

Оценка влияния состава подстилающей поверхности на результаты воздушной радиационной разведки

Рассмотрено влияние состава подстилающей поверхности на результаты воздушной радиационной разведки радиоактивно загрязненной местности. Проведен анализ вероятности наличия различных составов подстилающих поверхностей на территории России. Рассчитаны значения мощности экспозиционной дозы над радиоактивно загрязненной местностью в зависимости от высоты и типа подстилающей поверхности с помощью специализированного программного комплекса математического моделирования процессов переноса и регистрации гамма-излучения для проектирования спектрометрических систем авиационного радиационного контроля.

Ключевые слова:

воздушная радиационная разведка, контроль природной среды, подстилающая поверхность, радиоактивное загрязнение местности, метод Монте-Карло, достоверность, гамма-излучение, погрешность измерения мощности дозы.

Д.А.Кожевников

(ФГБУ «33 ЦНИИИ» Минобороны России, г. Вольск-18)

И.Э.Новиков

(ГНЦ РФ Федеральное государственное автономное научное учреждение «ЦНИИ РТК», г. С.-Петербург)

Методическая основа проведения измерения у существующих приборов воздушной радиационной разведки заключается в том, что для определения мощности дозы гамма-излучения в некоторой точке на местности (как правило, на высоте 1 метр) проводится измерение мощности дозы над этой точкой на высоте полета летательного аппарата с последующим умножением измеренного значения на величину кратности ослабления гамма-излучения слоем воздуха между высотой полета и исследуемой высотой. Величина кратности ослабления $K(h)$ показывает отношение искомой мощности дозы к измеряемой:

$$K(h) = \dot{X}(h_0) / \dot{X}(h), \quad (1)$$

где $\dot{X}(h_0)$ – мощность дозы на интересующей высоте $h_0 = 1$ м; $\dot{X}(h)$ – мощность дозы, измененная на высоте полета h .

На характер зависимости $K(h)$ влияет ряд факторов, включая растительный покров [1], метеорологические условия [2], рельеф местности, наличие и особенности объектов на обследуемой территории. Кроме этого, представляет интерес оценка влияния состава подстилающей поверхности на зависимость $K(h)$ и, соответственно, на результаты воздушной радиационной разведки радиоактивно загрязненной местности.

Анализ результатов ранее проведенных исследований показывает, что отсутствие учета состава подстилающей поверхности в районе радиоактивного загрязнения может обусловить дополнительные погрешности при измерении мощности дозы в ходе воздушной радиационной разведки [3].

Табл.1. Площадь территорий России, покрытых водой [4].

Тип водной поверхности	Площадь, км ²	Относительная площадь, %
Болота	1 528 312	8,92
Озера	408 856	2,39
Реки и водохранилища	130 224	0,76
Ледники	56 131	0,33
Всего водная часть	2 123 524	12,4

Исходные данные

Для оценки величины рассматриваемой погрешности проведен анализ статистического распределения различных типов подстилающей поверхности на территории России. Поскольку заранее неизвестен район радиоактивного загрязнения, целесообразно принять в качестве исходного условия гипотетическое осуществление воздушной радиационной разведки над любым районом территории России как равновероятное событие. Воздушная радиационная

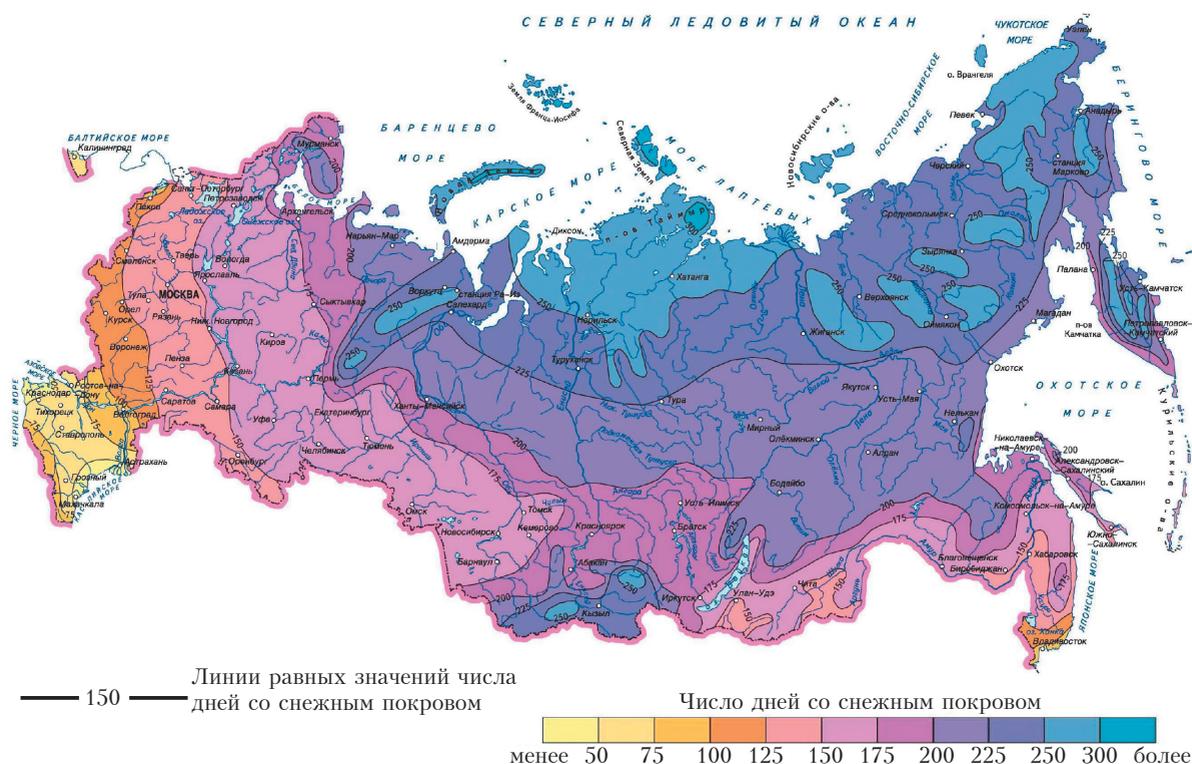


Рис.1. Количество дней со снежным покровом.

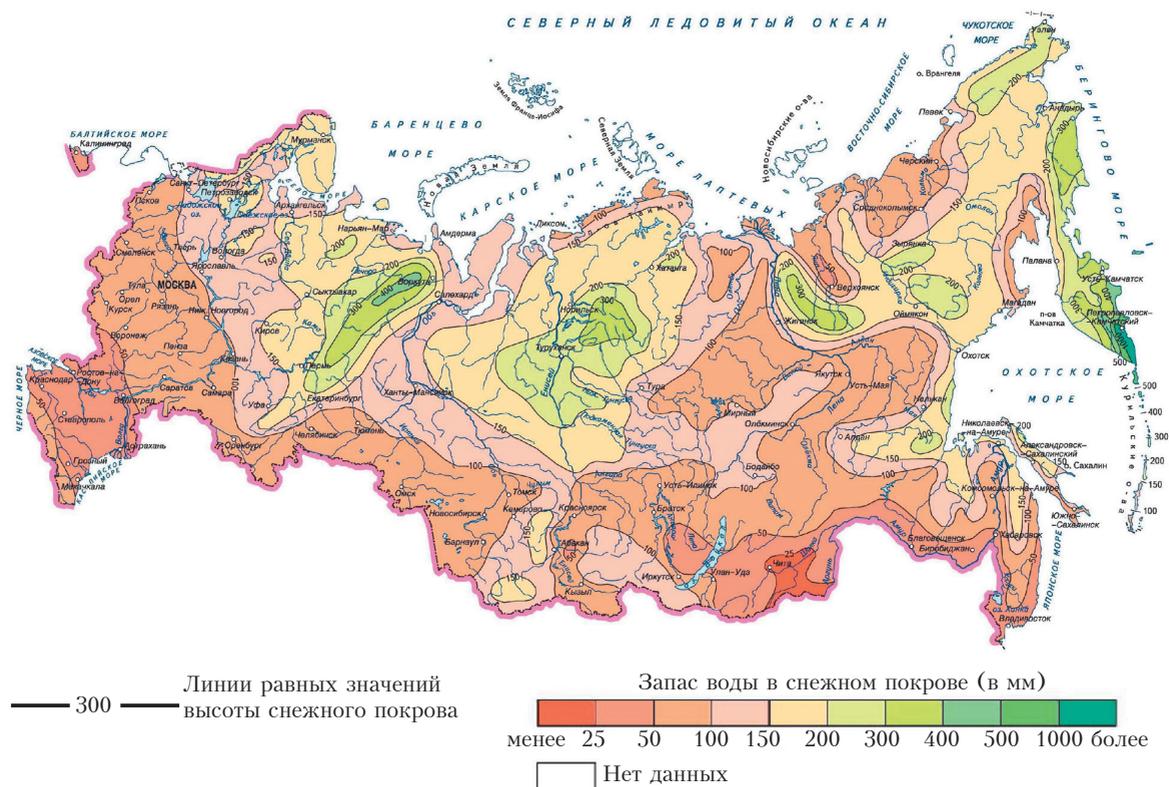


Рис.2. Запас воды в снежном покрове.

разведка осуществляется над твердыми поверхностями (снег, лед, почва, песок, скальные породы и другие типы грунта, бетон и асфальт), поэтому стоит исключить из рассмотрения участки, покрытые водой (кроме льда и снега). В табл.1 представлена информация о площади территорий России, покрытых водой [4].

Лед присутствует на поверхности водоемов при их замерзании. По результатам анализа продолжительности покрытия водоемов льдом [4] установлено, что вероятность наличия льда в качестве подстилающей поверхности составляет около 5,24%.

На основе данных о количестве дней в году со снежным покровом и высоте снежного покрова, представленных на рис.2 и 3 [5], рассчитана вероятность наличия снежного покрова с запасом воды более 10 см на территории России, которая составляет 54,71%.

В ходе анализа распространенности техногенных типов подстилающей поверхности

установлено, что асфальтовое покрытие имеет большая часть автомобильных дорог с твердым покрытием, на его долю приходится около 0,43% территории страны, бетонное покрытие присутствует преимущественно в городах и занимает примерно 0,12% территории страны [6-9].

Оставшаяся часть территории России покрыта почвами и горными породами различных типов. Для оценки влияния состава подстилающей поверхности на достоверность результатов воздушной радиационной разведки проведен анализ атомарного состава наиболее распространенных типов почв, результаты которого представлены в табл.2 [10-24].

По данным, представленным в табл.2, видно, что атомарные составы наиболее распространенных типов почв схожи между собой, за исключением торфяных почв, что связано со значительным преобладанием органических компонентов над минеральными. Обобщенные

Табл.2. Атомарный состав наиболее распространенных на территории России типов почв.

Тип почвы	Площадь, %	Массовая доля компонентов, %									Эффективный атомный номер
		O	Si	Al	Fe	Ca	C	K	Mg	H	
Материнские породы и маломощные горные почвы	31,8	51,07	33,00	06,25	03,30	2,05	00,40	1,91	0,91	0,10	12,88
Тундровые	19,2	47,82	29,71	06,65	03,58	2,14	03,49	2,07	0,90	0,25	12,88
Подзолистые	13,1	49,61	34,86	06,33	03,02	0,78	00,66	2,04	0,72	0,06	12,73
Черноземы	12,4	49,92	31,94	06,84	03,79	1,22	02,46	1,38	0,82	0,17	12,86
Серые лесные	9,2	49,38	33,45	06,67	03,80	1,24	01,29	1,60	1,02	0,09	12,96
Торфяные	4,8	36,80	01,00	00,12	00,50	1,20	53,33	0,30	0,13	5,33	8,08
Подзолисто-глеевые	3,6	49,17	33,85	06,98	03,11	0,80	01,12	2,50	0,60	0,08	12,80
Каштановые	2,3	48,80	29,90	06,53	03,64	3,76	02,01	1,58	1,09	0,08	13,10
Красноземы	1,4	48,43	21,50	14,15	11,50	0,34	01,81	0,23	0,93	0,13	14,69
Сероземы	1,1	50,09	25,86	07,21	03,89	5,04	01,74	1,80	1,44	0,04	13,24

результаты анализа вероятности наличия различных составов подстилающих поверхностей на территории России представлены в табл.3.

Расчеты характеристик поля излучения

Задача оценки влияния состава подстилающей поверхности на результаты воздушной радиационной разведки решена применением методов математического моделирования (методов Монте-Карло). Для расчета мощности экспозиционной дозы в зависимости от высоты и типа подстилающей поверхности был использован разработанный в Государственном научном центре Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК) специализированный программный комплекс математического моделирования процес-

сов переноса и регистрации гамма-излучения для проектирования и градуировки спектрометрических систем авиационного радиационного контроля (АРК) [25,26]. В состав комплекса входят программы семейства *GRAIN* (*G*round-*A*ir *I*Nterface), предназначенные для расчета характеристик поля фотонного излучения для одномерной плоской многослойной геометрии (двухслойной типа «воздух-конденсированная среда» или трехслойной для учета влияния снежного покрова), и программа *DINAM*, предназначенная для моделирования процесса регистрации этого излучения спектрометрическими сцинтилляционными детекторами. Программный комплекс, разработанный совместными усилиями специалистов ЦНИИ РТК и Московского инженерно-физического института, позволяет учитывать весь диапазон возможных условий измерения для АРК и

Табл.3. Атомарный состав наиболее распространенных на территории России типов почв.

Тип подстилающей поверхности	Вероятность наличия, %	Массовая доля компонентов, %									Эффективный атомный номер
		O	Si	Al	Fe	Ca	C	K	Mg	H	
Лед, снег	59,95	89	–	–	–	–	–	–	–	11	7,68
Грунт (кроме торфяного)	37,64	49,13	32,94	06,60	03,24	1,76	01,64	1,70	0,92	0,10	12,83
Торфяные почвы	1,91	36,80	01,00	00,12	00,50	1,20	53,33	0,30	0,13	5,33	8,08
Асфальт	0,43	45,43	23,36	4,65	2,42	1,60	17,15	1,28	0,68	1,67	11,78
Бетон	0,12	29,57	24,89	4,41	1,24	32,76	0,86	1,22	3,72	0,10	15,71

использует модификации метода Монте-Карло, разработанные с учетом специфики измерительных задач АРК [25,26].

На данном этапе была использована программа *GRAIN-1*, которая рассчитывает поле излучения для одномерной плоской двухслойной геометрии. (Среды представляют собой полупространства, разделенные горизонтальной плоскостью). Для того, чтобы избежать применения типичной для таких расчетов локальной оценки искомого функционала [27], дающей в данном случае (детектор находится в рассеивающей излучение среде) расходящуюся дисперсию и медленную сходимость среднего арифметического, имеющую порядок $N^{-1/3}$, где N – число разыгранных историй, а также избежать влияния краевых эффектов при использовании модели источника конечных размеров, можно воспользоваться наличием симметрии задачи (среды и источник однородны в горизонтальных плоскостях). Наличие указанной симметрии позволяет провести эквивалентное преобразование, заменяющее модель с бесконечным источником и точечным детектором в горизонтальной плоскости на соответствующую модель с точечным источником и бесконечным детектором. Данное преобразование позволяет применять простые схемы расчета, дающие конечную дисперсию и максимальную сходимость среднего значения результата порядка $N^{-1/2}$. В качестве детектора используется плоский слой пространства, описываемый высотой расположения его нижней грани над границей раздела сред и собственной высотой (толщиной); искомые характеристики поля излучения получаются усреднением по этому слою. В качестве оценки искомого функционала используется оценка по пробегу [27]. Это означает, что при каждом розыгрыше транспортного ядра подсчитывается отрезок траектории l_j , лежащий внутри детектора. Плотность потока частиц, усредненная по объему детектора V_d , равна

математическому ожиданию суммарной длины траектории в единице объема детектора:

$$\bar{\varphi} = M\xi, \quad (2)$$

где $\xi = \sum l_j / V_d$ с суммированием по всем столкновениям за историю.

Погрешность результата по выборочной дисперсии:

$$D_n = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \xi_i^2 - \frac{1}{n(n-1)} \left(\sum_{i=1}^n \xi_i \right)^2, \quad (3)$$

Относительная погрешность δ среднего значения $\bar{\xi}$:

$$\delta = \bar{\xi}^{-1} \sqrt{D_n/n}. \quad (4)$$

При розыгрыше столкновения частицы программа использует метод статистических весов по выживанию, а также метод весового окна [27]. При достижении весом частицы нижней границы окна частица с помощью рулетки либо уничтожается, либо увеличивается в весе.

Мощность экспозиционной дозы \dot{X} оценивается пересчетом по флюенсу и энергии частиц:

$$\dot{X} = \Phi E \mu_{en,m}(E), \quad (5)$$

где Φ – флюенс частиц; E – энергия частиц; $\mu_{en,m}(E)$ – массовый коэффициент поглощения энергии (в воздухе).

Физическая модель взаимодействия излучения с веществом, используемая в программах серии *GRAIN*, учитывает следующие эффекты: фотопоглощение, комптоновское рассеяние, образование электрон-позитронных пар с генерацией аннигиляционного излучения. База данных содержит все необходимые для расчетов сечения взаимодействия и константы для воздуха, воды, грунта и бетона, кварцевого стекла и железа. В качестве источника информации используются данные из [28], (в настоящее время эта база данных содержится в Интернете).

Химический состав и плотность сложных веществ, представленных в базе данных, имеют следующие значения (массовые %):

Табл.4. Значения высотного коэффициента, полученные по результатам математического моделирования.

Высота h, м	Вид подстилающей поверхности				
	Воздух, $\rho = 0,00127 \text{ г/см}^3$	Лед, $\rho = 0,98 \text{ г/см}^3$ Снег, $\rho = 0,35 \text{ г/см}^3$ Торфяные почвы, $\rho = 0,8 \text{ г/см}^3$	Грунт (кроме торфяного), $\rho = 1,625 \text{ г/см}^3$	Бетон, $\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$	Асфальт, $\rho = 1,8 \text{ г/см}^3$
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,5	1,21	1,21	1,20	1,21	1,21
5	1,43	1,43	1,43	1,44	1,43
10	1,76	1,76	1,77	1,78	1,79
25	2,52	2,52	2,52	2,56	2,54
50	3,71	3,70	3,72	3,74	3,71
100	6,52	6,56	6,52	6,58	6,54
250	27,0	26,9	26,6	26,8	26,7
500	254	255	251	254	253
1000	$2,49 \cdot 10^4$	$2,54 \cdot 10^4$	$2,41 \cdot 10^4$	$2,33 \cdot 10^4$	$2,35 \cdot 10^4$

- грунт: O – 43%, H – 2%, C – 11%, Al – 14%, Si – 20%, Ti – 1%, Fe – 9%, плотность – $1,625 \text{ г/см}^3$;
- бетон: O – 49,8%, H – 0,6%, K – 1,9%, Al – 4,6%, Si – 31,6%, Na – 1,7%, Fe – 1,2%, S – 0,1%, Ca – 8,3%, Mg – 0,2%; плотность – $2,3 \text{ г/см}^3$;
- воздух: O – 23,2%, N – 75,5%, Ar – 1,3%, плотность – $1,27 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$.

Также определены следующие значения, используемые при расчетах среды:

- кварцевый песок: SiO_2 , плотность – $2,24 \text{ г/см}^3$;
- вода: H_2O , плотность – $1,0 \text{ г/см}^3$.

При необходимости возможна корректировка плотностей используемых при расчетах сред.

При проведении расчетов источник представлял собой бесконечно тонкую пленку на поверхности Земли с энергией излучения 661,7 кэВ, что соответствует энергии гамма-излучения Ba-137m – дочернего продукта распада Cs-137 . В качестве детектора использовался слой воздуха толщиной 1 мм на заданной высоте. Были рассчитаны мощность экспозиционной дозы и энергетически-угловое распределение потока излучения. Расчеты для каждого варианта производились до на-

копления статистики 9 млн. историй или до достижения величины статистической погрешности по потоку частиц 0,1%, статистическая погрешность мощности экспозиционной дозы для высоты 500 м не превышала 0,45%, для высоты 1000 м не превышала 3,9%.

Следует отметить, что для выбранной геометрии и используемого способа расчета его результаты не зависят от плотности подстилающей поверхности (при ее фиксированном химическом составе и неизменности прочих параметров расчета).

Результаты

Результаты математического моделирования представлены в табл.4. Поскольку используемые в настоящее время значения высотных коэффициентов рассчитаны для случая бесконечного плоского источника в воздушной среде без учета подстилающей поверхности, данные значения также представлены в табл.4. В виду ограниченности перечня используемых при моделировании сред, для расчета значений высотных коэффициентов, приведенных в табл.4, лед, снег и торфяные почвы были аппроксимированы водой с соответствующей плотностью; асфальт был аппроксимирован песком плотностью $1,8 \text{ г/см}^3$.

Выводы

По результатам математического моделирования установлено, что состав подстилающей поверхности в районе воздушной радиационной разведки влияет незначительно на достоверность получаемых результатов разведки. Предельное значение дополнительной погрешности при доверительной вероятности 0,95 для различного атомарного состава достигает 6%, для различных плотностей погрешность не превышает 1%. Полученные значения

имеют высокую сходимость с результатами, представленными в работе [3].

Таким образом, при осуществлении воздушной радиационной разведки радиоактивно загрязненной местности отсутствие информации о составе подстилающей поверхности обуславливает незначительную дополнительную погрешность при измерении мощности дозы, что подтверждает отсутствие необходимости специального учета указанного фактора.

Литература

1. Кожевников Д.А. Оценка влияния лесного покрова на результаты воздушной разведки радиоактивно загрязненной местности // АНРИ. 2017. № 4(91). С. 55-68.
2. Кожевников Д.А. Оценка влияния метеорологических условий на результаты воздушной разведки радиоактивно загрязненной местности // АНРИ. 2019. № 2(97). С. 91-98.
3. Израэль Ю.А., Стукин Е.Д. Гамма-излучение радиоактивных выпадений. М.: Атомиздат, 1967. 224 с.
4. Воды России. Материал из Википедии. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Воды России](https://ru.wikipedia.org/wiki/Воды_России) (дата обращения: 10.12.2019).
5. Снежный покров России. Энциклопедия мировой географии. URL: <https://geographyofrussia.com/snezhnij-rokrov-2> (дата обращения: 10.12.2019).
6. Россия в цифрах. 2018. Крат. стат. сб. М.: Росстат, 2018. 522 с.
7. Автомобильные дороги России. Материал из Википедии. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Автомобильные дороги России](https://ru.wikipedia.org/wiki/Автомобильные_дороги_России) (дата обращения: 10.12.2019).
8. Города России. Материал из Википедии. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Города России](https://ru.wikipedia.org/wiki/Города_России) (дата обращения: 10.12.2019).
9. Список городов России с территорией больше 100 квадратных километров. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 10.12.2019).
10. Национальный атлас почв Российской Федерации. Факультет почвоведения Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. М.: Астрель, 2011. 632 с.
11. Самофалова И.А. Химический состав почв и почвообразующих пород. Учебное пособие. М-во с.-х. РФ. Пермь: Изд-во ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА», 2009. 132 с.
12. Кудрин С.А. Средний химический состав основных типов почв Европейской части СССР по валовым анализам // Почвоведение. 1963. № 5.
13. Мамонтов В.Г., Панов Н.П., Кауричев И.С., Игнатъев Н.Н. Общее почвоведение. М.: КолосС, 2006. 456 с.
14. Агрохимическая характеристика почв СССР. Кн. 1–14. М.: Наука, 1962–1974.
15. Перельман А.И. Геохимия ландшафтов. М.: Высшая школа, 1966. 392 с.
16. Орлов Д.С., Садовникова Д.С., Суханова Д.С. Химия почв. М.: Высш. шк., 2005. 558 с.
17. Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 263 с.
18. Воробьева Л.А. Химический анализ почв. М.: МГУ, 1998. 272 с.
19. Парфенова Е.И., Ярилова Е.А. Минералогические исследования в почвоведении. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 205 с.
20. Горбунов Н.И. Минералогия и коллоидная химия почв. М.: Наука, 1974. 313 с.

21. Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методика исследования природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1964.
22. Ковриго В.П., Кауричев И.С., Бурлакова Л.М. Почвоведение с основами геологии. М.: КолосС, 2008. 439 с.
23. Муха В.Д., Картамышев Н.И., Муха Д.В. Агрочвоведение. М.: КолосС, 2003. 528 с.
24. Горбылева А.И., Андреева Д.М., Воробьев В.Б., Петровский Е.И. Почвоведение с основами геологии. Учеб. пособие. Минск: Новое знание, 2002. 480 с.
25. Сухоруков А.И., Хисматов И.Ф., Новиков И.Э. Основы теории аэрокосмического радиационного мониторинга Земли. Ч. 1. Физические основы радиационного дистанционного зондирования Земли. М.: Изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2011. 312 с.
26. Новиков И.Э. Пакет программ математического моделирования процессов переноса и регистрации гамма-излучения систем авиационного радиационного мониторинга // Вестник компьютерных и информационных технологий: научно-технический и производственный журнал. М.: Издательский дом «Спектр», 2013. N 8. С. 16-21.
27. Панин М.П. Моделирование переноса излучения. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. М.: МИФИ, 2008. 212 с.
28. E. Storm, H.I. Israel. *Photon cross sections from 1 keV to 100 MeV for elements Z = 1 to Z = 100. Nuclear Data Tables A7*, 1970, p. 565-681.

Assessment of the Influence of the Underlying Surface Composition on the Results of Aerial Radiation Reconnaissance

Kozhevnikov Dmitriy (Federal State Budgetary Institution «The 33rd Central Research Test Institute of the Ministry of Defense of Russian Federation», Vol'sk-18, Russia)

Novikov Igor (the Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia)

Abstract. The influence of the composition of the underlying surface on the results of aerial radiation reconnaissance of contaminated areas is considered. The analysis of the probability of the presence of various compositions of the underlying surfaces in Russia. The values of the exposure dose rate over the contaminated area were calculated depending on the height and type of the underlying surface using a specialized software package for mathematical simulation of gamma radiation transport and registration processes for the design of spectrometric systems for aviation radiation control.

Key words: aerial radiation reconnaissance, environmental control, underlying surface, radioactive contamination of the area, Monte Carlo method, veracity, gamma radiation, measurement error of dose rate.

Д.А.Кожевников (м.н.с.) – ФГБУ «33 ЦНИИИ» Минобороны России, г. Вольск-18.

И.Э.Новиков (инж.) – ГИЦ РФ Федеральное государственное автономное научное учреждение «ЦНИИ РТК», г. С.-Петербург.

Контакты: тел.: +7 (845) 935-38-44, доб 2-52; e-mail: demontoid456110@mail.ru;

тел.: +7 (812) 552-40-70; e-mail: Novikov@rtc.ru.