

Моделирование миграции ^{60}Co в водоносном горизонте в районе расположения Нововоронежской АЭС

В 1985 г. на Нововоронежской АЭС произошла утечка жидких радиоактивных отходов из хранилища №2. Основное количество ^{137}Cs локализовано в месте утечки, ^{60}Co с грунтовыми водами распространился до р.Дон (появление ^{60}Co в реке было зафиксировано в 1995 г.), что привело к загрязнению донных отложений. В настоящей работе представлены результаты расчета миграции ^{60}Co с грунтовыми водами.

Ключевые слова: радионуклиды, миграция, водоносный горизонт, моделирование, дифференциальные уравнения в частных производных.

Б.Е.Серебряков (ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им.А.И.Бурназяна ФМБА России, г.Москва),
Е.А.Иванов, И.В.Пырков (АО «ВНИИАЭС», г.Москва)

В 1985 г. на Нововоронежской АЭС произошла утечка жидких радиоактивных отходов из хранилища №2. Утечка произошла по периметру хранилища из закрытого грунтом поддона, поэтому ее обнаружили примерно через полгода при отборе проб воды из контрольных скважин. К настоящему времени основное количество ^{137}Cs локализовано в месте утечки – зоне аэрации на уровне поддона, ^{60}Co опустился в водоносный горизонт и с грунтовыми водами распространился примерно на 700 м до реки Дон. Появление ^{60}Co в реке было зафиксировано в 1995 г. Разгрузка грунтовых вод в Дон привела к загрязнению части донных отложений до уровня твердых радиоактивных отходов. В настоящей работе представлены результаты расчета миграции ^{60}Co с грунтовыми водами.

Модель миграции основана на решении дифференциального уравнения в частных производ-

ных переноса радионуклидов с грунтовыми водами:

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[D_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{C_t}{\rho K_d + \theta} \right) - V_i \frac{C_t}{\rho K_d + \theta} \right] - \lambda C_t + Q, \quad (1)$$

где C_t – объемная активность твердой и жидкой фаз; $D_{ij} = \alpha_t |V| \delta_{ij} + (\alpha_l - \alpha_t) V_i V_j / |V|$ – коэффициент гидродинамической дисперсии; α_t – поперечная, α_l – продольная дисперсность; δ_{ij} – символ Кронекера; V_i – фильтрационный поток грунтовых вод; λ – постоянная распада; Q – скорость поступления загрязняющих компонентов; t – время; ρ – плотность пород; K_d – коэффициент распределения радионуклидов; θ – влагосодержание, безразмерный параметр, в условиях насыщения $\theta = n$; n – общая пористость, которая полагается равной активной пористости.

Модель фильтрации воды основана на решении дифференци-

ального уравнения в частных производных для гидростатического потенциала (давления):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial \Psi}{\partial x_j} - \delta_{i3} \rho_w K_{ij} \right) + f, \quad (2)$$

где K_{ij} – коэффициент фильтрации (для ненасыщенных условий его называют коэффициентом влагопереноса); Ψ – гидростатический потенциал (давление); ρ_w – относительная плотность грунтовых вод (ρ/ρ_0 , $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$); f – дивергенция инфильтрационного потока или другой источник поступления воды.

Уровень грунтовых вод определяется путем решения двумерного уравнения, полученного путем интегрирования уравнения (2):

$$n \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij}^a H \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + F, \quad (3)$$

где h – уровень грунтовых вод; H – мощность водоносного горизонта; $H = h - Z$, Z – уровень водопора; $K_{ij}^a = \int_z^h K_{ij} dz / H$ –

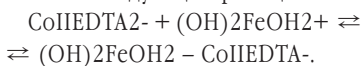
– усредненный по мощности горизонта коэффициент фильтрации; величина H – водопроводимость горизонта; F – сумма инфильтрационного и фильтрационного потоков в нижележащие горизонты.

Фильтрационный поток определяется по формуле:

$$V_i = -K_{ii} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x_i} - \delta_{i3} p_w \right) \quad (4)$$

В уравнениях (1)–(3) по повторяющимся индексам подразумевается суммирование, эти уравнения решаются численно с использованием метода конечных разностей, уравнения (1), (2) – в трехмерном, уравнение (3) – в двумерном виде. Наличие ^{60}Co в ЖРО связано с использованием в то время технологии промывки реактора трилоном-Б – натриевой солью этилендиаминтетрауксусной кислоты (EDTA). При этом кобальт образует комплексный анион с EDTA – CoII EDTA^{2-} . Полагается, что во время инцидента 1985 г. весь ^{60}Co находился в анионной форме, которая со временем трансформируется в катионную форму. Поскольку ^{60}Co в водоносном горизонте присутствует в виде как комплексного аниона, так и простого катиона, то для каждой формы уравнение (1) решается отдельно.

Процесс трансформации анионной формы кобальта в катионную учитывался согласно [1] следующим образом: гидроксид железа в твердой фазе присоединяет один ион водорода и получает положительный заряд: $(\text{OH})_2\text{FeOH}^{2+}$, анион CoII EDTA^{2-} адсорбируется на гидроксиде железа по следующей реакции:



Константа устойчивости аниона FeIII EDTA^{3-} значительно больше, чем у CoII EDTA^{2-} , поэтому трехвалентное железо замещает

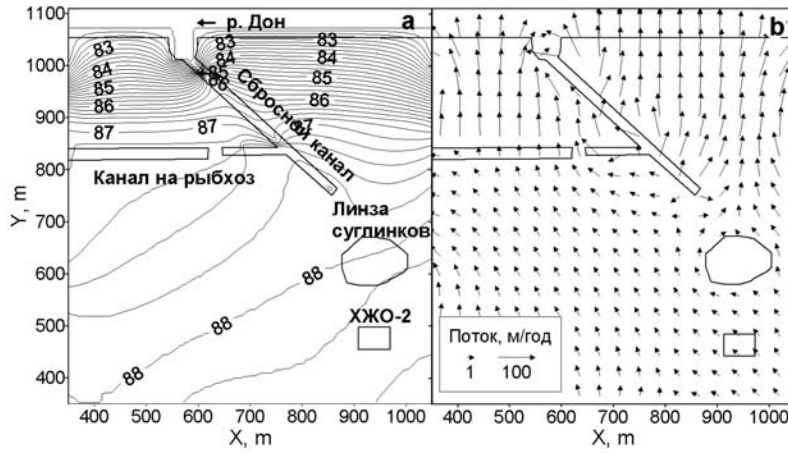


Рис. 1. Расчет фильтрации грунтовых вод, а – абсолютная отметка уровня грунтовых вод (м), б – векторы скорости фильтрации (м/год).

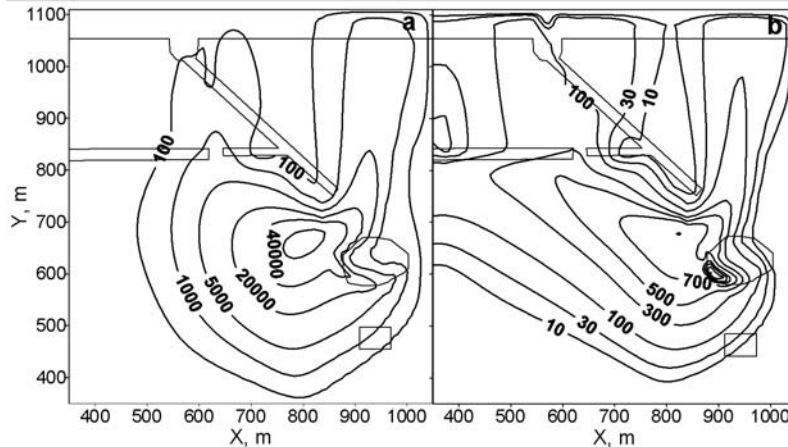


Рис. 2. Рассчитанное распределение активности анионной формы ^{60}Co в грунтовых водах (кБк/кг), а – через 7 лет после инцидента, б – через 18 лет.

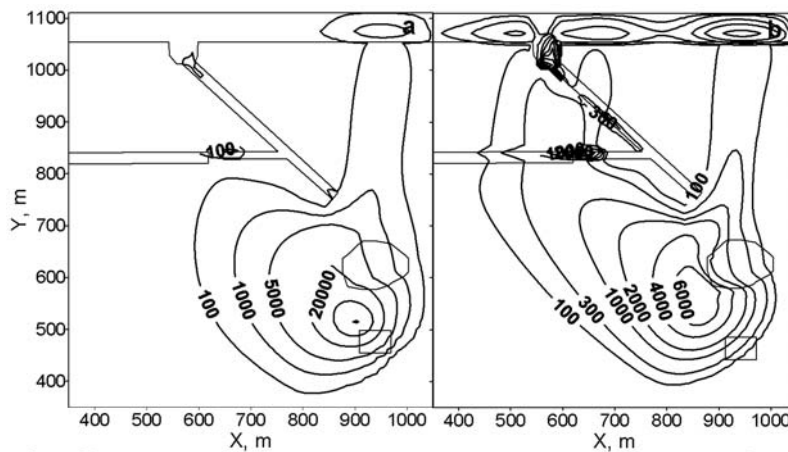
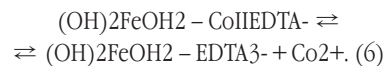


Рис. 3. Рассчитанное распределение активности катионной формы ^{60}Co в грунтах (кБк/кг), а – через 7 лет после инцидента, б – через 18 лет.

кобальт в адсорбированном комплексном ионе с EDTA по следующей реакции:



Этот процесс в уравнении (1) учитывается заданием величины

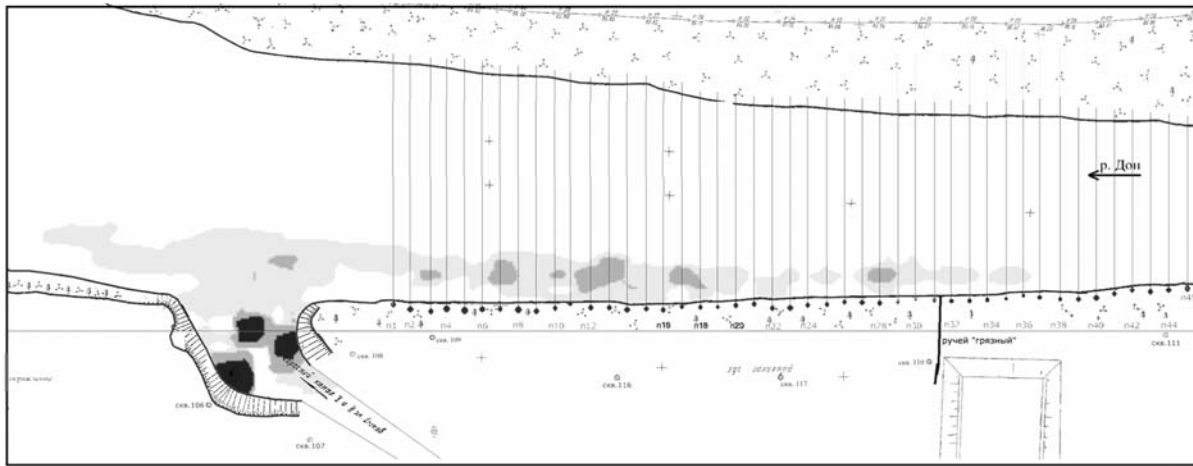


Рис.4. Измеренное распределение активности ^{60}Co в донных отложениях р.Дон.

$$Q = -C_t K_d k_{f2}, \quad (7)$$

где C_t – объемная активность ^{60}Co в анионной форме; K_d – коэффициент распределения при сорбции аниона кобальта в реакции (5), k_{f2} – скорость реакции (6), равная $0,004 \text{ ч}^{-1}$. Для катиона ^{60}Co величина Q определяется по формуле (4), но со знаком плюс.

Согласно измерениям коэффициент распределения песков водоносного горизонта равен $1,5 \text{ л/кг}$ для катиона и $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ л/кг}$ для аниона. Для донных отложений р.Дон и каналов коэффициент распределения дос-

тигает 1000 л/кг . Коэффициент фильтрации песков первой надпойменной террасы равен 18 м/сут , в пойме – 7 м/сут , продольная дисперсность 5 м , поперечная 1 м , активная пористость $0,3$.

На рис.1 приведены результаты расчета фильтрации грунтовых вод. Согласно рис.1 на миграцию загрязнителей значительное влияние оказывает система каналов, а также линза слабопроницаемых суглинков, выявленная при бурении скважин и показанная на рис.1а.

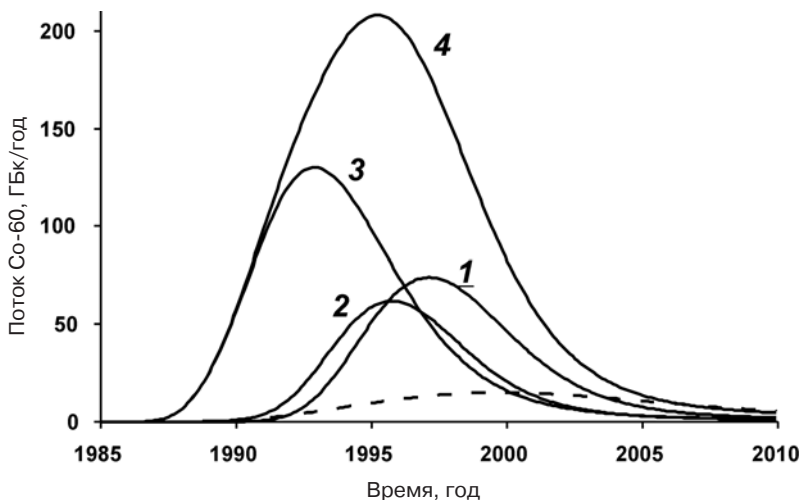


Рис.5. Расчет поступления ^{60}Co в р.Дон. 1 – поступление аниона ^{60}Co в устье сбросного канала, 2 – поступление аниона ^{60}Co на участке на 150 м выше устья сбросного канала, 3 – выше на 300 м устья сбросного канала, 4 – суммарное поступление аниона ^{60}Co . Пунктир – суммарное поступление катиона ^{60}Co .

На рис.2 показано распределение ^{60}Co в анионной форме. Согласно расчетам, можно сделать вывод, что имеются три основных пути миграции загрязнителей в реку:

- поступление в р.Дон выше устья сбросного канала примерно на 300 м между началом сбросного канала и ХЖО-2;
- через канал на рыбхоз ниже установленной на нем плотины;
- последний поток разделяется на поток в Дон примерно в 150 м выше устья и на поток в устье канала.

На рис.3 показано распределение ^{60}Co в катионной форме. Из-за сорбции песками почти весь ^{60}Co в катионной форме сосредоточен вблизи хранилища как через 7 лет после инцидента, так и через 18 лет , тогда как в анионной форме он находится в основном перед природными барьерами: линзой суглинков и каналами, откуда поступает в Дон. Таким образом, распределение ^{60}Co в катионной и анионной формах значительно различаются.

До проведения расчетов на основе измерений предполагалось, что поступление ^{60}Co происходит только в устье сбросного канала, что приводит к загрязнению донных отложений. Впоследствии результаты расчетов, показавшие

наличие других путей поступления в Дон, были подтверждены обнаружением ^{60}Co в донных отложениях выше устья сбросного канала, на рис.4 показано наблюдаемое распределение ^{60}Co в донных отложениях р.Дон.

На рис.5 показано изменение со временем поступления ^{60}Co в Дон. При расчете потоков учитывалось, что согласно экспериментальным данным поступление ^{60}Co в р.Дон равно $\sim 5 \cdot 10^{10}$ Бк/год. Расчеты приведены для трех участков, куда согласно рис.2 направле-

ны три основных потока загрязненных грунтовых вод. Видно, что сначала (в 1990 г.) ^{60}Co поступал в Дон выше по течению от устья сбросного канала примерно на 300 м, затем (с 1995 г.) через устье сбросного канала, что и было зафиксировано.

На основании расчета поступления ^{60}Co в р.Дон можно оценить дозу облучения населения, обусловленную утечкой жидких отходов в 1985 г. Дозу облучения оценивали по модели GENII [2] для критической группы населения – рыбаков и

членов их семей, потребляющих 50 кг рыбы в год. Согласно расчетам, максимальная доза на лиц из критической группы населения примерно в 10 раз меньше минимально значимой дозы 10 мкЗв/год. Таким образом, можно сделать вывод, что инцидент на Нововоронежской АЭС не привел к облучению населения свыше установленных пределов, из-за снижения поступления ^{60}Co в Дон доза постоянно уменьшается.

Литература

1. Szecsody J.E., Zachara J.M., Bruchart P.L. Adsorption-Dissolution Reaction Affecting the Distribution and Stability of CoII/EDTA in Iron-Coated Sand. Environ. Sci. Technol. 1994, v. 28, N 9. P.1706-1716.
2. Napier B., Peloquin R., Strenge D., et al. GENII – the Hanford Environmental Radiation Dosimetry Software System. V.1: Conceptual Representation. Pacific Northwest Laboratory. Washington, 1988.

Modeling of ^{60}Co Migration in the Aquifer at the Place Location of Novovoronezh NPP

Serebryakov Boris (State Research Center - Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia); Ivanov Evgeny; Pyrkov Igor (Joint stock company "All-Russian Research Institute" for Nuclear Power Plants Operation" (VNIIAES), Moscow, Russia)

Abstract. In 1985 at Novovoronezh NPP liquid radioactive waste leaked from the storage facility №2. The majority of ^{137}Cs amount has been localized at the place of the leakage; ^{60}Co was infiltrated into the aquifer and spread through ground waters up to Don River. ^{60}Co occurrence in the river was registered in 1995, it was caused contamination of bottom sediments. This paper presents the calculation results of ^{60}Co migration via ground waters.

Key words: radionuclides, migration, water-bearing formation, simulation, differential equations in partial derivatives.

Б.Е.Серебряков (к.ф.-м.н., в.н.с.) – ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им.А.И.Бурназяна ФМБА России, г.Москва; Е.А.Иванов (к.т.н., зам.дир., нач.цент.) И.В.Пырков (к.т.н., зам.нач.цент.) – АО «ВНИИАЭС», г.Москва.

Контакты: тел.: +7 (495) 376-15-86; e-mail: Check2000@mail.ru.