
УДК 621.039.584

И. В. Ковалец, М. И. Железняк, кандидаты физ.-мат наук,
А. В. Халченков, О. И. Удовенко

Ин-т проблем математических машин и систем НАН Украины
(Украина, 03187, Киев, просп. Глушкова, 42,
тел. (044) 526 14 38, E-mail: ik@env.com.ua),

Т. В. Лаврова

Украинский научно-исследовательский гидрометеорологический ин-т,
(Украина, МСП, 03650, Київ-28, просп. Науки, 37,
тел. (044) 525 11 30, E-mail: lavrova@uhmi.org.ua)

Численное моделирование воздушного распространения радона вокруг урановых хвостохранилищ

(Статью представил д-р техн. наук А. Я. Кондращенко)

Приведены результаты численного моделирования атмосферного переноса радона вокруг хвостохранилищ уранового производства бывшего ПО «Приднепровский химический завод». Скорости эксхалляции (эмиссии) заданы на основании измерений. Установлено, что загрязнение местности радоном ограничено территорией, непосредственно прилегающей к границам хвостохранилищ.

Наведено результати чисельного моделювання атмосферного переносу радону навколо хвостосховищ уранового виробництва колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод». Швидкості эксхалляції (емісії) задано на основі вимірювання. Згідно розрахунків забруднення місцевості радоном обмежено територією, що безпосередньо прилягає до меж хвостосховищ.

К л ю ч е в ы е с л о в а: атмосферный перенос, площадной источник, CALPUFF, радон, эксхалляция.

Приднепровский химический завод (ПХЗ) был одним из крупнейших предприятий по переработке урана в Советском Союзе [1]. Это предприятие работало с 1948 г. по 1991 г., а после распада СССР ПХЗ был разделен на несколько компаний, и обработка урана на нем прекратилась. Продукты переработки урана хранятся в девяти хвостохранилищах, и их суммарная радиоактивность составляет приблизительно $3,2 \cdot 10^{15}$ Бк [1]. Помимо радиоактивности, сохраняющейся в материале хвостохранилищ, на территории ПХЗ находятся загрязненные здания и другие объекты, которые были задействованы в производственном технологическом цикле. Промплощадка ПХЗ находится в непосредственной близости к жилой зоне г. Днепропетровска

(приблизительно 1 км). Воздушное распространение радона (^{222}Rn) как продукта распада радия (^{226}Ra), содержащегося в радиоактивных отходах на территории ПХЗ, является одним из возможных путей облучения персонала на территории промплощадки ПХЗ.

Естественно предположение о существенном вкладе хвостохранилищ в суммарную дозу облучения для персонала и населения жилой зоны вследствие увеличения объемной активности радона в воздухе. Поэтому в рамках «Государственной программы по приведению опасных объектов ПО «ПХЗ» в экологически безопасное состояние и обеспечению защиты населения от вредного воздействия ионизирующего излучения на 2005—2014 гг.» проведены исследования по мониторингу радиоактивности радона в грунте хвостохранилищ, его содержанию в приземном слое воздуха над их поверхностью и скорости эксхалации (эмиссии) из грунта в воздух [2]. При этом исследована в основном территория хвостохранилищ. Однако представляет также интерес влияние хвостохранилищ на радиоактивное загрязнение радоном на расстояниях от нескольких метров до нескольких километров.

Рассмотрим результаты исследования этой проблемы средствами математического моделирования. Следует заметить, однако, что хвостохранилища — не единственный источник радона на территории ПХЗ, где кроме природного фона есть загрязненные здания и другие трудно учитываемые и мало исследованные источники. Поэтому полученные результаты следует интерпретировать как исследование влияния отдельных хвостохранилищ в виде дополнительного поступления радона в воздух и увеличения его объемной концентрации.

Исследование было ограничено тремя хвостохранилищами: «Западное», «Центральный Яр» и «Юго-Восточное». Другие хвостохранилища «Лазо», «База С», «Сухачевское» менее изучены и не представляют интереса в качестве источников радона («Днепровское»). Исследованные три хвостохранилища представляют собой объекты площадью приблизительно 10^4 м^2 каждый, расположенные на расстоянии 0,5—1,5 км один от другого. Основная цель исследования — оценка средней и максимальной концентрации радона в воздухе в непосредственной близости к границе хвостохранилищ (приблизительно 700 м) и в отдалении, вплоть до границы жилой зоны.

Модели воздушного переноса радона от площадных (пространственно-распределенных) источников. Как известно, атмосферный перенос радона во многих случаях может быть рассчитан как распространение пассивной консервативной примеси [3]. Основания для такого приближения в рассматриваемом случае следующие. Поскольку время полураспада радона составляет приблизительно 91 ч., размер вычислительной области

в данном случае не более 10 км, а также поскольку радон как инертный газ не осаждается и не вымывается осадками, максимальная продолжительность пребывания радона в вычислительной области составляет 5 ч при минимальной скорости ветра 0,5 м/с. Это время значительно меньше времени полураспада. Следовательно, радиоактивный распад радона можно не учитывать.

Для расчета атмосферного переноса использована диагностическая метеорологическая модель (метеорологический препроцессор) CALMET и модель атмосферного переноса CALPUFF [4]. Эти модели рекомендованы Агентством по охране окружающей среды (США) для расчетов ближнего и дальнего переноса загрязнителей (в том числе в условиях сложной топографии) и свободно распространяются через Интернет. Модели CALMET-CALPUFF неоднократно использованы в задачах атмосферного переноса радиоактивных загрязнений, например переноса урана и его продуктов распада [5] и др. Детали алгоритмов, используемых в этих моделях, описаны в [4]. Основные принципы вычислительных алгоритмов моделей CALMET и CALPUFF следующие.

Метеорологический препроцессор CALMET рассчитывает распределение в пространстве поля ветра, температуры, высоты пограничного слоя, категории устойчивости и других метеорологических переменных, необходимых для расчета атмосферного переноса. В качестве входных данных можно использовать данные метеорологических измерений (наземные станции, радиозонды и др.). CALMET линейно интерполирует и экстраполирует данные измерений на вычислительную сетку с учетом неоднородностей топографии местности. Учет топографии осуществляется с помощью метода минимизации дивергенции. При расчете вертикального распределения метеорологических элементов наземные измерения экстраполируют по высоте в нижнем двухсотметровом слое атмосферы с помощью полуэмпирических соотношений, описывающих в том числе поворот вектора ветра с высотой. В более высоких слоях атмосферы осуществляется интерполяция между данными экстраполяции на высоте 200 м и данными радиозондов. Необходимые для вертикальной экстраполяции параметры, такие как динамическая скорость, масштаб Монин—Обухова и другие, рассчитывают на основании стандартных данных наземной станции — вектора ветра, температуры, точки росы, давления и облачности. При этом используют ряд параметров, которые зависят от категории подстилающей поверхности в месте расположения точки измерения (шероховатость и др.).

Модель атмосферного переноса CALPUFF относится к семейству моделей Эйлера—Лагранжа. Она описывает распространение загрязнений от точечных, линейных и площадных источников. В качестве входных метео-

рологических данных в этой модели использованы метеорологические поля, вычисленные с помощью модели CALMET. Модель CALPUFF может быть применена в условиях сложной топографии для описания процессов переноса с масштабами 0,1—1000 км. В лагранжево-эйлеровых моделях используется представление продолжительного выброса загрязнителей в виде последовательности мгновенных выбросов (puffs), которые в дальнейшем будем называть «частицами». На каждом временном шаге эти частицы переносятся ветром так, как это происходило бы с настоящими частицами. Следовательно, радиус-вектор центра масс частицы описывается уравнением $d\mathbf{r} = \mathbf{V}(\mathbf{r}) dt$, где \mathbf{V} — вектор скорости ветра, вычисленный с помощью линейной интерполяции значений скорости ветра на сетке CALMET в центр масс частицы. Однако, кроме координат центра масс, частицы лагранжево-эйлеровых моделей характеризуются также распределением концентрации в каждой частице. Это распределение соответствует известным полуэмпирическим соотношениям, описывающим пространственно-временное распределение вещества вследствие турбулентной диффузии мгновенного выброса [6]. Таким образом, концентрация C вещества в точке (x, y, z) в момент времени t вычисляется, как сумма вкладов отдельных частиц:

$$C(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \sum_{p=1}^N \frac{M_p}{\sigma_{xp} \sigma_{yp} \sigma_{zp}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(x_p - x)^2}{\sigma_{xp}^2}\right] \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(y_p - y)^2}{\sigma_{yp}^2}\right] \times \\ \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z_p - z)^2}{\sigma_{zp}^2}\right] + \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z_p + z - 2z_g)^2}{\sigma_{zp}^2}\right] \right\}, \quad (1)$$

где ось z направлена вертикально вверх, уровень $z = 0$ совпадает с уровнем моря; (x_p, y_p, z_p) — координаты частицы p ; N — суммарное количество частиц; M_p — суммарное количество вещества в p -й частице; z_g — высота поверхности Земли; $\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}$ — параметры, характеризующие распределение вещества в частице в горизонтальном и вертикальном направлениях.

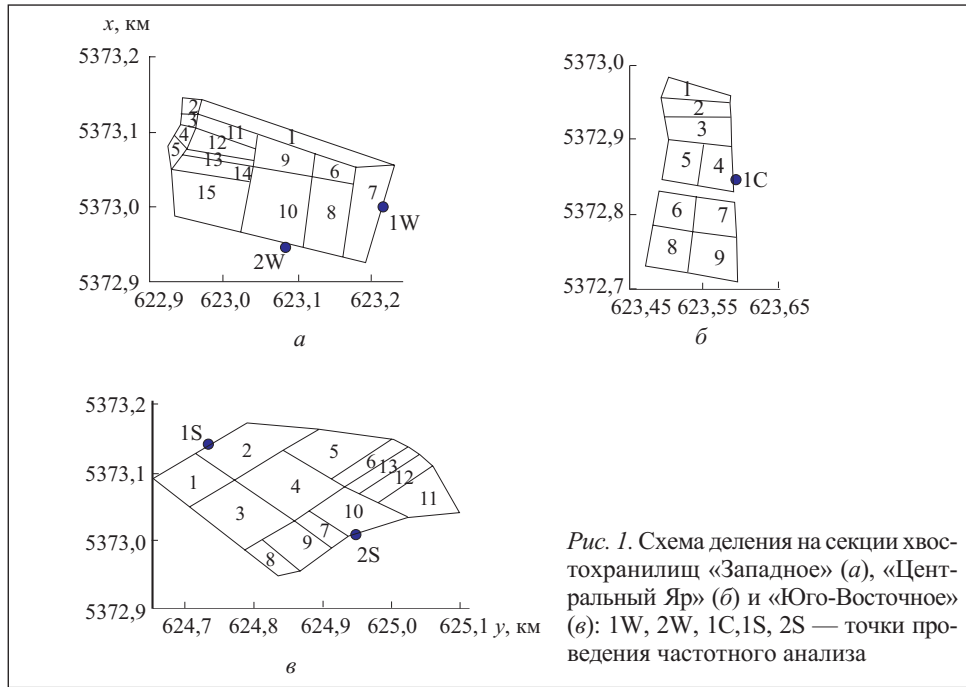
В формуле (1) предполагается полное отражение облака от поверхности Земли. Для $\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}$ используются параметризации, основанные на зависимости скорости увеличения этих параметров от локальных характеристик турбулентности (динамической скорости, масштаба Монина—Обухова, высоты пограничного слоя) в месте нахождения частицы. В результате зависимости параметров σ от расстояния l , пройденного частицей, близки к степенным зависимостям, найденным Паскуилом: $\sigma \approx al^b$, где значения $a \sim 1, b \sim 1$ зависят от категории устойчивости.

Источник выброса. Значение скорости эксхалиции радона с единицы площади хвостохранилищ является критическим для результатов моделирования. Для задания этой величины можно использовать либо расчетные оценки, либо результаты измерений эксхалиции. Поскольку вокруг изучаемых хвостохранилищ проводились серии измерений эксхалиции радона [2], измеренные значения использованы для расчета объемной активности радона в воздухе. Однако были проведены и расчетные оценки эксхалиции для выяснения чувствительности результатов к сделанным предположениям.

В первом приближении хвостохранилище можно представить состоящим из двух слоев: слоя радиоактивных отходов (РАО) и покрытия, сделанного искусственно для уменьшения эксхалиции радона с поверхности. Характеристики покрытия (материал, толщина, количество радия в покрытии) неоднородно распределены по площади хвостохранилища и не всегда известны. На основании имеющихся данных о характеристиках покрытия и других особенностей территория хвостохранилищ была разделена на секторы так, что эксхалицию в пределах отдельного сектора можно считать распределенной почти однородно. Поэтому выполненные в пределах каждого сектора измерения осреднялись, и полученное значение использовалось в расчетах в качестве величины эксхалиции для данного сектора. При этом вычисляемая на основании измерений эксхалиция радона предполагалась постоянной во времени.

На рис. 1 показано деление территории хвостохранилищ на секции в соответствии с описанными выше принципами и на основании технических требований модели CALPUFF, в которой источник можно задавать только в форме четырехугольника (координаты даны в универсальной поперечной проекции меркатора). Таким образом, несколько секций на рис. 1 соответствуют определенному сектору. Величина эксхалиции для хвостохранилищ «Западное» (см. рис. 1, *a*) и «Центральный Яр» (см. рис. 1, *б*) была задана в соответствии с табл. 1. Для хвостохранилища «Юго-Восточное» (см. рис. 1, *в*) задано одинаковое значение эксхалиции для всех секций — $3 \text{ Бк/м}^2\text{с}$, поскольку на его территории было сделано меньше измерений.

Как видно из табл. 1, наибольшая эксхалиция наблюдается на территории хвостохранилища «Центральный Яр». Следует обратить внимание на очень большие различия (в 30—50 раз) в величине эксхалиции между территорией дамбы и всей остальной территорией хвостохранилища «Западное». Это связано с тем, что средние значения измерений эксхалиции на территории дамбы, указанные в табл. 1, увеличены вдвое для учета эксхалиции со склонов дамбы, площадь которых приблизительно равна площади ее горизонтальной части. Следовательно, реальные различия между эксхалицией с дамбы и с остальной территории «Запад-



ного» хвостохранилища — в 15—25 раз. Остальные различия между эксхалляциями в пределах различных секторов объясняются, по-видимому, неоднородностью толщины покрытия и величиной концентрации радия в покрытии.

Рассмотрим возможные причины таких больших различий между эксхалляцией с дамбы и с остальной территорией хвостохранилища. На примере хвостохранилища «Западное», наиболее подробно изученного как относительно геоморфологических характеристик [7], так и относительно радиоактивного загрязнения [2], были проведены вычисления с помощью двухслойной модели эксхалляции радона. Согласно [8] поток радона из хвостохранилища с покрытием находим по формулам

$$J_{t(c)} = 10^4 R_{t(c)} \rho_{t(c)} E \sqrt{\lambda D_{t(c)}} \tanh(x_{t(c)} \sqrt{\lambda D_{t(c)}}),$$

$$J = \frac{2J_t \exp(-b_c x_c)}{1 + \sqrt{a_t/a_c} \tanh(b_t x_t) + [1 - \sqrt{a_t/a_c} \tanh(b_t x_t)] \exp(-2b_c x_c)} + J_c, \quad (2)$$

где индексы t и c относятся соответственно к слою РАО и к слою покрытия; J_t, J_c — потоки радона из слоев РАО и покрытия, рассматриваемых независимо один от другого; J — суммарный поток, в котором

первый член определяет затухание J_t вследствие влияния покрытия; $R_{t(c)}$ — удельная активность радия в материале; $\lambda = 2,1 \cdot 10^{-6} 1/c$ — постоянная распада радия; $\rho_{t(c)}$ — плотность материала; $x_{t(c)}$ — толщина соответствующего слоя; $E \approx 0,35$ — безразмерный коэффициент эманации радона (определяющий, какая часть радона попадает в поры и способна диффундировать).

Коэффициенты диффузии $D_{t(c)}$ радона в (2) определяем по формуле

$$D_{t(c)} = 7 \cdot 10^{-6} \exp(-4(m_{t(c)} - m_{t(c)} n_{t(c)}^2 + m_{t(c)}^2)), \quad (3)$$

где $m_{t(c)}$ и $n_{t(c)}$ — влажность (отношение объема пор, занятых водой к суммарному объему пор в единице объема) и пористость соответствующих материалов; параметры $b_{t(c)}$ и $a_{t(c)}$ определяем из следующих соотношений:

$$b_{t(c)} = \sqrt{\lambda D_{t(c)}}, \quad a_{t(c)} = n_{t(c)}^2 D_{t(c)} [1 - (1 - k)m_{t(c)}]^2,$$

где $k \approx 0,26$ — коэффициент равновесия между радоном в воздухе и в воде.

Таблица 1. Расчетные величины эксхалляции в секторах и соответствующих секциях хвостохранилищ (см. рис. 1)

Хвостохранилище	Номер секции	Название и номер сектора	Эксхалляция, Бк/м ² с
«Западное»	5, 4, 3, 2, 1, 7	Дамба	4
	11, 12, 13	Северная часть, западный сектор	0,075
	9	Северная часть, центральный сектор	0,177
	6	Северная часть, восточный сектор	0,1
	14, 15, 10, 8	Южная часть, западный и восточный секторы [2]	0,117
«Центральный Яр»	1,2	I	0,75
	3	II	8,3
	5,4	III, IV	12,5
	6	V	3,4
	7	VI	3,5
	8	VII	3,3
	9	VIII	0,7

Поскольку измерения эксхалиции проводились на территории северной части «Западного» хвостохранилища и на территории дамбы, были проведены вычисления для этих двух территорий. На основании проведенных исследований [2, 7] для слоя РАО в обоих случаях приняты следующие значения параметров: $x_t = 10$ м, $\rho_t = 1600$ кг/м³, $m_t = 0,7$, $n_t = 0,4$, $R_t = 3169$ Бк/кг; для слоя покрытия в обоих случаях принято $\rho_c = \rho_t$, $n_c = 0,3$, $m_c = 0,3$ (рекомендовано в [8] в качестве значения по умолчанию). Толщина покрытия в северной части $x_c = 2$ м, а для дамбы $x_c = 1$ м. Активность радия в покрытии на территории дамбы средняя по хвостохранилищу $R_c = 150$ Бк/кг. Территория северной части рекультивирована, поэтому активность радия в покрытии на этой территории существенно меньше средней по хвостохранилищу и на основании измерений [2] принята $R_c = 30$ Бк/кг.

При данных значениях параметров модели вычислены значения эксхалиции радона на территории дамбы, $J_{\text{dam}} = 0,823$ Бк/м²с, и на территории северной части: $J_N = 0,23$ Бк/м²с. По данным измерений на территории дамбы $J_{\text{dam}} \approx 2$ Бк/м²с, а на территории северной части $J_N = 0,08 \div 0,18$ Бк/м²с.

Таким образом, результаты вычислений для территории северной части хвостохранилища хорошо согласуются с результатами измерений. Поскольку на территории северной части толщина слоя РАО и толщина покрытия достаточно велики для того, чтобы значения влажности в них можно было считать неизменными в течение года, значения эксхалиции, полученные в результате измерений для этой части хвостохранилища, можно считать неизменными в течение года.

Из приведенных результатов следует, что на территории дамбы вычисленные значения эксхалиции в 2,5 раза меньше наблюдаемых. Такие различия могут быть обусловлены двумя причинами: повреждениями в покрытии (поскольку на территории дамбы происходили оползни) и меньшей влажностью основной толщи хвостохранилища в районе дамбы по сравнению со средним значением (поскольку дамба возвышается на 5 м над прилегающей территорией).

Результаты проведенных расчетов свидетельствует о том, что в случае отсутствия покрытия значение эксхалиции на территории дамбы способно достигать 1,4 Бк/м²с. Если, кроме того, сделать предположение о нулевой влажности слоя РАО, то это значение способно достичь 2 Бк/м²с. Следовательно, можно сделать вывод о том, что оценки величины источника на дамбе, сделанные на основании измерений, близки к максимально возможным значениям.

На южной части хвостохранилища «Западное» измерения не проводили, и значения потока здесь приняты такие же, как и на северной части.

Однако южная часть (центральный и восточный секторы) в основном покрыта асфальтом, под которым находятся бетонные плиты, а территория западного сектора южной части рекультивирована. Большие значения эксхалляции радона наблюдаются только в местах повреждения асфальтового покрытия над сочленениями бетонных плит, между которыми прорастает трава. Поэтому использованные значения эксхалляции в данном случае, по-видимому, завышены.

Таким образом, на основании изложенного можно предположить, что значения эксхалляции радона, заданные в расчетах модели для «Западного» хвостохранилища (см. табл. 1), теоретически близки к максимально возможным.

Результаты расчетов. Поскольку детальные расчеты атмосферного распределения загрязнения от площадных источников вблизи их границы сопряжены с рядом сложностей [9], перед проведением моделирования распространения радона был выполнен тестовый расчет распространения пассивной примеси с использованием модели CALPUFF для сценария, описанного в [9]. В этом сценарии исследована атмосферная дисперсия от источника квадратной формы со стороной 150 м, расположенного на уровне земли. Скорость ветра принята равной 2 м/с, направление ветра перпендикулярно одной из сторон, стратификация — нейтральная, категория землепользования — сельскохозяйственная растительность, мощность источника выброса — 10^{-4} г/м²с. В работе [9] представлены расчетные значения $C(x)$ приземной концентрации загрязнения на оси симметрии облака в точках на разных расстояниях x от середины источника:

$$3,5 \cdot 10^5 \leq C(35) \leq 1,8 \cdot 10^6, 2,5 \cdot 10^5 \leq C(100) \leq 7,3 \cdot 10^5, \\ 1,2 \cdot 10^4 \leq C(1575) \leq 7,0 \cdot 10^4,$$

где в скобках указаны значения x в метрах, а значения концентрации даны в мг/м³. С помощью CALPUFF были получены следующие значения:

$$C(35) = 7,4 \cdot 10^5, C(100) = 5,1 \cdot 10^5, C(1575) = 3,1 \cdot 10^4.$$

Следовательно, для всех x значения, рассчитанные с помощью CALPUFF, находятся в пределах интервала, характеризующего разброс значений различных моделей [9]. При этом вблизи границы источника ($x \leq 100$) значения, полученные с помощью CALPUFF, находятся ближе к верхней границе интервала разброса, а для больших значений x ($x \approx 1000$) — приблизительно посередине этого интервала. Таким образом, рассчитанные с помощью модели CALPUFF концентрации атмосферного загрязнения от источника согласуются с результатами, полученными с помощью

других моделей, активно используемых в мировой практике для решения аналогичных задач.

Для получения репрезентативных значений средней концентрации загрязнения воздуха вокруг хвостохранилищ были проведены вычисления атмосферного переноса радона, поступающего из хвостохранилищ за период 4,5 года (с начала 2005 г. по май 2009 г. включительно). Вычисления выполнены на территории размером 6×6 км, охватывающей три хвостохранилища. В качестве географических данных о топографии использованы данные DEM (Digital Elevation Model) с пространственным разрешением 198 м, которое совпадало с горизонтальным разрешением сетки метеорологической модели CALMET. Значения концентрации загрязнения определяли в местах расположения зданий, в отдельно выбранных точках на территории, вблизи границ каждого из хвостохранилищ и в узлах вычислительной сетки CALMET.

В расчетах были использованы данные наземной метеорологической станции, расположенной в Днепропетровске (направление и скорость ветра на высоте 10 м, приземная температура на высоте 2 м, давление, точка росы, облачность), и данные ближайшего радиозонда (направление и скорость ветра, температура, высота на стандартных уровнях давления). Эти данные заданы с шагом, соответствующим интервалу измерений (3 ч для наземной станции и 12 ч для радиозондов). Число пропусков метеорологических измерений незначительно (не более 1 %) и поэтому не влияет на средние значения концентраций загрязнений. В случае отсутствия результатов измерений для обеспечения непрерывности расчетов использованы метеорологические данные за последний перед пропуском срок измерения.

Категория землепользования определена экспертно на основании визуальной оценки фотографий. Следует заметить, что категория землепользования в данных расчетах влияет только на скорость перемешивания, поскольку осаждение и вымывание отсутствует. Это влияние определяется параметром шероховатости [10]

$$z_0 \approx h/30 \text{ м}, \quad (4)$$

где h — характерный размер отдельных элементов шероховатости. Согласно этой формуле основная территория промплощадки может быть классифицирована как городская застройка, что соответствует $z_0 \approx 1$ м. Однако, во-первых, шероховатость поверхности хвостохранилищ значительно меньше, чем шероховатость основной территории промплощадки. Во-вторых, формула (4) применима для высот, больших, чем высота элементов шероховатости, где значение динамического трения (и соответственно параметра шероховатости) всегда больше, чем в слое, распо-

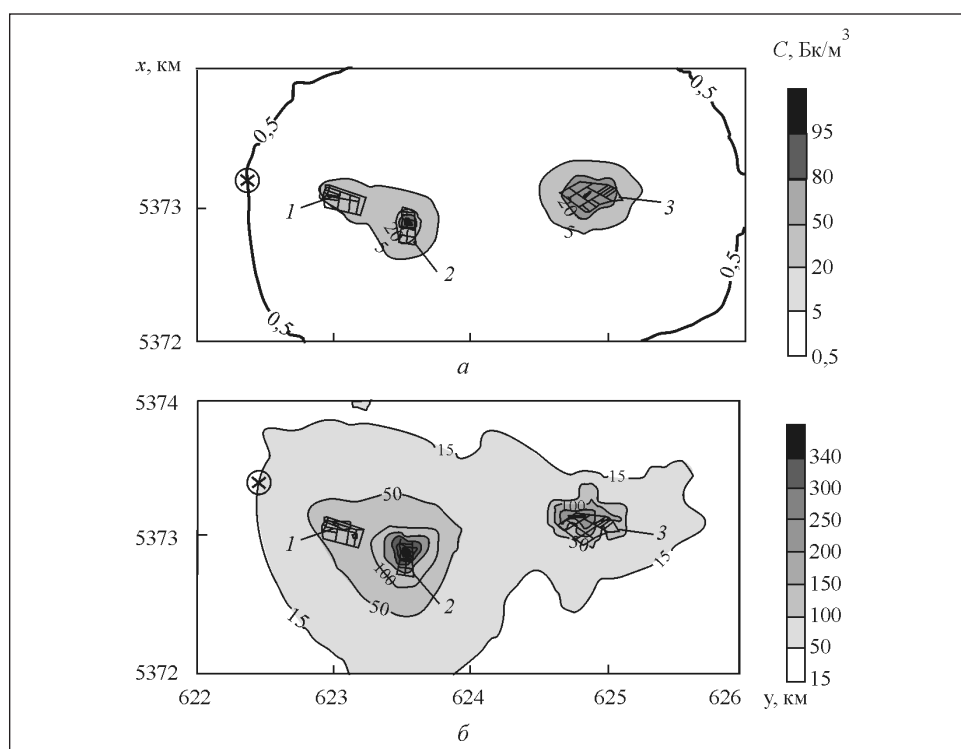


Рис. 2. Средняя (а) и максимальная среднесуточная (б) за период 4,5 года концентрация радона, создаваемая хвостохранилищами «Западное» (1), «Центральный Яр» (2) и «Юго-Восточное» (3); ⊗ — ближайшая к хвостохранилищу точка на границе жилой зоны

женном ниже высоты элементов шероховатости (зданий) [11]. В данном случае источник расположен на поверхности Земли, и распространение загрязнения вблизи источника происходит в слое, расположенном ниже крыш зданий, в так называемом слое «проникающей шероховатости». Поэтому в вычислениях было использовано меньшее значение шероховатости: $z_0 = 0,2$ м.

На рис. 2 представлены распределения средних за весь промежуток расчета приземных концентраций радона вокруг хвостохранилищ. Максимальное значение средних концентраций над территорией хвостохранилища «Западное» — 20 Бк/м^3 , над территорией хвостохранилища «Центральный Яр» — 100 Бк/м^3 , над территорией хвостохранилища «Юго-восточное» — 50 Бк/м^3 . На рис. 2, а, видно, что средние концентрации выше фоновых (20 Бк/м^3) наблюдаются практически только на территории хвостохранилищ и в непосредственной близости к ней. Соответствующая годовая доза от ингаляции радона и его продуктов распада, рассчитанная

согласно стандартным методикам [12], составляет от 0,1 мЗв (у границ хвостохранилищ «Западное» и «Юго-восточное») до 0,5 мЗв (у границы хвостохранилища «Центральный Яр»). На территории хвостохранилища «Центральный Яр» годовая доза достигает 0,8 мЗв.

В отличие от среднегодовых концентраций максимальные среднесуточные концентрации (см. рис. 2, б) за весь период расчетов могут достигать 50 Бк/м³ в радиусе 350 м от хвостохранилища «Центральный Яр» и на расстояниях 100—200 м от хвостохранилищ «Западное» и «Юго-Восточное».

Согласно расчетам, влияние хвостохранилища на загрязнение в точке, ближайшей к хвостохранилищам на границе жилой зоны, незначительно: среднее значение концентрации радона — 0,5 Бк/м³, максимальное — 15 Бк/м³, а средняя годовая доза — 0,004 мЗв.

Дополнительный анализ среднесуточных концентраций проведен для отдельных точек, расположенных на границах хвостохранилищ, представленных на рис. 1. Полученные результаты представлены в табл. 2. В точке на границе хвостохранилища «Центральный Яр» в 60 % случаев концентрация превышает нормативное значение 50 Бк/м³. Для двух различных точек, расположенных на границе хвостохранилища «Западное», частота превышения значения 50 Бк/м³ отличается на порядок. Очевидно, что это различие обусловлено неоднородным пространственным распределением источника (см. табл. 1). Для хвостохранилища «Юго-Восточное» частота превышения 50 Бк/м³ достигает 10 % на северо-западной границе и лишь 1,8 % на юго-восточной. Поскольку для этого хвостохранилища пространственное распределение источника задано однородным, такие различия можно объяснить только влиянием неравномерности распределения ветра по величине и направлению.

На рис. 3 приведены измеренные и рассчитанные величины концентрации радона на территории трех хвостохранилищ. Как видим, для всех

Таблица 2. Результаты частотного анализа распределения среднесуточных концентраций радона за период 4,5 года

Точка на рис. 1	Хвостохранилище, граница	$C_{\text{ср}}$, Бк/м ³	C_{max} , Бк/м ³	Частота N (%) превышения значений		
				$C > 20, \%$	$C > 50, \%$	$C > 100, \%$
1W	«Западное», восточная	29,2	93,63	61,8	14,6	0
2W	«Западное», южная	5,5	71,5	4	0,1	0
1С	«Центральный Яр», восточная	68	281	94	60	17,6
1S	«Юго-Восточное», северо-западная	23,7	195	45	10	0,5
2S	«Юго-Восточное», юго-восточная	14	86	25	1,8	0

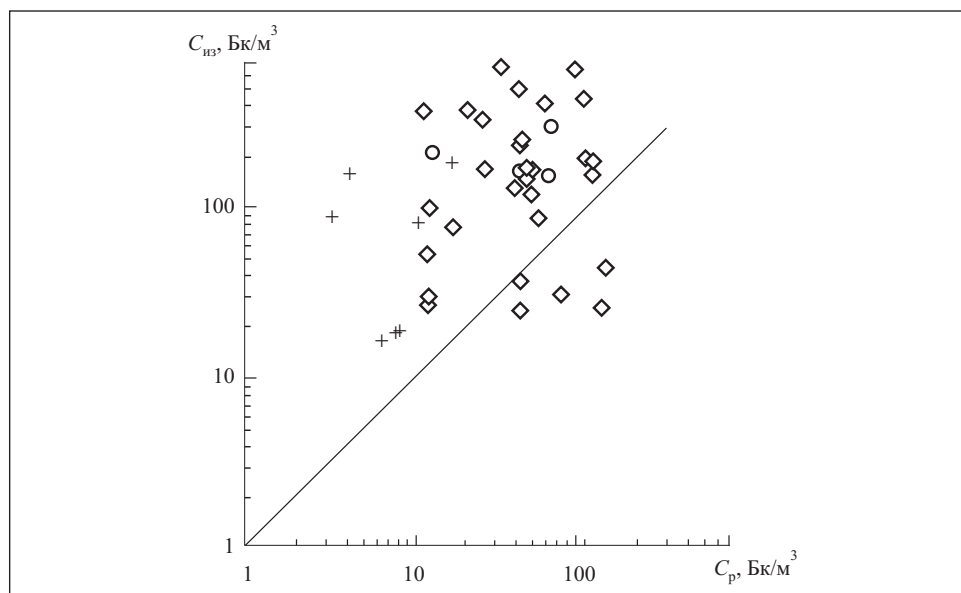


Рис. 3. Полученные в результате измерений $C_{из}$ и рассчитанные $C_{р}$ концентрации загрязнений на территориях хвостохранилищ: + — «Западное»; ◇ — «Центральный Яр»; o — «Юго-Восточное»

хвостохранилищ рассчитанные значения концентрации в среднем меньше, чем измеренные. Так, значения $C_{р}$, рассчитанные для территории хвостохранилища «Западное», значительно меньше измеренных в 2008 г. ($C_{из} = 200 \text{ Бк/м}^3$) и в 2007 г. ($C_{из} = 400 \text{ Бк/м}^3$). Результаты проведенных расчетов согласуются с результатами предыдущих исследований хвостохранилища «Западное» [7].

Следует также обратить внимание на существенные различия между результатами измерений на территории хвостохранилища «Западное». Так, в июне 2008 г. в трех точках были зафиксированы значения $C_{из} = 20 \text{ Бк/м}^3$, а в июне — июле 2008 г. на той же территории — значения $C_{из} = 100$ и $C_{из} = 193 \text{ Бк/м}^3$. Такие же большие расхождения наблюдаются и для хвостохранилища «Юго-Восточное». Для хвостохранилища «Центральный Яр» согласование результатов расчетов с измерениями значительно лучше. В среднем расчетные значения для этого хвостохранилища в 1,5 раза меньше значений, полученных в результате измерений. Если исключить из сравнения точки, в которых измерения проводились над разломами в покрытии, то это различие будет еще меньше. В то же время, для хвостохранилищ «Западное» и «Юго-Восточное» рассчитанные концентрации в среднем меньше измеренных значений соответственно в три и пять раз.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что различие значений C больше для тех хвостохранилищ, где эксхалация меньше (эксхалация на хвостохранилище «Центральный Яр» в среднем значительно больше, чем на двух других). Такая ситуация возможна, например, когда на концентрацию радона кроме хвостохранилищ значительное влияние оказывают другие источники. Это предположение основано на том, что оценка функции источника для хвостохранилища «Западное» в проведенных расчетах, по-видимому, близка к максимальному значению (см. предыдущий раздел). Следовательно, существующие различия между значениями рассчитанных и измеренных концентраций радона, возможно, объясняются: а) влиянием других источников радона; б) осреднением результатов по временным интервалам, значительно большим (в 100 — 200 раз), чем интервалы измерений (поскольку точные даты измерений неизвестны); в) влиянием неучтенных в расчетах повреждений покрытий хвостохранилищ.

Выводы. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что концентрация радона в атмосфере вокруг хвостохранилищ «Западное», «Центральный Яр» и «Юго-Восточное» не превышает 50 Бк/м^3 на расстоянии больше 300 м от границ хвостохранилищ. Таким образом, влияние хвостохранилищ на концентрации радона на территории промплощадки и жилой зоны незначительно. Этот результат согласуется с данными [7], полученными на основании использования модели Гаусса и имевшимися в 2001 г. фактическими данными.

Создаваемая хвостохранилищами концентрация радона в точках на их границах превышает 50 Бк/м^3 в 60 % случаев для хвостохранилища «Центральный Яр», в 15 % случаев — для хвостохранилища «Западное» и в 10 % случаев — для хвостохранилища «Юго-Восточное». При этом на границе хвостохранилищ «Западное» и «Юго-Восточное» есть точки, где частота N существенно меньше названных значений вследствие пространственной неоднородности источника эксхалации радона и изменчивости во времени и пространстве направления и скорости ветра.

Влияние хвостохранилища на загрязнение жилой зоны весьма незначительно. В ближайшей к хвостохранилищам точке жилой зоны $C_{\text{ср}} = 0,5 \text{ Бк/м}^3$, $C_{\text{max}} = 15 \text{ Бк/м}^3$, а средняя годовая доза составляет $0,004 \text{ мЗв}$. Моделирование атмосферного переноса радона проведено с использованием данных измерений эксхалации радона. Теоретические оценки эксхалации для хвостохранилища «Западное», полученные с учетом его геоморфологических характеристик и данных о радионуклидном составе почвы, свидетельствуют о том, что использованные в вычислениях значения эксхалации близки к максимальным.

Значительные различия измеренных и рассчитанных значений концентрации радона в воздухе на территории хвостохранилищ можно объяснить влиянием посторонних трудно контролируемых источников радона, присутствующих на территории промплощадки ПХЗ, влиянием неучтенных в расчетах повреждений покрытий хвостохранилищ, а также завышением времени осреднения в расчетах по сравнению с временем осреднения измерений.

Апробированная методика может быть использована для расчета воздушного переноса радона от других хвостохранилищ.

Results of digital modeling of the atmospheric transfer of radon around the uranium tailing dumps of the former Industrial Association (IA) «Pridneprovsky Khimicheskii zavod» are presented. The exhalation (emission) rates are preset on the basis of measurements. It has been established that the locality contamination with radon is limited by the territory directly adjacent to the tailing dump boundaries.

1. *Voitsekhovich O., Lavrova T.* Remediation Planning of Uranium Mining and Milling Facilities: The Pridneprovsky Chemical Plant Complex in Ukraine // Remediation of Contaminated Environments/G. Voigt, S. Fesenko, eds.— Elsevier. — 2009. — P. 343— 356.
2. *Звіт* Центру моніторингових досліджень і природоохоронних технологій «Виконання робіт згідно з програмами і регламентами радіаційного моніторингу», 2008. — Договір № 9 з ДП «Бар'єр» від 28.05.08. — 66 с.
3. *Galmarini S.* One Year of ^{222}Rn Concentration in the Atmospheric Surface Layer // Atmospheric Chemistry and Physics. — 2006. — **6**. — P. 2865— 2887.
4. *Scire J. S., Strimaitis D. G., Yamartino R. J.* A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model (Version 5). — Earth Tech. Inc., Concord, 2000. — 521 p. — (<http://www.src.com/calpuff/calpuff1.htm>).
5. *Rood S., Voilleque P., Rope S. et al.* Reconstruction of Atmospheric Concentrations and Deposition of Uranium and Decay Products Released from the Former Uranium Mill at Uravan// Journal of Environmental Radioactivity. — 2008. — **99**. — P. 1258— 1278.
6. *Бруцяцкий Е. В.* Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов. — Киев : Институт гидромеханики НАН Украины, 2000. — 444 с.
7. *Исследование* и технология хранения РАО на ГП «Барьер». Хвостохранилище «Западное». — Отчет УкрНИПИПромтехнологии 2001. Министерство топлива и энергетики Украины. — Гос. регистрация № А-15969. Договор 3032. — 38 с.
8. *Calculation of Radon Flux Attenuation by Earthen Uranium Mill Tailings Covers.* U.S. Nuclear Regulatory Commission. — Office of Nuclear Regulatory Research. Regulatory Guide 3.64. — 1989. — 46 p.
9. *Environmental Protection Agency.* Review and Evaluation of Area Source Dispersion Algorithms for Emission Sources at Superfund Sites, 1989. — Report by TRC Environmental Consultants Inc., № EPA 450/4 -89-020, EPA Contract No 68-02-4399. — 137 p.
10. *Монин А. С., Яглом А. М.* Статистическая гидромеханика. Том 1. — С.-П. : Гидрометеоиздат. — 696 с.

11. *Fisher B. E. A. et. al. (eds). Meteorology Applied to Urban Air Pollution Problems. — European Commission COST Action 715, Final Report, 2005. — Sofia : Demetra Ltd. Publishers, 2005. — 276 p.*
12. *Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97). Государственные гигиенические нормативы. — Киев : Отдел полиграфии Украинского центра госсанэпиднадзора Министерства здравоохранения Украины, 1998. — 135 с.*

Поступила 06.11.09

КОВАЛЕЦ Иван Васильевич, канд. физ.-мат. наук, докторант Ин-та проблем математических машин и систем НАН Украины. В 1996 г. окончил Московский физико-технический ин-т. Область научных исследований — математическое моделирование окружающей среды.

ЖЕЛЕЗНЯК Марк Иосифович, канд. физ.-мат. наук, зав. отделом Ин-та проблем математических машин и систем НАН Украины. В 1973 г. окончил Одесский гидрометеорологический ин-т. Область научных исследований — математическое моделирование окружающей среды, системы поддержки принятия решений для ядерного аварийного реагирования, управление водными ресурсами, вычислительная гидродинамика.

ХАЛЧЕНКОВ Александр Викторович, науч. сотр. Ин-та проблем математических машин и систем НАН Украины. В 2003 г. окончил Киевский национальный университет им. Т. Шевченко. Область научных исследований — математическое моделирование окружающей среды, радиационная экология.

УДОВЕНКО Олег Игоревич, науч. сотр. Ин-та проблем математических машин и систем НАН Украины. В 1998 г. окончил Киевский национальный университет им. Т. Шевченко. Область научных исследований — геоинформационные системы.

ЛАВРОВА Татьяна Валерьевна, науч. сотр. Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического ин-та. В 1992 г. окончила Днепрпетровский госуниверситет. Область научных исследований — радиационная экология.