

С.А. Тобратов, О.С. Железнова

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ЛАНДШАФТАХ РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ И ИХ ИНДИКАЦИОННОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Обобщены результаты полевых радиэкологических исследований, проведенных авторами в 2010–2011 годах. Показано, что местный радиационный фон и удельная активность естественных радионуклидов контролируются гранулометрическим составом почв, а эманации родона (^{222}Rn) могут служить индикаторами тектонической активности. Также установлено, что траектория чернобыльского радиоактивного следа в пределах Рязанской области существенно зависит от морфологической структуры ландшафтов. Предложена методика расчета канцерогенного риска, определяемого удельной активностью почвенных радионуклидов.

радиационный фон, естественные радионуклиды, ландшафты, рельеф, тектонические неоднородности, канцерогенный риск.

Не вызывает сомнений актуальность радиэкологических исследований в староосвоенных регионах Центра России, особенно в тех, где проявились последствия аварии на Чернобыльской АЭС. Однако часто техногенный вклад в радиоактивность существенно переоценивается, а роль естественных радионуклидов – радия (^{226}Ra), тория (^{232}Th) и калия (^{40}K) – вообще не учитывается. Значительная неопределенность имеется и в отношении пространственных закономерностей гамма-фона и удельной активности радионуклидов, а также количественных оценок их влияния на здоровье человека. Исходными данными при разработке указанных вопросов послужили результаты полевых исследований, проведенных сотрудниками лаборатории геохимии ландшафтов при кафедре физической географии Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (направление – «Геохимия», проект – «Эколого-геохимический потенциал ландшафтов Рязанской области и смежных регионов: оценка, оптимизация, управление»).

Радиационный фон территории является интегральной характеристикой всех радиэкологических процессов, включая накопление и миграцию естественных радионуклидов в почвенном покрове, радоновые эманации, влияние космических излучений и техногенного загрязнения. Столь сложный комплекс факторов, влияющих на величину гамма-фона, вполне вероятно «размывает» его пространственные закономерности, снижает значимость ландшафтных факторов, их определяющих, и делает колебания фона на территории преимущественно случайными. В число задач нашей работы входило выявление соотношений между случайными и закономерными факторами

радиационного фона. При этом анализ указанных закономерностей целесообразен при оценке экологических рисков для здоровья населения, связанных с канцерогенными эффектами, и выявления пространственной неоднородности данных рисков.

В марте 2010 года нами было предпринято обследование всей территории Рязанской области – измерение гамма-фона и его временной динамики. Измерения проводились при помощи дозиметра РКСБ-101 на высоте 1 м над земной поверхностью. Среднее время экспозиции дозиметра в каждой точке измерений составляло 12 минут. Всего было сделано 383 измерения, из них 42 – в долинах и 341 – на водоразделах, останцовых поверхностях, а также на антропогенных сооружениях: дорожных насыпях, в плотной городской застройке и т.д. Исследованиями были охвачены все типы ландшафтов Рязанской области. При интерпретации полученных данных использовался метод ключей, то есть считалось, что каждая точка характеризует некоторую территорию, единую в почвенно-геоморфологическом отношении. Как правило, границы таких единых территорий намечались заранее, до полевого этапа, и в пределах каждой из них производилось по крайней мере два измерения для выявления возможных внутренних различий, недоучтенных на подготовительном этапе.

Результаты исследований в картографической форме представлены на рисунке 1. Картографированию предшествовала статистическая обработка данных, в ходе которой установлено, что средний уровень гамма-фона для Рязанской области составляет 10,92 мкР/ч с коэффициентом вариации 11,8 процента, с минимальным значением 6,7 мкР/ч (елово-сосновый лес по левобережью реки Сынтулки у поселка Озерный) и максимальным значением 16,1 мкР/ч (пойма реки Оки у села Терехова). Таким образом, внутри региона радиационный фон различается почти в 2,5 раза.

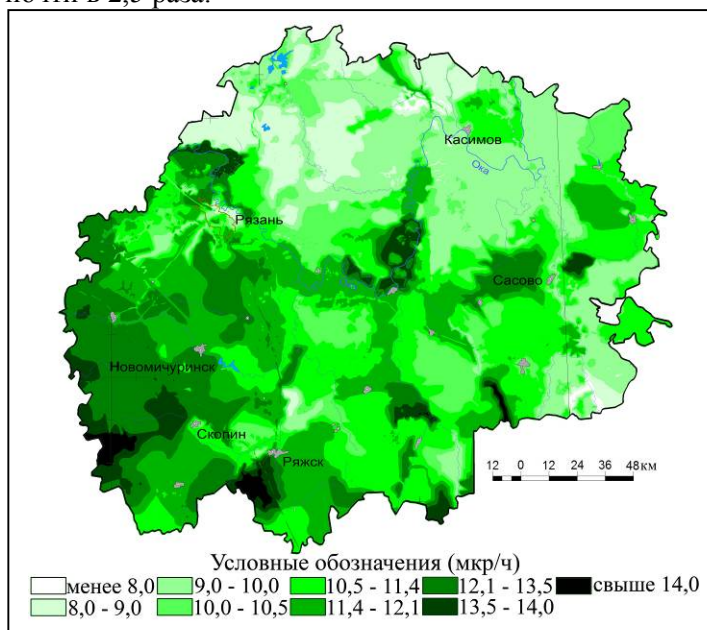


Рис. 1. Радиационный фон ландшафтов Рязанской области

Кривая распределения измеренных величин гамма-фона (рис. 2) близка к нормальной колоколообразной функции, однако выявляются элементы, осложняющие классическую форму колокола. С достаточно высокой четкостью обособляются, по крайней мере, три частных максимума с модами в 8,5, 10, 13,8 мкр/ч; с меньшей четкостью выделяется максимум с модальным классом 11,5 мкр/ч. Максимум около 10,8 мкр/ч соответствует среднерегionalной норме гамма-фона и является базовым для всей совокупности. Выявленные неоднородности кривой распределения использовались при формировании системы изолиний. Как видно из рисунка 1, распределение территорий с различным уровнем гамма-фона является неслучайным, такие территории образуют вполне определенные пространственные сочетания. Резкие ландшафтные границы, связанные со сменной литогенной основой, в первую очередь гранулометрического состава пород, характеризуются высокой плотностью изолиний гамма-фона. Ряд ландшафтных рубежей отличается повышенными значениями фонового излучения.

Неоднородность кривой распределения (частный минимум в области 10,5 мкр/ч) соответствует наиболее важному ландшафтному рубежу в пределах региона – границе между песчаными и суглинистыми почвами. Особенно низкие значения (менее 9 мкр/ч) гамма-фона отмечаются в центральной Мещере, преимущественно в пределах ландшафтов раннемосковского времени. Отличительной чертой этих территорий является формирование их литогенной основы на ранних этапах микулинского межледниковья, когда в условиях высоких скоростей потоков талых вод в Мещерском подпрудном бассейне откладывался наиболее крупнодисперсный материал, исходно бедный радионуклидами. Обычно это останцовые поверхности либо верхние части склонов основных мещерских ложбин стока. Центральная часть более возвышенного Тумского блока, где сохранилась перемытая морена, а также территории, прилегающие к Клепиковскому поозерью, сложенные тонкозернистыми, часто суглинистыми песками, характеризуются довольно высокой для Мещеры величиной гамма-фона – около 10 мкр/ч. Еще выше, до 10,4 мкр/ч, он увеличивается над крупнейшими торфяными аккумуляциями, например, на Красном болоте. На низинных болотных массивах фон ниже на 0,5–2 мкр/ч.

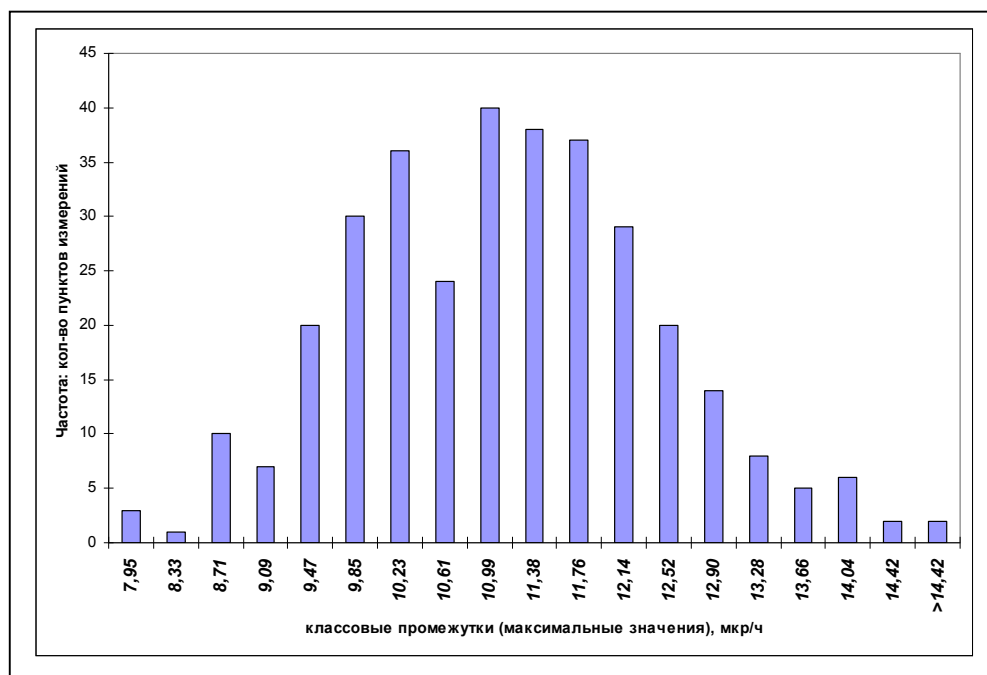


Рис. 2. Кривая распределения величин гамма-фона

В юго-восточной Мещере, сложенной валдайскими легкими суглинками, гамма-фон возрастает до 10,3–11,5 мкр/ч с дальнейшим увеличением к пойме Оки. При этом изолиния 10,5 мкр/ч достаточно четко разграничивает преимущественно песчаные и суглинистые почвы. В местных западинах, приуроченных к доплейстоценовому руслу Оки, гамма-фон за счет аккумулятивных процессов локально повышается до 11 мкр/ч. К югу от долины Оки величина гамма-фона менее 10,5 мкр/ч наблюдается в пределах днепровских зандров (в той их части, где они не затронуты переработкой флювиальными процессами). При этом величина фона на зандрах стабильно выше, чем в Мещере, и колеблется в пределах 9,8–10,5 мкр/ч. Исключением являются террасы некоторых крупных рек (например, Рановы и Кермиси), где зандровые пески были существенно перемыты и радиационный фон падает до «центрально-мещерских» значений – около 8 мкр/ч.

С утяжелением механического состава водораздельных почв возрастает и гамма-фон, при этом диапазон значений – 10,5–11,2 мкр/ч – обычно соответствует переходным зонам между ландшафтами разных типов: переходу от Сынтульского полесья к Касимовскому ополью, северной периферии Азеевского ополья, периферийным частям Раново-Пронского зандра, к зоне трансгрессии поймы Оки в окрестностях Рязани и т. д. К указанным территориям примыкает существенная часть Окско-Донского плоскоместного водораздела, приуроченная к плиоценовой долине пра-Дона (Ергень-реки) и его притоков, сложенная мощной (50 м и более) толщей древнеаллювиальных песков. Господствующими на водоразделе почвами являются суглинистые черноземы, и можно было бы ожидать больших величин гамма-фона, однако этого не происходит вследствие влияния коренных пород. Там, где они размыты четвертичными эрозионными процессами, и к поверхности близко подходят юрские глины, и, кроме того, имеется достаточно активный тектонический рубеж (район Канино – Малый Сапожок – Кривель и далее к северу), радиационный фон возрастает на 1–1,5 мкр/ч, достигая значений, превышающих 12 мкр/ч, то есть

уровня, наиболее типичного для суглинистых почв, особенно черноземного типа. Такие значения преобладают на юго-западе области и – локально – на востоке в пределах Сасовского района, где черноземы, подстилаемые юрскими глинами, заходят наиболее далеко на север. К указанным значениям приближается фон, характерный для центральных частей Азеевского и Касимовского ополей.

Сопоставление полученных в 2010 году полевых данных с картой радиоактивного загрязнения, которая составлялась по результатам вертолетной гамма-съемки территории области в конце 1980-х годов, позволяет заключить, что в некоторых случаях наблюдается соответствие аномально высоких значений гамма-фона с конфигурацией ареалов загрязнения, примером чего может служить территория в верховьях Прони, в районе села Салтыки, возможно также к северо-западу от поселка Чучково. Однако несоответствий между двумя картами существенно больше: например, выраженные максимумы в районе села Муравлянка Скопинского района, села Троицкого Сараевского района, а также села Малахова Клепиковского района никак не связаны с чернобыльским радиоактивным следом. Два последних максимума, по всей видимости, обусловлены радоновыми эманациями в активных частях тектонических разломов на границах соответственно участка долины пра-Дона (район села Троицкого) и Тумского тектонического блока (район села Малахова). Аномалия в районе Муравлянки приурочена к рудопроявлениям радиоактивных элементов в смежной Тульской области.

Урочища и ландшафты долин существенно отличаются друг от друга по величине гамма-фона, что определяется условиями гидродинамики. Максимальные величины гамма-фона отмечаются на участках поймы Оки, совпадающих с активными современными прогибами, например, на Шиловском пойменном расширении в контурах Рязано-Костромского прогиба главным образом потому, что здесь создаются наиболее благоприятные условия для аккумуляции тяжелосуглинистого аллювия. К востоку от Ковров-Касимовского плато, где на водоразделах преобладают песчаные и легкосуглинистые почвы, фон в пойме Оки снижается на 3,5–4 мкp/ч. В верховьях малых рек преобладают эрозионные процессы и аллювий имеет более легкий состав, поэтому и фон в их контурах обычно понижен. Исключениями являются долины малых рек Алешина (Сараевский район) и Вобша (Шацкий район). Причины относительно высоких значений фона, превышающего 14 мкp/ч, могут быть обусловлены радоновыми эманациями в тектонически активных структурах (что наиболее вероятно для долины Алешины) или рудопроявлениями урана (последние неоднократно фиксировались в Шацком районе). Повторно проведенные нами замеры гамма-фона в долинах указанных малых рек в июле 2010 года показали высокую стабильность его повышенного уровня: вновь полученные значения составили соответственно 14,4 и 21,7 мкp/ч.

Согласно этим данным лесные массивы в большинстве случаев несколько снижают величину радиационного фона в сравнении с прилегающими к ним открытыми пространствами очевидно вследствие того, что аккумуля-

ляция растениями всех радионуклидов, кроме радия, незначительна. Однако данное снижение в целом невелико, а в условиях сомкнутого полога еловых лесов может отсутствовать. Большинство антропогенных сооружений, состоящих из известняка, песка и других материалов с низким содержанием радионуклидов, отличаются относительно пониженным радиационным фоном, причем разница с окружающими природными территориями может иногда превышать 1 мкр/ч.

Таким образом, в пространственной картине гамма-фона Рязанской области четко проявляются ландшафтные закономерности, в подавляющем большинстве случаев связанные с вариациями литогенной основы, главным образом механического состава почв и пород. Если местные внутриландшафтные процессы приводят к перераспределению пород по территории, то это влияет на величину фона. По этой причине минимальным фоном характеризуются почвы на песчаных субстратах раннемосковского времени, а максимальным – тяжелосуглинистые черноземы и аллювиальные почвы в крупных тектонических прогибах при условии преобладания суглинков на водоразделах. Радиационный фон в западинах взаимосвязан с фоном окружающей территории, но всегда выше его на 0,5–1 мкр/ч. Определенный вклад в фон локально могут вносить радоновые эманации. Влияние загрязнения чернобильским цезием неоднозначно и чаще вообще не проявляется.

Тектоника является неотъемлемой частью литогенной основы ландшафтов, определяя главным образом конфигурацию природных рубежей, а также «ландшафтных ядер». При этом границы ландшафтов и природно-территориальных комплексов иного ранга вследствие приуроченности к тектонически ослабленным зонам характеризуются высокой интенсивностью потоков вещества. Интенсивность потоков особенно велика, если по разные стороны рубежа имеют место высокие градиенты вследствие объективных различий близко расположенных ландшафтов. Все это определяет приуроченность к пограничным зонам водных потоков, и чем выше ранг природных комплексов, разделяемых данным рубежом, тем больший порядок водотока в нем можно наблюдать. Следовательно, конфигурация тектонически ослабленных зон разного ранга в первом приближении дается рисунком речной сети. Однако такой рисунок часто не отражает современных тенденций в развитии рубежей и их отдельных участков. В частности, некоторые водотоки могут подвергаться заболачиванию и отсутствовать на картах гидросети как самостоятельные потоки, что для Мещеры является обычным. Но это не означает отсутствия активности соответствующего рубежа. Некоторые рубежи продолжают на водоразделах, где трассируются, например, цепочкой суффозионных западин либо временными водотоками, либо неоднородностями почвенного покрова. Поэтому карта гидросети информативна, но все же не содержит достаточно сведений о тектонических рубежах.

Одним из наиболее мобильных в природной среде элементов является ^{222}Rn – газ эндогенного происхождения, член радиоактивного ряда урана – радия. Изотопы радона актинон и торон представляют иные радиоактивные ряды и, обладая на порядок меньшим периодом полураспада, менее устойчивы в окружающей среде.

«Истинный» ^{222}Rn , порождаясь радиоактивным распадом в недрах, диффундирует через толщу горных пород, и его поток, как и поверхностные водные потоки в ландшафте, наиболее интенсивен в тектонически ослабленных зонах.

Одним из косвенных методов геологической разведки, направленных на поиски разломов и некоторых месторождений, является эманационный метод, основанный на измерении интенсивности радоновых эманаций. Косвенным показателем такой интенсивности могут служить колебания естественного радиационного фона. Это связано с тем, что природный гамма-фон складывается из трех основных источников: распада почвенных радиоизотопов (около 40 процентов фона), влияния космических лучей (менее 20 процентов) и вклада эндогенного радона (свыше 40 процентов). При этом первые два источника чрезвычайно стабильны и не обеспечивают значительных вариаций радиоизлучения. Если такие вариации наблюдаются, то они связаны с радоновыми эманациями. Согласно классической статистической закономерности, чем мощнее процесс, тем выше коэффициент вариации и стандартные отклонения ¹.

Опираясь на данную закономерность, мы предприняли попытку на основе данных полевых измерений радиационного фона и их колебаний во времени косвенным путем оценить эманации и соответственно активность эндогенных процессов в точках наблюдений. Приведенные выше данные измерений гамма-фона позволили рассчитать и картировать не только средние значения величины радиационного фона в каждой точке измерений, но и их стандартные отклонения. Полученная совокупность стандартных отклонений была подвергнута вариационному анализу (рис. 3).

Как видно из рисунка, кривая распределения далека от классической формы колокола, которая наблюдалась бы в случае полной однородности природной среды. Колебания стандартных отклонений не случайны, и можно выделить несколько групп значений при расчленении вариационной кривой. В частности, правая часть кривой начиная со значений $1,15 \text{ мкр/ч}$ и более, обеспечивает заметную правую асимметрию распределения и фактически состоит из двух слившихся совокупностей с модальными значениями $1,3$ и $1,8 \text{ мкр/ч}$ (участок *в* на рис. 3). По нашему предположению, территории, где получены такие значения, можно ассоциировать с тектонически активными рубежами, где эманации радона значительно выше среднерегionalных величин. Заметно обособленную совокупность в области минимальных значений стандартного отклонения от 0 до $0,45 \text{ мкр/ч}$ с модальным классом $0,20 \text{ мкр/ч}$ (участок *а* на рис. 3) можно в свою очередь увязать с тектонически спокойными территориями, представляющими собой ядра ландшафтных структур. Территории, где стандартные отклонения гамма-фона находились в диапазоне от $0,45$ до $1,15 \text{ мкр/ч}$ (участок *б* на рис. 3), являются переходными зонами, примыкающими в зависимости от величины сигмы либо к тектонически стабильным ядрам, либо к активным рубежам.

¹ Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М. : Академия, 2004. 416 с.

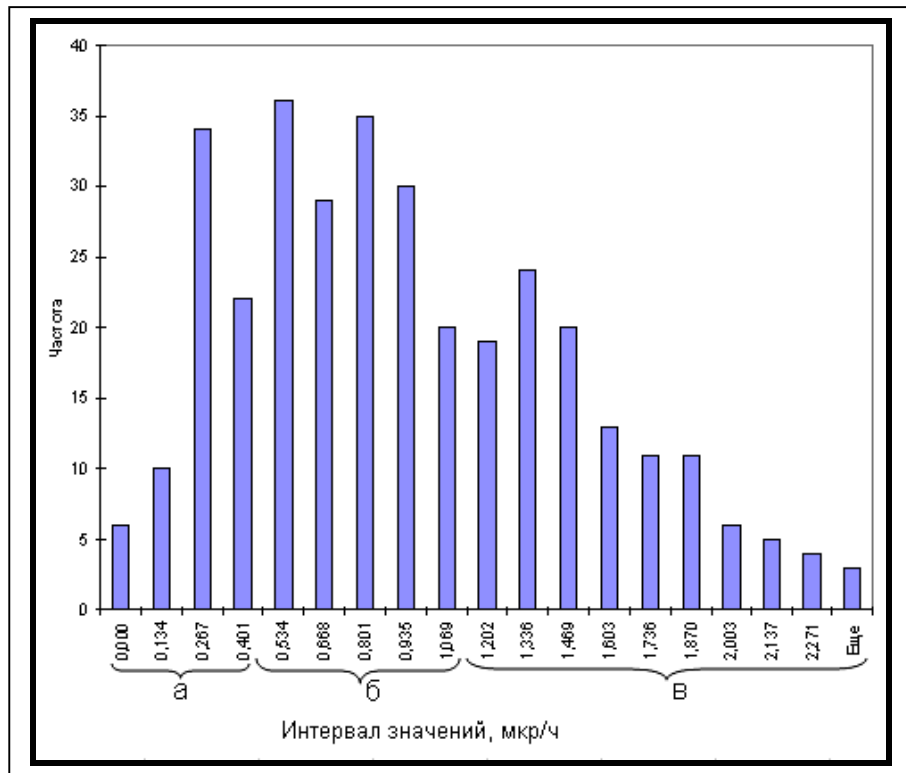


Рис. 3. Кривая распределения стандартных отклонений величины радиационного фона

При картировании стандартных отклонений фона было выявлено, что максимальные их величины четко группируются в линейно вытянутые структуры, территориально соответствующие рубежам, устанавливаемым по геофизическим данным, а также по данным регионального геоморфологического анализа (рис. 4). Такое соответствие свидетельствует о том, что примененный нами метод с высокой степенью достоверности позволил воспроизвести пограничный эффект, связанный с тектоническими рубежами. Более того, полученная информация, по нашему мнению, дает возможность получить дополнительные данные о современной активности рубежей, которая не может быть установлена при анализе таких преимущественно статичных объектов, как неоднородности слоев горных пород или формы рельефа. Действительно, ряд геоморфологических рубежей может быть реликтовым и в настоящее время активно не развиваться.

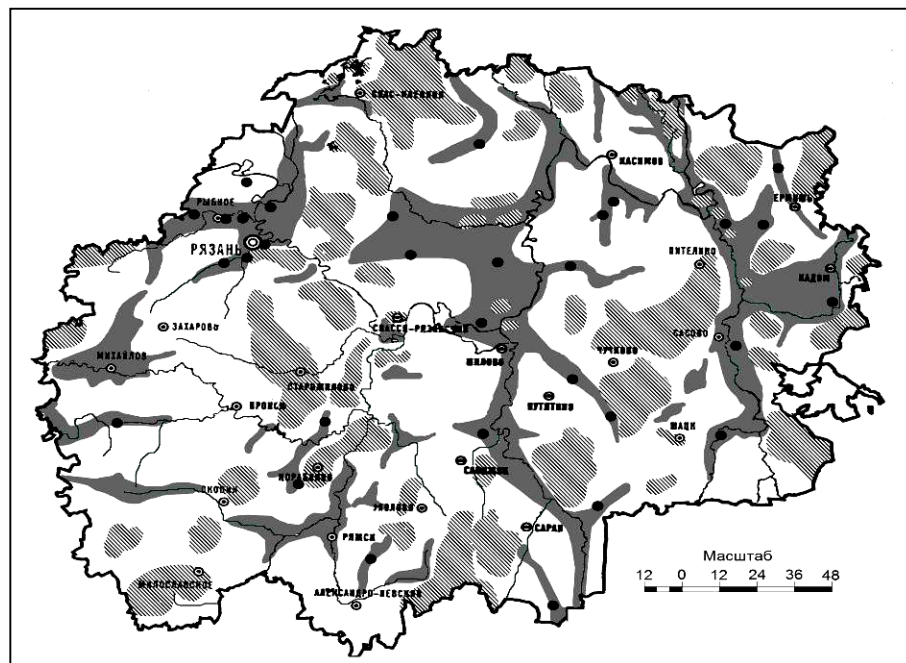


Рис. 4. Картосхема стандартных отклонений гамма-фона

На основе анализа карты стандартных отклонений гамма-фона можно сделать следующие выводы.

1. Наибольшая активность проявляется по линии «река Гусь – среднее течение Оки – верховья Пары», то есть в пределах неогенового Токаревского прогиба; по линии «Елатьма – низовья Мокши – среднее течение Цны», то есть в пределах Пензо-Муромского прогиба; на участке долины Оки при впадении в нее рек Солотчи, Вожи, Трубежа и далее в сторону Михайлова, то есть в пределах тектонически активного Вожского блока; в верховьях рек Керди, Прони, Верды; в районе Рязской поймы Рановы и на прилегающих территориях; в верховьях реки Хупты и по рекам Вердице, Сынтулке и Унже; в Клепиковском озере; по периферии Тумского блока, который ограничивается долинами рек Курши и Нармы; по внешней периферии юго-восточной Мещеры от устья При до устья Листвянки; по природному рубежу, совпадающему с долиной Тырницы, и на ряде других территорий.

2. Тектонически стабильными представляются центральные части крупных тектонических неоднородностей: Тумского блока, центрального элемента Окско-Цнинского плато и, кроме того, погребенные участки некоторых древних долин и инверсионные структуры рельефа (камовое поле на периферии Среднерусской возвышенности; Окско-Донское плоскоместье, частично совпадающее с долиной пра-Дона; Шевырляевский ландшафт, сформировавшийся в пределах

долины одного из притоков пра-Дона (возможно, пра-Мокши), выполненной мощной толщей неогеновых песков).

Таким образом, как и следовало ожидать, наибольшая тектоническая активность, фиксируемая вариантом эманационного метода, приурочена к долинам. При этом некоторые погребенные долины, являющиеся наследием иных тектонических этапов развития территории, не проявляют активности в настоящее время и даже перешли на водораздельный режим (Окско-Донской водораздел, Шевырляевский ландшафт; Пронско-Рязанское поднятие и т.д.). Зафиксированы также области повышенной интенсивности эманаций, где долины еще не сформировались, но присутствуют такие характерные элементы рельефа, как суффузионные западины (например, территория между Щацком и Сараями к северо-востоку от характерного излома русла реки Пары, граница Азеевского оползня к западу от поселка Ермишь, а также граница Шевырляевского ландшафта по линии «село Липяной Дюк – город Сасово»). Повидимому, на указанных территориях следует ожидать активизации эрозионных процессов как необходимого следствия пограничных эффектов ландшафтов.

Согласно изложенному выше стандартные отклонения гамма-фона косвенно характеризуют объемную активность радона в приземном воздухе. Еще более информативными при определении неотектонической активности ландшафтных рубежей могут быть концентрации радона в водотоках, приуроченных к разломам, особенно с учетом того, что с разломами разного ранга ассоциированы практически все основные ландшафтные рубежи. Установить современный тектонический статус разломов в условиях равнинного рельефа, как правило, весьма сложно. Однако существует необходимость в проведении такого рода анализа, поскольку неотектоника во многом определяет направленность и скорость эволюции природных комплексов и соответственно их природного потенциала.

В этой связи в феврале – марте 2011 года нами были предприняты полевые исследования, в ходе которых изучалась удельная активность радона в основных водотоках центра Рязанского региона. Районом исследований была выбрана территория на границе трех крупнейших морфоструктур: Мещерской низменности, Окско-Донской равнины и Среднерусской возвышенности. Объективной границей Мещеры является современное русло Оки, которое заложено по системе тектонических неоднородностей, отделяющих наиболее пониженную Мещеру от более возвышенной южной части Рязанской области. В пределах Мещерской низины достаточно четко обособлены юго-восточная и северо-западная части, в пределах которых эволюция ландшафтов идет несколько по-разному. Северо-западная Мещера более возвышена; для нее характерно наличие плейстоценовых термокарстовых котловин и их активное заболачивание; преобладает верейно-котловинный рельеф. Юго-восточная Мещера более снижена, рельеф плоский, значительное распространение имеют легкие суглинки, господствуют мелколиственные леса; заболачиванию подвергаются не котловины, а древние

эрозионные врезы, поэтому конфигурация болот не округлая, а вытянутая; характерны процессы трансгрессии поймы Оки.

Окско-Донская равнина в пределах района исследований представлена двумя небольшими участками: Рака-Тысьинским блоком, испытывавшим в прошлом дифференцированные вертикальные движения (современный его тектонический статус проблематичен) и асимметричным Старорязанским плато, активное современное воздымание западной части которого не вызывает сомнений. Наиболее внутренне разнообразна по структуре Среднерусская возвышенность, в пределах которой в границах района исследований выявляются воздымающиеся (Константиновский блок) и опускающиеся территории (Вожский блок, Михайлово-Рязанская депрессия). Проблематичен и статус Пронско-Рязанского поднятия, которое на своей значительной площади представлено камовым полем, сформировавшимся в днепровскую эпоху. Здесь часто камовые холмы наложены на отрицательные тектонические структуры и некоторые участки указанного поднятия представляют собой пример инверсионного рельефа, где значительная высота над уровнем моря может сопровождаться тенденцией к их опусканию, либо тектонической стабильностью.

В ходе исследований нами отобрано 57 образцов поверхностных вод, в которых была определена удельная активность радона с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра УСК «Гамма-Плюс» с программным обеспечением «Прогресс». При анализе мы исходили из того, что поверхностные воды являются наиболее информативными природными объектами для исследования радоновых эманаций, поскольку, во-первых, водотоки закладываются исключительно по тектоническим разломам, а во-вторых, в поверхностных водах не наблюдается столь высоких колебаний активности радона, как в воздухе, и его концентрация хорошо осредняется. При интерпретации результатов мы учитывали также и то, что радон как неустойчивый компонент поверхностных вод выделяется из них даже при небольших механических воздействиях. В этой связи пробы поверхностных вод отбирались с максимальной аккуратностью, не допускалось пробулькивание проб. Считалось закономерным, что в крупных водотоках концентрация радона будет ниже, чем в мелких, вследствие значительной их транзитности, малой связи с грунтовыми водами местного ландшафта, а также высокой скорости течения, зашугованности некоторых участков русла. Учитывалось также, что в быстро текущих малых реках (например, река Серебрянка на Старорязанском плато) концентрация радона снижается вследствие трения. Кроме того, как и ожидалось, не были зафиксированы высокие концентрации радона в озерах и реках Мещеры, а также в пойменных озерах, поскольку данный элемент эффективно поглощается торфами и сапропелями и даже при наличии эманации остается в донных отложениях и не переходит в воду.

Результаты лабораторных измерений удельной активности радона были подвергнуты вариационному анализу (рис. 5), в ходе которого выявлено, что выборка распадается на 4 совокупности. Это свидетельствует о том, что были изучены 4 принципиально различных по уровню радоновых эманаций группы природных объектов.

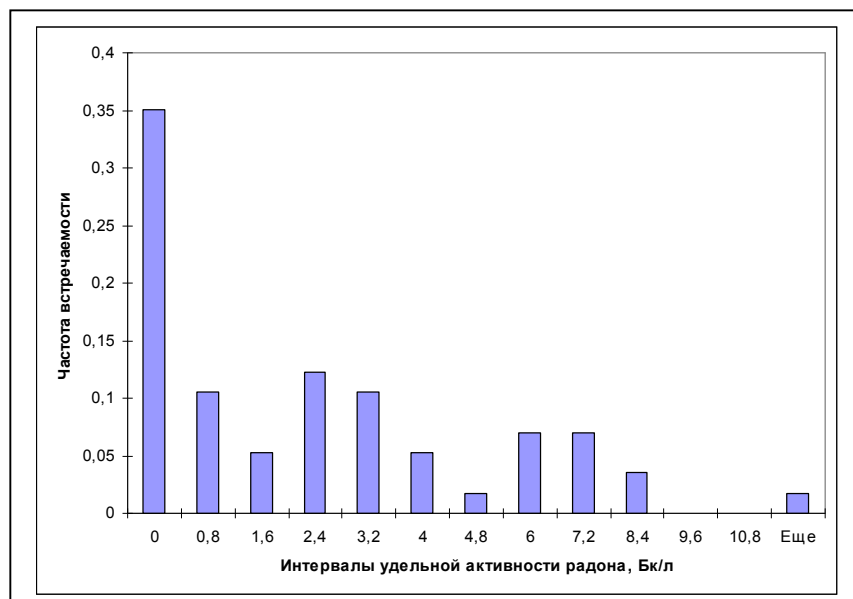


Рис. 5. Кривая распределения удельной активности радона в поверхностных водах центра Рязанской области

Наиболее многочисленной оказалась группа с уровнем удельной активности радона ниже 1 Бк/л; большинство водотоков этой части выборки имели нулевую или отрицательную активность радона. Исходя из этого данные природные объекты следует ассоциировать с областями современных тектонических опусканий, территориальная приуроченность которых показана на рисунке 6.

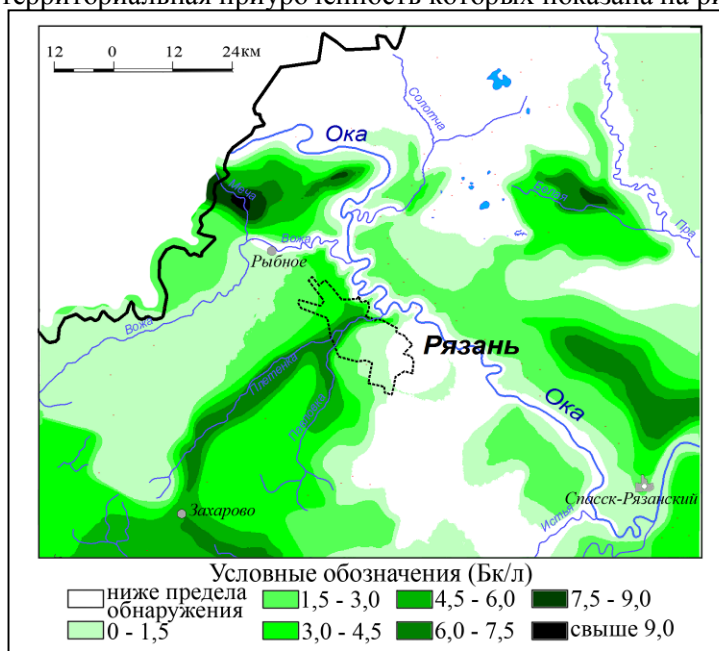


Рис. 6. Удельная активность радона
в поверхностных водах центральной части Рязанской области

Хорошо заметно, что в данную совокупность природных объектов попали водотоки северо-западной Мещеры, а также малые реки рубежа Среднерусской возвышенности и Окско-Донской равнины. По указанным выше причинам к ним относятся также воды реки Оки (на большей части территории исследования, кроме участка Старорязанского плато), реки Вожи в низовьях, реки Пры, всех мещерских озер, а также большинства крупнейших торфяных массивов Мещеры.

Наибольший интерес представляют территории, где активность радона превысила 4 Бк/л . Как следует из кривой распределения, они занимают изолированное положение, формируют особую совокупность и территориально соответствуют тектонически активным зонам, разделяющим разнонаправленно движущиеся блоки литосферы и обладающим наибольшей современной тектонической активностью. Анализ составленной нами карты удельной активности радона позволил закартировать такие структуры (рис. 7).

Большинство выявленных структур обладают сходным простиранием. Выявляются две группы взаимно параллельных разломов – простирающихся соответственно с юго-запада на северо-восток и с северо-запада на юго-восток. К первой группе относятся, в частности, участки долины Прони и Оки к востоку от города Спасска-Рязанского (соответствуют разлому, который разграничивает воздымающееся Старорязанское плато и опускающийся Пронско-Спасский блок), долина Плетенки (соответствует пограничному линеаменту между Пронско-Рязанским поднятием и Вожским блоком, которые в настоящий момент также движутся разнонаправленно), участок долины Оки в районе Солотчи (на восточной периферии воздымающегося Константиновского блока). «Второстепенные» представители первой группы с относительно пониженной удельной активностью радона ($3\text{--}4 \text{ Бк/л}$) – это структура, которой соответствует долина Тысьи, а также небольшие линеаменты, по которым заложилась река Клещевая, Пилис и другие, стекающие с внешней периферии Среднерусской возвышенности, а также некоторые водотоки в пределах упомянутого выше камового поля. Вторую группу формируют линейные структуры, которым соответствуют долины рек Истья и Жраки на Среднерусской возвышенности, ручья Сосенка на северо-востоке Константиновского блока, рек Белой и Ураж на Мещерской низменности и особенно системы линеаментов от долины реки Меча до низовьев реки Кишня. Последняя из указанных структур соответствует древней доплейстоценовой долине Оки. В пределах Рязанского пойменного ландшафта данная структура совпадает с современной поймой Оки, но степень выраженности ее здесь меньше.

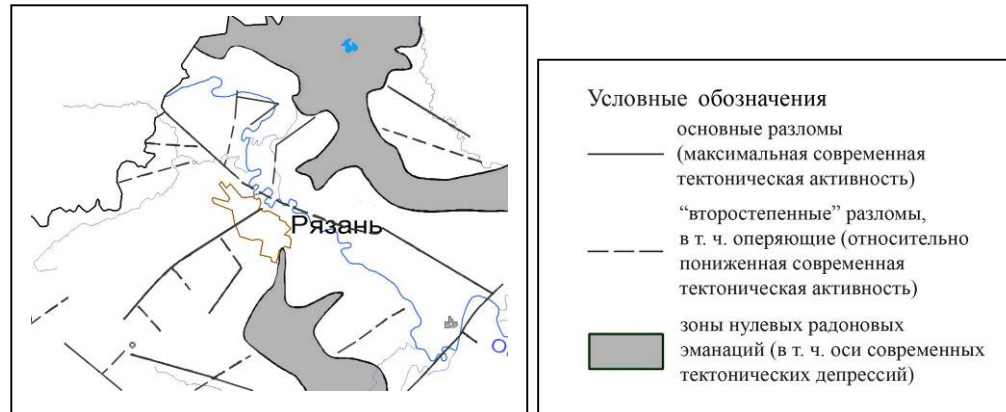


Рис. 7. Тектонические неоднородности, выявленные при анализе радоновых эманацій

Следовательно, доплейстоценовая структура продолжает активное тектоническое развитие, хотя русло Оки в настоящее время наследует несколько иные линеаменты. Особенно высокие радоновые эманації зафиксированы нами в долине реки Меча – до 11 Бк/л, что соответствует американскому гигиеническому нормативу концентрации радона в объектах хозяйственно-бытового водопользования. Это обстоятельство вполне закономерно, поскольку долина Мечи не просто разграничивает воздымающийся Константиновский блок и погружающийся Вожский, но территориально соответствует очагу наиболее интенсивного погружения последнего.

Примечательно, что на втором месте по концентрации радона находятся воды реки Ураж на юго-восточной периферии Солотчинско-Деулинского ландшафта (7,5 Бк/л), что абсолютно не типично для подавляющего большинства водотоков Мещеры вследствие поглощения радона торфяниками. Несмотря на то, что воды реки Ураж также формируются за счет дренирования болотных массивов, удельная активность радона там принципиально выше, что является индикатором высокой тектонической активности на границе северо-западной и юго-восточной Мещеры и свидетельствует о справедливости высказанных выше соображений об автономном характере их ландшафтного развития.

Вышеизложенное свидетельствует о том, что максимальная тектоническая активность проявляется на границах разнонаправленно движущихся структур литосферы. Процессы на этих границах приводят к активизации миграции вещества, что, в частности, проявляется в усилении водообмена (закладывании по указанным границам долин рек), а также в увеличении радоновых эманацій. Обычно это сопровождается усилением эрозии, оползнеобразованием и т.д. Именно территории, прилегающие к таким структурам, характеризуются усилением как положительных, так и негативных эффектов

эмиссии радона из недр; иные территории в этом отношении существенно более нейтральны. К таким «нейтральным» территориям относятся и районы былой тектонической активности: в частности, древние разломы, по которым дифференцированных тектонических движений сейчас не наблюдается. Примером таких структур могут быть долины рек Вожи (в верховьях) и Рака, приуроченные к древним разломам, которые старше современной долины Оки в несколько раз, но не проявляют признаков современной тектонической активности. Также нами установлено, что наибольшая активность в пределах Константиновского блока наблюдается в его северо-восточной части, где, в частности, имеется несколько восходящих родников, например источник в селе Пощупове, с удельной активностью радона до 8,4 Бк/л. Выявлено наличие крупной субмеридиональной системы тектонических опусканий, ось которой примерно соответствует 40° восточной долготы и протягивается от Клепиковского поозерья через Красное болото на юг, где она формирует пограничную зону между Среднерусской возвышенностью и Окско-Донской равниной. Здесь наблюдаются нулевые радоновые эманации. Опускания в пределах указанной территории активизируют компенсационное поднятие окружающих блоков, в том числе относительно слабое воздымание Рака-Тысьинской структуры и более существенное – Пронско-Рязанского поднятия. Тем самым установлено, что указанное выше камовое поле в пределах данного поднятия не является тектонически стабильной либо опускающейся территорией, а проявляет тенденции современного воздымания, эрозионного расчленения и т.д. Уточнен тектонический статус Рака-Тысьинского ландшафта: слабое воздымание в его восточной части и тенденция к опусканию – в западной.

Дифференциация в почвах естественных радионуклидов (табл. 1 и рис. 8) полностью определяется гранулометрическим составом почв: в зональных суглинистых почвах юга области их удельная активность в 2–7 раз выше, чем в песчаных и органогенных почвах Мещеры (максимальные различия свойственны торью – ^{232}Th). Техногенный цезий (^{137}Cs) тяготеет к ненарушенным почвам, где отсутствует «эффект разбавления» при распашке, особенно в условиях выраженного аккумулятивного режима и наличия факторов сорбции (например, высокомолекулярной органики), поэтому отчетливые максимумы его накопления приурочены к лесным массивам, торфяникам, но главным образом к западинам.

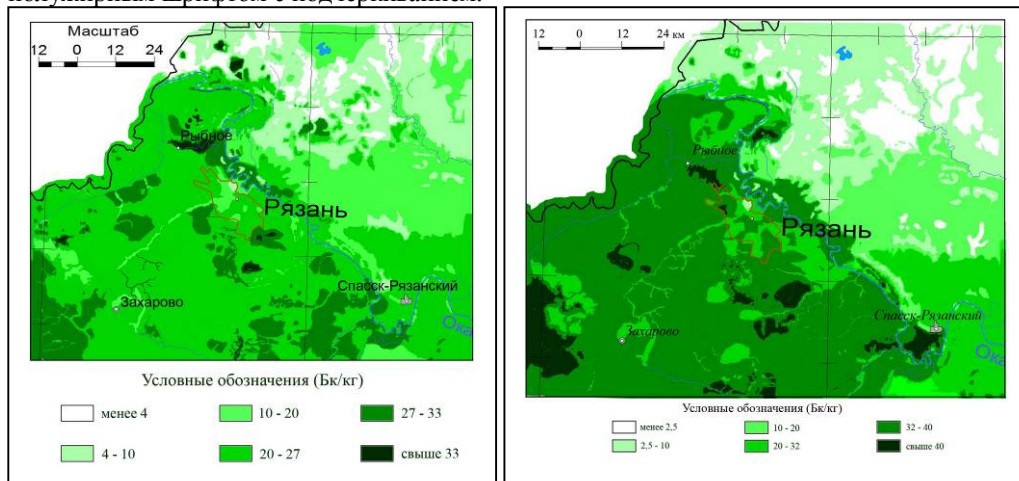
Таблица 1

Дифференциация естественных радионуклидов в почвах центра Рязанской области в зависимости от условий почвообразования (по результатам дисперсионного анализа)

Почвенные группировки	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
-----------------------	-------------------	-------------------	-----------------

Мецера	Дерново-подзолистые автоморфные песчаные	<u>11,2</u>	<u>5,7</u>	<u>154,0</u>
	Гидроморфные (в основном болотно-подзолистые)	<u>10,9</u>	<u>7,0</u>	<u>161,2</u>
	Агродерново-подзолистые (бывшие поля, пастбища)	<u>13,9</u>	13,4	246,2
	Болотные торфяные	<u>14,7</u>	<u>7,6</u>	<u>102,6</u>
Оско-Донская равнина, Среднерусская возвышенность	Суглинистые автоморфные пахотные (агросерые лесные и агрочерноземы)	26,2	<u>35,8</u>	503,9
	Суглинистые почвы овражно-балочного комплекса	<u>25,1</u>	33,8	457,8
	Суглинистые зональные ненарушенные (в лесных экосистемах)	<u>28,9</u>	<u>35,1</u>	<u>508,8</u>
	«Западинные подзолы»	27,6	32,2	531,0
Поймы	Аллювиальные суглинистые	24,4	32,1	427,4
	Песчаный русловой аллювий Оки, Пры, Солотчи	<u>9,1</u>	<u>8,4</u>	<u>175,7</u>
Почвы в черте г. Рязани		21,4	30,6	442,4

Примечание. Результаты LSD-тестирования дисперсионных комплексов: статистически достоверные (на уровне значимости $< 0,05$) минимумы концентраций и подвижности ТМ – курсивом с подчеркиванием; высокие средние значения, достоверно отличающиеся от минимальных и недостоверно от большинства остальных средних – полужирным шрифтом; абсолютные максимумы, достоверно различающиеся со всеми средними – полужирным шрифтом с подчеркиванием.



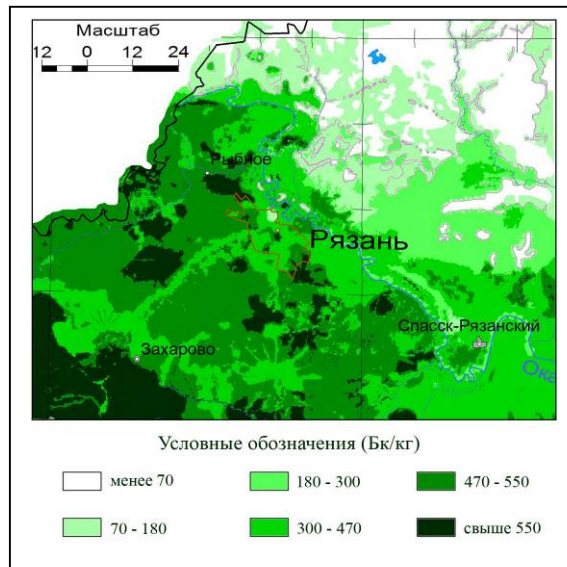
а) ^{226}Ra б) ^{232}Th в) ^{40}K

Рис. 8. Удельная активность естественных радионуклидов в гумусовых горизонтах почв

В соответствии с алгоритмом, изложенным в «Нормах радиационной безопасности» (НРБ-99/2009)², была рассчитана эффективная удельная активность природных радионуклидов, содержащихся в верхних (0–20 см) горизонтах почв ($A_{эфф}$):

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,3A_{Th} + 0,09A_K. \quad (1)$$

Результаты представлены на рисунке 9. Можно заключить, что, во-первых, вариации $A_{эфф}$ определяются механическим составом почв и материнских пород и закономерно возрастают с утяжелением их состава и, во-вторых, в почвенно-геохимических условиях Рязанского региона отсутствуют механизмы, способные обеспечить превышение показателей $A_{эфф}$ для материалов I и II классов, используемых в строительстве в пределах населенных пунктов (соответственно 370 и 740 Бк/кг). Минимальной активностью отличаются органические почвы.

² СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)» / Роспотребнадзор России. М., 2009.

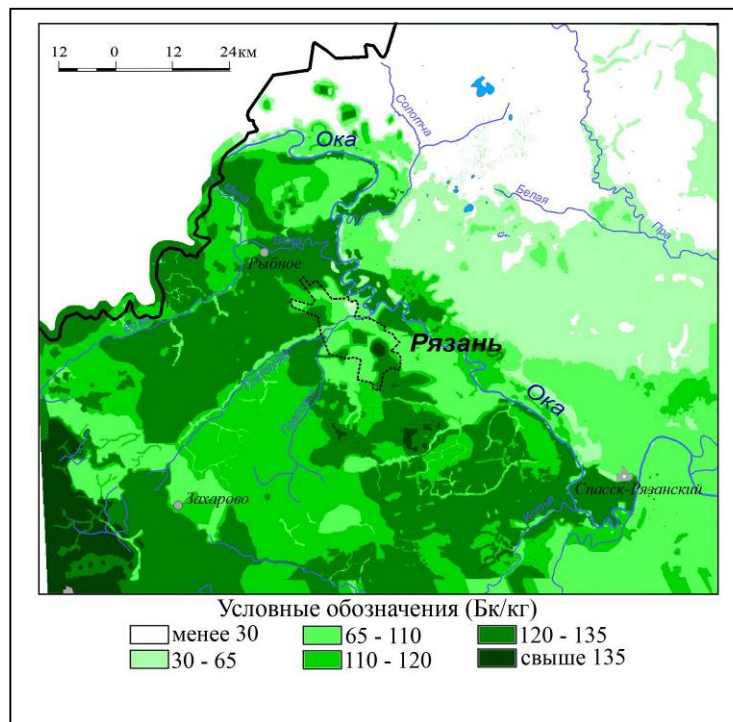


Рис. 9. Эффективная удельная активность почвенных радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K

Величина $A_{эфф.}$ информативна, но не позволяет оценить экологический риск от радиоактивного облучения в каких-либо сопоставимых и картируемых единицах, а не просто в терминах наличия/отсутствия превышения. Разработка таких единиц может быть осуществлена на основе принятой в настоящее время беспороговой концепции канцерогенного риска³, согласно которой рост стохастических эффектов начинается при любом положительном уровне гамма-фона и линейно нарастает с ростом внешнего облучения с коэффициентом риска $7,3 \cdot 10^{-2} \text{ 1/3в}$ (в пересчете на эквивалентную дозу). Если известна удельная активность радионуклидов в почве, то необходимо разработать процедуру, при помощи которой может быть осуществлен переход от удельной активности (Бк/кг) к вкладу распада гамма-излучающих радиоактивных элементов в местный радиационный фон (мкр/ч).

³ Нормы радиационной безопасности НРБ-96 (ГН 2.6.1.054-96) / Госкомсанэпиднадзор России. М., 1996.

Непосредственных расчетных способов переходов между единицами радиоактивности не существует, но могут быть установлены эмпирические зависимости между ними, и в узких интервалах значений они являются линейными. С целью разработки таких переходных коэффициентов в лаборатории ВНИИФТРИ (г. Зеленоград) была проведена калибровка дозиметра ДБГ-01, наиболее часто используемого для оценки радиационного фона службой Росгидромета, на «водных фантомах» – растворах радионуклидов с заранее известной активностью с учетом поправок на геометрию излучающей среды. Полученные коэффициенты составили:

для ^{232}Th – 0,05918;

для ^{226}Ra – 0,0263;

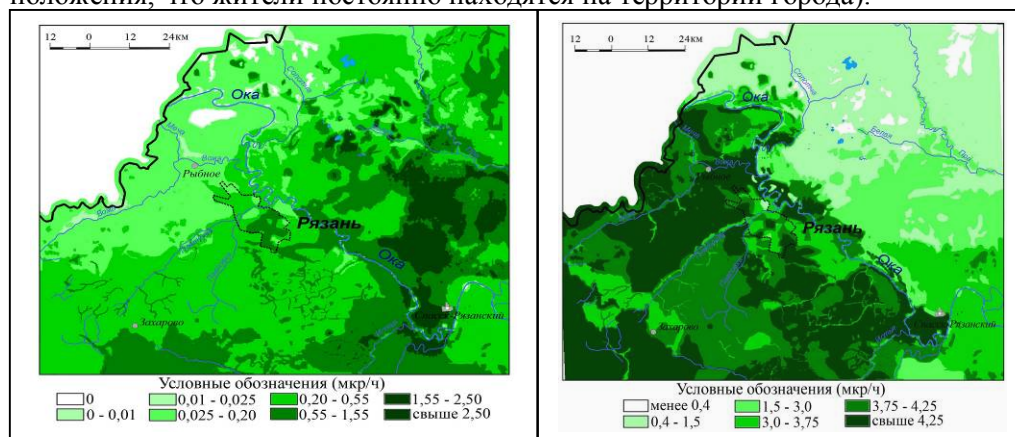
для ^{40}K – 0,002755;

для ^{137}Cs – 0,01205.

Подобные коэффициенты оказалось возможным определить только эмпирически. При расчетах вклада каждого радионуклида в радиационный фон указанные коэффициенты умножаются на величины удельной активности, произведения которых имеют размерность *мкР/ч*. Если необходимо определить вклад группы радионуклидов, произведения суммируются.

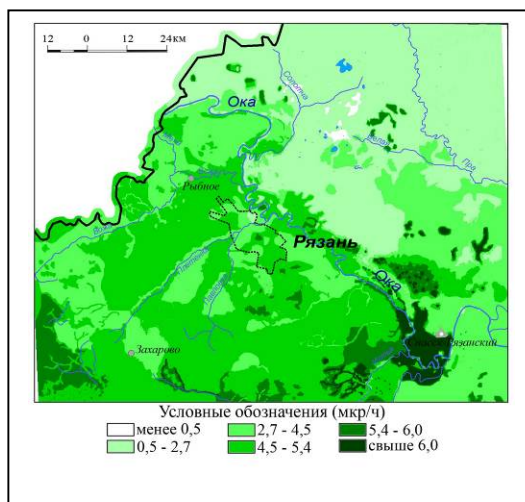
Результаты расчетов по охарактеризованной выше оригинальной методике в картографической форме представлены на рисунке 10. На их основе можно осуществлять пространственное моделирование канцерогенного риска, для чего необходимо дополнительно учесть только два показателя: плотность населения и время пребывания людей на конкретной территории. Детальность разработанных нами карт позволяет вести расчеты на уровне отдельных урочищ и их групп.

Приведем пример подобных расчетов для города Рязани (исходя из предположения, что жители постоянно находятся на территории города).



а) цезий

б) радий, торий, калий



в) сумма естественных радионуклидов и радиоцезия

Рис. 10. Вклад почвенных радионуклидов в местный гамма-фон в ландшафтах центра Рязанской области

Радиоэкологическая оценка канцерогенного риска, обусловленного чернобыльским радиоактивным следом, включает следующие этапы:

1) Определение экспозиционной дозы облучения населения за счет распада почвенного цезия (в среднем для города Рязани). Согласно результатам проведенных нами полевых исследований средняя удельная активность радиоцезия в почвах областного центра составила 52,7 Бк/кг. Соответственно

$$X = 52,7 \cdot 0,01205 = 0,635 \text{ мкр/ч.}$$

2) Определение годовой поглощенной дозы от распада ^{137}Cs с учетом того, что 1 рентген равен 0,87 рад, а 1 рад равен 0,01 грея:

$$D = (0,75 \cdot 10^{-6} \cdot 24 \cdot 365) / 0,87 = 6,39 \times 10^{-3} \text{ рад/год} = 6,39 \cdot 10^{-5} \text{ Гр/год.}$$

3) определение эквивалентной дозы от распада ^{137}Cs :

$$H = 6,39 \cdot 10^{-5} \cdot \text{КК},$$

где КК – коэффициент качества облучения, зависящий от энергии продуктов распада. Для гамма-излучения КК = 1, поэтому $H = 6,39 \cdot 10^{-5} \text{ Зв/год}$.

4) Определение эквивалентной эффективной дозы от почвенного ^{137}Cs с учетом взвешивающих коэффициентов для органов и тканей. Упрощенный способ расчета – умножение H на интегральный коэффициент 0,949:

$$H_E = 6,39 \cdot 10^{-5} \cdot 0,949 = 6,064 \cdot 10^{-5} \text{ Зв/год.}$$

5) Определение годовой коллективной дозы облучения гамма-излучением от распада ^{137}Cs всего населения города Рязани:

$$S_E = 6,064 \cdot 10^{-5} \cdot 520000 = 31,53 \text{ Зв/год.}$$

6) Определение числа проявлений стохастического эффекта $n = r \times SE$, где r – коэффициент риска (согласно НРБ-96 $r = 7,3 \cdot 10^{-2} \text{ 1/Зв}$) для фонового облучения населения. Соответственно

$$n = 7,3 \cdot 10^{-2} \cdot 31,53 = 2,30 \text{ случая в год.}$$

Аналогичные расчеты для суммы естественных радионуклидов с учетом того, что средние удельные активности ^{232}Th , ^{226}Ra и ^{40}K составляют соответственно 21,9, 31,5 и 452,0 Бк/кг , дают результат 12,19 случая в год. Таким образом, «чернобыльский» радиоцезий увеличивает природообусловленную вероятность развития злокачественных новообразований от внешнего гамма-излучения на 19 процентов.

Как показано на рисунке 10 в, максимум канцерогенного риска наблюдается не в окрестностях Рязани, а в другом важнейшем «ландшафтном узле» Рязанского региона – рубеже Рака-Тысшинского, Старожиловского, Веретьевского и Пронско-Спасского пойменного ландшафтов, где чернобыльский радиоактивный след накладывается на исходно высокую удельную активность естественных радионуклидов, что является признаком проявления классического «эко-тонного эффекта» – усиления миграции и аккумуляции вещества на природных рубежах. Данный эффект – необходимая сторона функционирования ландшафтов, и большинство его проявлений благоприятно для природной среды, но в случае, если в миграционных процессах участвуют загрязняющие вещества, последствия могут оказаться неблагоприятными для человека.

В этой связи весьма примечательна траектория чернобыльского следа в пределах района исследований (рис. 10 а). Через Рязанский регион 26–27 апреля 1986 года проходил теплый фронт циклона: выпадали осадки и преобладал юго-западный ветер. Радиоактивное облако перемещалось в сторону областного центра, но встретило препятствие – Пронско-Рязанское поднятие, и отклонилось по «пути наименьшего сопротивления» – в канал, образованный долинами Истья, Прони и Оки, по которому затем вышло на наиболее сниженную юго-восточную часть Мещеры – город Спасск-Рязанский. Данный ландшафтный регион стал своеобразным «конусом выноса», когда загрязнение стало активно распространяться вширь, охватывая в основном местные торфяники и западины. При этом новым каналом распространения облака стал участок поймы Оки в ветровой тени Рака-

Тысьинского блока, и загрязнение частично распространилось в сторону устья Вожи. Попутно радиоцезием была загрязнена и юго-восточная периферия Рака-Тысьинского ландшафта, то есть та же территория, где, как показали результаты проведенной нами снегосъемки, наблюдается аккумуляция кадмия, нитратного азота, свинца и иных загрязнителей. Следовательно, причиной такого рода территориальных совпадений являются особенности рельефа данного участка Окско-Донской равнины и в целом его пограничное положение, усиливающее турбулентность воздушных течений и соответственно увеличивающее вероятность выведения загрязняющих веществ из атмосферной миграции. В дальнейшем ослабевшая «западная ветвь» радиоактивного облака попала под канализирующее влияние долины Вожи (ее простираение соответствовало направлению ветра в свободной тропосфере), а распространению на север воспрепятствовало пойменное сужение между Константиновским и Солотчинским блоками. В результате северо-восточная траектория переноса цезия восстановилась, но зона загрязнения охватила большую часть Солотчинско-Деулинского ландшафта (особенно торфяники Красного и Емельянова болот). В то же время север Солотчинско-Деулинского и почти весь Шехминский ландшафты, находившиеся «под защитой» возвышенных литосферных микроблоков, уцелели от загрязнения, а в подветренной части наиболее возвышенного Константиновского ландшафта (к югу от села Вакина) даже отмечена нулевая удельная активность цезия. Следовательно, чернобыльский радиоактивный след оказался вовлечен в те же системы атмосферной миграции, что и загрязняющие вещества местного происхождения, причем основными регуляторами указанных систем являются неоднородности мезо- и макрорельефа.

Таким образом, радиоактивность почв и поверхностных вод демонстрирует тесную генетическую связь с ключевыми факторами ландшафтной дифференциации и особенностями литогенной основы (в первую очередь с гранулометрическим составом почв и рельефом), интенсивностью современных тектонических движений, а также с морфологической структурой ландшафтов как таковой; чернобыльский радиоцезий, накопленный почвами региона, несколько увеличивает вероятность канцерогенеза, но основным фактором канцерогенного риска является все же удельная активность естественных радионуклидов, распределение которых контролируется природными процессами; цезий может служить маркером траекторий воздушной миграции загрязняющих веществ местного происхождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы радиационной безопасности НРБ-96 (ГН 2.6.1.054-96) [Текст] / Госкомсанэпиднадзор России. – М., 1996.
2. Пузаченко, Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях [Текст]. – М. : Академия, 2004. – 416 с.
3. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)» [Текст] / Роспотребнадзор России. – М., 2009.

S.A. Tobratov, O.S. Zheleznova

**THE SPATIAL PATTERNS OF DIFFERENTIATION OF RADIONUCLIDES
IN THE LANDSCAPES OF THE RYAZAN REGION
AND THEIR INDICATOR VALUE**

The results of the field radioecological researches which have been carried out by the authors in 2010-2011 are generalized. It is shown that the local radiating background and the specific activity of natural radionuclides are supervised by the granulometric composition of soils, and the emanations of ^{222}Rn can serve as indicators of tectonic activity. Also it is established that the trajectory of Chernobyl radioactive trace within the Ryazan region essentially depends on the morphological structure of the landscapes. The procedure for the calculating of cancerogenic risk which is defined by the specific activity of soil radionuclides is offered.

radiating background, natural radionuclides, landscapes, relief, tectonic heterogeneity, cancerogenic risk.