

РАДИОАКТИВНЫЕ ВОДЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ

А.Я.Смирнова

Воронежский государственный университет

Рассматриваются вопросы геологии района и условия формирования зон аномальных концентраций радона в подземных водах. Ставится задача исследования экологического риска, связанного с радоном в воздушной и водной среде.

Региональная изученность радиоактивных подземных вод Черноземья остается крайне недостаточной. Между тем проблема изучения радиоактивных элементов и в частности радона в водной и воздушной среде в современное время весьма актуальна. Это объясняется с одной стороны введением новых норм радиоактивной безопасности, повышением государственных требований к качеству пресных питьевых и минеральных лечебных вод, возникновением новых экологических особенностей радиоактивных вод, а с другой – использованием радиоактивных компонентов в качестве геохимических показателей при поисках минеральных ресурсов и рудопроявлений. Повышенно внимание к экологическим проблемам, связанным с влиянием радиоактивных вод на окружающую среду. Требования к качеству пресных питьевых вод указывают на недопустимость концентрации радона более, чем 60 Бк/дм^3 , а радия более $0,8 \text{ Бк/дм}^3$ [1]. Однако, многие подземные водоисточники отличаются сравнительно высокими концентрациями радона. Например, в Ленинградской области в водах отдельных участков наблюдается в Бк/дм^3 : 550–1700, в Карелии – более 550, на Кавказе – 109–1480, Забайкалье – 1480–7400 [2].

Как известно, начало изучения радиоактивных элементов в гидросфере было положено В.И. Вернадским, в трудах которого рассмотрены вопросы насыщения вод радиоактивными компонентами, особенности их миграции и накопления. В начале XX столетия под его руководством были начаты поиски урановых месторождений и разработаны основные положения учения о геологии и геохимии радиоактивных элементов. Однако, широкий размах и планомерность изучения распространения радиоактивных элементов в природе получили геолого-разведочные работы после тридцатых годов.

Во всех природных водах Земли содержится некоторое количество радиоактивных элементов. В гидрогеологической практике под радиоактивными водами подразумеваются подземные воды, обогащенные ураном, радием и радоном. Наиболее высокие концентрации радиоактивности прослеживаются в водах урановых месторождений кислых кристаллических пород ($U^{238} > n \cdot 10^{-8} \text{ г/дм}^3$, $Ra > n \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$), в высокоминерализованных водах погруженных нефтяных месторождений, в сейсмически активных регионах Средней Азии, Кавказа [2]. Обогащение природных вод радиоактивными элементами связано с эмануирующей способностью руд и

горных пород, содержащих урано–радиевую минерализацию. Эманирование коллекторов подземных вод определяет цепочку распада элементов уранового ряда: $U^{238} \rightarrow Ra^{226} \rightarrow Ra^{222}$. Период полураспада этих элементов исчисляется от $4,5 \cdot 10^9$ лет до 3,825 дней. Далее радон распадается с выделением альфа-частиц, продуцирующих радиоактивные изотопы свинца, полония и висмута.

В природе широко распространены радиоактивные радоновые воды с пониженными фоновыми и весьма значительными концентрациями радона. Такие участки известны в России и далеко за ее пределами: Канаде, Бразилии, Индии, Иране, США и др.

Повышенными концентрациями радона характеризуются подземные воды пород Балтийского щита, окраинных районов Русской плиты при сочленении их с кристаллическими массивами.

Из практики исследования подземных вод следует, что радиоактивные воды могут формироваться в различных геологических и гидрогеологических условиях. Однако, в большинстве случаев они приурочены к трещиноватым магматическим породам, в которых обнаруживаются рассеянные или повышенные концентрации урана и радия (табл.1).

Среднее содержание радиоактивных элементов в природных водах в сотни раз меньше, чем в горных породах (табл.2).

В бальнеологии большой популярностью пользуются радоновые воды, в которых радон является лечебным фактором. Они применяются на курортах в виде водных ванн для лечения заболеваний нервной, сердечно–сосудистой систем, органов дыхания и болезней обмена веществ. Лечение радоном отличается большой эффективностью. Во всемирной медицинской практике преобладает эксплуатация месторождений радоновых вод: Карловы Вары, Баден–Баден, Пятигорск. Если уран и радий – металлы, то эманация радия – газ радон с высокой растворимостью в воде.

По величине концентрации радона (Бк/дм^3) выделяются следующие подгруппы:

- очень слаборадоновые – 185–740;
- слаборадоновые – 740–1480;
- среднерадоновые – 1480–1400;
- высокорадоновые > 7400.

Преимущественное применение в здравницах России (Железноводск, Кисловодск, Сестрорецкий

Таблица 1

Среднее содержание радиоактивных элементов в породах по А.Холмсу и А.П.Виноградову

Породы	U%	Ra%
Кислые	$4 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$
Основные	$12 \cdot 10^{-4}$	$0,4 \cdot 10^{-10}$
Осадочные (песчаники)	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$

Таблица 2

Среднее содержание урана, радия и радона в природных водах

Водные системы	U г/дм ³	Ra г/дм ³	Rn Бк/дм ³
Поверхностные воды:			
Океаны и моря	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-13}$	2–5
Озера и реки	$(8-6) \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-13}$	0
Подземные воды зоны интенсивного водообмена в породах:			
Осадочные породы	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-12}$	10–100
Кислые магматические породы	$7 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-12}$	120–400
Породы урановых месторождений	$6 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-11}$	> 750

курорт близ Санкт–Петербурга, Молоковка в Забайкалье) находят первая и вторая подгруппы.

В зависимости от геолого–структурных особенностей и гидрогеологических условий территории проявления радоновых вод носят различный характер: региональный и локальный с контурами месторождений.

Как было указано выше источники радона в подземных водах связаны с трещиноватыми магматическими и осадочными породами, обогащенными урано–радиевой минерализацией. К приоритетным относятся граниты, пегматиты, гнейсы и вулканические породы. Работами специалистов в области радиогеологии указывается, что обогащение вод радоном зависит в первую очередь от содержания урано–радиевых минералов в водовмещающих породах и от способности их эманации. Большая роль принадлежит трещиноватости пород, пористости, скорости фильтрации воды по трещинам и величине диаметра трещин. Трещинные воды кислых кристаллических массивов отличаются высокой концентрацией радона.

В Центральном Черноземье радоновые воды были открыты при поисковых работах на урано–радиевые ресурсы в кристаллических породах Воронежского кристаллического массива (ВКМ)

Долгое время Центральное Черноземье, расположенное в сводовой и юго–восточной части ВКМ, оставалось неизученным в отношении минеральных вод. Исследованиями, выполненными геологами, гидрогеологами, геохимиками научных и производственных организаций городов Воронежа, Белгорода, Москвы во второй половине прошлого столетия, было показано, что на территории Центрального Черноземья широко распространены минеральные лечебные воды разнообразного химического состава, минерализации, газового состава, биологически активных элементов.

Анализ и обобщение большого фактического материала по водам, размещенным в гидродинамических зонах интенсивного и затрудненного водообмена, проведенная оценка биологически активных

элементов позволяют выделить пять бальнеологических групп минеральных вод [4]. Ведущее место среди них по лечебной ценности занимают радоновые воды. В зависимости от геологических и гидрогеологических особенностей территории Черноземья создаются условия для формирования широкого спектра фоновых и повышенных концентраций радона в подземных водах, приведшие в ряде случаев к образованию месторождений радоновых вод.

Работами Дмитракова Л.И. и др. (1999 г.) по вопросам ураноносности ВКМ прогнозируется формирование урановых месторождений типа «несогласия» и «инфильтрационного палеорусла» на территории Воронежской и Белгородской областей. Широко известно проявление уранового оруденения в Калач–Эртильском мегаблоке ВКМ, в западной периферии которого, в Лискинском районе, у озера Богатое, к зоне сочленения осадочных девонских пород и мигматит – гранит – грано–сиенитового комплекса, приурочено месторождение урано–радоновых вод. Его пространственная гидрогеологическая урано–радоновая модель четко обрисовывается в виде купола, на участках глубинного тектонического водопроводящего Богатовского разлома с прилегающей к нему системой трещин. Водовмещающие породы – щелочные и кислые разности магматических пород опробованы скважинами на глубине 75 и более м.

Морфология и объем минеральных вод на фиксируемый момент времени указан на рисунке.

Пространственная модель распределения концентраций радона в воде зависит от многих факторов, но главные – масштаб и формы содержания урано–радиевой минерализации в массиве трещиноватых пород. Они изучены при поисковых геологических работах на уран геологами бывшей Придонской геолого–геофизической экспедиции в указанном мегаблоке.

Лискинское месторождение радоновых вод отличается сложными гидрогеологическими условиями, зависящими от геолого–структурных особенностей, влияющих на гидродинамическую и гид-

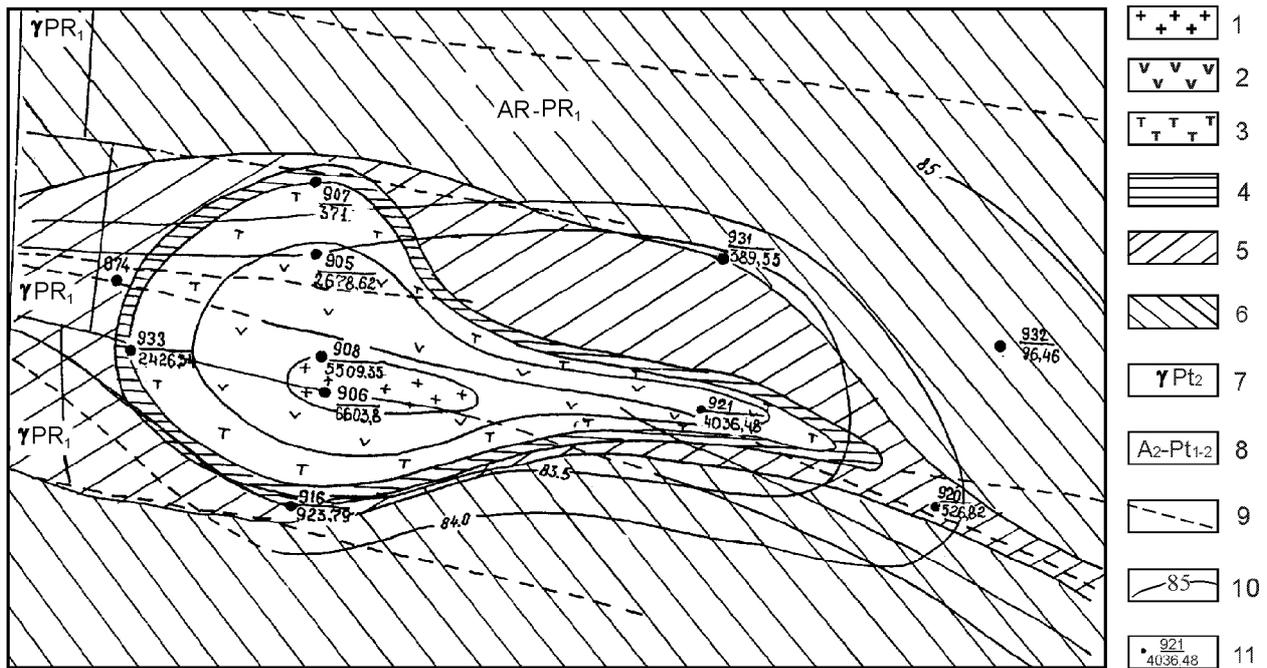


Рисунок. Распространение радона в водах трещиноватой зоны архейско-протерозойских пород Лискинского месторождения на глубине 230 – 280 м: 1 – содержание радона в воде: Бк/дм³; 1 – более 5500; 2 – 5500–2600; 3 – 2600–900; 4 – 900–500; 5 – 500–300; 6 – менее 300; 7 – среднепротерозойские граниты; 8 – архейско-протерозойские гнейсы; 9 – разрывные нарушения системы Богатовского разлома; 10 – гидроизоэпы трещинных вод нижней трещиноватой зоны; 11 – скважина: цифры в числителе – номер скважины, в знаменателе – содержание радона.

рогеохимическую структуру восходящего потока вод. Формирующийся тип радонового месторождения определяется разгрузкой подземных вод в трещинно-жильную систему архейско-протерозойских магматических пород и, следовательно, вероятной возможностью их внедрения по системам сквозных трещин в виде гидродинамических куполов вверх по разрезу в среднедевонские отложения. Воды циркулируют в трещинах субширотной ориентации с наиболее концентрированной их разгрузкой в центре месторождения, где глубина вскрытия вод скважиной составляет 75 м. В разрезе продуктивной толщи выделяется два уровня концентрации радона в водах – нижний и верхний.

Нижний уровень концентрации радона составляет 2934,6–4453,0 Бк/дм³. Радоновые воды циркулируют по трещинам архейско-протерозойских гнейсов на глубинах от 75 до 120 м. Мощность отдельных участков трещинных пород, обогащенных урано-радиевой минерализацией, составляет 10–12 м. По показателю коэффициента фильтрации (0,057–0,32 м/с). Породы относятся к слабопроницаемым. Воды напорны. В ряде скважин пьезометрический уровень устанавливался выше земной поверхности на 0,4–0,7 м. Водообильность трещинной зоны пород по данным дебита скважин изменяется от 35 до 216 м³/сут при понижении уровня в них на 54,6–56,4 м. Гидрогеохимическое опробование и аналитические работы по определению химического состава вод по унифицированной методике Ю. Лурье (1971 г.) свидетельствуют об относительно малой минерализации (1,4 – 1,72 г/дм³), преобладании хлоридов, сульфатов и малым, в анионной части,

содержанием гидрокарбонатов. Повышено содержание натрия и кальция в катионной части.

Таким образом, радоновая вода по макрокомпонентам типизируется как хлоридно-сульфатная натриево-кальциевая. Аналогичный тип воды широко распространен в среднедевонских отложениях, окаймляющих склоны ВКМ.

Верхний уровень концентрации радона в воде составляет 5509,35 Бк/дм³, т.е. эти воды относятся к среднерадоновым. Они циркулируют в трещиноватых породах архей-протерозоя на глубине 230–280 м. Трещиноватость этих массивов пород более равномерная, что подтверждается малыми вариациями коэффициента фильтрации – 0,29–0,28 м/с. Воды напорны. Дебиты скважин колеблются от 0,95 до 121 м³/сут при понижении пьезометрического уровня на 46,6–54,0 м. В гидрогеохимическом отношении эти породы содержат слабосоленоватую воду с минерализацией от 1,6 до 1,9 г/дм³. По данным Центрального научно-исследовательского института курортологии и физиотерапии (ЦНИИКиФ) в химическом составе вод преимущество сохраняется в анионной части за сульфатами (46,7–58,0 моль-%) и хлоридами (40–49 моль-%). Очень мало гидрокарбонатов (2–3,6 моль). Макро-катионный состав представлен натрием (64,6–71,0 моль-%) и кальцием (27–31,0 моль-%) (табл. 3).

Как видно из приведенных аналитических данных по мере возрастания глубины в воде накапливаются сульфаты, что возможно связано с сульфидным оруднением, сопровождающим урано-радиевую минерализацию. Подобная геологическая ситуация наблюдается в районе Кавказских мине-

Таблица 3

Химический состав минеральных радоновых вод Лискинского месторождения.

Местоположение точки наблюдения	Озеро Богатое Лискинского района, скв. 2р.					
Геологический индекс водоносного горизонта	AR-PR					
Глубина отбора проб	75,0–120,0			230,0–280,0		
РН	7,75			7,0		
Катионы:	мг/дм ³	моль/дм ³	моль-%	мг/дм ³	моль /дм ³	моль %
Ca ²⁺	171,1	8,54	31,0	176,63	8,81	30,0
Mg ²⁺	12,0	1,02	4,0	7,14	0,59	2,0
(Na+K) ⁺	414,2	17,92	65,0	495,5	19,98	68,0
Сумма катионов:	597,7	27,48	100,0	643,27	29,38	100,0
Анионы:						
HCO ₃ ⁻	61,0	1,14	4,0	89,64	1,47	5,0
SO ₄ ²⁻	617,2	12,85	47,0	677,33	14,1	48,0
Cl ⁻	478,2	13,49	49,0	489,53	13,81	47,0
Сумма анионов:	1156,0	27,48	100,0	1256,5	29,38	100,0
Сумма ионов:	1754,0			1899,77		
Содержание: Rn	4452 Бк/дм ³			6603,8 Бк/дм ³		
Общая жесткость, мг-экв./дм ³		9,56			9,4	
Общая М, г/дм ³	1,75 г/дм ³			1,9 г/дм ³		
Формула Курлова	$M_{1,75} \frac{Cl_{49}SO_4^{47}HCO_3^4}{(Na + K)_{65}Ca_{31}Mg_4}$			$M_{1,9} \frac{SO_4^{48}Cl_{47}HCO_3^5}{(Na + K)_{68}Ca_{30}Mg_2}$		

ральных вод, на Ессентукском месторождении углекислых минеральных вод, формирование которых сопряжено с уран-изотопным водопроявлениями, контактирующими с рудными месторождениями различного генезиса [3]. Что касается радона на Лискинском месторождении, то его концентрация увеличивается до 6603 Бк/дм³, что свидетельствует о тесной взаимосвязи с урано-радиевой минерализацией, концентрация которой с глубиной, вероятно, увеличивается.

По данным ЦНИИКиФ в радоновых минеральных лечебных водах Лискинского месторождения имеются U238 – (10,0-11,6)·10⁻³ Бк/дм³, а содержание Ra226 составляет (0,15–28,6)·10⁻¹² г/дм³.

Обращают на себя внимание содержащиеся в водах биологически активные микроэлементы в мг/дм³: фтор – 3,27–0,38, стронций – 1,38–1,46, медь – 0,15. Присутствует свинец – 0,05, цинк – 0,08, молибден – 0,04. Концентрации этих микроэлементов усиливает лечебный фактор и повышает минеральную ценность радоновых вод.

При использовании радоновых вод в медицинской практике к ним предъявляются требования в отношении стабильности концентрации радона. В связи с этим важно отметить, что пятилетние наблюдения ГПП «Воронежгеология» указывают на устойчивость концентрации радона на месторождении. Этой же организацией проводилась оценка запасов радоновых вод по двум скважинам (Е.М. Талдыкин, 1973 г.). Оказалось, что суммарный возможный водоотбор из 2-х скважин с концентрацией радона 5509,3–66038 Бк/дм³ может быть в количестве 415 м³/сут.

Проведенный нами анализ гидрогеологической радоновой модели в плане и разрезе свидетель-

ствует о взаимосвязи водоносных горизонтов терригенно-карбонатных отложений среднего девона с водами тектонических трещин кристаллического фундамента. В таких условиях запасы вод месторождения могут формироваться за счет перетекания вод из девонских отложений и смешения с потоком радоновых вод поднимающихся с больших глубин из эманулирующих гранитоидных коллекторов, фундамента. Возможно, что химический состав вод в меньшей степени зависит от процессов выщелачивания кристаллических пород и окислительно-восстановительных условий подземной гидросферы докембрия.

В связи с этим можно предположить, что в региональном плане Черноземья из эманулирующих коллекторов гранитоидных пород напорные радоновые воды могут внедряться вверх по разрезу в осадочные породы среднего девона в зонах повышенной трещиноватости или в местах образования гидрогеологических «окон». Следовательно, в девонских водоносных горизонтах, возможно образование очагов радоновых минеральных вод.

В России известны минеральные воды с более низкой концентрацией радона. Это Липовские минеральные лечебные воды Урала. Содержание радона в них колеблется от 74 до 1480 Бк/дм³. Эти воды относятся к ценным в бальнеологическом отношении, так как они используются без разбавления их пресной водой и обладают высоким лечебным эффектом.

Эманирование гранитоидных пород, как показывают фактические данные, не оказывает влияние на формирование химического состава минеральных лечебных вод, что находит подтверждение материалами исследования Волоконовского место-

рождения и участка Маслова Пристань Белгородской области.

Волоконовское месторождение радоновых вод расположено в Чернянском районе, в бассейне реки Оскол. Скважинами вскрыты воды на глубине 210–300 м в трещиноватых кварцито–песчаниках архейско–протерозойского возраста. Содержание радона колеблется от 1113 до 2226 Бк/дм³. Волоконовские воды относятся к среднерадоновым водам, лечебный фактор которых определяется исключительной концентрацией радона. Аналитические данные химического состава подтверждают формирование гидрокарбонатно–хлоридного натриевого класса вод с минерализацией 0,5–0,65 г/дм³.

Проявление радоновых минеральных вод отмечено на юге Белгородской области, в Шебекинском районе, на участке Маслова Пристань. Воды вскрыты скважиной на глубине 795 м в алевроито–песчаниковой толще докембрия. Эти воды отличаются оригинальным химическим составом, тип которого указывает на формирование их в древней морской обстановке. Эти воды с высокой минерализацией (30–31 г/дм³). Анионный состав представлен хлоридами. Катионная составляющая воды – кальцием и натрием.

Радоновые минеральные воды Центрального Черноземья используются в местных радонолечебницах. Например воды Лискинского месторождения подаются по трубопроводу в пансионаты Георгиу–Дежа. Разработан способ транспортировки радоновых вод в герметичных цистернах автотранспортом от скважины месторождения до радонолечебницы в г. Белгороде. Как известно всего в России проводится около 1 млн. радоновых процедур в год (А.Н. Разумов и др., 2000 г.)

В последние десятилетия исследователи геохимии вод все более обращают внимание на возможную экологическую опасность радона и продуктов его распада: свинца, висмута и теллура на биотические компоненты среды. Органами здравоохранения прослежена связь между этими компонентами и онкологическими заболеваниями населения.

Напорные радоно–радиевые воды под влиянием гидростатического давления могут подниматься к приповерхностным слоям гидросферы и адсорбционно накапливаться в органо–минеральной части почв. В испарительном процессе радон может мигрировать в воздух атмосферы, скапливаться в воздухе подвальных и полуподвальных помещений.

Как указано в работах З.П. Денисенко, А.В. Щелкунова и др. [5] на отдельных локальных площадках г. Пятигорска в воздухе закрытых подвальных помещений объемная концентрация радона может составлять 1200–2000 Бк/дм³, в то время как в современных строениях она не превышает 70 Бк/дм³. Есть сведения о повышенных концентраци-

ях радона в подвальных и полуподвальных помещениях старых зданий г. Воронежа.

Таким образом, вышеприведенные данные свидетельствуют об определяющей роли структурно–тектонического строения и литологии докембрийского кристаллического фундамента в формировании пространственных радоновых гидрогеохимических аномалий Центрального Черноземья. Для неглубокозалегающего Лискинского месторождения существует потенциальная опасность загрязнения водами других горизонтов в процессе его эксплуатации и нарушении гидродинамических параметров водоносной зоны.

Пространственная гидрогеологическая радоновая модель месторождения позволяет осуществлять контроль за охраной минеральных вод от истощения и загрязнения.

Учитывая широкий спектр использования радоновых вод в бальнеологии и при поисках разнообразных минеральных ресурсов кристаллического фундамента и осадочного чехла проблема исследования радоновых вод Черноземья требует более широких планомерных исследований.

Медико–гидрогеологические исследования радиоактивных вод приповерхностных слоев литосферы рекомендуется включать в комплекс экологических исследований, осуществляемых на территории Центрального Черноземья.

Необходимо признать что региональная изученность радиоактивности подземных вод недостаточна для социально–экономического развития Центрального Черноземья и требует планомерных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы. -М., 1999. -116 с.
2. Воронов А.Н. Радон в подземных водах: экологические аспекты // Экологические проблемы гидрогеологии: Восьмые Толстихинские чтения. –СПб, 1999. - С. 148-151.
3. Духина А.А. Пространственная гидрогеологическая уран-изотопная модель Ессентукских углекислых минеральных вод // Радон, гелий и другие радиогенные компоненты в природных водах: экологические и научные аспекты: Тез. докл. Междунар. научн. семинар. – СПб, 2000. – С. 12-16.
4. Смирнова А.Я., Бочаров В.Л., Лукьянов В.Ф. Минеральные воды Воронежской области (лечебные и лечебно-столовые). -Воронеж, 1995. – 182 с.
5. Денисенко З.П., Щелкунов А.В., Потапов Е.Г. Радиационно-экологическое состояние района горы Горячая Пятигорска //Радон, гелий и другие радиогенные компоненты в природных водах: экологические и научные аспекты: Тез. докл. Междунар. научн. семинар. – СПб, 2000. – С. 50-52.