Картирование геогенного радонового потенциала (на примере территории Москвы)

В статье предложены методические подходы к построению карты геогенного радонового потенциала территории России. Картирование основано на анализе пространственного распределения удельной активности радия в грунтах и аномальных значений плотности потока радона с поверхности. В качестве основы для районирования предлагается использовать кадастровое деление России. Такой подход делает удобным использование карты в ходе градостроительного планирования, в предпроектных изысканиях для строительства, при гигиенических исследованиях, в том числе, для оценки доз, получаемых населением вследствие облучения радоном, и наконец, в качестве ресурса, направленного на информирование граждан. На основе предложенных подходов построена карта геогенного радонового потенциала Москвы.

Ключевые слова: *картирование радона, потенциальная радоноопасность, геогенный радоновый потенциал, плотность потока радона, удельная активность радия.*

П.С.Микляев (ФГБУН Институт геоэкологии им.Е.М.Сергеева РАН, г.Москва), Т.Б.Петрова (МГУ им.М.В.Ломоносова, г.Москва), А.В.Климшин, А.П.Смирнова (ФГБУН Институт геофизики им.Ю.П.Булашевича Уральского отделения РАН, г.Екатеринбург)

Введение. В настоящее время за рубежом интенсивно развиваются региональные исследования потенциальной радоноопасности, прежде всего, методы картирования радона в помещениях и в геологической среде. В России, к сожалению, исследования в этом направлении ограничились созданием в середине 1990-х гг. обзорных карт природной радиоактивности и потенциальной радоноопасности территории России и ближнего зарубежья [1,2] в масштабе 1:5000000–1:10000000. Примерно в то же время были составлены карты прогнозной радоноопасности Санкт-Петербурга, Ленинградской области [3-5], Иркутской области и некоторых других регионов, выполненные ФГУП Российский геоэкологический центр РГЭЦ «УРАНГЕО». Перечисленные карты на момент их создания во многом опережали аналогичные зарубежные разработки. Однако обзорный масштаб этих карт ограничивает возможности их применения на практике для принятия управленческих решений, в процессе инженерно-экологических изысканий для строительства, для проведения гигиенических оценок или просто для использования гражданами в информационных целях.

Наиболее близко к решению задачи оценки потенциальной радоноопасности территорий в настоящее время подошли в странах Европейского союза в рамках концепции «геогенного радонового потенциала». В настоящее время реализуется общеевропейский проект по созданию Европейского атласа природной радиации – «European Atlas of Natural Radiation» (EANR), частью которого является создание Европейской карты геогенного радонового потенциала «European Geogenic Radon Map» (EGRM) [6,7]. Данная концепция основана на анализе и картировании признаков повышенного радоновыделения из геологической среды – повышенных концентраций урана (радия) в горных породах, объемной активности радона в подпочвенном воздухе, повышенной проницаемости грунтов и т.п. Как справедливо отмечают европейские исследователи [7], концентрации радона в помещениях всегда зависят от деятельности человека, а природные и антропогенные факторы, такие как типы строительных конструкций, виды строительных материалов, метеорологические факторы, привычки проживающих в домах людей, яв-

ляются изменяющимися во времени переменными, характерными для каждого конкретного дома. Например, два дома, построенные по-разному на одном и том же геологическом основании (на однородном участке) будут иметь различные средние концентрации радона в помещении, так же как и два одинаково построенные дома на однородном участке, но с разными привычками жителей [7]. Поэтому специалисты заинтересованы в отображении величины, которая ближе к понятию «геологической опасности», не зависящей от антропогенных факторов и постоянной во времени. Эта величина, или пространственная переменная, названа «геогенным радоновым потенциалом» (geogenic radon potential). Карта геогенного радонового потенциала может служить для идентификации областей, где по естественным причинам можно ожидать повышенные концентрации радона в помещениях, и поэтому при строительстве новых зданий на таких территориях могут понадобиться особые радонозащитные мероприятия. Такая карта также необходима при принятии решений о первоочередности скрининговых исследований ЭРОА радона в существующих зданиях в гигиенических целях для оценки доз облучения. Как выражаются авторы [7], геогенный радоновый потенциал отражает «"what earth delivers" in terms of radon», то есть, «что "дает земля" в плане радона».

Количественно оценить геогенный радоновый потенциал можно двумя путями [7]. Первый подход основан на определении некоторого единого численного показателя, отражающего физические процессы, которые вносят наибольший вклад в формирование концентрации радона в помещениях зданий, и называемого радоновым потенциалом грунта. Так, в Чехии и Германии такой показатель обозначается RP и определяется как функция газопроницаемости грунта (k) и объемной активности радона в подпочвенном воздухе (C_{Rn}) на глубине 0,8 м [7-9]:

$$RP = f(C_{Rn}, k). \quad (1)$$

Показатель RP характеризует конвективный («адвективный») поток радона, нормированный на разницу давлений через барьер, которым может быть, например, фундаментная плита здания, т.е. расчет RP основан на предположении о преобладании конвективного переноса радона в системе «грунт–здание». Отметим, что определение входных переменных k и C_{Rn} связано с рядом проблем, таких, например, как отсутствие системы стандартизации измерений газопроницаемости почвы (грунта), высокая степень неопределенности результатов измерений объемной активности (ОА) подпочвенного радона, возможные временные колебания k и C_{Rn} и т.п. [7]. К тому же величина RP может применяться только при глубине заложения фундамента не более 0,8 м [8,9]. В России аналогичный показатель предложен Л.А.Гулабянцем, обозначается $П_{Rn}$ и определяется как произведение удельной активности радия в грунте (C_{Ra}), коэффициента эманирования ($K_{эм}$) и плотности грунта (ρ) [10]:

$$П_{Rn} = C_{Ra}\rho K_{эм}. \quad (2)$$

Следует отметить, что показатель $П_{Rn}$ во многом лишен перечисленных выше недостатков, свойственных величине RP (неопределенность входных параметров и ограниченная глубина оценки). $П_{Rn}$ характеризует равновесную активность свободного радона в единице объема грунтового массива под подошвой радононепроницаемой конструкции при нулевом значении активности радона на границах объема [10] и предполагает преобладание диффузионного переноса радона в системе «грунт–здание». Несмотря на различные модели переноса радона, лежащие в основе перечисленных показателей, оба они (RP и $П_{Rn}$) по физическому смыслу характеризуют детерминированную величину радоновой нагрузки на подземную часть здания, определяемую свойствами грунтов основания.

Второй подход к оценке геогенного радонового потенциала основан на определении категориально-численной величины, называемой в зарубежной литературе радоновым индексом RI (чтобы избежать путаницы с описанным выше показателем RP), и базируется на методе «многомерного перекрестного табулирования» [7]. Радоновый индекс RI выражается в виде классов, например, I, II, III, IV... или низкий, средний, высокий. При таком подходе комбинациям входных величин присваиваются баллы или качественные характеристики, например: (высокий почвенный радон) × (низкая проницаемость) = (средний RI), где (...) обозначает классифицируемую переменную [7]. Величина RI поддается количественной оценке при значительном разнообразии входных величин и позволяет учитывать показатели самых различных типов, размеров и размерностей, как, например, ОА радона в подпочвенном воздухе, плотность потока радона, проницаемость грунтов, концентрации радона в помещениях, концентрации урана (радия) в горных породах, мощность дозы внешнего гамма-излучения и т.п. Кроме того, могут быть учтены геологические условия, которые характеризуются категориальными, но не

численными переменными. Прежде всего, это параметры, связанные с тектоникой, рудными телами, карстовыми полостями, и другие условия, которые кодируются двоичным кодом («есть – нет»). Определение радонового индекса RI широко распространено в практике в ряде стран, таких как США [11], Чехия [8], Германия [12], Франция [13], Италия [14] в течение примерно 20 лет. Этот способ оценки зарекомендовал себя как весьма надежный, при этом, однако, каждая страна имеет различные наборы входных величин и свою методику определения категории радонового индекса.

Представляется необходимой разработка методических подходов картирования геогенного радонового потенциала территории России с учетом как зарубежного опыта, так и особенностей практики оценки потенциальной радоноопасности, сложившейся в нашей стране. Обзор европейского опыта картирования геогенного радонового потенциала, приведенный, например, в работе [7], показывает, что для построения карты прежде всего необходимо определиться с ответом на следующие вопросы.

1. Какие параметры использовать в качестве входных данных для оценки целевой переменной (концентрацию радона в почвах или в воздухе помещений, проницаемость грунта, удельную активность радия в грунтах, коэффициент эманирования, плотность потока радона из грунта и т.п.).

2. Какой показатель выбрать в качестве конечной целевой переменной, собственно характеризующей радоновый потенциал территории (непрерывную численную величину типа RP или категориальную типа RI), и как его определять.

3. Какой тип территориальных единиц выбрать как основу для картирования в качестве элементарной территориальной единицы (геологические подразделения, административные единицы, квадраты координатной сетки).

4. Каким образом оценивать конечную переменную в пределах элементарной территориальной единицы.

Ниже данные вопросы будут рассмотрены подробнее.

Выбор входных параметров. Обобщение опыта исследований, проведенных авторами данной работы, и анализ литературы позволил сформулировать три основных условия, которым должны удовлетворять входные параметры.

Во-первых, очевидно, что для построения карты следует использовать как можно большее количество результатов измерений, крупные массивы данных, покрывающие, по крайней мере, ту часть территории страны, где сосредоточено основное ее население. То есть, должны использоваться величины, измерения которых проводятся в нашей стране в массовом порядке, и которые может выполнить любая рядовая лаборатория радиационного контроля (условие обеспечения массовости измерений). Очевидно, например, что если в России в массовом порядке не измеряют ОА радона в подпочвенном воздухе, то и не следует использовать этот параметр для построения карты радонового потенциала территории России.

Кроме того, для построения карты необходимо обобщение результатов, полученных различными организациями в разное время. Это определяет весьма строгий подход к обеспечению единства измерений, гарантирующего получение сопоставимых результатов разными лабораториями (условие обеспечения единства измерений). Так, например, несмотря на то, что проницаемость грунтов объективно влияет на радоновый потенциал, использовать этот показатель при построении карты потенциальной радоноопасности нецелесообразно, т.к. измерения этой величины не имеют должного метрологического обеспечения, и мы, строго говоря, не можем сопоставлять данные по проницаемости, полученные разными организациями.

Наконец, в качестве входных данных должны использоваться величины, результаты измерения которых не зависят (или, по крайней мере, слабо зависят) от нюансов технологии проведения измерений и отбора проб. Например, от глубины и способа заглубления измерительного зонда при измерениях ОА радона в подпочвенном воздухе, или степени герметичности образцов и времени их выдержки в герметичном состоянии при измерениях коэффициента эманирования, и т.п. (условие обеспечения качества результатов).

Приведенным выше требованиям (массовость, единство, качество) наиболее удовлетворяют величины плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта и удельной активности радия в грунтах, измеренные по дочерним продуктам распада в деэманированном состояни ($A_{Ra}^{ДПР}$). Эти показатели (ППР и $A_{Ra}^{ДПР}$), во-первых, массово измеряются в ходе инженерно-экологических изысканий для строительства, т.е. по ним, в принципе, уже имеется массив данных; во-вторых, существуют простые, аттестованные методики измерения и аппаратура, применяющиеся всеми без исключения организациями, занятыми в системе радиационного контроля, что обеспечивает единство измерений. Наконец, в-третьих, результаты измерения этих величин прак-

тически не зависят от особенностей пробоотбора, что обеспечивает качество результатов.

В то же время, параметры ППР и $A_{Ra}^{ДПР}$ напрямую характеризуют потенциальную радоноопасность территории, т.е. возможное повышенное радоновыделение геологической среды. Удельная активность радия в грунтах, характеризующая радоновый потенциал грунта $П_{Rn}$ (учитывая, что коэффициент эманирования, плотность и пористость грунтов изменяются в относительно узком диапазоне), наиболее важный фактор, определяющий радоновую нагрузку на подземную часть зданий в условиях преобладания диффузионного переноса радона. Главное преимущество параметра $A_{Ra}^{ДПР}$ заключается в том, что он не подвержен временным колебаниям и постоянен для каждого литолого-генетического типа грунта [15,16], что позволяет детерминированно определять эту величину на основе классификации грунтов по содержанию в них радия.

Плотность потока радона с поверхности грунта является показателем, позволяющим выявлять аномалии радонового поля, связанные с геодинамической активностью территории [17], что крайне важно для оценки потенциальной радоноопасности территорий в районах с активной современной тектоникой, а также в геодинамически активных зонах платформ. Измерения плотности потока радона в настоящее время массово проводятся по всей стране в рамках изысканий для строительства. Оборудование для проведения измерений имеется в распоряжении любой аккредитованной лаборатории радиационного контроля. Недостатком параметра ППР являются существенные временные колебания этой величины, однако, временная вариабельность является общим свойством радонового поля приповерхностных грунтов, и полностью избавиться от этого фактора невозможно.

Таким образом, оптимальными входными параметрами для оценки геогенного радонового потенциала территорий являются величины ППР и $A_{Ra}^{ДПР}$. При этом удельная активность радия в грунтах отражает потенциальную радоноопасность территорий, обусловленную преимущественно диффузионным переносом радона, а плотность потока радона с поверхности грунта позволяет выявлять радоновые аномалии, связанные с конвективными потоками в геологической среде.

Выбор типа конечной целевой переменной и методов ее оценки. Следующий шаг – выбор типа целевой переменной, которую следует использовать для оценки радонового потенциала. Опыт исследований показывает, что степень потенциальной радоноопасности, выражаемая в виде некоторого радонового потенциала территории, может быть корректно оценена только с помощью категориального показателя, характеризующегося тремя категориями (классами). Низкой – когда есть веские основания утверждать, что радоновыделение из геологической среды незначительно при любых условиях. Высокой – когда повышенное радоновыделение зафиксировано инструментально, и/или есть веские основания предполагать его наличие. Средней (умеренной) – некое промежуточное положение, когда некоторые предпосылки для повышенного радоновыделения существуют, но оно не зафиксировано измерениями.

В этой связи в данной работе в качестве целевой переменной выбран категориальный показатель, который мы предлагаем вслед за западными коллегами называть «геогенным радоновым потенциалом территории» (чтобы впоследствии не тратить время на гармонизацию отечественной и мировой терминологии) и обозначать аббревиатурой ГРП. Для определения целевой переменной категориального типа необходимо предварительно классифицировать (разбить на классы или категории) выбранные выше входные параметры (ППР и $A_{Ra}^{ДПР}$), т.е. перевести их в разряд категориальных величин, характеризующихся не непрерывными значениями, изменяющимися в определенном диапазоне, а категориями «высокий – средний – низкий» или рангами I, II, III ... и т.п.

В данном случае встает вопрос: какие значения входных параметров считать граничными между различными рангами, и как обосновать эти границы? Для этого обратимся к результатам предыдущих исследований. Ранее была установлена эмпирическая зависимость между удельной активностью радия в грунтах и плотностью потока радона из грунтов [17]. Согласно данной зависимости, усредненная стационарная плотность потока радона из грунтов может превышать допустимый уровень для участков строительства жилых и общественных зданий (80 мБк/м^{2}с) при усредненной удельной активности радия ($A_{Ra}^{ДПР}$) в приповерхностных грунтах около 40 Бк/кг. Расчет с применением математической модели диффузионного переноса радона в дисперсных средах подтверждает это значение. Таким образом, значение $A_{Ra}^{ДПР}$ = 40 Бк/кг можно принять в качестве верхней границы «безопасного» диапазона. Величина $A_{Ra}^{ДПР}$, при которой радоновыделение из массива будет гарантировано высоким, превышающим допустимые санитарные уровни, исходя из опыта,

имеющегося у авторов, а также из результатов математического моделирования с применением диффузионной модели, составляет около 100 Бк/кг. Это нижняя граница «опасного» диапазона, при превышении которого территория является потенциально радоноопасной, независимо от каких-либо дополнительных условий. Интервал значений $A_{Ra}^{ДПР}$ от 40 до 100 Бк/кг относится к «условно опасному» диапазону. При такой «промежуточной» удельной активности радия в грунтах вопрос о потенциальной радоноопасности территории зависит от дополнительных параметров, например, от значений коэффициентов эманирования, плотности, пористости геологической среды и т.п.

Таким образом, можно предложить специальную типизацию (ранжирование) территорий по удельной активности радия ($A_{Ra}^{ДПР}$) в верхней 20-метровой эффективной толще грунтов, характеризующую степень потенциальной радоноопасности территории в условиях преимущественно диффузионного переноса радона:

I ранг – в эффективной толще грунтов $A_{Ra}^{ДПР} < 40$ Бк/кг (безопасно);

II ранг – в эффективной толще присутствуют грунты с удельной активностью радия в диапазоне $40 \leqslant A_{Ra}^{ДПР} \leqslant 100$ Бк/кг (условно опасно);

III ранг – в эффективной толще присутствуют грунты с $A_{Ra}^{ДПР} > 100$ Бк/кг (опасно).

Следующим шагом является ранжирование параметра ППР. Значения плотности потока радона из грунтов, измеренные в случайный момент времени, как указывалось в наших предыдущих работах [18,19], сами по себе не отражают потенциальную радоноопасность территории, т.к. являются случайными величинами, колеблющимися в широких пределах. Сравнивать эти случайные величины с допустимым уровнем, регламентируемым санитарными правилами (80 мБк/м^{2}с), некорректно. Вместе с тем, измеренные значения ППР дают информацию о характере радонового поля территории, позволяя выявить радоновые аномалии, обусловленные, возможно, конвективным переносом радона в геодинамически активных зонах. Верхней границей фоновых колебаний ППР (которые можно считать обусловленными диффузионным переносом) в пределах Русской плиты является значение ППР, равное 150 мБк/м^{2}с (усредненное по участку не менее, чем по 20 точкам измерения) [17]. Таким образом, значение ППР – 150 мБк/м^{2}с, усредненное по участку измерений, является границей между фоновым и аномальным диапазоном плотности потока радона. Соответственно, территории, где присутствуют участки с аномальными значениями ППР, превышающими в среднем по участку 150 мБк/м^{2}с, следует считать потенциально радоноопасными.

Таким образом, можно предложить следующую типизацию (ранжирование) территорий по средним значениям ППР на участках, характеризующую степень потенциальной радоноопасности территории:

I ранг – на всех обследованных участках ППР $\leqslant$ 150 мБк/м^{2}с (безопасно);

II ранг – присутствуют участки с ППР > 150 мБк/м^{2}с (опасно).

В данном случае непрерывная шкала возможных значений ППР разделена только на два диапазона – «опасно – безопасно», промежуточный диапазон отсутствует, потому что такой фактор как наличие аномального радонового поля кодируется только двоичным кодом: либо аномалия есть, либо ее нет.

Теперь определим конечную переменную – геогенный радоновый потенциал (ГРП) территории. Как указывалось выше, ГРП целесообразно разделить на три категории (высокий – средний – низкий) в зависимости от сочетания рангов входных параметров. Территорию можно считать безопасной в плане радона (низкий ГРП) в случае, если одновременно выполняются условия: $A_{Ra}^{ДПР} < 40$ Бк/кг; ППР $\leqslant$ 150 мБк/м^{2}с. В данном случае на территории отсутствуют признаки потенциальной радоноопасности, соответственно, есть веские основания утверждать, что радоновыделение из геологической среды незначительно при любых условиях. Высоким потенциал можно считать в случае, если на территории инструментально зафиксировано аномально высокое радоновыделение, или есть веские основания предполагать его наличие. Следовательно, ГРП территории является высоким при выполнении одного из следующих условий: $A_{Ra}^{ДПР} > 100$ Бк/кг; ППР > 150 мБк/м^{2}с. Умеренный или средний геогенный радоновый потенциал территории (некое промежуточное положение, когда предпосылки для повышенного радоновыделения существуют, но оно не зафиксировано) характеризуется условием: $40 \leqslant A_{Ra}^{ДПР} \leqslant 100$ Бк/кг и ППР $\leqslant$ 150 мБк/м^{2}с. Категории геогенного радонового потенциала в зависимости от сочетания рангов входных величин приведены в табл.1.

Несмотря на кажущееся преобладание высокого ГРП (заполняет 4 из 6 клеток таблицы), условия для реализации высокого потенциала на платформенных территориях распространены значительно в меньшей степени по сравнению с умеренным и, тем более, низким геогенным радоновым потенциалом.

Выбор типа элементарной территориальной единицы. Выбор типа элементарной территориальной единицы картирования U (геологические подразделения, административные единицы, квадраты координатной сети) определяется масштабом, необходимым разрешением (детальностью) карт и их целевым назначением. В качестве основы для карт радонового потенциала целесообразно использовать геологическую информацию. Вместе с тем, положение геологических границ, отраженное на картах, чаще всего сложно определить непосредственно на местности даже при использовании достаточно крупномасштабных карт, например, масштаба 1:10000 – 1:25000, и тем более при более мелком масштабе. Поэтому для практического использования карты необходима привязка к каким-то более четким ориентирам, однозначно определяемым на местности, например, административным и муниципальным границам, координатам координатной сети. Точная привязка элементарных территориальных единиц к местности удобна для органов управления и надзора, а также для проектных и строительных компаний, являющихся основными коммерческими потребителями информации о геогенном радоновом потенциале. В этой связи, несмотря на то, что исходной информацией для построения карты радонового потенциала, несомненно, должны быть геологические карты, конечную информацию целесообразно предоставлять в виде, основанном на административных единицах или квадратах координатной сети.

В европейских странах в качестве элементарных территориальных единиц U распространено использование муниципалитетов, например, в Австрии [20], Бельгии [21], Финляндии [22], или квадратов регулярной координатной сети, как например, в Германии [6] и Великобритании [23]. Однако использование координатной сети приемлемо только для относительно небольших густонаселенных высокоразвитых стран, характеризующихся более или менее равномерным распределением плотности населения, степени экономического развития и урбанизации территорий. В крупных странах, к которым относится Россия, плотность населения распределена неравномерно. В этой связи, в крупных странах, таких, например, как США [11], Австралия [24], Канада [25], в основу составления карт радонового потенциала положено административно-территориальное деление, дробность которого напрямую зависит от плотности населения.

Для построения карт радонового потенциала территории России можно также использовать административно-территориальное или муниципальное деление на уровне административных районов и муниципальных образований. Однако оба этих деления недостаточно дробные для построения карты потенциальной радоноопасности отдельных городов. В этой связи, по мнению авторов, оптимальным решением является использование в качестве элементарных единиц кадастрового территориального деления России (http://maps.rosreestr.ru). Это деление удобно по следующим причинам. Во-первых, оно имеет строгую иерархическую структуру, причем, низший уровень кадастрового деления (кадастровые кварталы) более подробный по сравнению с муниципальным и, тем более, административно-территориальным делением. Во-вторых, границы кадастровых единиц четко привязаны к местности и к координатной системе. В-третьих, к кадастровым кварталам привязаны все земельные участки и объекты капитального строительства, что позволяет на основе кадастрового реестра накапливать информацию по каждому объекту, включая результаты как инженерно-экологических изысканий, так и санитарно-гигиенических обследований (измерений ЭРОА радона в воздухе помещений). Наконец, опыт других развитых стран показывает, что в перспективе учет радоноопасности территорий может и даже должен влиять на оценку стоимости недвижимости и земли, что, так или иначе, сделает необходимым привязку результатов оценки геогенного радонового потенциала к кадастровому делению территории России.

Таким образом, в ходе картирования радонового потенциала территории в качестве элементарной территориальной единицы предлагается использовать единицу кадастрового деления территории России, как наиболее оптимальную.

Табл.1. Категории геогенного радонового потенциала территорий в зависимости от сочетания классов входных величин ($А_{Ra}^{ДПР}$ и ППР).

Наибольшее усредненное значение ППР на участках, мБк/м²с		Наибольшее значение удельной активности радия ($А_{Ra}^{ДПР}$) в грунтах "эффективной толщи", Бк/кг		
		I ранг	II ранг	III ранг
		< 40	40–100	> 100
I ранг	⩽ 150	низкий	умеренный	высокий
II ранг	> 150	высокий	высокий	высокий

Ранжирование территории по значениям входных параметров и построение результирующей карты геогенного радонового потенциала. Ранжирование территорий по значениям входных параметров заключается в присвоении каждой элементарной территориальной единице U определенного ранга в зависимости от значений параметров ППР и $A_{Ra}^{ДПР}$. Перечисленные входные параметры существенно различаются своим пространственным видом, способами измерения и/или определения и нанесения на карту. Рассмотрим подробнее способы ранжирования этих параметров и особенности оценки ГРП на их основе.

Плотность потока радона с поверхности грунта по характеру распределения в пространстве является «двухмерной» дискретной величиной, неравномерно распределенной по поверхности земли. Данные по плотности потока радона, как правило, получают по результатам инженерно-экологических изысканий на участках строительства. На каждом участке проводятся измерения не менее чем в 20-и точках, расположенных в узлах регулярной сети, затем на каждом участке рассчитывается среднее значение ППР с учетом неопределенности результата измерений. Эти значения и используются для оценки радонового потенциала. Аномальные потоки радона характеризуются дискретным пространственным распределением [17], следовательно, проводить интерполяцию данных от участка к участку или какое-либо осреднение ППР по площади нельзя. Таким образом, величина ППР характеризуется набором отдельных точечных объектов (участков застройки), неравномерно распределенных в плане. Каждому такому точечному объекту, в зависимости от величины ППР, присваивается I или II ранг (табл.1). Ранг элементарной территориальной единицы (кадастрового квартала) в целом определяется по «наихудшему варианту», т.е. по участку с наибольшим средним значением ППР, присутствующему в пределах данной элементарной единицы.

Иными словами, если в пределах элементарной территориальной единицы присутствует хотя бы один участок с аномальным значением плотности потока радона (II ранг), то всей элементарной единице присваивается II ранг по ППР, а, следовательно, в соответствии с табл.1, данной территориальной единице присваивается высокий радоновый потенциал. В случае если в пределах элементарной территориальной единицы отсутствуют участки с аномальными значениями ППР (присутствуют только участки I ранга), то всей территориальной единице присваивается I ранг по ППР, а оценка радонового потенциала в таком случае проводится на основе данных об удельной активности радия в грунтах.

Несколько иначе обстоит дело с картированием удельной активности радия в грунтах. Удельная активность радия в грунтах ($A_{Ra}^{ДПР}$) – величина, характеризующаяся распределением как в плане, так и по глубине. Кроме того, эта величина характеризуется непрерывным распределением в пространстве (от точки к точке) и детерминированно определяется литолого-генетическим типом отложений или горных пород [15,26]. Таким образом, картирование $A_{Ra}^{ДПР}$ следует проводить на основе обобщения данных по удельной активности радия в отложениях, слагающих разрез исследуемой территории.

Величина $A_{Ra}^{ДПР}$ должна оцениваться послойно в пределах приповерхностной толщи грунта, определяющей радоновую нагрузку на подземную часть зданий, заложенных в этой толще. Предлагается назвать эту приповерхностную толщу «эффективной». Мощность эффективной толщи определятся глубиной инженерно-хозяйственного освоения территории при наземном строительстве, условно принимаемой равной 20 м. Удельная активность радия в горных породах и рыхлых отложениях, залегающих глубже нижней границы эффективной толщи, в обычных условиях при оценке геогенного радонового потенциала территории не учитывается. Исключение составляют территории, характеризующиеся рудными концентрациями урана в породах ($A_{Ra}^{ДПР} = 10^3–10^4$ Бк/кг и более), где мощность эффективной толщи следует определять по результатам специальных исследований.

Каждому геолого-генетическому типу грунта, слагающего эффективную толщу на исследуемой территории, присваивается некоторое значение параметра $A_{Ra}^{ДПР}$. Параметр $A_{Ra}^{ДПР}$ должен характеризовать наибольшую удельную активность радия в данном типе грунта (по «наихудшему варианту»). Однако использование максимальных измеренных значений удельной активности радия не представляется целесообразным, т.к. эти значения могут быть обусловлены случайными ошибками при отборе проб и при измерениях, локальными включениями или другими микро-неоднородностями грунтов, не характеризующими их реальную радиоактивность. В этой связи в качестве параметра $A_{Ra}^{ДПР}$ предлагается использовать верхнюю границу интервала «3 сигма» для каждого геолого-генетического типа грунта:

$$A_{Ra}^{ДПР} = \overline{A_{Ra}^{ДПР}} + 3\sigma, \quad (3)$$

где $\overline{A_{Ra}^{ДПР}}$ – среднее значение удель-

Табл.2. Ранжирование грунтов Москвы по удельной активности радия ($A_{Ra}^{ДПР}$).

Возраст и состав отложений		Стратиграфический индекс	Удельная активность радия в грунтах, Бк/кг				Ранг по параметру $A_{ДПР}$
			среднее значение $(\overline{A_{Ra}^{ДПР}})$	макс.–мин.	СКО (σ)	$A_{Ra}^{ДПР} = \overline{A_{Ra}^{ДПР}} + 3\sigma$	
Каменноугольная система	Известняки и доломиты	C_{2-3}	12,5	8,2–22,6	5,1	27,8	I
	Мегрели	C_{2-3}	8,1	6,0–10,2	1,9	13,8	I
	Глины мегрелистые	C_{2-3}	12,7	5,2–21,0	3,2	22,3	I
Юрская система	Глины и суглинки	J_{3k-0}	26,0	14,6–120,0	15,0	**71,0**	II
	Суглинки и супеси	J_{3tt}	22,2	10,3–400,0	20,4	**83,6**	II
Меловая система	Суглинки и супеси	K_1	12,6	4,0–22,2	6,3	31,5	I
	Пески	K_{1-2}	5,9	2,5–12,0	2,8	14,3	I
Четвертичная система	Суглинки и глины	pr II–III	24,2	14–42	4,7	39,0	I
	Суглинки	g I–II; lg II; lb III	14,6	9,8–26,4	3,2	24,2	I
	Пески и супеси	f I-II; lg II; a I-III	7,0	3,0–14,4	2,3	14,0	I
	Пески и супеси	a IV	11,7	5,5–21,3	5,2	27,3	I

ной активности радия (определенной по дочерним продуктам распада в деэманированных пробах) в данном типе грунта; σ – стандартное отклонение удельной активности радия в данном типе грунта.

Следующим шагом на основе геологических карт составляется обобщенная карта распространения грунтов I, II, и III рангов, т.е. карта ранжирования территории по параметру $A_{Ra}^{ДПР}$. При этом ранг территории в целом определяется наивысшим рангом грунтов, присутствующих в эффективной толще. Например, если в разрезе эффективной толщи присутствуют слои (прослои, линзы) грунтов II или III ранга, то независимо от конкретной глубины залегания и доли объема этих грунтов в эффективной толще, территориям в пределах латерального распространения этих грунтов присваивается, соответственно, II или III ранг.

Следующим шагом на карту ранжирования территории по параметру $A_{Ra}^{ДПР}$ накладывается карта аномалий ППР и карта элементарных территориальных единиц (кадастровых кварталов). Ранг каждого кадастрового квартала определяется наивысшим рангом по параметрам $A_{Ra}^{ДПР}$ и ППР, присутствующим в пределах данной элементарной территориальной единицы.

На заключительном этапе, на основе ранжирования территории по входным параметрам ППР и $A_{Ra}^{ДПР}$, каждой элементарной территориальной единице присваивается значение целевой переменной – геогенного радонового потенциала в соответствии с табл.1. Результатом является карта геогенного радонового потенциала территории.

Очевидно, что данная карта является по своей сути индикаторной, лишь качественно отражающей вероятность того, что в том или ином районе может быть повышенное радоновыделение из грунтов. Не следует считать, что в пределах района (кадастрового квартала) с высоким радоновым потенциалом все участки (или даже многие участки) будут характеризоваться повышенными потоками радона из грунтов и, тем более, повышенными концентрациями радона в зданиях. Высокий геогенный радоновый потенциал свидетельствует лишь о том, что на данной территории присутствуют радоноопасные участки. В пределах районов (кадастровых кварталов) с умеренным показателем потенциальной радоноопасности могут существовать условия для повышенных потоков радона, однако, их реализация в каждом конкретном случае зависит от глубины залегания грунтов с повышенной концентрацией радия, конструкции и глубины заложения фундаментов зданий и т.п. На территориях, характеризую-

щихся низким радоновым потенциалом, вероятность повышенного радоновыделения из грунтов практически стремится к нулю, независимо от конструкции и глубины заложения подземной части зданий.

Карта геогенного радонового потенциала Москвы. Апробация приведенного выше методического подхода была проведена на примере Москвы (в пределах МКАД). К настоящему времени на территории Москвы накоплен обширный фактический материал, полученный в ходе массовых инженерно-экологических изысканий на участках строительства. В перспективе подобный материал может быть получен и для других городов и населенных пунктов страны, что в конечном итоге позволит в будущем создать карту геогенного радонового потенциала, по крайней мере, для наиболее населенной части России.

Для построения карты радонового потенциала Москвы было проведено обобщение и анализ данных по удельной активности радия в грунтах эффективной толщи и плотности потока радона с поверхности грунтов. Характеристика удельной активности радия в грунтах исследуемой территории дана по результатам изучения природной радиоактивности грунтов Москвы, полученным авторами ранее [15,16]. Выделено 11 типов отложений различного возраста, генезиса и литологического состава, обладающих характерными значениями удельной активности радия и незакономерным распределением этого показателя в пределах каждого из выделенных типов. На основе этой типизации проведено ранжирование грунтов Москвы по параметру $A_{Ra}^{ДПР}$, результаты которого приведены в табл.2. Из таблицы видно, что грунты III ранга на исследуемой территории отсутствуют. Наиболее высокими значениями удельной активности ^{226}Ra характеризуются отложения келловей-оксфордской глинистой толщи, где встречаются прослои и линзы мощностью от 0,5 до 5–7 м с удельной активностью ^{226}Ra, достигающей значений 60–120 Бк/кг. Также аномально высокие концентрации ^{226}Ra (до 400 Бк/кг), связанные с включениями фосфоритов, характерны для отложений титонского яруса [15]. Все остальные грунты на исследуемой территории, независимо от их литологического состава и свойств, относятся к I категории по параметру $A_{Ra}^{ДПР}$.

Следующим шагом, по данным инженерно-геологических скважин, имеющихся в базе данных Института геоэкологии им.Е.М.Сергеева РАН, ведущим научным сотрудником лаборатории геоинформатики и компьютерного картографирования ИГЭ РАН к.г.н. Е.А.Карфидовой была построена карта глубины залегания кровли юрских отложений масштаба 1:50000, на основе которой построена карта пространственного распределения исходных данных (рис.1).

На карте выделены области распространения юрских отложений в пределах эффективной толщи. Данным областям присвоен II

Рис.1. Карта пространственного распределения параметров ППР и $A_{ДПР}$ на территории Москвы. 1 – участки с аномальными значениями плотности потока радона (ППР > 150 Бк/м^{2}с); 2, 3 – удельная активность радия ($A_{Ra}^{ДПР}$) в грунтах эффективной толщи: 2 – $40 \leqslant A_{Ra}^{ДПР} \leqslant 100$ Бк/кг; 3 – $A_{Ra}^{ДПР} < 40$ Бк/кг.

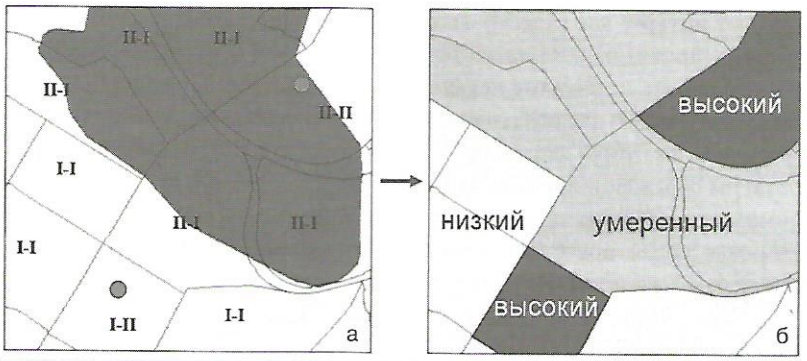

Рис.2. Ранжирование территории по показателям $A_{Ra}^{ДПР}$ и ППР (а) и оценка радонового потенциала для каждой элементарной территориальной единицы (б).

ранг по удельной активности радия в грунтах ($40 \leqslant A_{Ra}^{ДПР} \leqslant 100$ Бк/кг). Остальной территории, на которой кровля юрских отложений залегает глубже 20 м, либо эти отложения отсутствуют (размыты), присвоен I ранг по удельной активности радия в грунтах ($A_{Ra}^{ДПР} < 40$ Бк/кг).

Пространственное распределение участков с аномальными значениями ППР (в среднем по участку ППР > 150 мБк/м^{2}с) на территории Москвы было взято в соответствии с составленной авторами Картой плотности потока радона на территории Москвы, опубликованной в работе [27]. Также на карту были нанесены границы элементарных территориальных единиц (кадастровых кварталов). В результате была получена карта пространственного распределения исходных данных (рис.1).

Затем каждому кадастровому кварталу присваивался ранг по показателям $A_{Ra}^{ДПР}$ и ППР в соответствии с методологией, описанной выше (рис.2а), и оценивался радоновый потенциал в соответствии с табл.1 (рис.2б). На рис.2а римскими цифрами обозначен ранг кадастровых кварталов по $A_{Ra}^{ДПР}$ (первая цифра) и по ППР (вторая цифра через дефис), остальные обозначения см. на рис.1. На рис.2б оттенками показаны градации геогенного радонового потенциала от светлого (низкий), до темного (высокий).

В результате была построена карта геогенного радонового потенциала Москвы, приведенная на рис.3. Следует отметить, что технология построения карты, а именно, использование в качестве элементарных таксонов кадастрового деления, предусматривает возможность работы в разных масштабах: от 1:10000 и крупнее при работе в рамках отдельных районов и округов до 1:50000 и мельче при оценках в пределах города в целом. В то же время, подход к картированию, основанный на кадастровом делении, может быть применен только при наличии большой базы экспериментальных данных по входным параметрам, т.е. по результатам оценки потенциальной радоноопасности участков строитель-

Рис.3. Карта геогенного радонового потенциала Москвы (в пределах МКАД). Геогенный радоновый потенциал: 1 – низкий; 2 – умеренный; 3 – высокий; 4 – нет данных (парковые зоны).

ства. В пределах территорий, характеризующихся умеренным и высоким радоновым потенциалом, присутствуют признаки потенциальной радоноопасности территории. Соответственно при проведении инженерных изысканий на предпроектных (прединвестиционных) этапах проектирования зданий и сооружений на таких территориях необходимо особое внимание уделять вопросам оценки потенциальной радоноопасности.

Область применения карты геогенного радонового потенциала не ограничивается строительной отраслью. Такая карта необходима также органам власти для градостроительного планирования и составления планов развития населенных пунктов, муниципалитетам для ориентации в экологической ситуации в населенном пункте (округе, районе). Кроме того, данные материалы представляют интерес для кадастровых органов, проводящих оценку стоимости земель и объектов недвижимости, а также для страховых компаний, т.к. могут влиять на размеры страховой премии, например, при страховании жизни и здоровья людей, постоянно проживающих на данной территории. Наконец, карта геогенного радонового потенциала в перспективе может лечь в основу стратегии ограничения облучения населения России радоном в помещениях, т.к. на ее основе возможно определение территорий, первоочередных с точки зрения проведения радонового обследования зданий. В заключение отметим, что карта показателя потенциальной радоноопасности является ресурсом, направленным на предоставление информации гражданам страны, интересующимся радоновой обстановкой в том или ином районе, например, при покупке жилья, или в своем доме, просто из любопытства. Учитывая последнее, карта должна быть оформлена в виде интерактивного интернет-ресурса, простого в использовании, постоянно обновляемого, и, главное, находящегося в свободном доступе.

Таким образом, разработана концепция оценки потенциальной радоноопасности территорий, основанная на анализе геологического строения территории и учитывающая закономерности формирования радонового поля. Предлагаемая концепция, в том числе, может лечь в основу усовершенствования существующих и разработки новых нормативных документов в градостроительной отрасли. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 13-05-01112а и № 13-05-00975а.

Литература

1. Смыслов А.А., Максимовский В.А., Харламов М.Г. и др. Радон в земной коре и риск радоноопасности. Разведка и охрана недр. №4, 1994. С. 25-27.
2. Максимовский В.А., Решетов В.В., Харламов М.Г. Карта радоноопасности России. Масштаб 1:10 000 000. Под ред. Смыслова А.А. М.-СПб: СПбГГИ, 1995. 1 с.
3. Карта прогнозной радоноопасности Санкт-Петербурга. Официальный портал администрации Санкт-Петербурга, 2001. (http://old.gov.spb.ru/gov/admin/otrasl/ecol/).
4. Карта прогнозной радоноопасности Ленинградской области. Российский геоэкологический центр, 2004. (http:// www.rgec.ru/articles/).
5. Тихонов М.Н. Радон: источники, дозы и нерешенные вопросы. Атомная стратегия. №23, 2006. С. 66-84.
6. Gruber V. (2011) Minutes of 'European Geogenic Radon Map (EGRM)' Workshop (JRC Ispra, 29 November – 1 December 2011) (available at http://rem.jrc.ec.europa.eu/RemWeb/, restricted area, access on request).
7. Gruber V., Bossew P., De Cort M. and Tollefsen T. The European map of the geogenic radon potential. 2013 J. Radiol. Prot. 33 51. doi:10.1088/0952-4746/33/1/51.
8. Neznal M., Matolin M., Just G., Turek K., Short-term Temporal Variations of Soil Gas Radon Concentration and Comparison of Measurement Techniques. Rad. Prot. Dosim. 108, 2004. P. 55-63 .
9. Neznal M., Neznal M., Matolin M., Barnet I. and Miksova J. 2004 The New Method for Assessing the Radon Risk of Building Sites (Czech Geological Survey Special Papers vol 16) (Prague: Czech Geological Survey) (www.radon-vos.cz/pdf/meto-dika.pdf).
10. Гулабянц Л.А. Пособие по проектированию противорадоновой защиты жилых и общественных зданий. М.: НО «ФЭН-НАУКА», 2013. 52 с.
11. EPA (US Environmental Protection Agency) 1993 EPA Map of Radon Zones (Report 402-R-93-071) (www.epa.gov/radon/zonemap.html, accessed 28 February 2012).
12. Kemski, J., Siehl, A., Stegemann, R., Valdivia-Manchego. M., Mapping the geogenic radon potential in Germany. The Science of the Total Environment 272, 2001. P. 217-230.
13. Ielsch G., Cushing M.E., Combes Ph., Cuney M. Mapping of the geogenic radon potential in France to improve radon risk management: methodology and first application to region Bourgogne. Journal of Environmental Radioactivity 101, 2010. P. 813-820.
14. Guida D., Guida M., Cuomo A., Guadagnuolo D., Siervo V. Assessment and Mapping of Radon-prone Areas on a regional scale as application of a Hierarchical Adaptive and Multi-scale Approach for the Environmental Planning. Case Study of Campania Region, Southern Italy. WSEAS Transactions on Systems. Issue 2, Volume 12, 2013. P. 105-120.

Литература (продолжение)

15. Петрова Т.Б. Особенности формирования радиационного фона г.Москвы, обусловленного гамма-излучающими радионуклидами природного и техногенного происхождения. Автореф. диссер. на соискание уч. степ. канд. техн. наук: 05.26.02. Федеральный медицинский биофизический центр им.А.И.Бурназяна.М., 2011. 25 с.

16. Микляев П.С., Томашев А.В., Охрименко С.Е., Петрова Т.Б., и др. Содержание радионуклидов естественного происхождения в грунтах г.Москвы. АНРИ №1(24), 2001. С. 65-72.

17. Микляев П.С., Макаров В.И., Дорожко А.Л., Петрова Т.Б., Маренный М.А., Маренный А.М., Макеев В.М. Радоновое поле Москвы. Геоэкология, №2, 2013. С. 172-187.

18. Микляев П.С. Закономерности миграции и эксхаляции радона из грунтов на территории г. Москвы. Автореф. диссер. на соискание уч. степ. канд. геол.-мин. наук: 25.00.08/ ПНИИИС, Москва, 2002. 25 с.

19. Микляев П.С., Петрова Т.Б. Механизмы формирования потока радона с поверхности почв и подходы к оценке радоноопасности селитебных территорий. АНРИ №2(49), 2007. С. 2-17.

20. Ringer W., Kaineder H., Friedmann H. The Austrian Radon Programme – Past and future. (2010) Proceedings – Third European IRPA Congress, 14–18 June 2010, Helsinki, Finland. Electronic publication, August 2011. ISBN: 978-952-478-551-8 (pdf) www.irpa2010europe.com. P. 490-498.

21. Dehandschutter B. & Sonck M. Estimating lung cancer risk due to radon exposure in the radon-prone areas of Belgium. (2010) Proceedings – Third European IRPA Congress, 14–18 June 2010, Helsinki, Finland. Electronic publication, August 2011. ISBN: 978-952-478-551-8 (pdf) www.irpa2010europe.com. P. 655-662.

22. Valmari T., Makelainen I., Arvela H., Reisbacka H. National measurement databasein radon research in Finland. (2010) Proceedings – Third European IRPA Congress, 14–18 June 2010, Helsinki, Finland. Electronic publication, August 2011. ISBN: 978-952-478-551-8 (pdf) www.irpa2010europe.com. P. 509-518.

23. Miles J.C.H., Appleton J.D., Rees D.M., Green B.R.M., Adlam K.A.M., Myers A.H. Indicative Atlas of Radon in England and Wales. Chilton, Didcot, Oxfordshire OX11 ORQ, UK. 2007 (WEB ONLY VERSION). http://www.hpa.org.uk.

24. ARPANSA Fact Sheet 26 – Radon Map of Australia (http://www.arpansa.gov.au/pubs/factsheets/026is_radonmap.pdf) Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, 2011.

25. Radon Potential Map of Canada, 2011. Radon Environmental Management Corporation. http://www.radoncorp.com.

26. Титаева Н.А. Геохимия природных радиоактивных радов распада. М.: ГЕОС, 2005. 226 с.

27. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Маренный М.А., Маренный А.М., Дорожко А.Л., Макеев В.М. Карта плотности потока радона на территории Москвы. АНРИ №3(70), 2012. С. 15-24.

Mapping the Geogenic Radon Potential (for Example, the City of Moscow)

Miklyaev Petr (Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the Russian Academy of Sciences (IEG RAS), Moscow, Russia); Petrova Tatiana (Moscow State University, Moscow, Russia); Klimshin Aleksey, Smirnova Anna (Institute of Geophysics, The Ural Branch of Russian Academy of Science, Yekaterinburg, Russia)

Abstract. Methodical approaches to the mapping geogenic radon potential in Russia were created. The mapping is based on the analysis of the spatial distribution of specific activity of radium in the soil and abnormal values radon flux density from the surface. As a basis for zoning is proposed to use the cadastral division of Russia. A map of radon potential of Moscow was created. Map can be used for urban planning, for engineering surveys, for hygienic studies, including, for the assessment of doses received by the population as a result of exposure to radon, and finally as a resource aimed at informing the public.

Key words: *radon mapping, radioactivity geology, geogenic radon potential, radon flux, specific activity of radium.*

П.С.Микляев (к.г.-м.н., в.н.с.) – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии им.Е.М.Сергеева РАН; 101000, г.Москва, Уланский пер., д.13, стр.2.

Т.Б.Петрова (к.т.н., с.н.с.) – МГУ им.М.В.Ломоносова; 119992, г.Москва, Ленинские горы, д.1, стр.10.

А.В.Климшин (к.т.н., н.с.), А.П.Смирнова (инж.) – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им.Ю.П.Булашевича Уральского отделения РАН; 620016, г.Екатеринбург, ул.Амундсена, д.100.

Контакты: тел.: +7 (495) 607-80-63; e-mail: peterm7@inbox.ru.