

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

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

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  $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{230}\text{Th}$  и следующие за ними в цепочках распада радионуклиды сепарируются после переработки руды и получения готовых продуктов  $\text{U}$ ,  $\text{UO}_2$ ,  $\text{UF}_4$ ,  $\text{UF}_6$  природного изотопного состава. Для достижения радиоактивного равновесия необходимо время, равное периоду полураспада соответствующего родоначальника ряда.

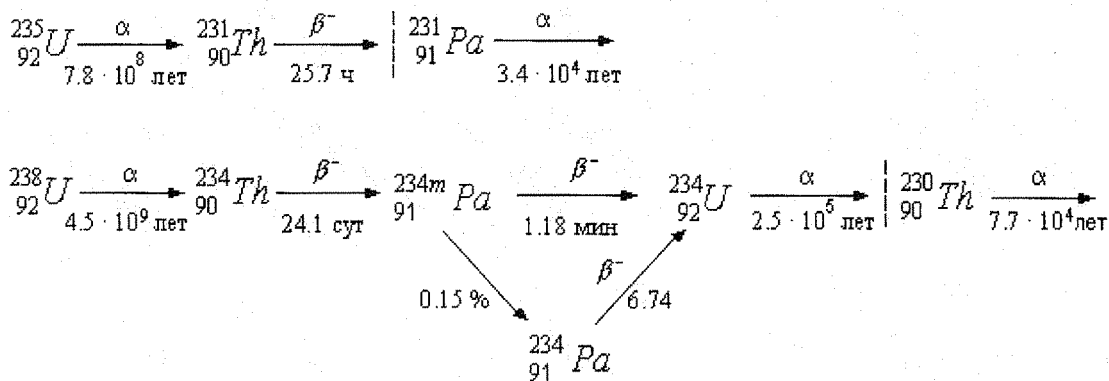


Рис. 1. Цепочки распада ряда  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$

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  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$ . 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  $^{238}\text{U}$  равновесие нарушается между материнским и тремя первыми членами ряда до изотопа  $^{234}\text{U}$  (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  $^{238}\text{U}$  (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  $^{234}\text{U}$ . Нарушения же равновесия между природными компонентами радия и урана не происходит. Поэтому определение концентраций естественных, природных, урана и радия по дальним продуктам распада ряда  $^{238}\text{U}$  гамма-спектрометрическим методом правомерно, что и заложено в основу предлагаемой методики.

А в ряду  $^{235}\text{U}$  равновесие нарушается между первыми двумя членами ряда –  $^{231}\text{Th}$  ( $T_{1/2}=25,52$  ч) и  $^{231}\text{Pa}$  ( $T_{1/2}=3,25 \cdot 10^4$  лет). Концентрацию  $^{235}\text{U}$  определяют по гамма-линии 185,71 кэВ, излучаемой возбужденным ядром  $^{231}\text{Th}$ . При этом, применяя гамма-спектрометрию, всегда сталкиваются с проблемой разрешения дублета, возникающего в результате интерференции с гамма-линией 185,97 кэВ  $^{226}\text{Ra}$ , принадлежащего ряду  $^{238}\text{U}$ . Существуют методы определения относительного фотовклада от каждого радионуклида в дублет 186 кэВ. Но в этом случае необходимо учесть удельные массовые активности изотопов  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  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  $^{235}\text{U}$ , а также активность равновесного  $^{238}\text{U}$ . 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  $\gamma$ -спектрометрии по гамма-излучению дальних членов ряда ( $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ). Оценку сдвига равновесия в ряду  $^{238}\text{U}$  и  $^{226}\text{Ra}$  можно получить, измерив активность нуклида  $^{234}\text{Pa}$  по  $\gamma$ -линии 1001,06 кэВ, являющегося третьим нуклидом в ряду  $^{238}\text{U}$  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  $^{234}\text{Pa}$  практически совпадает с активностью  $^{238}\text{U}$ . Результат позволяет рассчитать концентрацию равновесного  $^{235}\text{U}$  через природное изотопное соотношение.

Концентрацию неравновесной компоненты изотопа  $^{238}\text{U}$  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  $^{234}\text{Th}$ . 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  $^{231}\text{Pa}$  (семейства  $^{235}\text{U}$ ), и линии 63,9 кэВ, принадлежащей  $^{232}\text{Th}$ ; для линии 93 кэВ (в действительности дублет линий

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

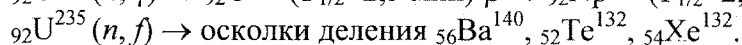
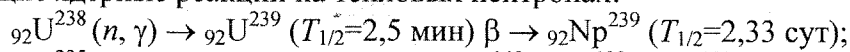
Второй способ основан на использовании нейтронно-активационного анализа для определения суммарной концентрации равновесной и неравновесной компонент. Раздельное определение урана в природных смесях  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  возможно, благодаря тому, что ядра атомов изотопа  $^{235}\text{U}$  делятся, главным образом, тепловыми нейтронами, а ядра атомов изотопов  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  – быстрыми, имеющими энергию выше пороговой, равной соответственно 1,4 и 1,3 МэВ. Сечение вынужденного деления ядер атомов  $^{235}\text{U}$  равно  $\sigma_f=582$  бн (на тепловых нейтронах),  $\sigma_f=1,45$  бн (на нейтронах спектра деления). А для ядер атомов  $^{238}\text{U}$  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  $\beta$ - и  $\gamma$ -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  $^{232}\text{Th}$ , что заметно усложняет определение концентрации  $^{238}\text{U}$ . В этом случае происходит регистрация детектором запаздывающих нейтронов не только от осколков деления  $^{238}\text{U}$ , но и от осколков деления  $^{232}\text{Th}$ . 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  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ . Учитывая, что в природе фракционирование изотопов  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  незначительно (отношение их концентраций постоянно и равно  $137,9 \pm 0,10$ ), можно по результатам двух сеансов облучения вычислить концентрации  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ , а также и  $^{232}\text{Th}$ . Если сравнить ядерные сечения деления этих трех элементов, то, очевидно, что при облучении их смесей нейтронами полного реакторного спектра, элементы  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  имеют сечение деления, более чем в 1000 раз меньшие, чем изотоп  $^{235}\text{U}$ . 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  $^{235}\text{U}$ . Это позволяет определять концентрации изотопов  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  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  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  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 ( $n, \gamma$ ) 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  $^{238}\text{U}$  в ядерном реакторе образуется изотоп  $^{239}\text{U}$  ( $T_{1/2}=2,3$  мин,  $E_{\gamma}=74,6$  кэВ), при распаде которого образуется  $^{239}\text{Np}$  ( $T_{1/2}=2,35$  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  $^{238}\text{U}$  с активностью третьего члена его радиоактивного ряда –  $^{234}\text{Pa}$ . Для этого необходимо экспонировать реперные образцы 3 – 5 ч, чтобы в аппаратурном гамма-спектре значимо проявился пик от  $^{234}\text{Pa}$ .

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

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

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

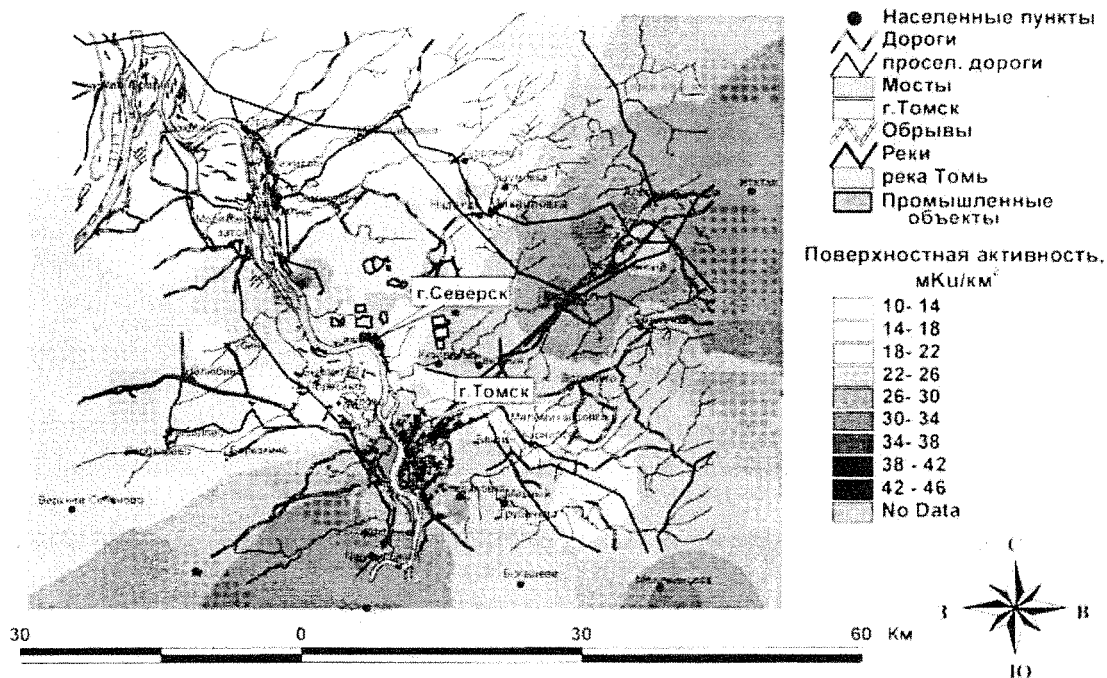


Рис. 2. Изораспределение удельной поверхностной активности равновесного изотопа  $^{238}\text{U}$

2. Методом запаздывающих нейтронов определяем общую концентрацию  $^{235}\text{U}$  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).

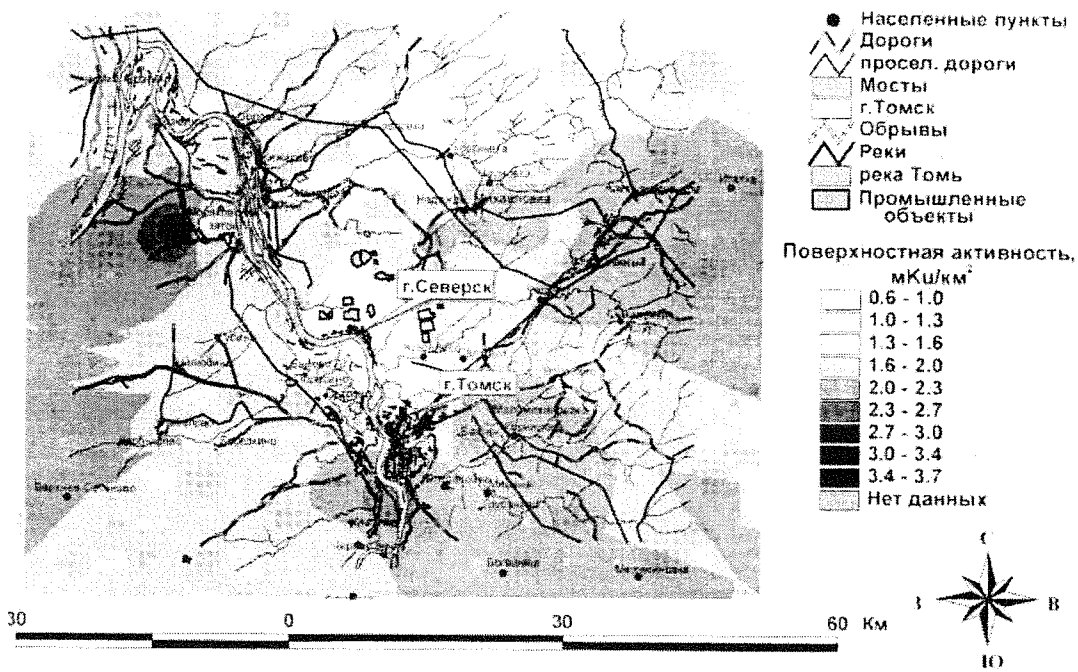


Рис. 3. Изораспределение удельной суммарной поверхностной активности изотопа  $^{235}\text{U}$

3. Нейтронно-активационным анализом определяем общую концентрацию  $^{238}\text{U}$  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.

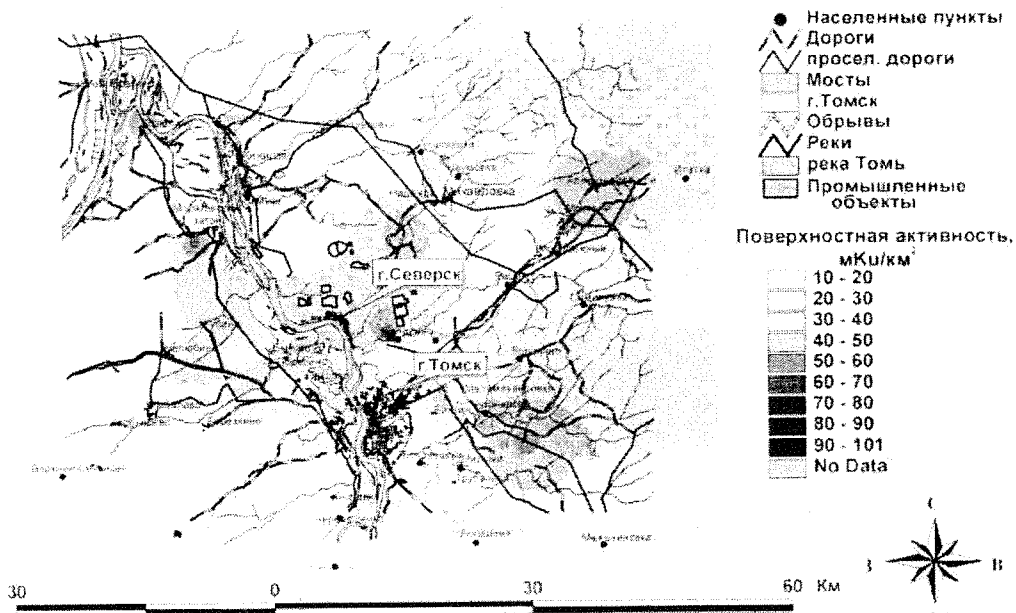


Рис. 4. Изораспределение удельной суммарной поверхностной активности изотопа  $^{238}\text{U}$

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

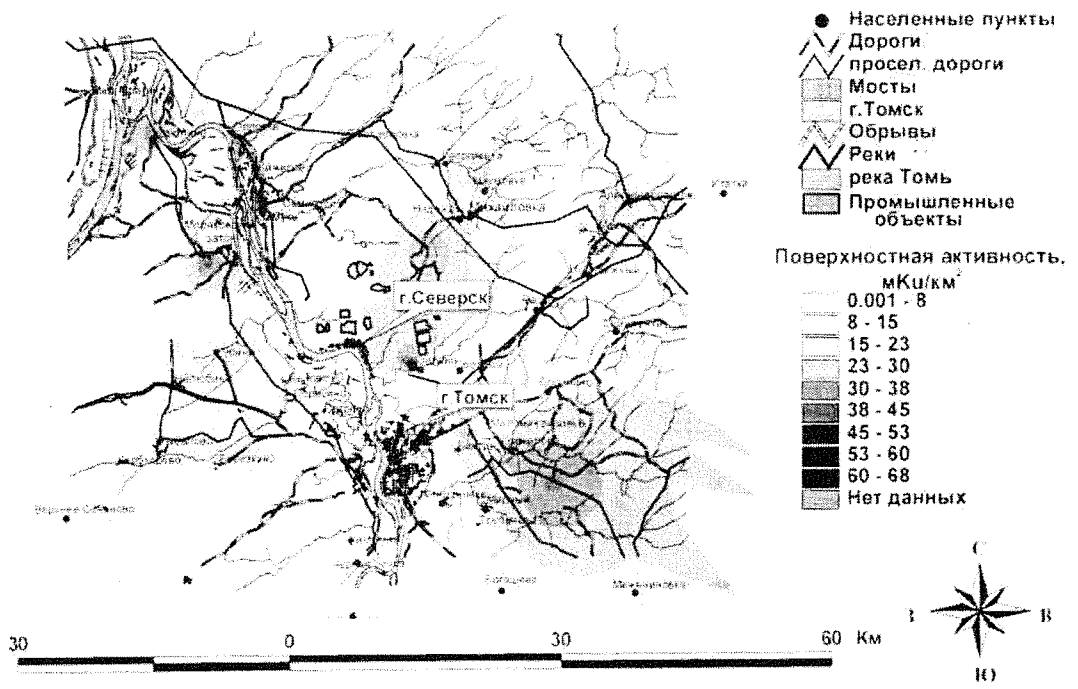


Рис. 5. Изораспределение удельной поверхностной неравновесной активности изотопа  $^{238}\text{U}$

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

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

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



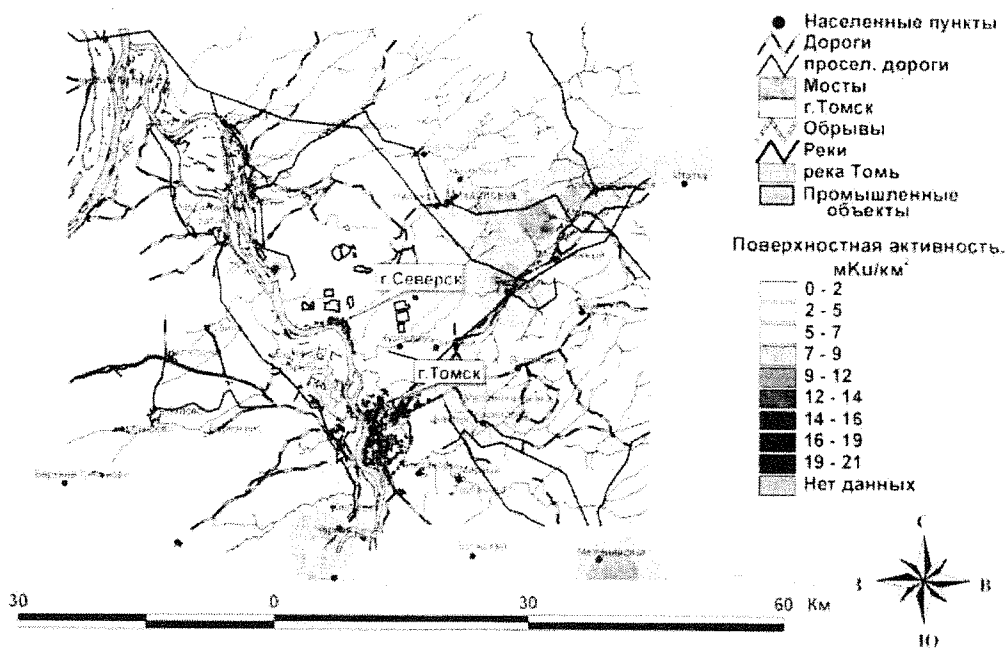


Рис. 6. Изораспределение удельной поверхностной привнесенной равновесной активности изотопа  $^{238}\text{U}$

8. По набору значений концентраций  $^{235}\text{U}$  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  $^{235}\text{U}$  (рис. 7):

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

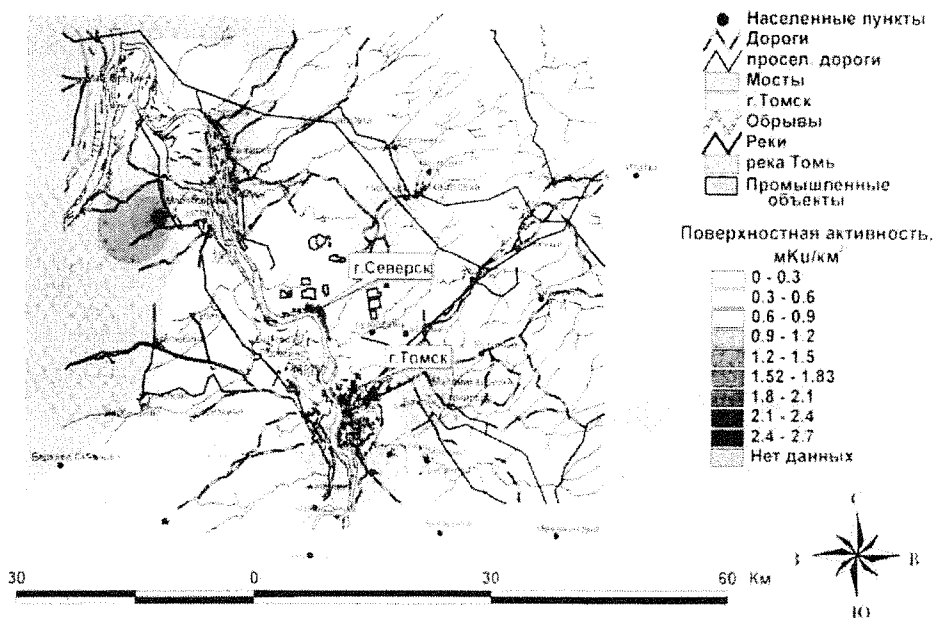


Рис. 7. Изораспределение удельной поверхностной неравновесной активности изотопа  $^{235}\text{U}$

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

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

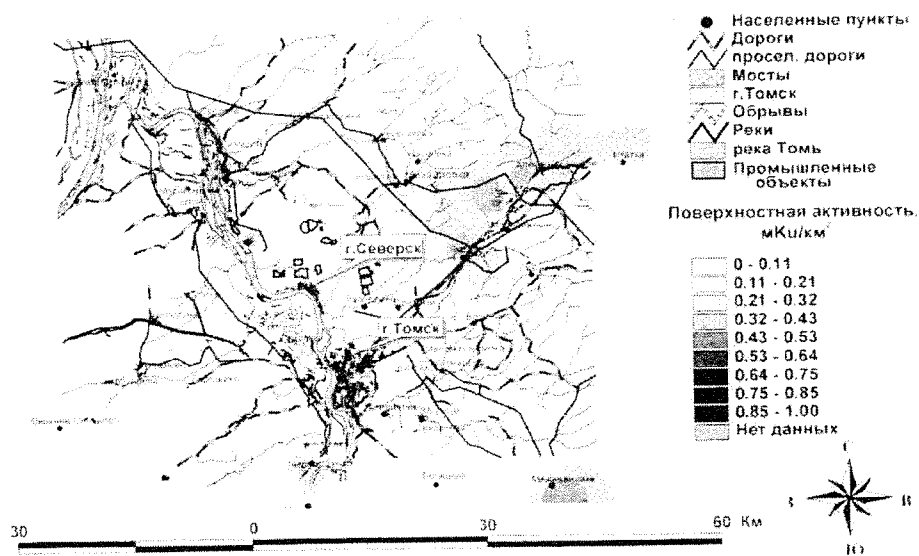


Рис. 8. Изораспределение удельной поверхностной привнесенной равновесной активности изотопа  $^{235}\text{U}$

## Заключение

1. Поверхностные удельные активности природного равновесного изотопа  $^{238}\text{U}$  велики, составляют всего лишь  $(10 - 70)$  мКи/км<sup>2</sup> (рис. 1), а изотопа  $^{235}\text{U}$  –  $(0,6 - 2,5)$  мКи/км<sup>2</sup> (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  $(5 - 20)$  мКи/км<sup>2</sup>.

## 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  $\gamma$ -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., Верховицкий 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.