

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 574:631.438.2

### НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ РОЛИ ПОЧВ КАК СРЕДЫ, ЭКРАНИРУЮЩЕЙ ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

С.В. Мамихин, Д.В. Манахов, А.И. Щеглов, Е.В. Цветнов

В статье обсуждаются вопросы оценки роли почвы в снижении дозовых нагрузок при определении стоимости экосистемных услуг, а также некоторые проблемы моделирования дозовых нагрузок в наземных экосистемах. Предлагается алгоритм описания формирования дозовой нагрузки для живых организмов, находящихся в почве, на ее поверхности или на некотором удалении от нее. Данный алгоритм позволяет учитывать миграцию радиоактивных веществ в некотором объеме почвы и неоднородность ее экранирующих свойств. Возможно подключение модуля динамики влажности почвы. В качестве примера реализации алгоритма приводится одна из версий имитационной модели — DoseMod\_3D\_soil.

*Ключевые слова:* имитационное моделирование, экранирующая способность почв, ионизирующее излучение, расчет доз, наземные экосистемы, экосистемные услуги почв.

#### Введение

Известно, что почвы обладают сильной экранирующей способностью и могут существенно ослаблять интенсивность ионизирующего излучения, например, в результате вертикальной миграции радионуклидов вниз по профилю или при захоронении радиоактивных отходов. В частности, на этом основаны радиометрические методы исследования некоторых физических свойств почв с использованием в качестве источника излучения  $^{60}\text{Co}$ . Изучение экранирующей способности почв наиболее актуально для  $\gamma$ -излучения, обладающего сильным проникающим действием. В связи с этим остановимся на некоторых фактах ослабления почвой именно этого вида излучений. Установлено, что слой грунта толщиной 5 см снижает мощность дозы  $\gamma$ -облучения в 5 раз, 20 см — в 10, 40 см — в 30—50 раз [16]. Слой почвы естественного сложения толщиной 30 см ослабляет интенсивность  $\gamma$ -излучения примерно в 10 раз [6]. В опытах по острому  $\gamma$ -облучению сосново-березового насаждения регистрируемая его доза снижалась с 7—25 кР в подстилке до 0,1—1 кР в слое почвы, залегающем на глубине 15—20 см [8]. Такие свойства почвы по отношению к ионизирующему излучению представляют собой большой интерес в таких важных аспектах, как прямое ее использование в качестве экранирующего материала при организации временных хранилищ радиоактивных отходов, при оценке дозовых нагрузок на человека и биоту в различных ситуациях радиоактивного загрязнения.

В настоящее время ведется активный поиск, связанный с развитием концепции природного капитала и экосистемных услуг — выгод, получаемых

человеком от окружающей среды [3, 19, 25]. Одна из них — экранирующая способность почвы по отношению к радиоактивному излучению [18]. Например, отмечено, что пахотная почва способна снижать дозовую нагрузку, получаемую человеком, в несколько раз [17].

**Факторы, обуславливающие экранирующую способность почвы.** Принято считать, что ведущие факторы, обуславливающие экранирование ионизирующих излучений почвой, это ее плотность и химический состав, которые существенно изменяются по горизонтам и типам почв. Фактором, оказывающим сильное влияние на поглотительные свойства почвы в естественных условиях, является также ее влажность. Очевидно, причина заключается в том, что величина коэффициента линейного ослабления  $\gamma$ -излучения водой примерно в 1000 раз больше, чем этот параметр для воздуха вне зависимости от энергии излучения [9, 15]. Причем, влажность почвы — характеристика динамическая. Она может существенно изменяться как в пространстве, так и во времени. Все это делает почву весьма непростым объектом радиологических исследований и усложняет разработку прогнозов дозовых нагрузок.

Работы по оценке степени влияния отдельных или совокупности свойств почв на их экранирующую способность в научной литературе немногочисленны. Полученные зависимости по отдельным факторам, например по плотности почвы, имеют довольно сложный характер. Так, например, обнаружено, что при снижении плотности почвы с 1,75 до 1,0 г/см<sup>3</sup> экспозиционная доза возрастает только на 30% [7].

**Прогнозирование дозообразования в наземных экосистемах.** В настоящее время в радиоэкологии

и радиобиологии для учета экранирующей способности почв при расчете доз облучения живых организмов используются два основных подхода. Первый — *аналитический*, подразумевающий применение уже апробированных на практике формул, пригодных для достаточно простых или вынужденно упрощенных ситуаций. Очевидное преимущество аналитических методов расчета — их доступность и относительная простота используемых формул. Также возможно применение простых уравнений, позволяющих в какой-то степени учитывать характер распределения радионуклидов в почве, в частности, для равномерно загрязненного слоя, линейного и экспоненциального распределений [5].

В литературе, однако, отмечено, что пользоваться аналитическими уравнениями следует с большой осторожностью, поскольку в реальности мы, как правило, сталкиваемся с более сложными радиологическими ситуациями, и чтобы получить численные решения, требуются значительные упрощения и приближения. Вместе с тем известно, что многие неучтенные факторы могут привести к существенным расхождениям между вычисленными и реальными значениями доз [13]. Мы проводили сравнение результатов использования разных формул для аналитического расчета дозообразования в ситуации поверхностного радиоактивного загрязнения и убедились в наличии большого разброса получаемых оценок [12].

Предлагаемые более сложные формулы требуют введения большего количества исходной информации, которой, как правило, нет в распоряжении специалистов в области дозиметрии и радиоэкологии [16]. Для приблизительных расчетов и каких-либо конкретных условий на практике могут применяться формулы с эмпирически устанавливаемыми коэффициентами дозового преобразования, подразумевающими со временем последующую корректировку их величины [14].

По нашему же мнению, для конкретных ситуаций более эффективно применение второго подхода — *имитационного моделирования*, активно используемого в настоящее время в радиоэкологии. В радиологических математических моделях постоянно предпринимаются попытки учесть экранирование ионизирующего излучения почвой и рассмотреть его в динамике [7, 24, 26]. При этом принимается во внимание, что важным фактором, определяющим дозовые нагрузки на поверхности почвы, является миграция радионуклидов вниз по ее профилю. Однако из-за недостатка исходной информации в моделях используется наиболее общая форма описания зависимости снижения интенсивности излучения в наземных экосистемах от нисходящей миграции радионуклидов в профиле почв.

В первом приближении ослабление  $\gamma$ -излучения при прохождении через почву, согласно за-

кону поглощения, можно описать экспоненциальной формулой, отражающей влияние толщины поглотителя, его свойств и энергии излучения. Так, в почве как частично насыщенной пористой среде поглощение можно описать уравнением Ламберта—Бера [22]:

$$I_0 = I_{\infty} e^{(-\mu_a x_a \rho_a - \mu_w x_w \rho_w - \mu_s x_s \rho_s)}, \quad (1)$$

где  $I_{\infty}$  — интенсивность счета без поглотителя (имп/сек),  $I_0$  — интенсивность счета с поглотителем (имп/с),  $\mu$  — массовый коэффициент ослабления,  $x$  — толщина поглотителя,  $\rho$  — плотность материала, индексы  $a$ ,  $w$  и  $s$  соответствуют воздуху, воде и почве.

Так как воздух незначительно воздействует на передачу фотонов, то величиной  $(-\mu_a x_a \rho_a)$  можно пренебречь. Если предположить, что  $\mu_s$ ,  $x_s$ ,  $\rho_s$ ,  $\mu_w$ ,  $x_w$  и  $\rho_w$  являются константами в течение периода тестирования, то уравнение Ламберта—Бера (1) можно переписать следующим образом:

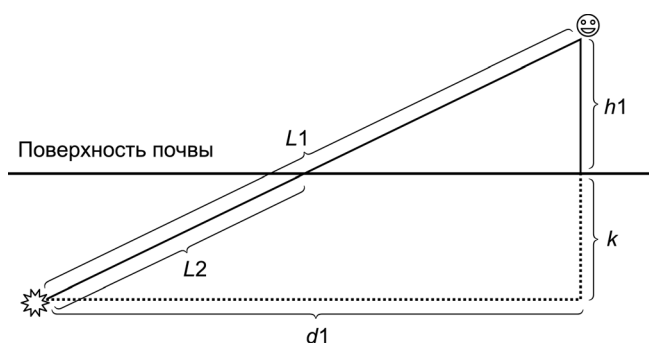
$$\Delta x_w = \frac{\ln \left( \frac{I_{01}}{I_{02}} \right)}{\mu_w \rho_w},$$

где  $\Delta x_w$  — изменение в длине пути по воде,  $I_{01}$  и  $I_{02}$  — скорости счета до и после увлажнения почвы,  $\mu_w$  — экспериментально определяемый параметр, который не должен изменяться, если геометрия системы не изменяется [23].

Используя эти или аналогичные им уравнения, методом имитационного моделирования можно рассчитать дозовые нагрузки на живые организмы, находящиеся в почве, на ее поверхности или на определенном расстоянии от нее.

**Модель расчета дозовых нагрузок DoseMod\_3D\_soil.** Для расчета дозовых нагрузок от источников облучения, находящихся в почве или искусственном грунте, нами разработана модель DoseMod\_3D\_soil. В данной модели используется следующий алгоритм: весь рассматриваемый объем почвы разбивается на отдельные структурные единицы (элементарные ячейки) кубической формы. Для создания трехмерного массива расстояний от каждой элементарной ячейки данного объема почвы до объекта облучения, находящегося в почве, на поверхности почвы или на некоторой высоте над ней ( $L1$ ), и толщины слоя почвы, который проходит кратчайшим путем первичное излучение ( $L2$ ), используется вспомогательный модуль 3Ddist\_mod, в котором и рассчитываются необходимые параметры (рисунок).

Для учета пространственно-временной динамики содержания радионуклидов в почве в качестве вспомогательного модуля можно применить миграционные модели VertMig, воспроизводящую вер-



Упрощенная схема расчета расстояния от элементарной ячейки до объекта облучения, находящегося над поверхностью почвы

тикальную миграцию <sup>137</sup>Cs по профилю почвы [10], и 3Dmig\_mod, которая воспроизводит поведение радионуклидов в некотором объеме почвы [11].

Приведем используемую нами формулу расчета мощности поглощенной дозы  $D_{kij}$  от загрязненной радионуклидом ячейки, находящейся в точке с координатами  $k, i$  и  $j$ , для объекта облучения, расположенного над поверхностью почвы:

$$D_{kij} = \frac{G \cdot A_{kij}}{L1_{kij}^2} e^{-\mu' \cdot L2_{kij}}, \quad (2)$$

где  $G$  — гамма-постоянная (аГр · дм<sup>2</sup>)/(с · Бк), константа, специфичная для рассматриваемого радионуклида;  $A$  — активность источника излучения (Бк/дм<sup>3</sup>);  $L1$  и  $L2$  — соответствующие расстояния (дм),  $\mu'$  — линейный коэффициент ослабления  $\gamma$ -излучения поглотителем (1/дм).

Принято, что рассеянное, вторичное, загрязнение, увеличивающее дозу, и неровность поверхности почвы, снижающая этот показатель, компенсируют действие друг друга. Для учета влияния гидрологического режима почвы на ее экранирующую способность в модели предусмотрена возможность подключения модуля расчета динамики влажности почвы.

Модель и ее вспомогательные модули, в зависимости от ресурсных потребностей и для обеспечения совместимости с современными версиями операционных систем, реализовывалась в различных версиях BASIC.

Таким образом, модель DoseMod\_3D\_soil может использоваться для оценки дозовых нагрузок от источников излучения, находящихся на поверхности почвы или в самой почве, и распределенных в любых пространственных конфигурациях. Это делает практическое применение данного алгоритма удобным для оценки экосистемной услуги почвен-

ного экранирования, а также для иных целей, например, для оценки доз от приповерхностных захоронений радиоактивных отходов или расчетов при проведении дезактивационных мероприятий загрязненных территорий посредством засыпки чистым грунтом. Необходимая задача для обеспечения адекватности прогноза — параметризация модели. На нашей кафедре в свое время были проведены исследования по изучению экранирующей способности дерново-среднеподзолистой легкосуглинистой почвы на моренном суглинке (по генетическим горизонтам) по отношению к излучению от радиоактивного источника, содержавшего <sup>137</sup>Cs [21], а также экранирующей способности песка и воды от радиоактивных источников, содержавших <sup>22</sup>Na и <sup>137</sup>Cs [2].

В целях повышения компетентности модели необходимо аналогичное экспериментальное определение линейных коэффициентов ослабления  $\gamma$ -излучения наиболее опасных радионуклидов для различных типов почв и грунтов. Альтернативой при параметризации модели является вычисление массового коэффициента ослабления почвы на основе данных о ее химическом составе:

$$\mu = \sum_{i=1}^n \mu_i w_i, \quad (3)$$

где  $\mu_i$  — массовый коэффициент ослабления  $i$ -го элемента,  $w_i$  — массовая доля  $i$ -го элемента.

Данный способ позволяет, не прибегая к трудоемким и затратным экспериментам с закладкой источника радиоактивного излучения, определять массовый коэффициент ослабления для различных почв с известным химическим составом. Это делает его удобным, например, при приближенной оценке экосистемных услуг почв.

Рассмотрим описанный алгоритм на конкретном примере. В 2005 г. нами проведено радиационно-экологическое обследование участка на территории Плавского радиоактивного пятна. Участок был заложен на пашне с плотностью загрязнения <sup>137</sup>Cs 220 кБк/м<sup>2</sup>, причем загрязнение верхней и нижней частей пахотного горизонта различались незначительно и составляли 113 и 107 кБк/м<sup>2</sup> в слоях 0—10 и 10—20 см соответственно. Почва участка была диагностирована, как темно-серая лесная с плотностью сложения почвенной массы — 1,23 г/см<sup>3</sup>, содержанием гумуса — 5,5%, полевой влажностью на момент обследования — 21% [4]. Валовой химический состав (%) гумусового горизонта почвы представлен ниже ([по 1]).

Химически связанная вода	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
4,30	78,24	8,91	4,29	1,02	0,26	0,31	1,97	1,60	2,55	1,18



Рассчитанный на основе данных о химическом составе массовый коэффициент ослабления по (3) составил для почвы — 0,077, для воды — 0,086 см<sup>2</sup>/г.

Оценка надфоновой мощности эквивалентной дозы  $\gamma$ -излучения на высоте 1 м от поверхности в соответствии с приведенным выше алгоритмом (2), с учетом распределения загрязнителя по профилю почвы, экранирования излучения от нижних слоев верхними и влажности почвы на момент обследования составила 0,208, а без учета этих факторов — 0,383 мкЗв/ч.

Таким образом, за счет наличия экранирующей способности почв, ранее неучитываемой экосистемной услуги, реальные дозовые нагрузки для населения на исследуемом участке территории Плавского радиоактивного пятна в 1,8 раза ниже потенциальных.

Добавим, что в обсуждаемой здесь области моделирования дозообразования в наземных экосистемах, помимо накопления исходной информации по конкретным почвам, для построения более адекватных прогностических моделей, с нашей точки зрения, необходимо дальнейшее развитие имитационных моделей, подключение модулей расчета динамики влажности почвы, более активное использование ГИС-технологий. Также не можем не упомянуть специализированные разработки в области моделирования формирования доз, которые уже на протяжении ряда лет развиваются физиками. Примером может служить GEANT (GEometry ANd Tracking), банк библиотек для компьютерного моделирования прохождения элементарных частиц через вещество на основе метода Монте-Карло [20].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахтырцев Б.П.* Серые лесные почвы Центральной России. Воронеж, 1979.
2. *Бадави В.М.* Дозовые нагрузки на человека и компоненты биоты в наземных экосистемах: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2010.
3. *Бобылев С.Н., Захаров В.М.* Экосистемные услуги и экономика. М., 2009.
4. *Владыченский А.С., Щеглов К.А., Манахов Д.В.* Содержание и распределение гумуса в профиле темно-серых лесных почв под различными насаждениями // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2007. № 1.
5. *Гусев Н.Г., Беляев В.А.* Радиоактивные выбросы в биосфере / Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1991.
6. *Ковэн Д.Д., Плэтт Р.Б.* Дозы облучения вокруг ядерного реактора без защиты // Вопросы радиэкологии. М., 1968.
7. *Константинов И.Е., Скотникова О.Г., Солдаева Л.О.* Модель вертикальной миграции Cs-137 в почвах и прогнозирование экспозиционной дозы. М., 1979.
8. *Криволицкий Д.А.* Почвенная фауна — биоиндикатор радиоактивных загрязнений // Радиэкология почвенных животных. М., 1985.

## Выводы

Экранирующая способность почв — важнейший фактор, который оказывает прямое воздействие на формирование дозовой нагрузки как на почвенную биоту, так и на наземные организмы. Это обстоятельство необходимо обязательно принимать во внимание при оценке радиологической обстановки, эколого-экономической оценке земель и экосистемных услуг в районах с уже имеющимся радиоактивным загрязнением либо с повышенным его риском (районы расположения АЭС и т.д.).

Способность почв экранировать ионизирующие излучения зависит от ее плотности, химического состава, влажности, особенностей их сочетания и существенно изменяется в генетическом профиле и ряду почв. Однозначного метода оценки этого почвенного свойства, а также ранжирования факторов по их значимости на настоящий момент нет. Это обусловлено высокой сложностью почв как экранирующей среды и их разнообразием.

В настоящее время математическое моделирование дозообразования в наземных экосистемах по мере накопления необходимой информации и наработки требуемых алгоритмов постепенно переходит от аналитического моделирования к имитационному. Это повышает адекватность прогнозов и создает возможность оценки доз при сложных сценариях загрязнения.

Отсутствие учета экранирующей способности почв при заглаблении радионуклидов неизбежно приводит к завышенной прогностической оценке дозовых нагрузок.

9. *Кухлинг Х.* Справочник по физике. М., 1982.
10. *Мамихин С.В.* Динамика углерода органического вещества и радионуклидов в наземных экосистемах (имитационное моделирование и применение информационных технологий). М., 2003.
11. *Мамихин С.В., Бадави В.М.* Имитационная модель трехмерной миграции в почвах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2011. № 4.
12. *Мамихин С.В., Манахов Д.В., Бадави В.М.* Расчетные методы радиологической оценки воздействия химических веществ, применяемых в хозяйственной деятельности // Проблемы радиэкологии и пограничных дисциплин / Под ред. В.И. Мигунова, А.В. Трапезникова. Вып. 13. Екатеринбург, 2010.
13. *Метеорология и атомная энергия* / Под ред. Д.Х. Слэйда. Л., 1971.
14. Определение годовых суммарных эффективных эквивалентных доз облучения населения для контролируемых районов РСФСР, УССР, БССР, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС (Метод. указ.). М., 1991.
15. *Перцев Л.А.* Ионизирующие излучения биосферы. М., 1973.

16. Романов Г.Н. Ликвидация последствий радиационных аварий. (Справ. рук-во). М., 1993.

17. Фокин А.Д., Лурье А.А., Торшин С.П. Сельскохозяйственная радиология. СПб., 2011.

18. Цветнов Е.В., Щеглов А.И., Цветнова О.Б. Эколого-экономический функциональный подход к оценке стоимости сельскохозяйственных земель в условиях химического и радиоактивного загрязнения // Почвоведение. 2009. № 3.

19. Экосистемы и благосостояние человека: синтез // Докл. междунар. программы «Оценка экосистем на пороге тысячелетия», 2005. URL: <http://millenniumassessment.org/documents/document.791.aspx.pdf> (дата обращения: 04.07.2016).

20. Agostinelliae S., Allisonas J., Amakoe K. et al. Geant4 — a simulation toolkit // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors, and Associated Equipment. Vol. 506, Iss. 3. 2003.

21. Badawy W.M., Mamikhin S.V. Radioactivity measurements and dose rate calculation due to  $\gamma$ -ray of soil from Chashnikovo — Russia // Arab. J. Nucl. Sci. and Applic. 2012. Vol. 45, N 2.

22. Beamish D. Gamma ray attenuation in the soils of Northern Ireland, with special reference to peat // J. Environ. Radioactiv. 2013. Vol. 115.

23. Ferraz E.S.B., Mansell R.S. Determining water content and bulk density of soil by gamma-ray attenuation technique // Technical Bulletin. 1979. N 807.

24. Müller H., Prohl G. ECOSYS-87: A dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents // Health Phys. 1993. Vol. 64, N 3.

25. Platon V., Frone S., Constantinescu A. New developments in assessing forest ecosystem services in Romania // Proc. Econom. and Finance. 2015. N 22.

26. Taranenko V., Prohl G., Gomez-Ros J.M. Absorbed dose rate conversion coefficients for reference terrestrial biota for external photon and internal exposures // J. Radiol. Prot. 2004. Vol. 24.

Поступила в редакцию  
15.07.2016

## SOME ASPECTS OF THE EVALUATION OF THE ROLE OF SOILS AS A MEDIUM, SHIELDING IONIZING RADIATION

S.V. Mamikhin, D.V. Manakhov, A.I. Shcheglov, E.V. Tsvetnov

The article discusses the assessment of the role of soil as a medium attenuating ionizing radiation and some problems of simulation of dose loads in terrestrial ecosystems. The algorithm description of the formation of radiation doses to living organisms in the soil, on its surface or at some distance from it. This algorithm allows to take into account the migration of radioactive substances in a certain volume of soil and the irregularity of its shielding properties. You can connect the module dynamics of soil moisture. As an example, the implementation of the algorithm the model DoseMod\_3D\_soil.

*Key words:* simulation, screening capacity of the soil, ionizing radiation, dose calculation, terrestrial ecosystems.

### Сведения об авторах

**Мамихин Сергей Витальевич**, докт. биол. наук, вед. науч. сотр. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. *E-mail:* svmamikhin@mail.ru. **Манахов Дмитрий Валентинович**, канд. биол. наук, ст. препод. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. *E-mail:* demian2@yandex.ru. **Щеглов Алексей Иванович**, докт. биол. наук, зав. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. *E-mail:* shchegl@mail.ru. **Цветнов Евгений Владимирович**, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. *E-mail:* ecobox@mail.ru.