

## АЭРОГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ В ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЕ ОТЧУЖДЕНИЯ НА БАЗЕ БПЛА ТИПА ОКТОКОПТЕР

*Ю.Л. Забулонов, В.М. Буртняк, И.О. Золкин*

*Государственное учреждение «Институт геохимии окружающей среды*

*НАН Украины», Киев, Украина*

*Тел. +38(044)502-12-23*

Представлены результаты полевых исследований состояния радиоактивного загрязнения ПВЛРО «Рыжий лес» и «Нефтебаза» в Чернобыльской зоне, полученные авторами в июне 2015 г. Отработаны методика обнаружения локальных неоднородностей на поверхности грунта, не имеющих контрастных границ, посредством аэрогамма-спектрометрии с борта БПЛА типа октокоптер, а также методика поиска и оконтуривания скрытых захоронений радиоактивных отходов.

### ВСТУПЛЕНИЕ

В результате Чернобыльской катастрофы в атмосферу было выброшено значительное количество радиоактивных веществ, что привело к радиоактивному загрязнению больших территорий. Высокими уровнями радиоактивного загрязнения характеризуются территории, непосредственно прилегающие к ЧАЭС. На сегодня эти районы характеризуются высокой плотностью поверхностного радиоактивного загрязнения и содержат весь спектр радионуклидов ядерного топлива:  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{155}\text{Eu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$ . Вторичными источниками радиоактивного загрязнения окружающей среды также является множество пунктов временной локализации радиоактивных отходов (ПВЛРО).

ПВЛРО были построены в годы аварии на Чернобыльской АЭС для предотвращения дальнейшего распространения радиоактивных веществ в окружающей среде. В них содержатся, в основном, радиоактивная почва, радиоактивное оборудование, используемое при ликвидации аварии.

Были организованы ПВЛРО двух типов: это траншеи, которые находятся под землей, и бурты, находящиеся над землей. В настоящее время бурты и траншеи могут быть малозаметными из-за проседания почвы и покрытия их густой растительностью. По оценкам общее количество траншей и буртов в районе приблизительно равно от 800 до 1000. Размеры траншей и буртов колеблются от нескольких метров до 10 м в длину и ширину. Высота буртов может быть до 2 м, а глубина траншеи составляет около 2 м.

Целью исследований являлись усовершенствования информационной технологии решения задач оперативного выявления (поиск, локализация, идентификация) и оценки фактической радиационной обстановки при проведении воздушной радиационной разведки местности.

Для реализации поставленной цели необходимо: усовершенствовать методики обнаружения локальных неоднородностей в грунте, поиска и оконтуривания скрытых захоронений; провести детальную разведку заданных районов с поиском и

оконтуриванием скрытых захоронений; составить топосхему захоронений; определить уровни загрязнений на поверхности участков.

Работа выполнялась в рамках проекта «Исследование захоронений радиоактивных отходов и временного места хранения в Чернобыльской зоне отчуждения». Возможности созданных методов и средств демонстрируются на примере обследования ПВЛРО «Рыжий лес» и «Нефтебаза».

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для решения поставленных задач был использован новый аэрогамма-спектрометрический комплекс (СК) на базе беспилотного летательного аппарата (БПЛА) типа октокоптер «АСПЕК», разработанного коллективом авторов в отделе ЯФТ Института геохимии окружающей среды НАН Украины.

СК «АСПЕК» состоит из бортовой и наземной частей. Бортовая часть предназначена для проведения измерений и сбора спектров гамма-излучения, идентифицированных географическими координатами, высотой, давлением и температурой с территории обследуемой поверхности. Наземная часть СК – вычислительный комплекс, который осуществляет обработку, ведение базы данных спектрометрической информации, поступающей из воздушного дистанционного комплекса, выявление зон радиоактивного загрязнения местности, определения спектрального состава и мощности экспозиционной дозы гамма-излучения, поиск и определение координат точечных источников гамма-излучения, а также отображение, построение карты-схемы дозовой обстановки и документирование данных радиационного мониторинга.

В качестве спектрометра – основного элемента измерительной системы – используется составной блок детектирования гамма-излучения, построенный на базе пяти блоков БДЕГ-04 диаметром 63х63 мм. Все спектрометры работают синхронно. Сигналы всех детекторов суммируются. Данный блок имеет массу 7,5 кг и позволяет программным образом подключать или отключать каждый из блоков БДЕГ-04 в зависимости от требуемой загрузки. Для исключения искажения измеряемого распределения

при больших нагрузках (большая активность) система последовательно отключает детекторы. Такая операция необходима для управления статистической нагрузкой детектирующей системы (импульс в секунду).

С помощью данного аэрогамма-спектрометра были проведены исследования площадок «Рыжий лес» и «Нефтебаза» Чернобыльской зоны отчуждения. Полеты выполнялись параллельными галсами. Расстояние между галсами 100 м, высота полета 30 м, средняя скорость 5 м/с. Спектрометрическая информация накапливалась в виде массива «амплитуда–время», по которому строился аппаратный спектр. Время экспозиции 1 с.

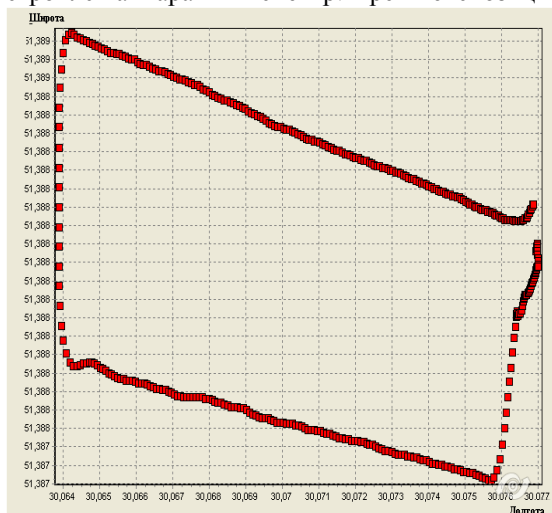


Рис. 1. Пример галса

Существующая методика составления карт-схем для загрязненных участков включает в себя несколько основных этапов:

- первичную оценку исследуемой территории средствами географической информационной системы (ГИС):
  - определение границ обследования и их нанесение на карту;
  - определение размера (шага) сетки;
  - построение карт-схем.

Оценка территории включает в себя:

- определение радиационной обстановки на исследуемой территории по имеющимся данным;
- определение локальных участков с высоким уровнем загрязнения радионуклидами;
- подготовку различных картографических материалов, относящихся к исследованию территории.

Для определения радиационной обстановки по каждому условному участку «Нефтебаза» и «Рыжий лес» из отдельных «галсовых» таблиц были сгруппированы общие файлы данных, в которых широта и долгота из системы WGS-84 были преобразованы в систему прямоугольных координат UTM WGS-84, зона 36N и дополнительно зона Гаусса-Крюгера (Пулково-42, зона 6). Такая операция необходима для удобства построения карт результатов измерений и совмещения их с имеющимися топографическими планшетами и другими данными по исследуемым площадкам.

Координатная привязка данных проводилась по показаниям радиовысотомера и GPS-информации.

В результате выполнения полетов и первичной обработки данных измерений были сформированы галсы – текстовые таблицы с колонками значений координат в виде широты и долготы (WGS-84), значений общего количества импульсов гамма-излучения, количества импульсов гамма-излучения в «окне» цезия-137, а также с колонками пересчета значений скорости счета (импульс в секунду) в единицы эквивалентной дозы (микрозиверт) [1].

Пример исходных результатов измерений, получаемых во время полета, приведен на рис. 1 и 2.

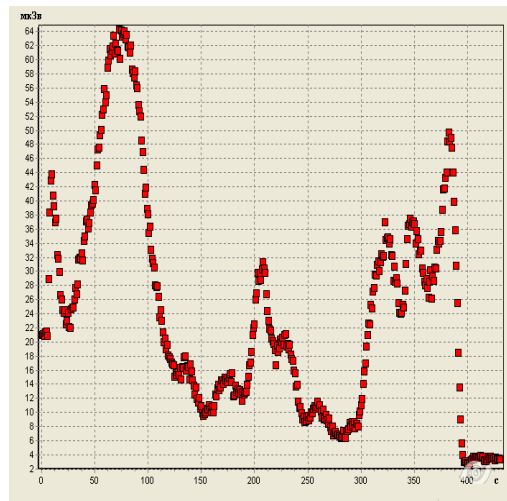


Рис. 2. Изменение интегральной активности на маршруте галса

Кроме того, значения интенсивности излучения были преобразованы к поверхностной активности на высоте 1 м.

Поверхностная активность радионуклида R по данным бортовых измерений определяется следующим образом:

$$A_R = (n_R - n_{\Phi R}) \cdot \frac{1}{S_R}, \quad (1)$$

где  $A_R$  – поверхностная активность радионуклида R;  $S_R$  – суммарная чувствительность спектрометра на определенной высоте полета  $H_f$  (калибровочная характеристика);  $n_R$  – суммарная скорость счета в энергетическом окне радионуклида R, приведенная к высоте  $H_f$ ;  $n_{\Phi R}$  – суммарная интенсивность фонового излучения в энергетическом окне радионуклида R.

Суммарная чувствительность спектрометра  $S_R$  зависит от погрешности измерений на калибровочных площадках и с достаточной степенью точности определяется выражением:

$$S_R = \frac{n_R^{cal} - n_{\Phi R}}{A_R^{cal}}, \quad (2)$$

где  $A_R^{cal}$  – значение активности радионуклида R на калибровочной площадке;  $n_R^{cal}$  – суммарное значение скорости счета в энергетическом окне радионуклида R при измерениях на высоте  $H_f$  во время проведения калибровки.

Таким образом

$$A_R = \frac{A_R^{cal}}{n_R^{cal} - n_{\Phi R}} \cdot (n_R - n_{\Phi R}). \quad (3)$$

Отсюда следует, что активность  $A_R$  радионуклида R является функцией нескольких переменных:

$$A_R = f(A_R^{cal}, n_R^{cal}, n_{\phi R}^{cal}, n_{\phi R}), \quad (4)$$

причем  $n_R^{cal}$  и  $n_R$ , в свою очередь, являются экспоненциальными функциями высоты полета:

$$n_R^{cal} = N_R^{cal}(0) \cdot \exp(-\mu_R \cdot H); \quad (5)$$

$$n_R = N_R(0) \cdot \exp(\mu_R \cdot H), \quad (6)$$

где  $\mu_R$  – коэффициент линейного ослабления по высоте для радионуклида R;  $N_R(0)$  – расчетные показания спектрометра на поверхности калибровочной площадки радионуклида R.

Основными факторами, оказывающими влияние на погрешность измерения, являются температура ( $t$ ) и давление ( $P$ ) воздуха, так как они в значительной степени определяют значение плотности воздуха и, следовательно, значение коэффициента ослабления показаний бортовых спектрометров при изменении высоты полета.

Технические указания МАГАТЭ рекомендуют учитывать влияние температуры и давления путем приведения измеренного значения высоты к единым условиям [2]:

$$H_{пр} = H_{изм} \cdot \frac{T_0}{T_0+t} \cdot \frac{P_{изм}}{P_0}, \quad (7)$$

где  $H_{пр}$  – приведенное значение высоты, м;  $T_0 = 273$  °С – абсолютная температура;  $t$  – текущее значение температуры воздуха по Цельсию за бортом летательного аппарата (ЛА);  $P_{изм}$  – давление воздуха за бортом ЛА при проведении измерений, кПА;  $P_0 = 10^5$  кПА – давление воздуха у поверхности Земли;  $H_{изм}$  – значение высоты полета, измеренное каналом измерения высоты.

В технологиях компьютерного построения карт предусматривается предварительная операция преобразования исходных данных наблюдений с нерегулярными координатами в данные на регулярной прямоугольной или квадратной сетке. Реальная съемка производилась по профилям с шагом  $\sim 5$  м и межпрофильным расстоянием  $\sim 100$  м, поэтому для итоговых карт с учетом

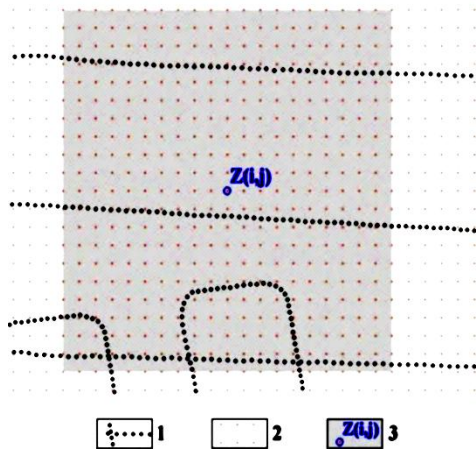


Рис. 3. Фрагмент расчетных матриц: 1 – точки наблюдений; 2 – узлы расчетных матриц; 3 – область «скользящего окна» осреднения и ее центр

необходимой детальности и корректности построений, а также на основе пробных расчетов выбрана регулярная квадратная сетка  $10 \times 10$  м (рис. 3).

Для расчетов матриц регулярной сетки использовался «Kriging»-метод как наиболее точный и используемый в аналогичных целях почти во всех ГИС. В результате проведенных работ были составлены карты-схемы загрязнения в виде площадного загрязнения с сечением изолиний эквивалентной дозы 5 мкЗв (рис. 4). Для построения карт-схем и проведения пространственного анализа с помощью ГИС был использован программный продукт ArcGIS for Desktop Basic [3].

Для выделения малоразмерных объектов с повышенным уровнем радиоактивного излучения построены карты локальной («высокочастотной») составляющей наблюдаемого поля с сечением изолиний эквивалентной дозы 2 мкЗв.

Файлы данных для таких карт получили путем вычитания из матриц исходного поля матриц региональной («низкочастотной») составляющей. Матрицы региональной составляющей рассчитывались по матрице исходного поля путем усреднения «скользящим окном» – квадратом со стороной 200 м (с учетом межпрофильного расстояния  $\sim 100$  м). Операция усреднения заключается в вычислении из каждого узла исходной матрицы среднего значения всех узлов, попадающих в «окно» с заранее заданными размерами:

$$Z_{cp}(i, j) = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{k=i-N/2}^{k=i+N/2} \sum_{l=j-M/2}^{l=j+M/2} Z(k, l), \quad (8)$$

где  $i, j$  – номера строки, столбца исходной и расчетной матриц;  $N, M$  – размеры «окна» осреднения в узлах матриц (см. рис. 3).

Такая методика выделения локальных аномалий широко распространена в прикладной геофизике.

Пример, поясняющий получение матрицы локальной («высокочастотной») составляющей, приведен на рис. 4.

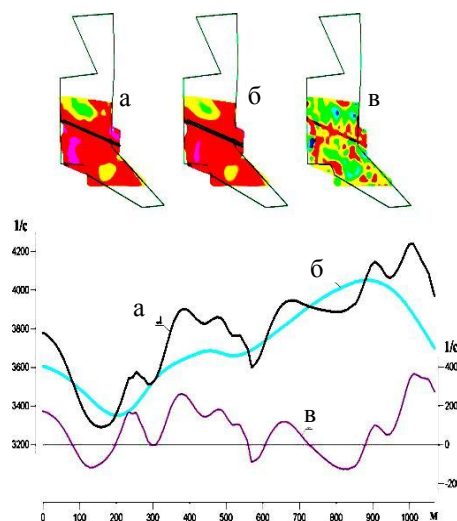


Рис. 4. Графики исходного (а), осредненного (б) и локальной составляющей (в, в=а-б) поля гамма-излучения на участке «Рыжий лес». Вверху – положение линии графиков на соответствующих картах

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате обработки и анализа данных измерений, полученных СК для БПЛА «АСПЕК», были выявлены области, выделяющиеся по интенсивности с общего фона (рис. 5), и определены их координаты. Как видно из рис. 6, на участке

«Нефтебаза» с общего высокого фона выделяются 7 участков (1–7) с интенсивностью от 90 до 160 мкЗв. На участке «Рыжий лес» с общего высокого фона выделяются 10 участков (8–17) с интенсивностью 90...170 мкЗв. Характеристики этих участков приведены в таблице.

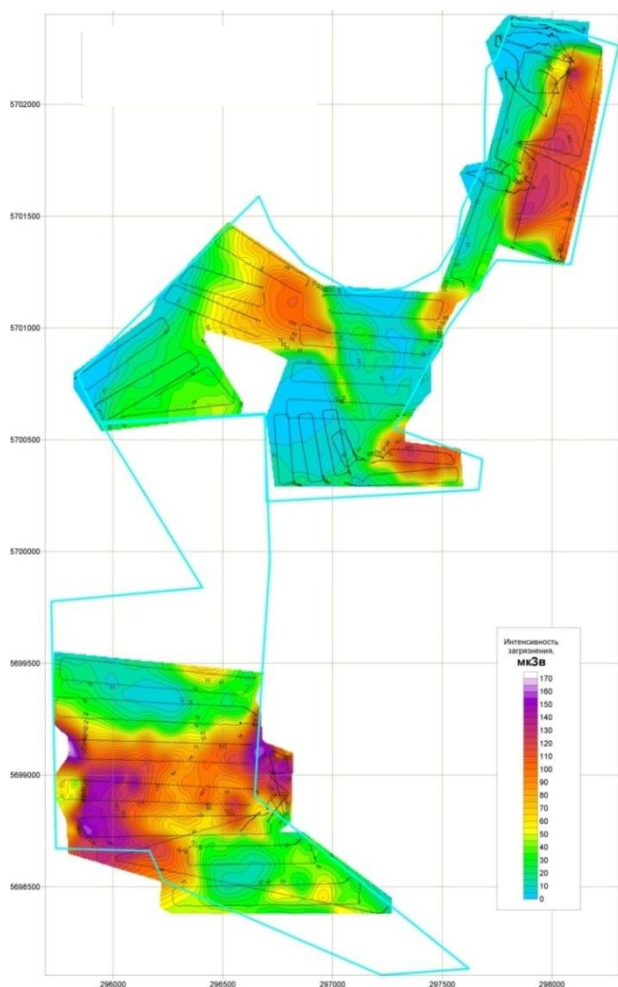


Рис. 5. Поверхность, полученная методом интерполяции

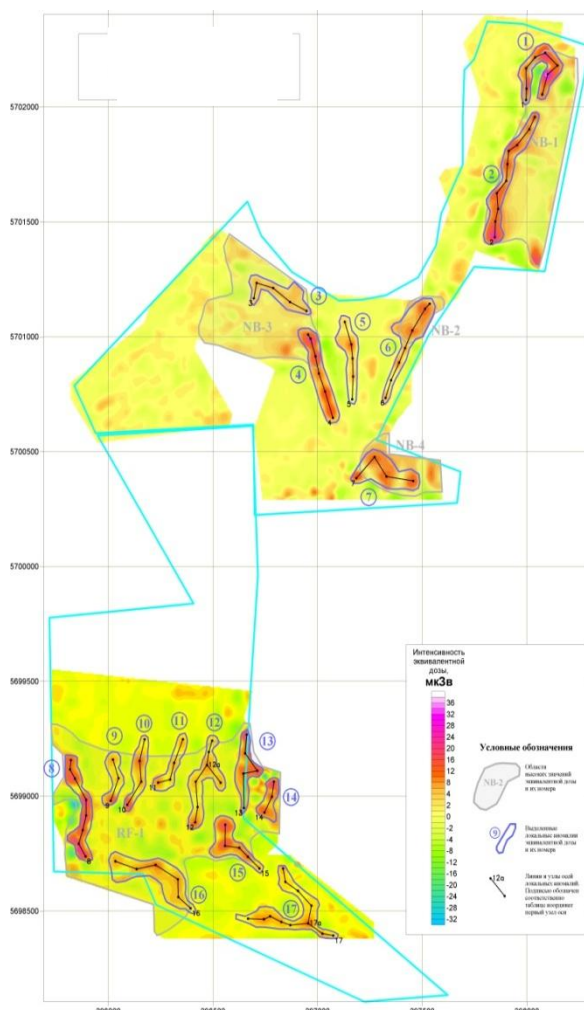


Рис. 6. Области высоких интенсивностей, выделенные в результате проведенной обработки

Выявленные локальные аномалии повышенных значений эквивалентной дозы

Номер аномалии	Область	Эквивалентная доза, мкЗв	Примечание
1	2	3	4
1	«Нефтебаза»	18...32	—
2	«Нефтебаза»	8...24	Может быть частично ложной в силу особенностей технологии выделения, так как расположена в резко выраженной границе «регионального» пятна загрязнения
3	«Нефтебаза»	4...6	—
4	«Нефтебаза»	12...20	Имеет явно выраженную линейность в плане
5	«Нефтебаза»	4...10	Имеет явно выраженную линейность в плане
6	«Нефтебаза»	4...14	Имеет явно выраженную линейность в плане
7	«Нефтебаза»	6...14	—
8	«Рыжий лес»	12...24	Может быть частично ложной в силу особенностей технологии выделения, так как расположена на резко выраженной границе «регионального» пятна загрязнения
9	«Рыжий лес»	6...14	—

Продолжение таблицы

1	2	3	4
10	«Рыжий лес»	6...16	–
11	«Рыжий лес»	6...8	–
12	«Рыжий лес»	4...8	–
13	«Рыжий лес»	8...18	–
14	«Рыжий лес»	10...22	–
15	«Рыжий лес»	6...18	–
16	«Рыжий лес»	6...10	–
17	«Рыжий лес»	6...10	–

Проведенные исследования показывают, что уровни радиоактивного загрязнения обследуемых участков очень высокие.

Из-за высокой и густой растительности, присутствующей на обследуемых участках, полеты вынуждены были проводить на высоте 30 м. Зеленая «масса» растительности внесла существенные искажения в результаты измерений (интенсивность растительности нельзя учесть при проведении калибровок). Более точные результаты «сканирования» рассмотренных площадок можно будет получить только в определенные временные периоды – ранней весной или поздней осенью, когда отсутствует зеленый покров.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ю.Л. Забулонов, Г.В. Лисиченко, Н.В. Макарец. Результаты модельных и полевых экспериментов по выявлению низкоинтенсивных источников радиоактивного излучения // *Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці НАН України*. 2005, в. 31, с. 96-100.
2. IAEA-TECDOC-1092/R. *Руководство по мониторингу при ядерных или радиационных авариях МАГАТЭ*. Вена, 2002.
3. ArcGIS for Desktop Software. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.esri.com/software/arcgis/about/gis-for-me>.

*Статья поступила в редакцию 16.07.2015 г.*

### АЕРОГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧНЕ ОБСТЕЖЕННЯ В ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ НА БАЗІ БПЛА ТИПУ ОКТОКОПТЕР

*Ю.Л. Забулонов, В.М. Буртняк, І.О. Золкін*

Представлені результати польових досліджень стану радіоактивного забруднення ПТЛРВ «Рудий ліс» і «Нафтобаза» в Чорнобильській зоні отримані авторами в червні 2015 г. Відпрацьована методика виявлення локальних неоднорідностей на поверхні ґрунту, що не мають контрастних границь, методом аерогамма-спектрометрії з борту БПЛА типу октокоптер. Відпрацьовані методики пошуку і оконтурювання прихованих захоронень радіоактивних відходів.

### AIRBORNE GAMMA SPECTROMETRIC SURVEY IN THE CHERNOBYL EXCLUSION ZONE BASED ON OKTOKOPTER UAV TYPE

*Yu.L. Zabulonov, V.M. Burtnyak, I.O. Zolkin*

The results of field studies of radioactive contamination condition of RWTSP “Red Forest” and “Neftebaza” in the Chernobyl zone, obtained by the authors in June 2015 are represented. The technique of detection of local inhomogeneities on the soil surface without contrasting borders by airborne gamma spectrometry from the board of oktokofter UAV type is worked through. The technique of searching and contouring of hidden burial of radioactive waste is practiced.