)t\right)$$

$$E(t, x, z) = \frac{\theta(t)}{4\pi} \frac{\exp\left(-\frac{(u \cdot t + x)^2 + (w \cdot t + z)^2}{4Kt}\right)}{Kt}$$

Считаем атмосферу устойчиво стратифицированной. Поэтому вертикальная скорость отсутствует.

$$w = 0$$

Решение неоднородного уравнения в этом случае имеет вид:

$$q = \frac{\theta(t)\pi}{(2\pi)^2} \int_0^y d\tau \int_R dx_1 dz_1 f(x_1, z_1, \tau) \cdot E(t - \tau, x - x_1, z - z_1) +$$

$$+ \frac{\theta(t)\pi}{(2\pi)^2} \int_R dx_1 dz_1 q_0(x_1, z_1) \cdot E(t, x - x_1, z - z_1).$$

Зададим начальное условие: $q_0(x, z) = \exp\left(-\frac{x^2}{x_0^2}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{z_0^2}\right)$

Подставляем начальное условие

$$q_0 = \frac{\theta(t)}{4\pi} \int_R dx_1 dz_1 \exp\left(-\frac{x_1^2}{x_0^2}\right) \exp\left(-\frac{z_1^2}{z_0^2}\right) \cdot \frac{\exp\left(-\frac{(ut + (x - x_1))^2 + ((z - z_1))^2}{4Kt}\right)}{Kt}$$

Решение имеет вид:

$$q_0(t, x, z) = \frac{\theta(t)}{\pi} \frac{\exp\left(-\frac{(ut + x)^2}{4Kt + x_0^2}\right)}{Kt \sqrt{\frac{1}{Kt} + \frac{4}{x_0^2}}} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{z^2}{4Kt + z_0^2}\right)}{\sqrt{\frac{1}{Kt} + \frac{4}{z_0^2}}}$$

Рассмотрим случай с переменным по высоте профилем ветра.

$$\frac{\partial q}{\partial t} + (u + U(z)) \frac{\partial q}{\partial x} - K \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} - K \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} = 0$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + (u + U(z)) \frac{\partial q}{\partial x} - K \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} - K \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} = 0$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} - K \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} - K \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} = -U(z) \frac{\partial q}{\partial x}$$

Решение имеет вид:

$$q_1 = -\frac{\theta(t)\pi}{(2\pi)^2} \int_0^y d\tau \int_R dx_1 dz_1 U(z_1) \frac{\partial q_0}{\partial x_1} \cdot E(t - \tau, x - x_1, z - z_1) +$$

$$+ \frac{\theta(t)\pi}{(2\pi)^2} \int_R d\xi q_0(x_1, z_1) \cdot E(t, x - x_1, z - z_1)$$

где
$$q_0 = \frac{\theta(t)}{4\pi} \int_R dx_1 dz_1 \exp\left(-\frac{x_1^2}{x_0^2}\right) \exp\left(-\frac{z_1^2}{z_0^2}\right) \cdot \frac{\exp\left(-\frac{(ut + (x - x_1))^2 + ((z - z_1))^2}{4Kt}\right)}{Kt}$$

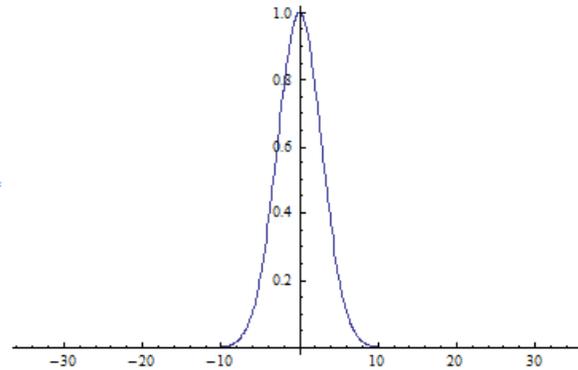
$$E(t, x, z) = \frac{\theta(t)}{4\pi} \frac{\exp\left(-\frac{(u \cdot t + x)^2 + (w \cdot t + z)^2}{4Kt}\right)}{Kt}$$

```
{K = 2., u = 0.6, w = 0.0, x0 = 4, za = 20, z0 = 4, t1 = 30, NN = 600}
```

```
In[22]:= Plot[Exp[-(x/x0)^2], {x, -35, 35}, PlotRange -> Full]
```

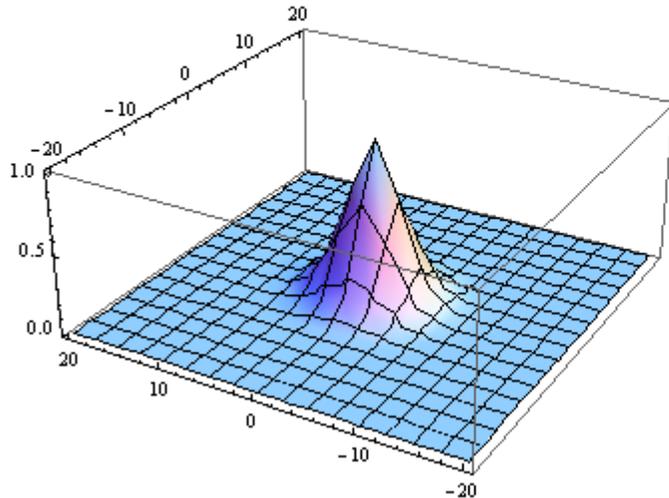
Начальное условие.

Out[22]=



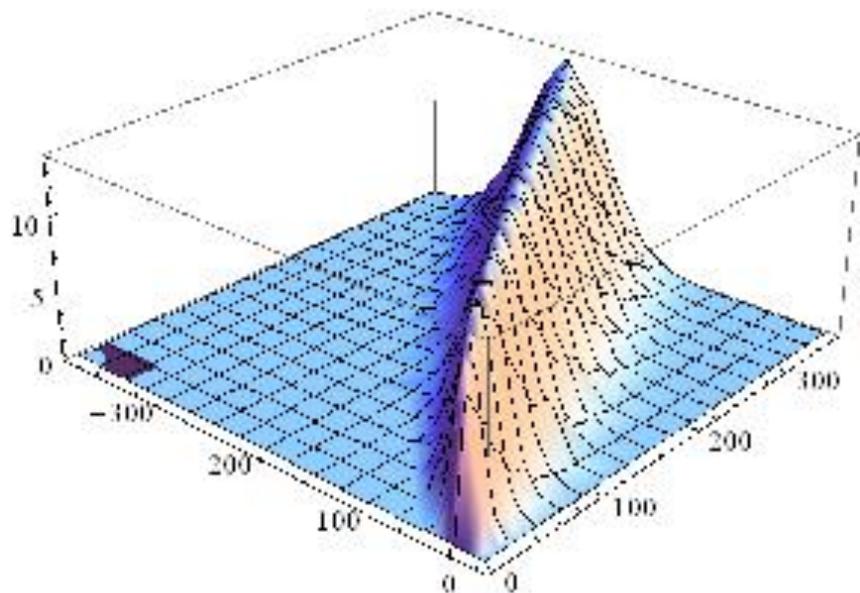
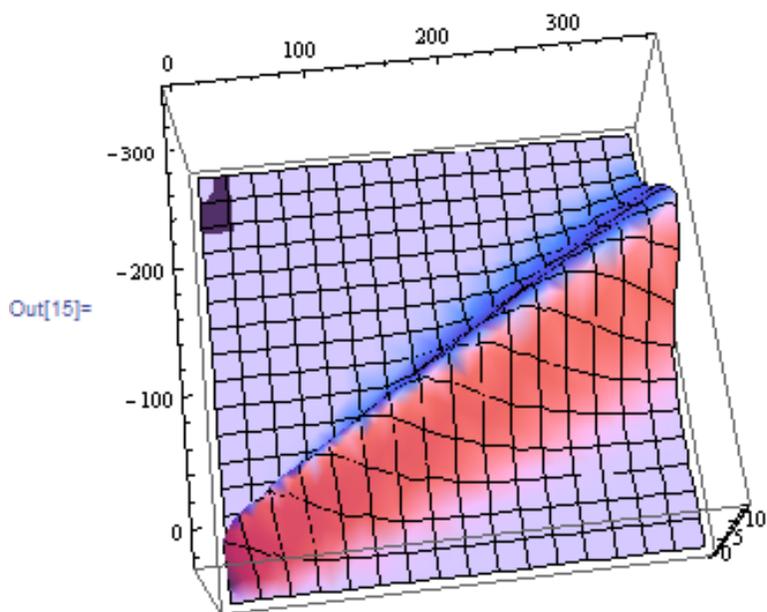
```
In[55]:= Plot3D[q0[x, z], {x, -20, 20}, {z, -20, 20.},  
PlotRange -> Full]
```

Out[55]=



Функция концентрации $q(t, x, z = 4)$

```
In[15]:= Plot3D  $\left[ \frac{2 \sqrt{\text{Pi}}}{\sqrt{\frac{1}{K t} + \frac{1}{x_0^2}}} \text{Exp} \left[ -\frac{(u t + x)^2}{4 K t + x_0^2} \right], \{x, -350, 20\}, \right.$   
 $\left. \{t, 0, 360\}, \text{PlotRange} \rightarrow \text{Full} \right]$ 
```

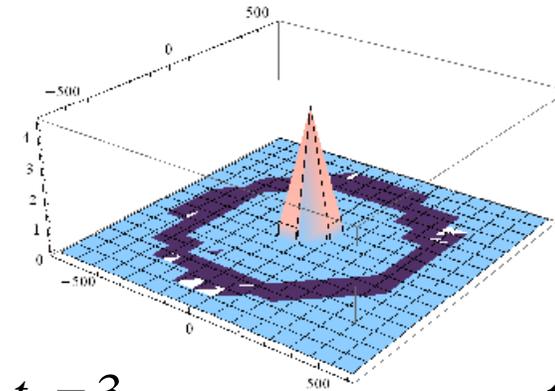
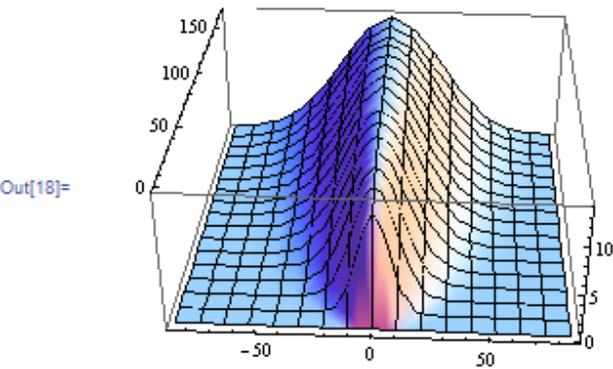


Функция концентрации $q(t, x = 4, z)$ для разных значений времени в случае отсутствия зависимости скорости от высоты.

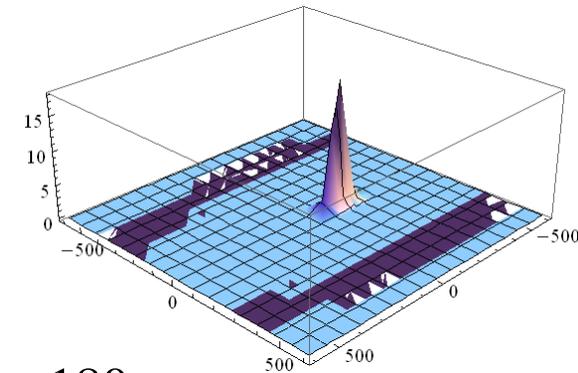
$$\text{In}[18]:= \text{Plot3D}\left[\frac{2\sqrt{\text{Pi}}}{\sqrt{\frac{1}{\text{K}t} + \frac{1}{z_0^2}}}\text{Exp}\left[-\frac{(wt+z)^2}{4\text{K}t+z_0^2}\right], \{z, -85, 85\},\right.$$

$$\left.\{t, 0, 170\}\right]$$

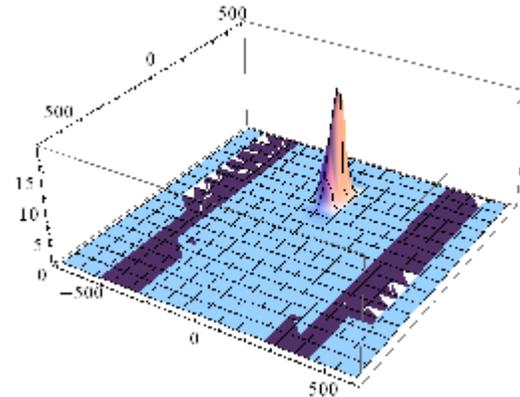
$$q(t_k, x, z = 4)$$



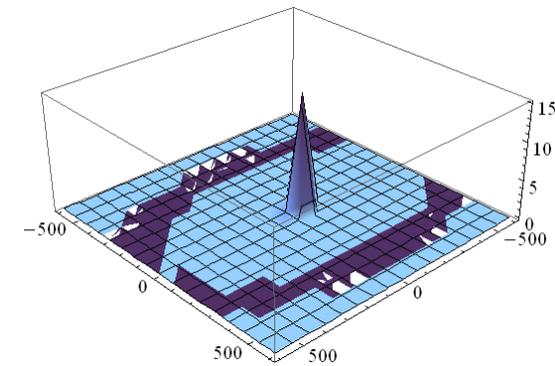
$$t_1 = 3$$



$$t_2 = 180$$



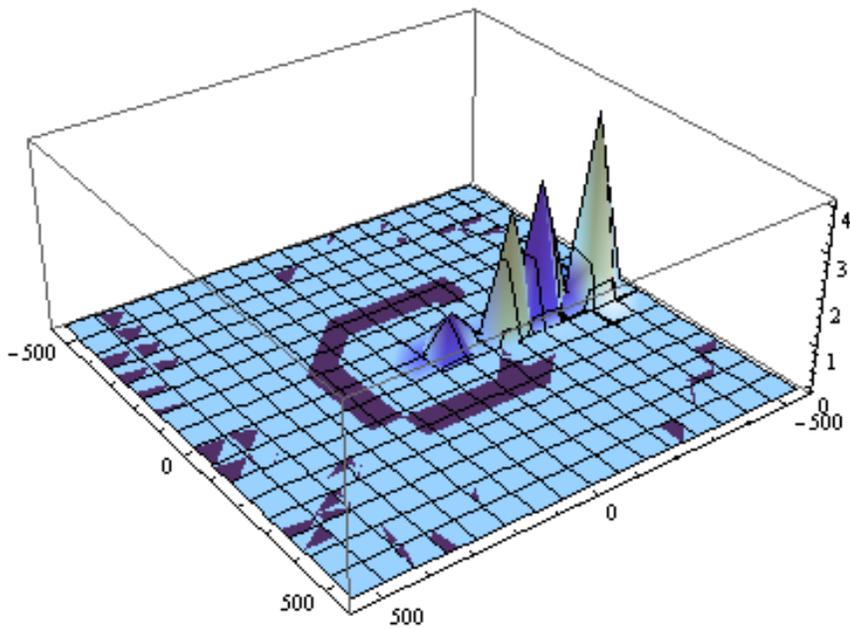
$$t_3 = 280$$



$$t_4 = 380$$

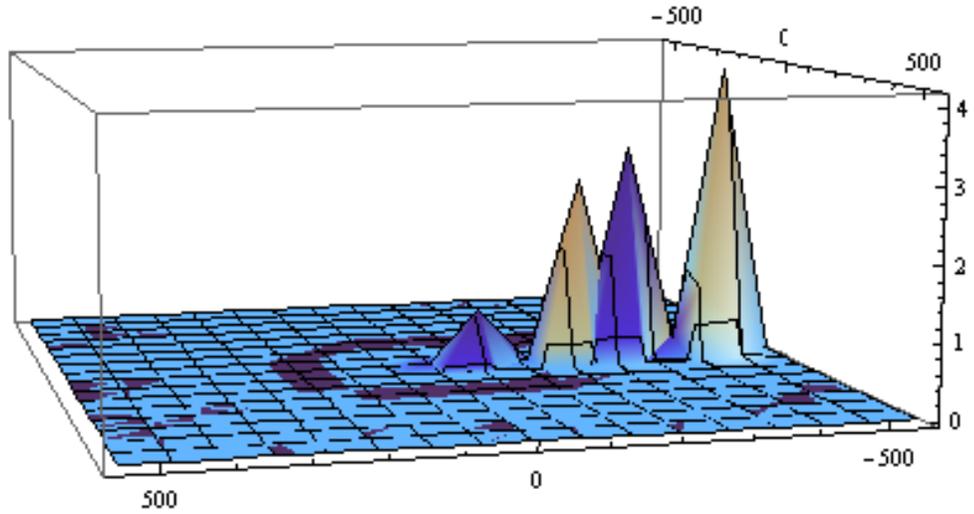
In[34]:= Show[S5, S4, S3, S2, S1]

Out[34]=



In[34]:= Show[S5, S4, S3, S2, S1]

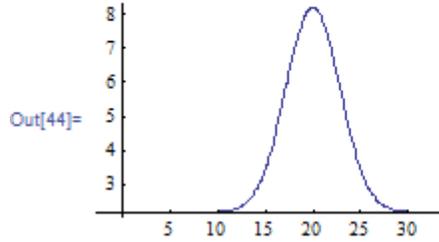
Out[34]=



Функция концентрации $q(t_k, x, z)$ для разных значений времени в случае зависимости скорости от высоты.

In[44]:= Plot[U[z] + u, {z, -2., 33},
PlotRange -> Full]

$t_1 = 5, t_2 = 10, t_3 = 30, t_4 = 40, t_5 = 50$



Горизонтальная скорость как функция от вертикальной координаты.

$q(t_k, x, z)$

