

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЧЕЛОВЕКА И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 504.75:546.791.027

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ УРАНА ПО ТЕРРИТОРИИ ТОМСКОГО РАЙОНА

Е.Г. Вертман, В.Д. Каратаев, В.М. Левицкий, Д.Э. Эргашев *

*Томский политехнический университет
Лаборатория радиационного контроля

Радиоактивность природных объектов (вода, воздух, почва) может быть обусловлена смесями природных и техногенных α -, β -, γ -излучателей. Определение суммарной активности недостаточно информативно. Для получения достоверной информации об источниках радиоактивного загрязнения окружающей среды требуется селективная идентификация радионуклидов. Комплексный анализ радионуклидного состава, аккумулированного в объектах окружающей среды, несколькими ядерно-физическими методами позволяет изучить изотопные соотношения и удельные массовые или поверхностные активности природных и техногенных радионуклидов. В итоге появляется возможность селекции основных источников радиоактивных загрязнений и определения их значимости.

Целью настоящей работы являлись разработка и реализация методики разделения концентраций изотопов урана, аккумулированные в почвенном слое толщиной 5 см на три компоненты: фоновую природную равновесную, техногенную равновесную и техногенную неравновесную. Элемент уран выбран в качестве индикатора радиоактивного загрязнения территории неслучайно. Два природных изотопа урана присутствуют в природных, как в минеральном, так и в органическом, веществах практически повсеместно в разных по количеству фоновых значениях. И если природный уран в процессе сложного радиоактивного распада находится в секулярном равновесии с дочерними продуктами распада, то разделенные радиохимическими методами (очищенные от продуктов распада) изотопы урана неравновесны, и прямым измерением их радиоактивность не обнаруживается. Этот факт позволяет осуществить предлагаемую методику разделения природной равновесной и неравновесной компонент изотопов урана с помощью комплексного исследования одной и той же пробы следующими ядерно-физическими методами анализа элементного состава веществ:

- инструментального γ -спектрометрического (ИГС) для определения природной радиоактивности изотопов урана (^{238}U и ^{235}U) по гамма-радиоактивности дочерних продуктов распада;
- инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) для определения суммарной концентрации изотопа ^{238}U ;
- метода запаздывающих нейтронов (МЗН) для определения суммарной концентрации изотопа ^{235}U .

Количественно состояние радиоактивного равновесия характеризуют коэффициентом радиоактивного равновесия $K_{p,p}$. Это отношение активности данного радионуклида к активности родоначального, или предшествующего ему по радиоактивному ряду радионуклида [1]. Если радиоактивное равновесие не нарушено, то $K_{p,p}=1$. В

урановом ряду радиоактивное равновесие может быть нарушено между ^{238}U и ^{234}U , между ^{238}U и ^{234}Th , между ^{234}Th и ^{226}Ra , между ^{226}Ra и ^{222}Rn , в силу причин естественного или техногенного характера. Если инструментальными методами удастся определить $K_{p,p}$ между ^{238}U , ^{234}Th и ^{226}Ra , то, в некоторых случаях, можно установить, количество какого радионуклида в естественном радиоактивном ряду уменьшилось или увеличилось. В природе активности ^{238}U и ^{234}Th практически равны. Нарушение равновесия между ^{234}Th и ^{226}Ra указывает на хронологическую миграцию радия. Если же ^{226}Ra находится в равновесии с ^{234}Th , а между ^{238}U и ^{234}Th равновесие нарушено, то изменяется концентрация ^{238}U .

Радиоактивное равновесие в урановых рядах может быть также нарушено за счет привнесения в почву техногенных неравновесных изотопов урана. Неравновесный уран – это техногенный радионуклид, лишенный дочерних продуктов распада радиохимическим выделением. Состояние радиоактивного равновесия в радиоактивных цепочках полностью нарушается в процессах химической переработки природного сырья (экстракции, сорбции, обогащения урана по одному из изотопов).

Пунктирные вертикальные линии на рис. 1 указывают границы, справа от которых радиоактивное равновесие практически не восстанавливается даже в течение многих тысячелетий [2], слева же – вековое равновесие сравнительно быстро восстанавливается: для первой цепочки – в течение 6 – 7 суток; для второй – в течение полугода. Нуклиды ^{231}Pa , ^{230}Th и следующие за ними в цепочках распада радионуклиды сепарируются после переработки руды и получения готовых продуктов U , UO_2 , UF_4 , UF_6 природного изотопного состава. Для достижения радиоактивного равновесия необходимо время, равное периоду полураспада соответствующего родоначальника ряда.

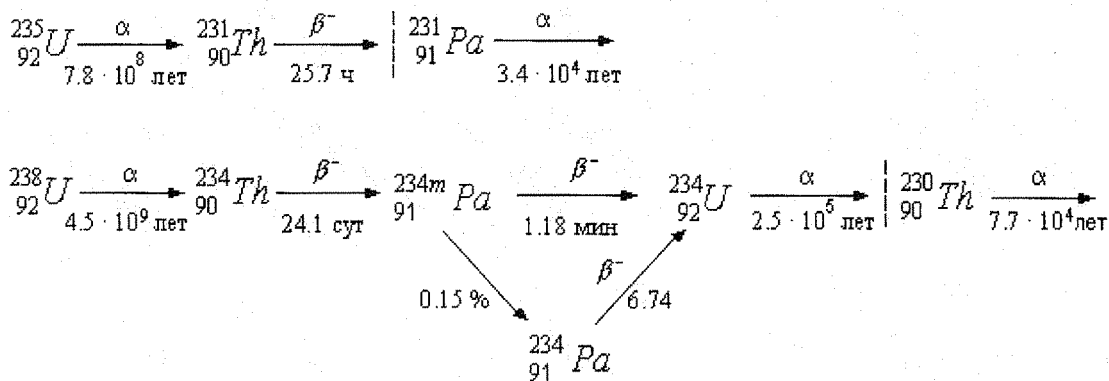


Рис. 1. Цепочки распада ряда ^{235}U и ^{238}U

Радиоактивное равновесие может нарушаться и в природе в результате естественных гидрогеохимических и биохимических процессов [3]. Эти же процессы приводят к нарушению природного изотопного соотношения между ^{238}U и ^{235}U . Таким образом, предлагаемая методика применима для исследования радиационной обстановки не только на территориях вокруг предприятий ядерного топливного цикла, но и на других территориях с целью определения концентраций неравновесных компонент изотопов урана и выяснения причин их аккумуляции в объектах окружающей среды. Нарушение равновесия происходит не во всех звеньях урановых цепочек. Предприятия, которые, в силу различных причин, могут быть источниками загрязнения окружающей среды неравновесными изотопами урана, функционируют, в среднем, 50 лет [4]. В случае разового, аварийного, выброса в окружающую среду неравновесных изотопов урана в самом начале функционирования предприятий

ЯТЦ, указанного периода времени недостаточно для восстановления равновесия во всех звеньях цепочек урановых рядов. В ряду техногенного изотопа ^{238}U равновесие нарушается между материнским и тремя первыми членами ряда до изотопа ^{234}U (его период полураспада составляет $2,5 \cdot 10^5$ лет). Тогда в образцах, взятых с объектов окружающей среды для анализа, наблюдается нарушение равновесия между суммарной концентрацией ^{238}U (уран природный плюс уран неравновесный) и природным радием, поскольку неравновесный радий в заметных концентрациях за период в 50 – 100 лет образоваться не может вследствие большого периода полураспада предшественника радия – изотопа ^{234}U . Нарушения же равновесия между природными компонентами радия и урана не происходит. Поэтому определение концентраций естественных, природных, урана и радия по дальним продуктам распада ряда ^{238}U гамма-спектрометрическим методом правомерно, что и заложено в основу предлагаемой методики.

А в ряду ^{235}U равновесие нарушается между первыми двумя членами ряда – ^{231}Th ($T_{1/2}=25,52$ ч) и ^{231}Pa ($T_{1/2}=3,25 \cdot 10^4$ лет). Концентрацию ^{235}U определяют по гамма-линии 185,71 кэВ, излучаемой возбужденным ядром ^{231}Th . При этом, применяя гамма-спектрометрию, всегда сталкиваются с проблемой разрешения дублета, возникающего в результате интерференции с гамма-линией 185,97 кэВ ^{226}Ra , принадлежащего ряду ^{238}U . Существуют методы определения относительного фотовклада от каждого радионуклида в дублет 186 кэВ. Но в этом случае необходимо учесть удельные массовые активности изотопов ^{238}U и ^{235}U в природном соотношении [5] или предварительно определить концентрацию (активность) одного из этих радионуклидов другим методом анализа [2, 3].

В итоге, казалось бы, появляется возможность определения суммарной (интегральной) активности равновесного и неравновесного ^{235}U , а также активность равновесного ^{238}U . Однако необходимо также учитывать поступления в окружающую среду урана за счет функционирования предприятий, сжигающих органическое топливо [6]. При сжигании органического топлива в золопылевых выбросах из труб и в золоотвалах радиоактивное равновесие в рядах не нарушается [7]. Инструментальное измерение суммарной активности привнесенного равновесного и природного урана в фоновых концентрациях производят методом γ -спектрометрии по гамма-излучению дальних членов ряда (^{214}Bi , ^{214}Pb , ^{210}Pb). Оценку сдвига равновесия в ряду ^{238}U и ^{226}Ra можно получить, измерив активность нуклида ^{234}Pa по γ -линии 1001,06 кэВ, являющегося третьим нуклидом в ряду ^{238}U и имеющего небольшой период полураспада (1,17 мин). Даже при малом квантовом выходе его гамма-линии (0,58 %) можно получить достаточную статистику в фотопике, если время экспозиции более 3 ч и метрологические параметры, характеризующие защитные свойства низкофоновой камеры (НФК), достаточно высоки [8]. Полученная активность ^{234}Pa практически совпадает с активностью ^{238}U . Результат позволяет рассчитать концентрацию равновесного ^{235}U через природное изотопное соотношение.

Концентрацию неравновесной компоненты изотопа ^{238}U в натурной пробе можно определить двумя способами.

Первый способ основан на гамма-спектрометрии по двум гамма-линиям (63,3 и 93 кэВ) его первого продукта распада ^{234}Th . Этот способ может быть реализован на специальных полупроводниковых детекторах из особо чистого германия (ОЧГ) с высоким энергетическим разрешением (0,3 кэВ). Однако затруднения в расшифровке спектрограмм вызывает интерференция обеих указанных линий: для линии 63,3 кэВ – от линии 63,9 кэВ, принадлежащей ^{231}Pa (семейства ^{235}U), и линии 63,9 кэВ, принадлежащей ^{232}Th ; для линии 93 кэВ (в действительности дублет линий

92,3 кэВ и 92,8 кэВ, принадлежащих ^{234}Th) – от линии характеристического рентгеновского излучения 93 кэВ, принадлежащей также ^{234}Th . Таким образом, этот способ затруднительно применять при значительном содержании ^{232}Th в анализируемых образцах. Кроме того, требуется введение поправок, учитывающих концентрации ^{235}U и ^{232}Th [9, 10].

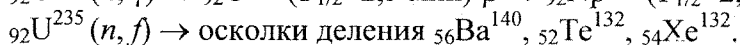
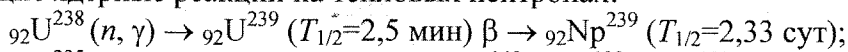
Второй способ основан на использовании нейтронно-активационного анализа для определения суммарной концентрации равновесной и неравновесной компонент. Раздельное определение урана в природных смесях ^{235}U , ^{238}U и ^{232}Th возможно, благодаря тому, что ядра атомов изотопа ^{235}U делятся, главным образом, тепловыми нейтронами, а ядра атомов изотопов ^{238}U и ^{232}Th – быстрыми, имеющими энергию выше пороговой, равной соответственно 1,4 и 1,3 МэВ. Сечение вынужденного деления ядер атомов ^{235}U равно $\sigma_f=582$ бн (на тепловых нейтронах), $\sigma_f=1,45$ бн (на нейтронах спектра деления). А для ядер атомов ^{238}U сечение вынужденного деления $\sigma_f=0,307$ бн (на нейтронах спектра деления). Как известно, при делении ядер тяжелых элементов под действием нейтронов образуются как мгновенные, так и запаздывающие нейтроны, испускаемые осколками деления [3, 11]. Высокая избирательность метода запаздывающих нейтронов обусловлена тем, что в природе нет других делящихся элементов в ощутимых количествах, кроме урана и тория, а также тем, что запаздывающие нейтроны могут быть зарегистрированы с достаточно высокой эффективностью в присутствии β - и γ -фона. Предел обнаружения МЗН значительно ниже, чем у традиционных методов анализа и равен $3 \cdot 10^{-7}$ мас.% урана для пробы, например, почвы, массой 10 г при облучении нейтронами с плотностью потока, равной $4 \cdot 10^{12}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Кроме того, МЗН является прямым методом в том смысле, что анализ осуществляется по индикации самого определяемого элемента, а не по продуктам радиоактивного распада, что достаточно удобно для определения в натурной пробе суммарной концентрации урана, находящегося в равновесной и неравновесной фазах.

Но при облучении быстрыми нейтронами также делится и ^{232}Th , что заметно усложняет определение концентрации ^{238}U . В этом случае происходит регистрация детектором запаздывающих нейтронов не только от осколков деления ^{238}U , но и от осколков деления ^{232}Th . Если в облучаемом образце отсутствуют в значимых концентрациях неравновесные изотопы урана, то при облучении нейтронами полного реакторного спектра получают интегральное количество запаздывающих нейтронов, испускаемых осколками деления всех трех элементов. При облучении образца в кадмиевом фильтре быстрыми нейтронами выход запаздывающих нейтронов будет обусловлен, практически, только делением ^{238}U и ^{232}Th . Учитывая, что в природе фракционирование изотопов ^{238}U и ^{235}U незначительно (отношение их концентраций постоянно и равно $137,9 \pm 0,10$), можно по результатам двух сеансов облучения вычислить концентрации ^{235}U и ^{238}U , а также и ^{232}Th . Если сравнить ядерные сечения деления этих трех элементов, то, очевидно, что при облучении их смесей нейтронами полного реакторного спектра, элементы ^{238}U и ^{232}Th имеют сечение деления, более чем в 1000 раз меньшие, чем изотоп ^{235}U . Таким образом, если в энергетическом спектре нейтронов доля тепловых нейтронов значительно больше, чем доля нейтронов с энергией более 1 МэВ, то основной вклад в эмиссию запаздывающих нейтронов будет давать деление ядер атомов ^{235}U . Это позволяет определять концентрации изотопов ^{235}U и ^{238}U по результатам одного сеанса облучения образца нейтронами полного реакторного спектра, пренебрегая содержанием тория, в тех образцах, где уран и торий содержатся примерно в равных количествах. Этот метод анализа можно использовать при анализе натуральных образцов природных объектов, в которых

природное изотопное отношение между ^{238}U и ^{235}U не нарушено. В случае присутствия в образце неравновесных компонент урана возникает нарушение природного изотопного отношения в большую или в меньшую стороны концентрации одного из них.

Нейтронно-активационный анализ (НАА) нашел широкое применение при измерении низких концентраций многих редких, рассеянных и радиоактивных элементов. Благодаря этому, стало возможным количественное определение концентраций изотопов урана в слаборадиоактивных природных объектах [12]. От экспозиции при облучении образцов зависит чувствительность метода (10^{-6} – 10^{-8} мас.%). Метод основан на облучении анализируемого образца потоком тепловых нейтронов и определения наведенной активности, обусловленной возникновением в результате ядерных реакций радиоактивных изотопов. В анализе используется, в основном, активация ядерной реакцией (n, γ) с последующей гамма-спектрометрией наведенной активности. Концентрация в образце активированных атомных ядер прямо пропорциональна массовой доле определяемого элемента.

При нейтронно-активационном анализе урана наиболее часто используют следующие ядерные реакции на тепловых нейтронах:



При активации ^{238}U в ядерном реакторе образуется изотоп ^{239}U ($T_{1/2}=2,3$ мин, $E_{\gamma}=74,6$ кэВ), при распаде которого образуется ^{239}Np ($T_{1/2}=2,35$ дня, $E_{\gamma}=106, 210, 228, 278, 316, 334$ кэВ).

Общее содержание урана, исходя из этих реакций, можно определять по изотопам ${}_{92}\text{U}^{239}$, ${}_{93}\text{Np}^{239}$, сумме осколков деления и, наконец, по отдельным осколочным продуктам: ${}_{56}\text{Ba}^{140}$, ${}_{54}\text{Xe}^{152}$. Отличающийся высокой чувствительностью, точностью и экспрессностью нейтронно-активационный метод определения урана свободен от интерференции со стороны других радиоактивных ядер [3, 12].

При районировании местности для отбора проб с объектов окружающей среды необходимо выделить территории, на которых концентрация урана близка к фоновым концентрациям, обусловленным природным содержанием и глобальными выпадениями. Эти территории можно использовать в качестве полигонов для отбора реперных (опорных для проведения анализа) образцов. Обычно такие территории определяются согласно среднегодовой розе ветров в исследуемой местности со стороны наименьшей вероятности атмосферного переноса дополнительной активности. Чтобы удостовериться в том, что в реперных образцах уран только природный и в фоновых концентрациях, необходимо проверить радиоактивное равновесие в урановых рядах сравнением активности ^{238}U с активностью третьего члена его радиоактивного ряда – ^{234}Pa . Для этого необходимо экспонировать реперные образцы 3 – 5 ч, чтобы в аппаратурном гамма-спектре значимо проявился пик от ^{234}Pa .

Изложенный выше принцип определения концентраций неравновесных изотопов урана в поверхностном слое почвы представим в виде изораспределений удельной поверхностной активности с помощью географической информационной системы (ГИС). В качестве примера используем базу данных о радиоактивности поверхностного слоя почвы на территории Томского района.

1. γ -спектрометрическим методом определяем концентрацию ^{238}U ($1/\text{см}^3$)

$$C_{\text{п,гр}}^{\text{U}^{238}} = C_{\text{п}}^{\text{U}^{238}} + C_{\text{гр}}^{\text{U}^{238}} \quad (1)$$

Здесь: $C_{п,тр}^{U^{238}}$ – суммарная концентрация природного и привнесенного равновесного изотопа ^{238}U ; $C_{п}^{U^{238}}$ – природная равновесная концентрации ^{238}U ; $C_{тр}^{U^{238}}$ – привнесенная равновесная концентрации ^{238}U . Полученные результаты анализов пересчитываем из удельной массовой активности Бк/кг в удельную поверхностную активность мКи/км² по стандартной методике и представляем в виде изораспределений (рис. 2).

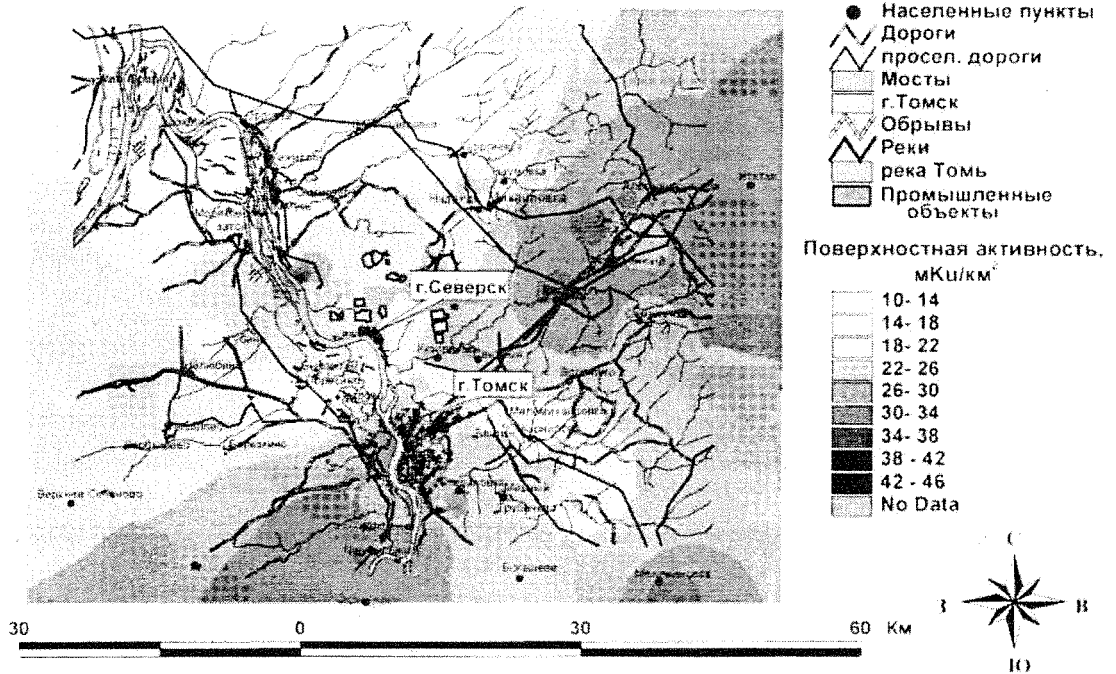


Рис. 2. Изораспределение удельной поверхностной активности равновесного изотопа ^{238}U

2. Методом запаздывающих нейтронов определяем общую концентрацию ^{235}U в образце

$$C_{\Sigma}^{U^{235}} = C_{п}^{U^{235}} + C_{тр}^{U^{235}} + C_{тн}^{U^{235}}, \quad (2)$$

где $C_{п}^{U^{235}}$, $C_{тр}^{U^{235}}$, $C_{тн}^{U^{235}}$ – природная естественная, привнесенная равновесная и неравновесная концентрации соответственно (рис. 3).

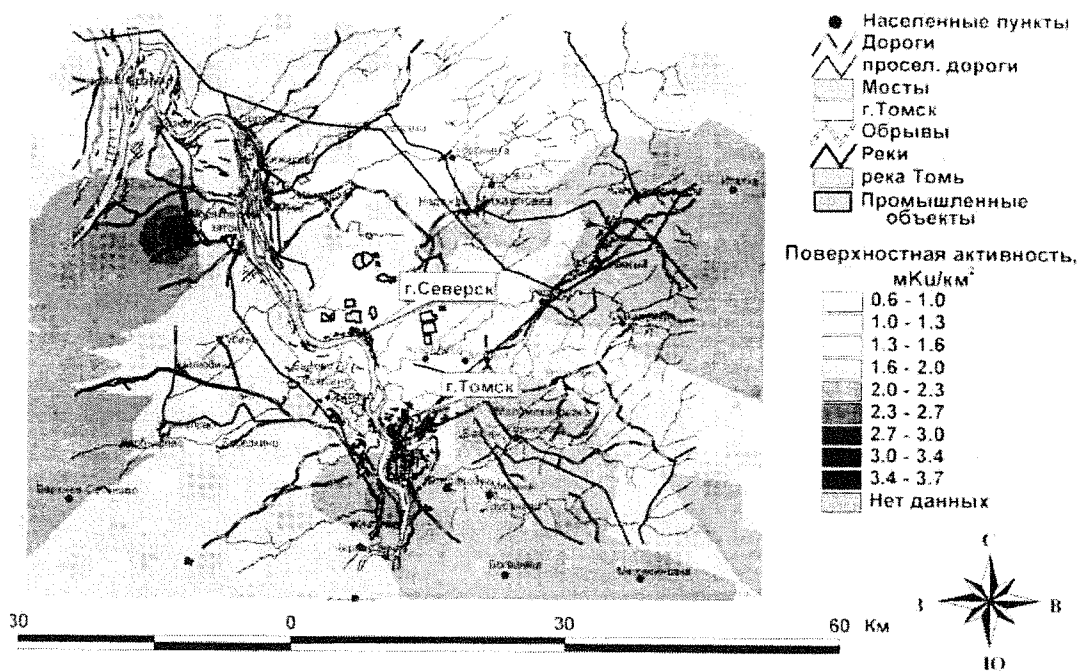


Рис. 3. Изораспределение удельной суммарной поверхностной активности изотопа ^{235}U

3. Нейтронно-активационным анализом определяем общую концентрацию ^{238}U в образце (рис. 4)

$$C_{\Sigma}^{U^{238}} = C_{\text{п}}^{U^{238}} + C_{\text{тр}}^{U^{238}} + C_{\text{тн}}^{U^{238}} \quad (3)$$

Компоненты $C_{\Sigma}^{U^{235}}$, $C_{\Sigma}^{U^{238}}$, $C_{\text{п,тр}}^{U^{238}}$ определяем инструментальными методами.

Неравновесные компоненты определяем расчетным способом, используя природное изотопное соотношение.

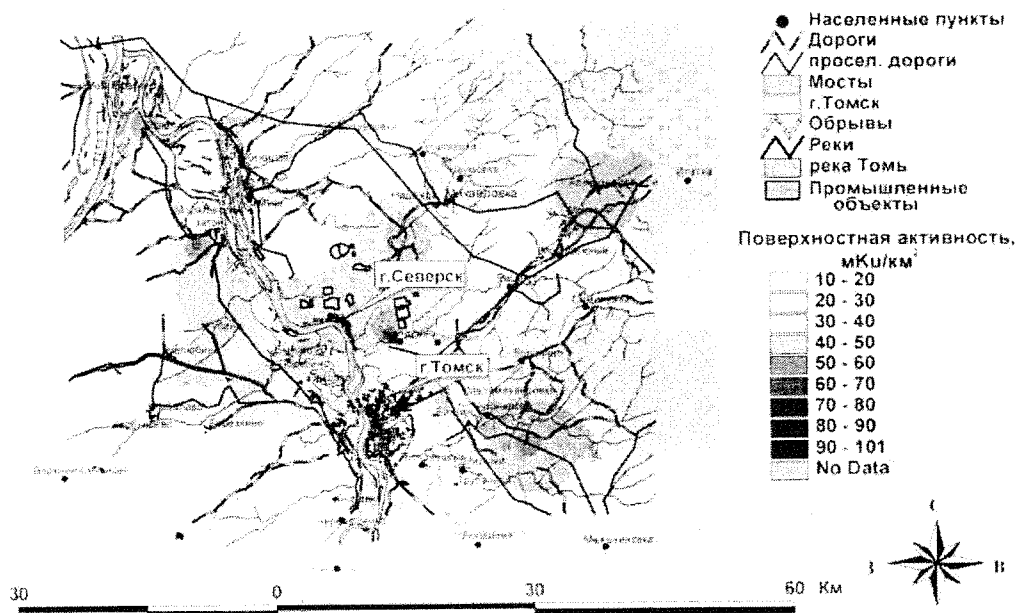


Рис. 4. Изораспределение удельной суммарной поверхностной активности изотопа ^{238}U

4. Неравновесную компоненту поверхностной активности ^{238}U определяем по соотношению (3) (рис. 5):

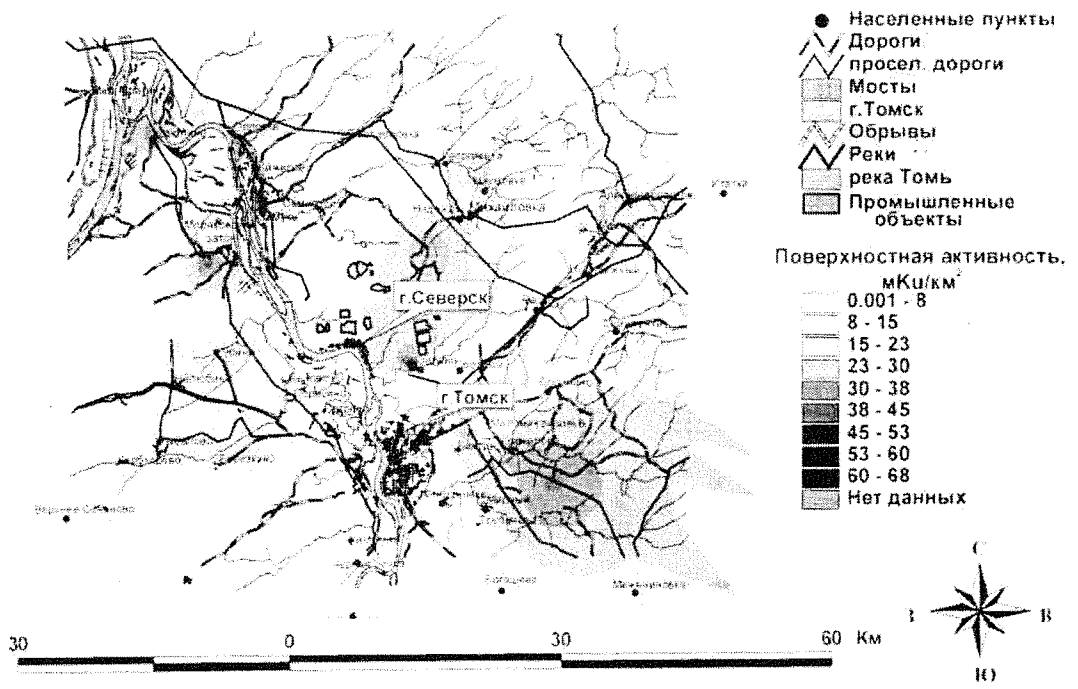


Рис. 5. Изораспределение удельной поверхностной неравновесной активности изотопа ^{238}U

$$C_{\text{пн}}^{U^{238}} = C_{\Sigma}^{U^{238}} + C_{\text{тр}}^{U^{238}} + C_{\text{п}}^{U^{238}} = C_{\Sigma}^{U^{238}} + C_{\text{п,тр}}^{U^{238}}. \quad (4)$$

5. По набору значений концентраций ^{238}U в реперных образцах компоненту $C_{\text{п}}^{U^{238}}$ оцениваем как среднюю выборочную:

$$\bar{C}_{\text{п}}^{U^{238}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{n,i}^{U^{238}}}{n}. \quad (5)$$

Здесь n – объем реперной выборки.

Природную концентрацию можно не определять, если известен «нулевой» уровень природной радиоактивности до пуска промышленного ядерного или неядерного объекта на исследуемой территории, как это было показано в [18].

6. Определяем привнесенную равновесную компоненту вычитанием результата, определенного по соотношению (5), из результата, определенного по соотношению (1) (рис. 6):

$$C_{\text{тр}}^{U^{238}} = C_{\text{п,тр}}^{U^{238}} - \bar{C}_{\text{п}}^{U^{238}}. \quad (6)$$

7. Для ^{235}U известно только $C_{\Sigma}^{U^{235}}$, но по природному изотопному отношению, которое составляет $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}=137,9$, вычисляем $C_{\text{п,тр}}^{U^{235}}$

$$C_{\text{п,тр}}^{U^{235}} = \frac{C_{\text{п,тр}}^{U^{238}}}{137,9}. \quad (7)$$

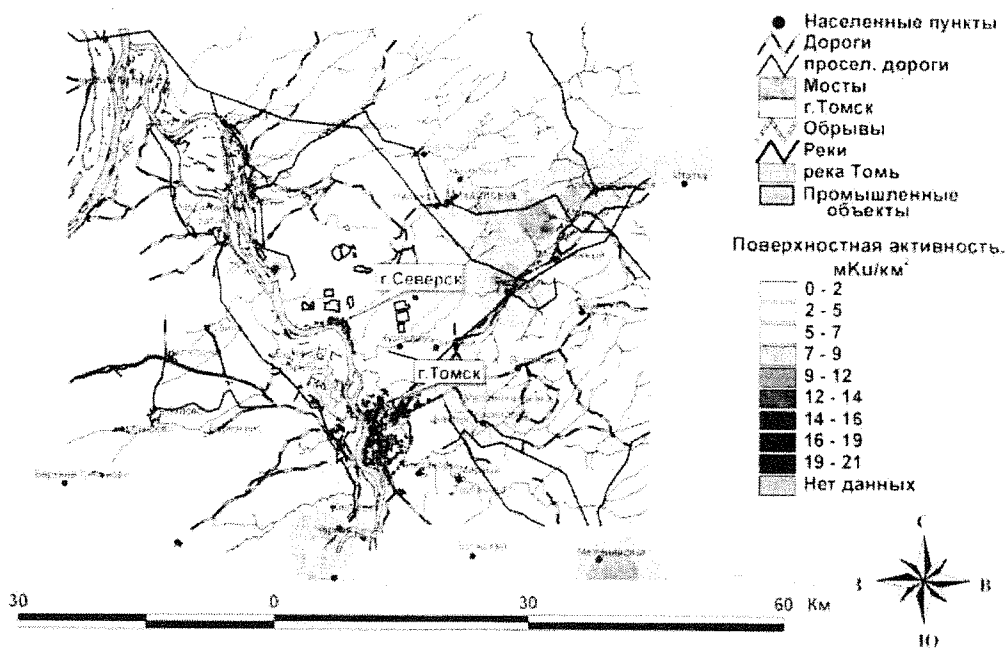


Рис. 6. Изораспределение удельной поверхностной привнесённой равновесной активности изотопа ^{238}U

8. По набору значений концентраций ^{235}U в реперных образцах компоненту $C_n^{U^{235}}$ оцениваем как среднюю выборочную:

$$\bar{C}_n^{U^{235}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{n,i}^{U^{235}}}{n} \quad (8)$$

9. С помощью соотношения (2) определяем неравновесную компоненту ^{235}U (рис. 7):

$$C_{\text{тн}}^{U^{235}} = C_{\Sigma}^{U^{235}} - C_{\text{тр}}^{U^{235}} - C_n^{U^{235}} = C_{\Sigma}^{U^{235}} - C_{\text{п,тр}}^{U^{235}} = C_{\Sigma}^{U^{235}} - \frac{C_{\text{п,тр}}^{U^{238}}}{137,9} \quad (9)$$

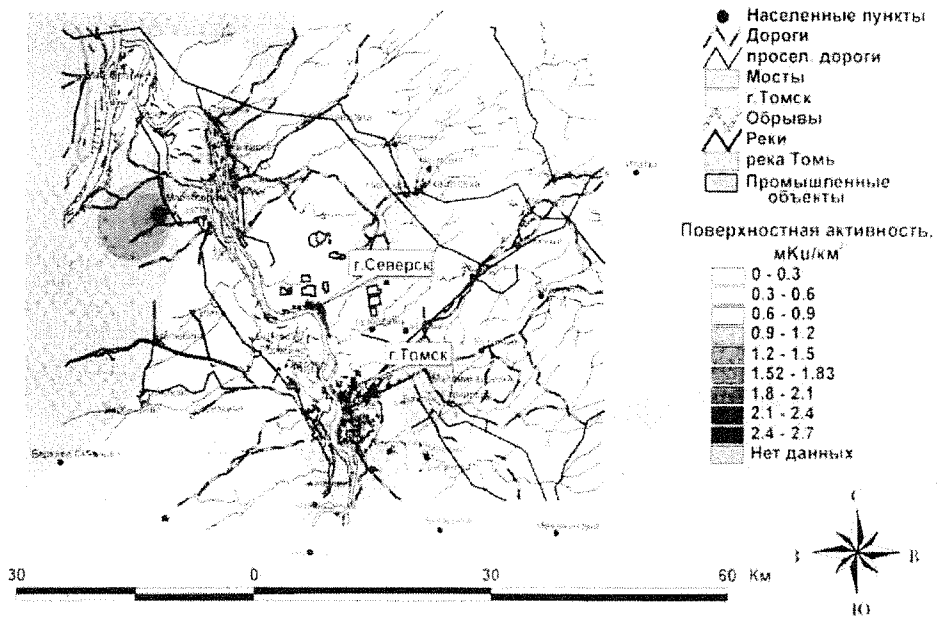


Рис. 7. Изораспределение удельной поверхностной неравновесной активности изотопа ^{235}U

10. Определяем привнесенную равновесную компоненту вычитанием результата, определенного по соотношению (8), из результата, определенного по соотношению (7) (рис. 8):

$$C_{\text{тр}}^{\text{U}^{235}} = C_{\text{п,тр}}^{\text{U}^{235}} - \bar{C}_{\text{п}}^{\text{U}^{235}} \quad (10)$$

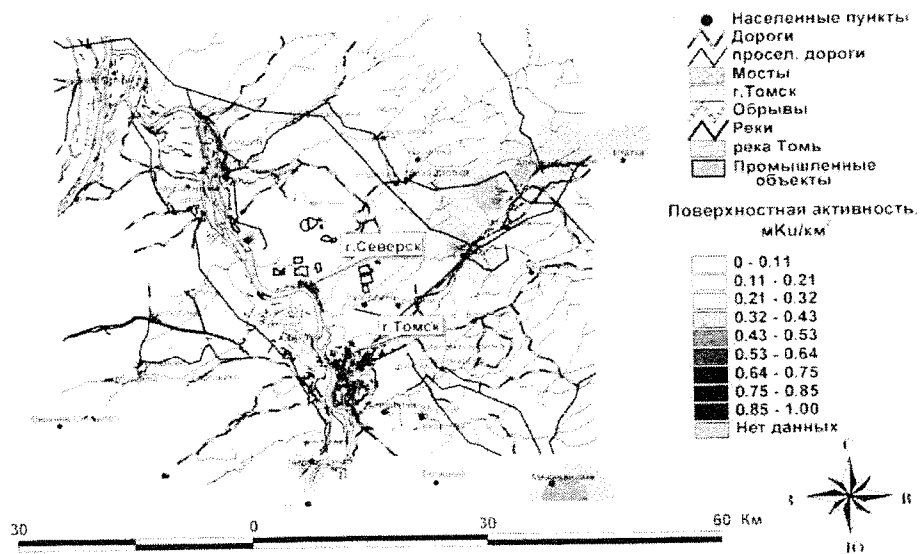


Рис. 8. Изораспределение удельной поверхностной привнесенной равновесной активности изотопа ^{235}U

Заключение

1. Поверхностные удельные активности природного равновесного изотопа ^{238}U велики, составляют всего лишь $(10 - 70) \text{ мКи/км}^2$ (рис. 1), а изотопа ^{235}U – $(0,6 - 2,5) \text{ мКи/км}^2$ (рис. 2), что находится в пределах среднего содержания изотопов урана в почвах различных генетических типов [7]. Неравномерность распределения урана по территории Томского района обусловлена, главным образом, распределением геологических структур, содержащих монациты. В северо-восточном направлении Копыловские монацитовые пески четко локализованы на карте. Та же причина обуславливает и локализацию повышенного содержания урана в районе поймы реки Томи, в 10 – 15 км вверх по течению относительно города, а также в районе станции Межениновка, расположенной на юго-востоке наблюдаемой зоны.
2. Рис. 3 – 8 иллюстрируют распределение привнесенной радиоактивности изотопов урана. Прослеживается атмосферный перенос радионуклидов с мелкофракционными золошлаковыми выбросами из труб котельных, ТЭЦ, ГРЭС и выпадение радионуклидов на поверхность почвы по среднегодовой розе ветров в северо-восточном направлении относительно города Томска. Виден перенос урана и по прибрежным территориям вдоль русла Томи в очень незначительных количествах, порядка $(5 - 20) \text{ мКи/км}^2$.

Литература

1. Пруткина М.И., Шапкин В.Л. Справочник по радиометрической разведке и радиометрическому анализу. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. С. 4-38.
2. Фролов В.В. Ядерно-физические методы контроля делящихся веществ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 184 с.
3. Вертман Е.Г. Анализ геологических проб методом запаздывающих нейтронов и его применение для решения некоторых геолого-геофизических задач: Дис канд. техн. наук. – Томск, 1981. 198 с.
4. Булатов В. И. Россия радиоактивная. – Новосибирск: ЦЭРИС, 1996. 227 с.
5. Крисяк Э.М. Ядерно-физические характеристики естественных радионуклидов. // Атомная энергия. 1986. Т.61. Вып.1. С. 50-60.
6. Рихванов Л.П. Общие и региональные проблемы радиозологии. – Томск.: Изд-во ТПУ, 1997. 384 с.
7. Булдаков Л.А. Радиоактивные вещества и человек. – М.: Энергоатомиздат, 1990. 160 с.
8. Арышев С.И., Каратаев В.Д., Эргашев Д.Э., Яковлева В.С. Низкофонный полупроводниковый гамма-спектрометр для радиозоологических исследований. – Деп. в ВИНТИ. 19.01.2000. №82.
9. Joshi S.R. Nuclear spectrometrie determination of uranium isotopes without use of radiochemical yield monifers. // Nucl. Instr. and Methods in Phys. Research. 1987. V. 254. No.2. P. 349-354.
10. Lau H.M., Sakanoue M., Komura K. Absolute determination of uranium concentration by hypenpure germanium LEPS // Nucl. Instr. and Methods. 1988. V. 200. No. 2-3. P. 561-565.
11. Вертман Е.Г., Левицкий В.М. Определение изотопного состава урана методом запаздывающих нейтронов в объектах окружающей среды // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы Международной конференции, Томск, 22-24 мая 1996г. – Томск: Изд-во ТПУ, 1996. С.444-447.
12. Вертман Е.Г., Судыко А.Ф., Резчиков В.И. Метрология γ -спектрометрического и нейтронно-активационного метода анализа радионуклидов в природных объектах // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы Международной конференции, Томск, 22-24 мая 1996г. – Томск: Изд-во ТПУ, 1996. С.441-444.
13. Барбашев С.В., Верховецкий Н.А., Пристер Б.С. Радиоактивное и химическое загрязнение почвы и растительности в районе Запорожской АЭС. – М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1991. 82 с.