

РАДИОАКТИВНОСТЬ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КАРСТОВЫХ МАССИВОВ

Максимович Н.Г.¹, Гершанок В.А.², Мещерякова О.Ю.¹, Растегаев А.В.³

¹Естественнонаучный институт Пермского государственного национального исследовательского университета, г. Пермь, Россия, e-mail: nmax54@gmail.com, olgam.psu@gmail.com

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия, e-mail: geophys@psu.ru

³Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, e-mail: gng@pstu.ru

Инженерно-экологические изыскания предполагают оценку радиационной опасности. Районы развития карста имеют ряд особенностей, связанных с циркуляцией, которые создают особые условия для накопления радиоактивных веществ. В качестве примера накопления радиоактивных веществ в карстовых массивах рассматривается Кунгурская ледяная пещера при оценке инженерно-геологических условий. Проблема ее естественной и техногенной радиоактивности представляет существенный интерес, поскольку пещера является научной лабораторией и одновременно туристическим объектом.

Ключевые слова: радиоактивность, карст, инженерно-геологические изыскания, пещера, радон.

RADIOACTIVITY AND ENGINEERING-GEOLOGICAL FEATURES OF KARST MASSIFS

Maksimovich N.G.¹, Gershanok V.A.², Meshcheryakova O.Y.¹, Rastyagaev A.V.³

¹Institute of Natural Sciences of Perm State University, Perm, Russia, e-mail: nmax54@gmail.com, olgam.psu@gmail.com

²Perm State University, Perm, Russia, e-mail: geophys@psu.ru

³State National Research Polytechnic University of Perm, Perm, Russia, e-mail: gng@pstu.ru

Engineering and environmental investigations suggested an assessment of radiation hazard. Areas of karst development have a number of features associated with the circulation, which creates special conditions for storage of radioactive substances. As an example, the accumulation of radioactive substances in karst massifs considered Kungur Ice Cave in the evaluation of engineering-geological conditions. The problem of natural and man-made radioactivity is of considerable interest, because the cave is a scientific laboratory and at the same time tourist attraction.

Key words: radioactivity, karst, engineering-geological researches, cave, radon.

Инженерно-экологические изыскания согласно пп. 4.1, 4.44-4.60 СП 11-102-97 [10] предполагают оценку радиационной опасности.

Как известно, естественный радиационный фон обусловлен радиоактивными изотопами элементов, содержащихся во всех окружающих нас предметах, а именно, в горных породах, строительных материалах, бытовых предметах, пище, во всех типах вод и атмосфере. Естественный фон обусловлен также космическим излучением.

Основной вклад в естественную радиоактивность вносят изотопы, находящиеся в горных породах. Таких изотопов известно более 250, и ими обусловлено естественное гамма-поле, которое повсюду нас сопровождает. Среди естественных радиоизотопов наиболее распространенными являются следующие: Rb^{87} , Th^{232} , K^{40} , U^{238} . Средняя концентрация каждого из них в земной коре превышает 2 з/т, что значительно больше, чем у таких широко известных элементов, как W , Mo , I , Bi , Au , Ag , Hg и многие др.

Изотопы Rb^{87} и K^{40} являются одиночными, т.е. после их распада сразу образуются стабильные продукты. Повышенные их концентрации достаточно хорошо проявляются в гамма-поле.

Изотопы Th^{232} и U^{238} являются родоначальниками радиоактивных семейств – ториевого и урано-радиевого, т.е. образуют цепочки последовательно

превращающихся друг в друга элементов. Причем основное радиоактивное излучение создают не сами родоначальники семейств, а их многочисленные продукты распада. Существующее в природе третье семейство – актиноурановое – рассматривать не будем из-за его крайне малого распространения. Родоначальник семейства U^{235} составляет по массе 0,7% от U^{238} , и излучатели семейства не вносят сколь-нибудь заметного вклада в общую радиоактивность.

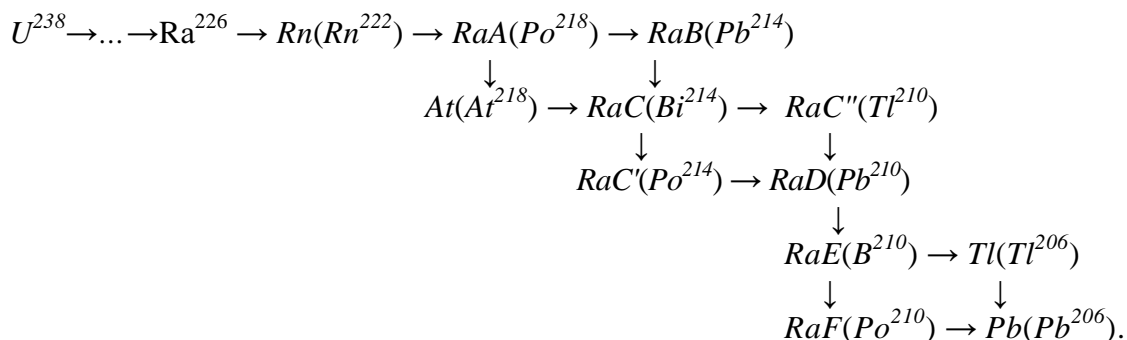
Говоря о радиационной нагрузке на население, следует иметь в виду, что среди продуктов распада в семействах есть по одному радиоактивному газу – изотопу радона, называемому эманацией. В урано-радиевом семействе это радон Rn^{222} , в ториевом – Rn^{220} (этот изотоп часто называют торон). Что касается эманации актиноуранового семейства – актинона (Rn^{219}), то ее рассматривать не будем из-за малого распространения.

Опасность газообразных продуктов распада заключается не только в создании ими гамма-поля. Попадая при дыхании внутрь организма, они вместе со своими продуктами распада создают внутреннее облучение органов не только γ -лучами, но и α - и β -частицами, которые из-за малой проникающей способности из внешнего источника внутрь не проникают, задерживаясь в кожном покрове.

Из двух видов эманации наибольшее значение имеет более долгоживущий радон. Его период полураспада $T = 3,825$ дня, в то время как у торона лишь $T = 54,5$ секунды, и он достаточно быстро распадается. Радон – инертный газ, не имеющий ни цвета, ни запаха, ни других признаков, по которым органы чувств человека могли бы его распознать. Он хорошо растворяется в воде, почти в 10 раз тяжелее воздуха и поэтому скапливается в низких участках местности, подвалах и на первых этажах зданий [8].

Материнским элементом для радона является радий, период полураспада которого около 1610 лет. Последующая цепочка радиоактивного распада и образовавшиеся при этом изотопы приведены в таблице 1.

Таблица 1. Фрагмент схемы распада в урано-радиевом семействе



Все продукты распада радона являются твердыми элементами. Они прикрепляются к микроскопическим пылинкам-аэрозолям и вместе с радоном и вдыхаемым воздухом попадают в легкие, поверхность которых составляет несколько десятков m^2 .

Рассмотрим вклад отдельных α -, β -, γ -излучателей в общую радиоактивность, создаваемую радоном и его продуктами распада.

Среди продуктов распада радона основными α -излучателями являются Rn , RaA , RaC' и RaF [5]. Их спектральная характеристика приведена в таблице 2.

Таблица 2 Спектральная характеристика основных α -излучателей урано-радиевого семейства

Излучатель	Энергия, α -	Число пар ионов,	Средняя длина
------------	---------------------	------------------	---------------

	частицы, МэВ	образованный α -частицей	пробега α -частицы в воздухе, см
Rn	5,58	$1,57 \cdot 10^5$	4,04
RaA	6,11	$1,72 \cdot 10^5$	4,64
RaC'	7,83	$2,20 \cdot 10^5$	6,87
RaF	5,40	$1,53 \cdot 10^5$	3,83

Достаточно мощными α -излучателями являются также продукты *At* и *RaC*, не включенные в таблицу 2, тем не менее их вклад в общее α -излучение невелик, в связи с тем, что образование этих продуктов из своих материнских элементов ничтожно мало, т.к. основная доля атомов распадается по другим веткам (табл. 1).

Рассмотренные нами 4 излучателя обеспечивают 65% энергии α -излучения всего семейства. Остальные 35% энергии связаны с твердыми α -излучателями продуктов распада урана до радона, которые в таблице 1 не приведены.

Медициной установлено, что относительная биологическая эффективность ($K_{обэ}$) α -частиц по сравнению с β - и γ -излучением гораздо более высокая. Так, для β -частиц и γ -лучей $K_{обэ} = 1$, в то время как для α -частиц $K_{обэ} = 20$, в чем и состоит основная опасность α -излучателя, находящегося внутри организма.

Внешний α -излучатель из-за ничтожно малой проникающей способности в веществе может оказать воздействие лишь на самый верхний слой кожи, проникнув внутрь не более чем на 0,001 мм.

Различная биологическая эффективность излучений заставляет при биологической оценке воздействия излучений на человека пользоваться не поглощенной дозой излучения $D_{погл}$, а эквивалентной $D_{экв}$, определяемой из выражения

$$D_{экв.} = D_{погл.} \cdot K_{обэ}. \quad (1)$$

Сам радон представляет опасность только как α -излучатель. Бета-частиц он не образует, а выделившееся количество γ -квантов при его распаде ничтожно мало.

Однако его продукты распада являются не только α -излучателями, но также и мощными β - и γ -излучателями. Так, около 50 % энергии β -излучения урано-радиевого семейства обеспечивают *RaB*, *RaC*, *RaE*, а на долю *RaB* и *RaC* еще приходится почти вся энергия (98%) γ -излучения семейства.

Сказанное свидетельствует о большом значении радона вместе со своими продуктами распада как мощного фактора радиационной нагрузки по α -, β -, γ -излучениям. По оценкам специалистов на его долю приходится свыше половины всей радиационной нагрузки от природных источников.

Роль торона в радиационной нагрузке изучена меньше. Распад в ториевом семействе происходит по схеме, аналогичной урано-радиевому семейству. Основными α -, β -, γ -излучателями в семействе являются *A*-, *B*-, *C* - продукты, а именно *ThA*(*Po*²¹⁶), *ThB*(*Pb*²¹²), *ThC*(*Bi*²¹²). Принято считать, что торон с продуктами распада обеспечивает не менее 30 % радиационной нагрузки от доли радона.

Свойство радона как α -излучателя свидетельствует о том, что общая радиоактивность, определяемая по γ -съемке, не является достаточным показателем наличия эманации. Нередко при невысоком уровне γ -поля наблюдаются повышенные показатели содержания эманации. И наоборот, поскольку γ -поле создают не только продукты распада радиоактивных семейств, но и одиночные радиоактивные излучатели, не имеющие к радону никакого отношения, то повышенный фон еще не свидетельствует о повышенном содержании радона. Содержание радона в воздухе можно определить только по изучению эманации.

Учитывая радоновую опасность, неудивительно, что в развитых странах радоновая проблема считается приоритетной. Начиная с 80-х годов прошлого столетия, в странах

стали устанавливаться нормативы на содержание радона в помещениях. В России его содержание в зданиях современной постройки не должно превышать 100 Бк/м^3 .

Постоянно образующийся в природе радон частично оседает внутри кристаллической решетки минералов, а частично поступает в окружающую среду, мигрируя от своего источника. Основным фактором миграции является диффузия. Миграция повышается с увеличением трещиноватости пород. Поэтому изучение концентраций эманации имеет большое значение в инженерной геологии при изучении трещиноватых, пористых пород, закарстованных участков и других ослабленных зон.

Районы развития карста имеют ряд особенностей, связанных с циркуляцией, которые создают особые условия для накопления радиоактивных веществ:

- повышенные трещиноватость и проницаемость;
- своеобразное движение воздушных потоков в массивах, зависящее от времени года;
- интенсивный водообмен карстовых вод;
- литология слагающих массив пород.

Известно, что миграция радона в земной коре происходит либо в газообразном, либо в растворенном состоянии. Содержание радона в подземной атмосфере и гидросфере зависит от концентрации радия во вмещающих породах и коэффициента эманирования пород. Рыхлые или сильнотрещиноватые породы, обладающие наибольшей внутренней поверхностью, характеризуются повышенным эманированием [9].

Примером накопления радиоактивных веществ в карстовых массивах является Кунгурская ледяная пещера [3] (рис. 1). Проблема ее естественной и техногенной радиоактивности представляет существенный интерес, поскольку пещера является научной лабораторией и одновременно туристическим объектом. В связи с этим в пещере проводились измерения уровня радиоактивности.

Первые замеры были выполнены в Кунгурской пещере в 1992 г., которые зарегистрировали повышенную гамма-активность, в 5 – 10 раз превышающую фоновую на поверхности. В залах Вышка, Метеорный и Дружбы Народов она составляла 35 – 38 мкР/ч, достигая в отдельных гротах 100 мкР/ч. Замеры на поверхности Ледяной горы показали повышенную радиоактивность в карстовых воронках, заполненных глиной (9–11 мкР/ч – на краях, 13-16 – в центре) [4].

Более детальные исследования были проведены в июле-августе 1999 г., точками наблюдения были охвачены различные морфологические элементы пещеры. Среднее значение гамма-фона составило 18 мкР/ч, что в 3 раза выше поверхностного фона (5-7 мкР/ч). Минимальная радиоактивность наблюдалась у Старого входа (5-10), в гротах Скандинавский (5-7 мкР/ч) и Скульптурный (9-12 мкР/ч), а наибольшая (до 70 мкР/ч) – в местах с сильной тягой воздуха, что косвенно свидетельствует о газовой природе излучения. Точки с большими значениями гамма-фона при незначительной тяге воздуха обнаружены в гротах Географов (до 32 мкР/ч), Вышка II и Близнецы (до 35 мкР/ч), Великан (до 44 мкР/ч) [4].

Изучение радиоактивности как в самой пещере, так и на ее поверхности было проведено летом 2001 г.. Для этого были проведены замеры активности воздуха и грунта дозиметром ДРГ 01М1 (в более чем 70 точках в гротах и в 30 точках на поверхности), отобраны пробы горных пород и почв, которые в дальнейшем исследовались в ИЭПС на гамма-спектрометре «Прогресс» в геометрии «Петри» – горные породы и «Маринелии» – почвы [2].

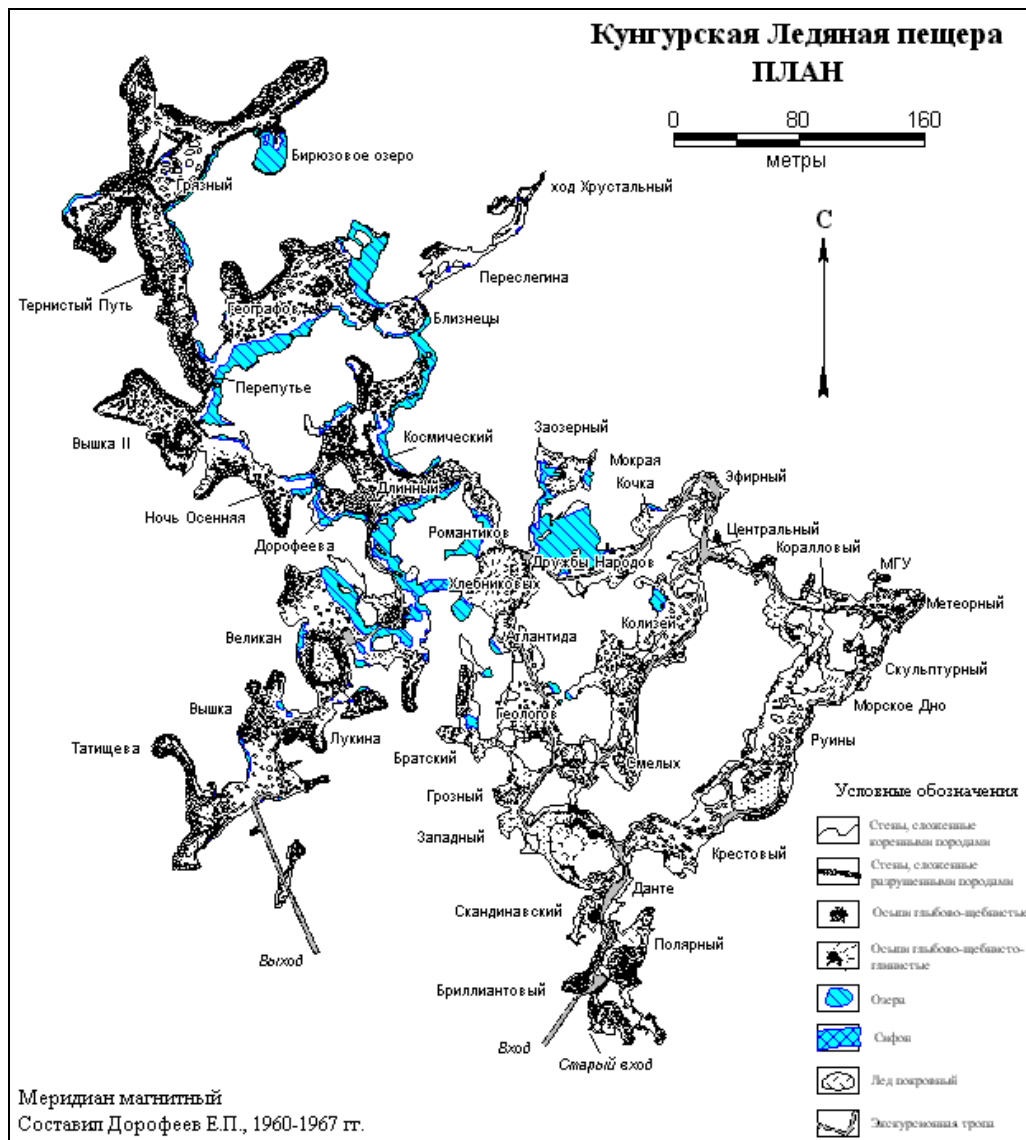


Рисунок 1. План-схема Кунгурской ледяной пещеры [8]

Активность грунта в пещере изменялась от 8 до 33 мкР/час, на поверхности – 6-17 мкР/час. Природный фон на Восточно-Европейской платформе составляет до 5-7 мкР/час в тех местах, где подстилающими являются карбонатные породы, и до 10-12 мкР/час – в случае сульфатных подстилающих пород. Активность воздуха в пещере изменялась от 6 до 48 мкР/час, в то время как на поверхности она составила 8-12 мкР/час. [1]. Средний показатель активности воздуха по пещере в целом – 20-26 мкР/час. В 13,5 % замеров она не превышала 12 мкР/час. Повышенная активность воздуха выявлена в гротах Коралловый, Колизей, Эфирный, Мокрая Кочка, Дружбы Народов, Длинный, Геофизиков, Ночь осенняя, Вышка-2, Грязный, Географов, Великан и Вышка [1].

Исходя из того, что Rn^{222} является дочерним продуктом распада Ra^{226} , основное внимание при изучении горных пород было обращено к этому природному изотопу. Используя данные о геологическом строении пещеры [3], было установлено, что максимальная активность воздуха наблюдается в тех гротах и коридорах, где в стенах вскрывается 4 слой ледяно-пещерской пачки кунгурского яруса пермской системы, состоящий из чередующихся слоев гипса и доломита. Полученные данные коррелируют с измеренной активностью Ra^{226} в отобранных образцах горных пород (табл. 3).

Таблица 3. Средняя активность Ra^{226} , Cs^{137} , Th^{232} и K^{40} в отработанных образцах горных пород, Бк/кг [2]

Породы	Кунгурская пещера				Дневная поверхность			
	Ra^{226}	Cs^{137}	Th^{232}	K^{40}	Ra^{226}	Cs^{137}	Th^{232}	K^{40}
Ангидрит*	6,1	3,8	5,3	249,6	3,8	2,5	2	156,1
Гипсо-ангидрит	14,03	4,1	5,35	314,45	15	5,1	10	238,2
Гипс	16,89	4,57	4,7	309	-	-	-	-
Селенит	9,2	3,8	6,1	212,8	-	-	-	-
Известняк метаморфизованный	5,17	7,23	7,73	256,27	-	-	-	-
Доломит (целик)	15,96	4,65	7,45	291,8	15,43	5,05	8,9	292,65
Доломит	28,57	5,9	10,35	329,55	-	-	-	-
Доломит (дресва)	44,64	4,8	10	253,3	42,68	6,5	10	265,8
Глина	20,2	5,3	15	684,4	-	-	-	-
Глинка трения	33,14	5,1	11	499,9	-	-	-	-

Примечание: * рыхлый ангидрит на дневной поверхности, (-) - нет данных.

Примером зависимости высокой активности воздуха и горной породы являются точки у восточной стены грота Дружбы Народов (40), у западной стены грота Длинный (28), у западной стены грота Колизей (30 мкР/час).

Гамма-фон существенно возрастает в летний период; его значения варьируются в гротах различного объема, но возрастание вблизи стен гротов не наблюдается. Это позволяет предположить, что причиной повышения фона является гамма-излучение не радионуклидов, входящих в состав горных пород, а присутствующих в виде аэрозолей в воздухе пещеры дочерних продуктов радона – свинца-214 (радий В) и висмута-214 (радий С) [4]. Повышенная активность воздуха наблюдается благодаря тому, что в летний период наблюдается нисходящая циркуляция воздуха, когда из пещеры движется поток охлажденного воздуха, а на смену ему через вертикальные каналы поступает теплый летний воздух [3].

В отобранных на дневной поверхности образцах горных пород активность Cs^{137} , K^{40} и Th^{232} выше, чем в пробах, отобранных в пещере (табл. 1). Объяснить появление техногенного цезия-137 в пещере возможно тремя причинами. Первая – привнос цезия-137 через воронки атмосферными водами, вторая – привнос цезия-137 паводковыми водами в весенний период времени, и третья – активная экскурсионная эксплуатация. Такая активная связь пещеры с окружающей средой способствует вносу техногенного изотопа Cs^{137} в относительно закрытую систему пещеры. В образцах почв, отобранных на разных формах рельефа, замерена активность Ra^{226} , Cs^{137} , K^{40} и Th^{232} (табл. 4) [2]. По полученным данным можно сделать вывод, что происходит миграция изотопов со склонов Ледяной горы и карстовых воронок, перераспределение этих радионуклидов и накопление их в понижениях рельефа и в самой пещере.

Таблица 4 Средняя активность Ra^{226} , Cs^{137} , Th^{232} и K^{40} в отобранных образцах почв, Бк/кг [2]

Место отбора	Ra^{226}	Cs^{137}	Th^{232}	K^{40}
Плоская поверхность Ледяной горы	15,36	32,69	11,68	328,1
Склон	8,951	21,99	3,2	207
Дно воронки, 1 надпойменная терраса	24,06	59,51	18	462,65
Среднее	15,93	38,06	10,96	332,58

Таким образом, при проведении инженерных изысканий и оценке радиационной обстановки в карстовых районах необходимо учитывать и особенности, которые могут обусловить повышенную активность и ее сезонную изменчивость.

Работа подготовлена при поддержке гранта РФФИ 10-05-96017 р_урал_а «Теоретические основы создания искусственных геохимических барьеров для защиты окружающей среды при освоении природных ресурсов Западного Урала».

Список литературы

1. Ажимова А. Ю., Киселев Г. П., Лавров И. А., Максимович Н. Г. Радиоактивность Кунгурской ледяной пещеры // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристской деятельности: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Кунгур, 2003. – С. 168-171.
2. Ажимова А. Ю., Киселев Г. П., Лавров И. А., Максимович Н. Г. Исследование радиоактивности в Кунгурской ледяной пещере // Карст и пещеры Кавказа: Материалы IV регионального карстолого-спелеологического совещ. – Сочи, 2003. – С. 34-37.
3. Кунгурская Ледяная пещера. – Пермь: Пермский ун-т, 1995. – Вып. 1.
4. Кунгурская Ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / под ред. докт. геолог.-минер. наук В. Н. Дублянского. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 376 с.
5. Новиков Г. Ф. Радиометрическая разведка. – Л.: Недра, 1989. – 404 с.
6. Поносов В. А., Катаев В. Н. О повышенном радиационном фоне в Кунгурской пещере // Свет: Вестн. Киев. карстолого-спелеол. центра. – Киев, 1992. – № 4 (6). – С. 36.
7. Поносов В. А., Степанов Ю. И. Экологические аспекты радиоактивности Кунгурской ледяной пещеры // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности. Мат-лы конф. – Кунгур, 2003. – С. 180-183.
8. Тестов Б. В., Шихов Н. И., Максимович Н. Г., Лавров И. А. Кунгурская ледяная пещера и радон // Вестник Уральского отделения РАН. – Екатеринбург: «Наука. Общество. Человек», 2003. – № 1 (3). – С. 49-54.
9. Титаева Н. А. Ядерная геохимия. – М.: Изд-во МГУ, 2000.
10. СП 11-102-97. Инженерно-экологические изыскания для строительства. – М.: ПНИИИС, 1997. – 42 с.

Рецензенты:

Середин В.В., д.г.-м.н., профессор, генеральный директор научно-исследовательского проектного и производственного предприятия по природоохранной деятельности «Недра», г. Пермь.

Лепихин А.П., д.г.н., профессор, директор Камского филиала ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Пермь.

Работа получена 16.09.2011.