

## Моделирование миграции тяжелых металлов в почве от наземного источника в окрестностях Новочеркасской ГРЭС

*А.Н. Тимофеев, Г.В. Муратова, Т.М. Минкина*

*Южный Федеральный Университет*

**Аннотация:** Рассмотрено решение задачи моделирования переноса примесей тяжелых металлов от наземного источника до нижних границ верхнего слоя почвы. Процесс переноса описан системой уравнений, включающей  $k$ - $\varepsilon$  модель и нестационарное уравнение диффузии. Приведены начальные и граничные условия, необходимые для решения краевой задачи. Показаны результаты численного моделирования, полученные с помощью программы ANSYS fluent.

**Ключевые слова:**  $k$ - $\varepsilon$  модель, уравнение диффузии, численное моделирование, ANSYS, Новочеркасская ГРЭС.

### Введение

Прогноз распространения загрязнений в почве является важной задачей для охраны окружающей среды и развития всех сельскохозяйственных видов деятельности.

Тяжелые металлы (ТМ) уже сейчас занимают второе место по степени опасности, уступая пестицидам и значительно опережая такие широко известные загрязнители, как двуокись углерода и серы. Широкое использование тяжелых металлов в производстве, несовершенные системы очистки приводят к тому, что ТМ попадают в почву, загрязняя и отравляя ее. Если не принять необходимых мер, в недалеком будущем ТМ могут стать более опасными, чем отходы атомных электростанций и другие твердые отходы.

В работах, посвященных проблемам экологического мониторинга загрязнения окружающей природной среды [1, 2], на сегодняшний день к тяжелым металлам относят более 40 элементов периодической системы Д.И. Менделеева с атомной массой свыше 40 атомных единиц: V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Sn, Hg, Pb, Bi и др.

Источником поступления могут служить как вносимые удобрения, золошлаковые отходы, так и оседаемые из атмосферы аэрозольные выбросы

---

предприятий. Если количество вносимых при мелиорации ТМ заранее известно, то движение примесей сквозь слой почвы, как и поступление металлов из атмосферы вследствие различных физико-химических процессов невозможно задать постоянными коэффициентами. Для решения этих задач прибегают к методам математического моделирования.

Способы распространения ТМ в различных средах рассматриваются во многих работах [3, 4]. На основе физики переноса вещества изучаемая область может быть рассмотрена как зона ламинарных [5] или турбулентных [6] потоков воздуха и жидкости. Выбор свойств течения основывается на характеристиках рассматриваемой области. Перенос ТМ в различных средах описан при помощи диффузии [7]. В источниках [8, 9] описан вклад химических реакций и их влияние на скорость распространения примесей в почве.

Совокупность процессов турбулентного потока, переноса вещества и диффузии позволяет проследить и исследовать перенос ТМ от некоторого наземного источника выброса до нижних границ верхнего слоя почвы. В данной работе приводится способ построения и реализации математической модели для расчета концентрации примесей для этой цепочки.

### **Постановка задачи**

Перенос примеси в атмосфере происходит за счет ветра, диффузии и гравитационного оседания, в почве – диффузии и движения влаги. Прочность образуемых соединений определяется через процессы сорбции ТМ гранулами почвы и десорбции. Будем считать, что примесь в атмосфере и в почве вне рассматриваемой области можно пренебречь, все оседающие ТМ полностью поглощаются почвой, примеси на границе верхнего слоя почвы выносятся грунтовыми водами в нижние слои.

Для описания процесса переноса ТМ была предложена модель [10] на основе уравнений неразрывности, Навье-Стокса, переноса кинетической энергии, ее диссипации и уравнения диффузии:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}), \quad (2)$$

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_3 G_b) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon, \quad (5)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u_x c_i) + \frac{\partial}{\partial y} ((u_y - u_g) c_i) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z c_i) - \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial c_i}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial c_i}{\partial z} \right) = f_i, \quad (6)$$

$$(\alpha - \gamma) \frac{\partial \tilde{c}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tilde{u}_j \tilde{c}_i) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D_j \frac{\partial \tilde{c}_i}{\partial x_j} \right) = c_i(x, y_0, z, t), \quad (7)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (8)$$

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, G_b = -g \frac{\mu_t}{\rho Pr} \frac{\partial \rho}{\partial y}, C_3 = \tanh \left| \frac{v}{w} \right|, \quad (9)$$

где  $u$  – вектор скорости потока воздуха,  $\rho$  – плотность среды,  $p$  – давление,  $\mu$  – динамическая вязкость,  $\rho \overline{u'_i u'_j}$  – тензор турбулентных напряжений,  $\mu_t$  – турбулентная вязкость.  $k$  – турбулентная кинетическая энергия,  $\varepsilon$  – скорость диссипации.  $S_k$  и  $S_\varepsilon$  задают свойства источника потока и определяются начальными условиями задачи.  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_\mu$  – эмпирические константы,  $\sigma_k$  и  $\sigma_\varepsilon$  – числа Прандтля для  $k$  и  $\varepsilon$  соответственно:

$$\sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92.$$

$G_k$  описывает производство кинетической энергии,  $G_b$  – производство кинетической энергии, вызванное плавучестью,  $C_3$  – влияние плавучести на  $\varepsilon$ .  $Pr$  – турбулентное число Прандтля (0.85),  $v$  – составляющая  $u$ , параллельная вектору ускорения свободного падения,  $w$  – перпендикулярная ему.  $u_g$  – скорость гравитационного оседания ТМ.  $\alpha$  и  $\gamma$  – эмпирические константы скорости сорбции и десорбции соответственно;  $\tilde{c}_i$  – концентрация  $i$ -го ТМ в почве,  $\tilde{y}$  – вектор скорости движения влаги в почве,  $D$  – коэффициент диффузии в почве,  $c_i(x, y_0, z, t)$  – функция источника поступления  $i$ -го ТМ в почву, определяемая как значение концентрации вещества на нижней границе атмосферы  $y_0$ ,  $K_x$ ,  $K_z$ , и  $K_y$  – коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузии в атмосфере [11, 12].

### Начальные и граничные условия

Рассмотрим исследуемую область (рис. 1) для определения начальных и граничных условий. Верхний участок  $0efgabcd$  соответствует нижнему слою атмосферы,  $0efghijk$  – верхний слой почвы. Источник атмосферных выбросов  $u_0$  расположен на некоторой высоте  $y_u$ . Движение атмосферы происходит от границы  $\Gamma_{0abe}$  до  $\Gamma_{gdcf}$ . Перенос вещества в почве происходит от  $\Gamma_{0efg}$  до  $\Gamma_{hijk}$ . Исследуемый промежуток времени  $t \in [0, T]$  и шаг по времени  $\tau$  задаются исходя из продолжительности наблюдений и их частоты.

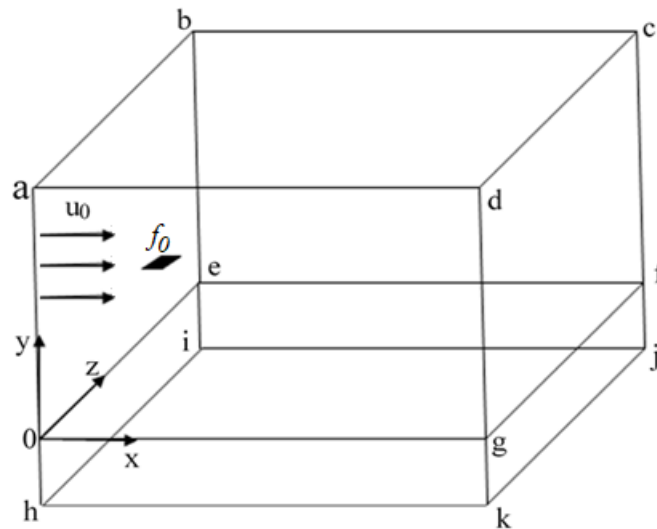


Рис. 1. – Схема исследуемой области

Начальные условия для уравнений воздушного потока и мощность источника выбросов определяют значения  $u$ ,  $k$ ,  $\varepsilon$  и  $f_i$  следующими соотношениями:

$$k_0 = \left(\frac{\mu}{l_0}\right)^2, \varepsilon_0 = C_\mu \frac{k_0^{3/2}}{l_0}, u = 0, f_i = f_{i0},$$

где  $l_0$  выбирается как длина минимально возможного вихря, согласно выбранной расчетной сетке.

Граничные условия для значений  $u$ ,  $k$  и  $\varepsilon$  на  $\Gamma_{0abe}$ :

$$u = u_0, k = C_{bk}|u|^2, \varepsilon = C_\mu \frac{k_0^{3/2}}{l_0},$$

где эмпирическая константа  $C_{bk} \in [0.003, 0.01]$ . На  $\Gamma_{gdef}$  нормы градиентов всех значений приравниваются нулю (величины «свободно выходят» за границы исследуемой области):

$$n \cdot [\nabla u + \nabla u^T] = 0, n \cdot \nabla k = 0, n \cdot \nabla \varepsilon = 0.$$

Значение вектора перпендикулярной составляющей  $u$  на  $\Gamma_{0efg}$  равно нулю ( $n \cdot u = 0$ , газ не проникает в твердое тело). Концентрация ТМ во всей исследуемой области в начальный момент времени может быть приравнена нулю, либо некоторому уже имеющемуся значению. Значение на  $\Gamma_{0efg}$  совпадает (источник поступления ТМ в почву):

$$c = 0, \tilde{c} = \tilde{c}_0, \tilde{c}_0(x, y_0, z, 0) = c(x, y_0, z, 0).$$

На  $\Gamma_{gdef}$  и  $\Gamma_{0efg}$  нормы градиента  $c$  (полное поглощение ТМ почвой), а также  $\Gamma_{hijk}$  норма градиента  $\tilde{c}$  (вынос в нижние слои почвы) приравниваются нулю:

$$n \cdot \nabla c = 0, n \cdot \nabla \tilde{c} = 0.$$

### Содержание ТМ в окрестностях НГРЭС

В качестве объекта исследования выбрана Новочеркасская ГРЭС (НчГРЭС) – крупнейший региональный источник выбросов ТМ в атмосферу, доля загрязнения от которого составляет около 70% всех выбросов Ростовской области [13]. Отдельный интерес представляет система, состоящая из четырех дымовых труб высотой до 250 м для вывода отходов сжигания топлива. Системы очистки позволяют снизить концентрацию ТМ в золе, однако, не решают проблему полностью.

Технический отчет НчГРЭС [14], а также исследования состава золошлаковых отходов [15, 16] позволяют описать положение, размеры и мощность источника выброса  $f_{i0}$  в системе уравнений 1-9. Необходимые для начальных условий данные представлены в таблицах 1-5.

Для решения задачи зависимость мощности выбросов от времени необходимо задать в виде функции. Найдем значения  $f_{i0}$  в правой части системы уравнений 1-9 – концентрацию  $i$ -го ТМ в выбросах предприятия для каждого шага по времени в виде непрерывной функции на примере хрома (таблица №2), построив регрессию 4 порядка, с использованием значения таблицы №1.

Таблица № 1

Объем годовых выбросов золы НчГРЭС, т/год

№ В Ди



---

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014		
1	180	6,3	7130,459	6850,223	7891,502	6527,18	8430,304	7858,684	8538,972
2	250	7,2	4958,681	8761,951	6077,062	6091,531	9658,293	10835,382	6569,492
3	250	7,2	2316,681	1644,644	3331,366	1700,884	1802,055	1770,769	2569,803
4	250	7,2	1160,103	965,442	1297,336	1107,555	279,587	1201,631	1733,249
				Cd	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr
% содержания в золе				9e-6	6e-5	1,4e-4	6,3e-5	5,1e-5	5e-5

Таблица № 2

Построение регрессии  $f$  для определения выбросов хрома

Год	Исходное значение, т/г	Регрессия, т/г	Коэффициент регрессии
2008	778,2962	773,3533	-8,136
2009	911,113	938,3104	128,549
2010	929,8633	868,0197	-685,52
2011	771,3575	845,6158	1443,711
2012	1008,512	958,9681	-105,251
2013	1083,323	1100,681	
2014	970,5758	968,0929	



Рис. 2. – Модель мощности выброса хрома, т/г

Для задания начальных условий движения воздуха  $u_0$  в г. Новочеркасске воспользуемся метеорологическими данными (таблица №3) о среднегодовых атмосферных характеристиках [17].

Таблица № 3

#### Свойства атмосферы Ростовской области

Направление	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
% времени	7,9	12,4	33,3	4,7	5,7	11,3	18,2	6,5
Среднегодовая скорость ветра на высоте 10м, м/с	3,2							

Поскольку значение скорости ветра изменяется с высотой, начальную скорость зададим следующей формулой:

$u_0(y) = u_c \left(\frac{y}{10}\right)^j$ , где  $u_c$  – среднегодовая скорость ветра на высоте 10м,  $j$  – эмпирический показатель шероховатости подстилающей поверхности (0.2).

Содержание ТМ в почвах на глубине  $y = -0,2$  м в окрестности ГРЭС рассмотрено на примере нескольких площадок мониторинга за промежуток 2000–2014 (таблица №4, рис. 3).

Таблица № 4



### Координаты площадок ежегодного мониторинга концентрации ТМ

Площадка	Широта	Долгота
НчГРЭС	47,4016446	40,23344162
1	40,250490	47,407190
2	40,206940	47,376700
3	40,199900	47,386410
4	40,204080	47,398960
5	40,206840	47,402020
6	40,218500	47,421280
7	40,233800	47,417270
8	40,138470	47,397220
9	40,030620	47,424090
10	39,976150	47,433610

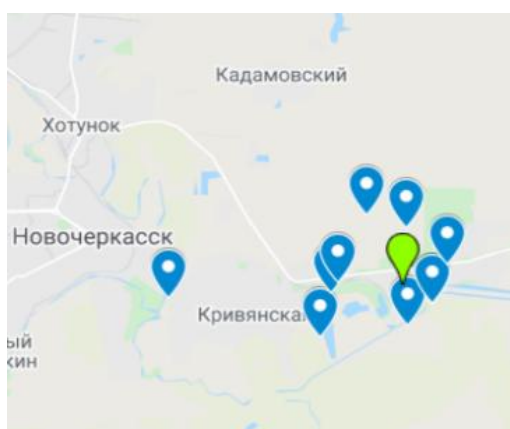


Рис. 3. – Размещение площадок мониторинга по отношению к НчГРЭС  
(зеленый маркер)

Начальные условия уравнений 1–9 задаются по таблицам 1–4. Также, необходимо задать такие характеристики почвы, как пористость (61%), коэффициент диффузии ( $1,7e+8$ ) и среднесуточная скорость движения влаги (0,04 м/сутки). Система уравнений решается относительно каждого направления ветра. Результаты вычислений складываются и интерполируются в точках мониторинга.

Значение концентрации  $\tilde{c}_i$  представлено в двух видах, валовое – общее значение, включающее сорбированные, десорбированные и не вступившие в реакцию ТМ, и непрочно связанные – все ТМ, за исключением сорбированных (таблица №5).

Таблица № 5

Валовое и непрочно связанное содержание хрома в почвах, мг/кг

Тип $\tilde{c}_i$	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Вал	131	141	134	142	129	135	141	136	140	138	133	141	146	138	129
Непрочно связанные	30,0	37,3	30,7	35,0	30,2	29,2	30,5	31,8	35,7	32,7	39,3	37,2	41,4	33,3	41,6

### Численный эксперимент

На основе разработанной и программно реализованной математической модели переноса примесей ТМ от наземного источника до нижних границ почвы были проведены вычислительные эксперименты.

Рассмотрим результаты расчетов загрязнения почвы на площадке №6 для хрома за 2008–2014 года. Расчеты произведены с помощью программы ANSYS fluent.

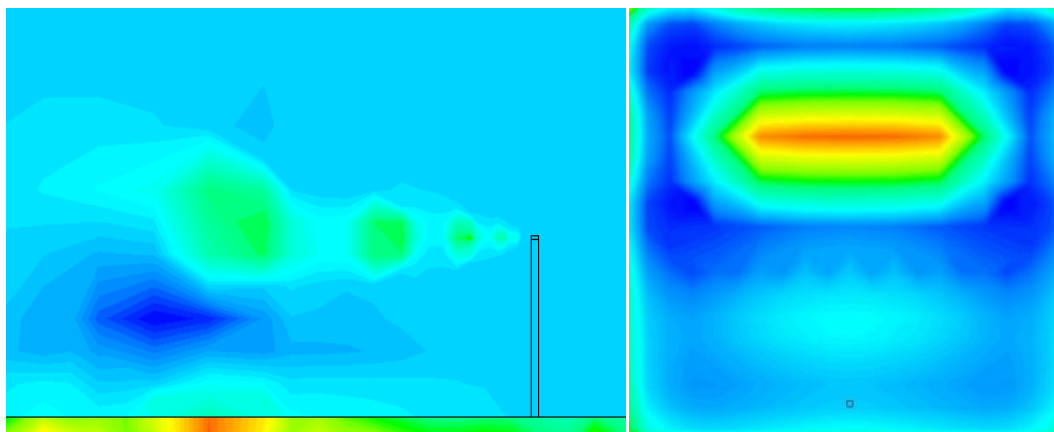


Рис. 4. – Моделирование изменения концентрации ТМ в исследуемой области в проекциях XY (слева) и XZ (справа) для западного направления ветра

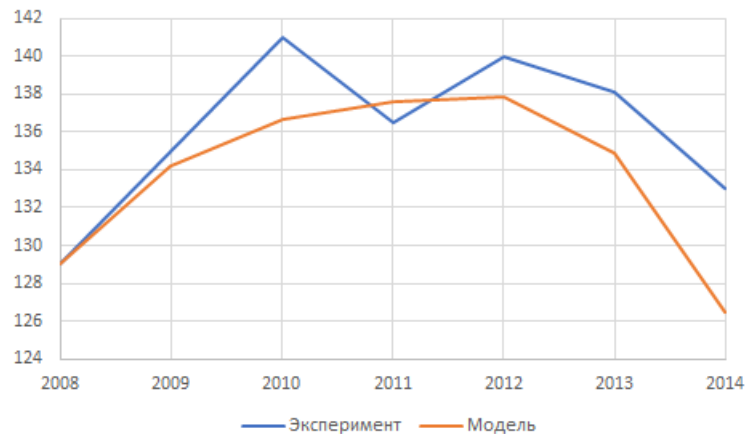
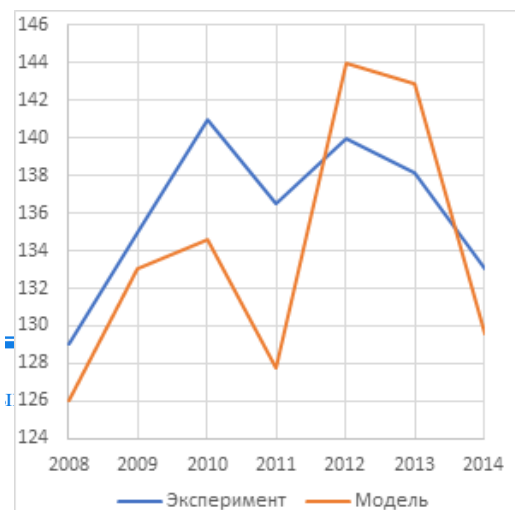
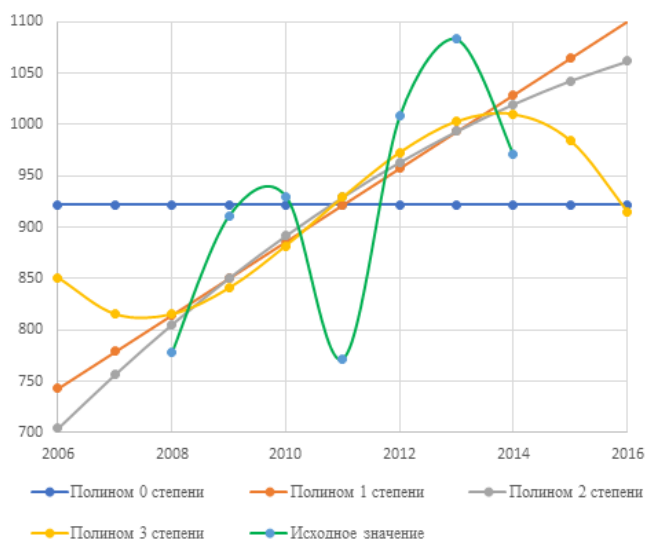


Рис. 5. – Моделирование изменения валового содержания хрома в почве за 2008-2014г. на площадке №б, мг/кг.

Колебания концентрации ТМ за указанный промежуток времени связаны с изменением объема выбросов на предприятии (замена топлива, простой оборудования и пр.). Использование полинома  $n$ -степени (где  $n$  – это количество лет) в качестве функции мощности применимо для ее аппроксимации и уменьшения шага по времени в расчетах, что удобно для исследования вклада различных факторов в процесс накопления ТМ в почве.

При изучении многолетних данных, для которых масса золошлаковых выбросов неизвестна,  $f$  целесообразно задать с помощью полиномов меньшей



степени (рис. 6).

Рис. 6. – Пример использования полиномов разной степени для задачи  $f_{io}$ , т/Г (слева), и расчеты изменения валовой концентрации хрома с использованием полинома 3 степени, мг/кг (справа)

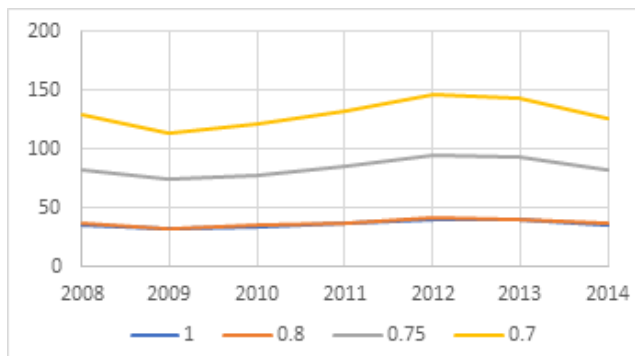


Рис. 8. – Концентрация хрома в почве при разных значениях  $\alpha-\gamma$ , мг/кг

Если предположить, что величины скорости сорбции и десорбции  $\alpha$  и  $\gamma$  нормированы (например, на наибольшее значение за исследуемый промежуток времени), то их разница ( $\alpha-\gamma$ ) в уравнении 7 будет варьироваться в промежутке от 0 – скорость перехода ТМ между состояниями равна и концентрация непрочно связанного вещества максимальна, до 1 – ТМ полностью сорбируются гранулами почвы и наибольшего значения достигает валовая концентрация. Результаты численного моделирования согласуются с данными наблюдений.

### Заключение

На основе стандартной  $k-\varepsilon$  модели и уравнения диффузии построена математическая модель переноса примесей ТМ от наземного источника до накопления их в верхнем 0-20 см слое почвы по данным 5-летнего мониторинга. Приведены начальные и граничные условия, необходимые для численного решения поставленной задачи.

Проведены численные эксперименты для исследования процессов миграции ТМ в почве в районе НчГРЭС на основе данных наблюдений за почвой прилегающих к электростанции территорий. Результаты вычислений

корректно отображают динамику изменения концентрации ТМ: поведение искомой величины в почве соответствует увеличению и снижению выбросов в атмосферу. При этом различие между данными наблюдений и модели может быть вызвано такими факторами, как сложность моделирования турбулентных потоков на больших расстояниях, использование усредненных метеоданных, а также присутствие в регионе дополнительных источников загрязнения.

Построенная математическая модель может применяться для анализа текущей ситуации и прогнозирования динамики миграции ТМ в почве от наземного источника эмиссии поллютантов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-50097*

### Литература

1. Минкина Т.М., Бурачевская М.В., Чаплыгин В.А. Накопление тяжелых металлов в системе почва – растение в условиях загрязнения // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2011. № 4. URL: [rosniipm-sm.ru/dl\\_files/udb\\_files/udb4-rec474-field12.pdf](http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb4-rec474-field12.pdf).
2. Минкина Т.М., Бауэр Т.В. Манджиева С.С. Закономерности процесса трансформации цинка в черноземе обыкновенном в присутствии различных анионов // Инженерный вестник Дона. 2013. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1793](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1793).
3. Захаров М.Ю., Семенчин Е.А. Построение приближенного решения краевой задачи, описывающей рассеяние примеси в атмосфере, методом точечных потенциалов // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2009. № 4. С. 20-27.
4. Терещенко А.М. Математическое моделирование распространения примесей в атмосфере // Вестник московской государственной академии

делового администрирования. Серия: философские, социальные и естественные науки. 2012. №1. С. 124-128.

5. Валуева Е.П. Ламинарная смешанная конвекция в вертикальном плоском канале с постоянной плотностью теплового потока на стенке // Теплофизика высоких температур. 2019. №3. С. 408-415.

6. Kuzmin D., Mierka O., Turek S. On the implementation of the  $k - \epsilon$  turbulence model in incompressible flow solvers based on a finite element discretization // International Journal of Computing Science and Mathematics. 2007. Vol.1. pp.193-206.

7. Федоров А.В. Описание ударной волны в угольном пласте при неравновесной десорбции // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. №1. С. 44-48.

8. Кирейчева Л.В., Тиньгаев А.В. Моделирование миграции тяжелых металлов в почве при использовании органических отходов // Природообустройство. 2009. №3. С. 29-37.

9. Bauer T.V., Pinskiy D.L., Minkina T.M. Application of XAFS and XRD methods for describing the copper and zinc adsorption characteristics in hydromorphic soils // Environ Geochem Health. 2020. URL: doi.org/10.1007/s10653-020-00773-2.

10. Тимофеев А.Н., Муратова Г.В., Минкина Т.М. Построение математической модели миграции тяжелых металлов в почве от наземного источника // Сборник материалов XXVIII научной конференции "Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития". Ростов-на-Дону: изд-во ЮФУ, 2021. С. 324-329.

11. Муратова Г.В., Глушанин М.В. Исследование процессов переноса, диффузии и трансформации радиоактивных примесей, поступающих в атмосферу при авариях на объектах энергетики // Вычислительные технологии. 2009. №14. С. 85-97.

---

12. Самарская Е.А., Сузан Д.В., Тишкин В.Ф. Построение математической модели распространения загрязнений в атмосфере // Математическое моделирование. 1997. №11. С. 59-71.

13. Голубцов А.Р. Геоэкологическая оценка состояния окружающей среды Новочеркасска // Устойчивое развитие науки и образования. 2020. №3. С. 78-84.

14. Чуб М.Р. Технический отчет по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для филиала ОАО «ОГК-2» Новочеркасская ГРЭС, г. Новочеркасск Ростовской области, пос. Донской. Ростов-на-Дону: ООО «Дон-Инк», 2013. 224 с.

15. Korotkova T.G, Ksandopulo S.J, Bushumov S.A. Quantitative Chemical Analysis of Slag Ash of Novocherkassk State District Power Plant // Oriental journal of chemistry. 2017. № 33(1). pp. 186-189.

16. Бушумов С.А., Короткова Т.Г., Сиюхов Х.Р. Гранулометрический состав золы Новочеркасской ГРЭС // Научный журнал КубГАУ. 2016. №10. URL: [ej.kubagro.ru/2016/10/pdf/52.pdf](http://ej.kubagro.ru/2016/10/pdf/52.pdf).

17. World weather. Архив погоды в Ростове-на-Дону. URL: [world-weather.ru/archive/russia/rostov\\_na\\_donu](http://world-weather.ru/archive/russia/rostov_na_donu).

### References

1. Minkina T.M., Burachevskaya M.V., Chaplygin V.A. Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii. 2011. № 4. URL: [rosniipm-sm.ru/dl\\_files/udb\\_files/udb4-rec474-field12.pdf](http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb4-rec474-field12.pdf).

2. Minkina T.M., Bauer T.V. Mandzhiyeva S.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1793](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1793).

3. Zakharov M.YU, Semenchin YE.A. Ekologicheskij vestnik nauchnykh tsentrov CES. 2009. T.6. № 4. pp. 20-27.

4. Tereshchenko A.M. Vestnik moskovskoy gosudarstvennoy akademii delovogo administrirovaniya. Seriya: filosofskiye, sotsial'n-yye i yestestvenn-yye nauki. 2012. №1. pp. 124-128.
  5. Valuyeva YE.P. Teplofizika vysokikh temperatur. 2019. T.57. №3. pp. 408-415.
  6. Kuzmin D., Mierka O., Turek S. International Journal of Computing Science and Mathematics. 2007. Vol.1. pp.193-206
  7. Fedorov A.V. Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh. 2014. №1. pp. 44-48.
  8. Kireycheva L.V., Tin'gayev A.V. Prirodoobustroystvo. 2009. №3. pp. 29-37.
  9. Bauer T.V., Pinskiy D.L., Minkina T.M. Environ Geochem Health. 2020. URL: doi.org/10.1007/s10653-020-00773-2.
  10. Timofeev A.N., Muratova G.V., Minkina T.M. Sbornik materialov XXVIII nauchnoy konferentsii "Sovremennye informatsionnye tekhnologii: tendentsii i perspektivy razvitiya". Rostov-na-Donu: izd-vo YUFU, 2021. pp. 324-329.
  11. Muratova G.V., Glushanin M.V. Vychislitel'nye tekhnologii. 2009. №14. pp. 85-97.
  12. Samarskaya YE.A., Suzan D.V., Tishkin V.F. Matematicheskoe modelirovaniye. 1997. №11. pp. 59-71.
  13. Golubtsov A.R. Ustoychivoe razvitiye nauki i obrazovaniya. 2020. №3. pp. 78-84.
  14. Chub M.R. Tekhnicheskiy otchet po inventarizatsii vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu dlya filiala OAO «OGK-2» Novocherkasskaya GRES, g. Novocherkassk Rostovskoy oblasti, pos. Donskoy [Technical report on the inventory of pollutants emissions into the atmosphere for the branch of JSC "OGK-2" Novocherkasskiy SDPP, Novocherkassk, Rostov region, settl. Donskoy]. Rostov-na-Donu: OOO «Don-InK», 2013. 224 p.
-





15. Korotkova T.G, Ksandopulo S.J, Bushumov S.A. Oriental journal of chemistry. 2017. № 33(1). pp. 186-189.

16. Bushumov S.A., Korotkova T.G., Siyukhov KH.R. Nauchnyj zhurnal KuBG AU. 2016. №10. URL: [ej.kubagro.ru/2016/10/pdf/52.pdf](http://ej.kubagro.ru/2016/10/pdf/52.pdf).

17. World weather. Arkhiv pogody v Rostove-na-Donu. [Weather archive in Rostov-on-Don]. URL: [world-weather.ru/archive/russia/rostov\\_na\\_donu](http://world-weather.ru/archive/russia/rostov_na_donu).