

УДК 614.8

Проблемы обезвреживания радиоактивных отходов

Канд. техн. наук, доц. **Маркитанова Л.И.** Lidmark@yandex.ru
Университет ИТМО
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

В статье анализируются основные проблемы, возникающие при обезвреживании, утилизации и ликвидации радиоактивных отходов. Проблема утилизации и захоронения РАО атомных электростанций (АЭС) особенно острой становится в настоящее время, когда по условиям эксплуатации требуют демонтажа большинство АЭС в мире (более 65 реакторов АЭС и 260 реакторов, использующихся в научных целях). Каждый шестой реактор работает на российском топливе, а значит и отработанное ядерное топливо (ОЯТ) с этих АЭС возвращается в РФ. В мире эксплуатируется более 436 ядерных энергоблоков. АЭС вырабатывают более 17% всей электроэнергии. Общее количество скопившегося в мире ОЯТ превышает 200 тыс. т. Проектирование, строительство и эксплуатация радиохимического предприятия для переработки и хранения ОЯТ и РАО экономически оправдано только для государства с развитой самостоятельной ядерной энергетикой, которое владеет соответствующими технологиями и высококвалифицированным персоналом. В настоящее время радиохимические заводы работают в России, Франции и Великобритании. США придерживаются отложенного решения, предпочитая консервировать ОЯТ в специальных хранилищах, чтобы в будущем либо заняться его переработкой, либо провести окончательное захоронение. При этом поставляемое США в другие страны ядерное топливо не возвращается на переработку в США, следовательно, проблема по его захоронению целиком ложится на государства импортеры.

Рассматриваются способы утилизации и ликвидации радиоактивных отходов, реализованные в атомной энергетике России. Описаны теоретические и практические решения по переработке радиоактивных отходов. Классифицируются жидкие и твердые радиоактивные отходы. Приводятся примеры некоторых хранилищ радиоактивных отходов и предприятий по их переработке.

Ключевые слова: радиоактивные вещества, радиоактивное загрязнение, утилизация радиоактивных отходов, обезвреживание, проблемы захоронения

The problem of clearance and disposal of radioactive waste

Ph.D., associate prof. **Markitanova L.I.** Lidmark@yandex.ru
ITMO University
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

The article analyses the main problems arising from the disposal, recycling and disposing of radioactive waste. The problem of utilization and the disposal of radioactive waste of nuclear power plants is becoming particularly relevant at the present time, when the conditions require the dismantling of most of the nuclear power plants in the world (more than 65 reactors and 260 reactors used for research purposes). Every sixth reactor operates in the Russian fuel and thus spent nuclear fuel from these nuclear power plants is returned to the Russian Federation. In the world, operating more than 436 nuclear reactors. NPP produce more than 17% of all electricity. The total amount accumulated in the world spent nuclear fuel exceeds 200 thousand tons. Design, construction and operation of the radiochemical plant for processing and storage of spent nuclear fuel and radioactive waste is economically feasible only for independent State with advanced

nuclear energy, which owns the relevant technologies and highly qualified personnel. Currently, radiochemical plants operate in Russia, France and the UK. United States adhere to the pending decision, preferring to preserve the spent nuclear fuel in special storage facilities, in the future, either to reprocessing or to final disposal. The United States supplied nuclear fuel to other countries is not returned for recycling in the United States, therefore, the problem of the disposal of entire States importers. Discusses methods for recycling and disposal radioactive waste which implemented in the nuclear industry of Russia. Describes the theoretical and practical solutions for processing of radioactive waste. Classified liquid and solid radioactive waste. Lists the storage of radioactive waste and recycling plants.

Keywords: radioactive substances, radioactive pollution, disposal of radioactive waste, clearance, disposal problems.

Природная или естественная радиация определяется наличием источников радиации космического и земного происхождения.[1]

Естественные источники радиации действуют на человечество всю историю его существования. Уровень радиации фона до 0,2 мкЗв/ч считается нормальным, выше 0,6 мкЗв/ч необходимы специальные меры по дезактивации местности. Средняя доза природной радиации от 1 до 1,5 мЗв за год считается относительно безопасной.[2]

Постановление правительства РФ № 1030 от 23. 10. 1995 утвердило Федеральную целевую программу «Обращение с радиоактивными отходами и отработавшими ядерными материалами, их утилизация и захоронение на 1996–2005 годы». В Программе выделен специальный раздел «Состояние проблемы».

Проблема радиоактивных отходов, т. н. «проблема РАО» состоит в том, что большое количество накопленных радиоактивных отходов, недостаточность технических средств для обеспечения безопасного обращения с этими отходами и отработавшим ядерным топливом, отсутствие надежных хранилищ для их длительного хранения или захоронения повышают риск возникновения радиационных аварий. Существует угроза радиационного загрязнения окружающей среды, облучения населения и персонала объектов экономики.

Особенно острой проблема утилизации и захоронения РАО атомных электростанций (АЭС) становится в настоящее время, когда по условиям эксплуатации требуют демонтажа большинство АЭС в мире (более 65 реакторов АЭС и 260 реакторов, использующихся в научных целях). Россия поставляет ядерное топливо, изготовленное на предприятиях АО «ТВЭЛ», во многие страны мира. Каждый шестой реактор работает на российском топливе, а значит и отработанное ядерное топливо (ОЯТ) с этих АЭС возвращается в РФ [3]. В мире эксплуатируется более 436 ядерных энергоблоков. АЭС вырабатывают более 17% всей электроэнергии. Общее количество скопившегося в мире ОЯТ превышает 200 тыс. т. [4, 5]

В настоящее время в России на атомных электростанциях (АЭС) вырабатывается свыше 15 % от всей электроэнергии, производимой в стране. Основная часть энергии вырабатывается в ядерных реакторах типа ВВЭР–1000 и РБМК–1000. В реакторы устанавливаются тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ) или тепловыделяющие сборки (ТВС) с начальным обогащением по урану–235 до 4,4 % для реакторов ВВЭР и до 2,6 % для реакторов типа РБМК. В природном уране содержание изотопа U-235 составляет 0,7 %. В реакторе ВВЭР находится 162 сборки, в реакторе РБМК – 1700. Сборки, извлеченные из реактора, называются ОТВС – облученные тепловыделяющие сборки, а в них находится ОЯТ. [6]

Одна из основных проблем в обращении с отработанным ядерным топливом (ОЯТ) состоит в том, что оно представляет смесь различных веществ (не переработанный – «невыгоревший» уран, продукты радиоактивного распада урана и трансурановые элементы). Энергетически ценные двуокиси изотопов урана (U–238 и U–235) и плутония составляют около 97,5 % ОЯТ. Даже после длительного хранения они могут быть использованы в атомной энергетике. Непригодные к энергетическому использованию радиоактивные отходы (РАО) составляют около 2,5 % ОЯТ. ОЯТ представляет большую опасность, т. к. его радиоактивность огромна [7].

Теоретические пути решения проблемы РАО:

- рассеивать короткоживущие изотопы в атмосфере, а для ликвидации долгоживущих изотопов предлагаются способы разбавления и рассеивания в воде морей и океанов;
- выбрасывать РАО в космос;
- захоронить на дне морей; в ледниковых щитах Гренландии и Антарктиды; в пластах каменной соли;
- захоронить в могильниках, оборудованных в скальных породах и герметично изолированных от внешней среды;
- удерживать РАО в стекольных (боросиликатных или алюмофосфатных по составу) матрицах, помещая их в стабильных блоках земной коры;
- «ликвидировать физически долгоживущие изотопы, переводя их в стабильные изотопы в мощных ускорителях или реакторах », т. е. провести трансмутацию изотопов, что, несомненно, станет одним из революционных открытий науки и приведет к техническому прогрессу атомной энергетики.

За 60 лет работы предприятий ядерной энергетики некоторые способы утилизации РАО были реализованы, например, в процессе эксплуатации АЭС газовые выбросы короткоживущих РАО проходят многоступенчатую очистку, в результате которой концентрация радионуклидов в них в 10 – 100 раз ниже предельно-допустимых уровней (ПДУ), и выбрасываются в атмосферу.

Практика захоронения РАО в моря считалась вполне обычной для всех ядерных держав. Однако слив жидких РАО и захоронение твердых в контейнерах в водах морей привел к возрастанию уровня радиации и нарушил биологический баланс экосистемы [8]. В настоящее время международными соглашениями сброс РАО в моря запрещен.

Захоронение РАО в глубоких океанических осадках нигде не было реализовано и запрещено международными соглашениями. Предложения об отправке отходов в космос, захоронения в ледниковые щиты или трансмутации РАО далеки от реализации.

Существующие разработки рекомендуют захоронение отвержденных РАО в стабильных блоках земной коры. Однако стекольные матрицы недостаточно устойчивы. В конце 70-х годов XX века были разработаны первые кристаллические матричные материалы (синтетические горные породы – синрок). Эти материалы состоят из смеси минералов (твердых растворов на основе титанатов и цирконатов) и гораздо более устойчивы к выщелачиванию, чем стекольные матрицы. В качестве потенциальных матриц были предложены твердые растворы минералов. Так, среди природных минералов (полевой шпат, оливин, пироксен, цеолит, фосфаты) с высокой изоморфной емкостью подобраны твердые растворы, способные концентрировать в себе группы элементов, входящих в состав РАО. Например, цеолиты, двухслойные матрицы. Исследования в России и за рубежом показали, что вмещением РАО могут служить три типа горных пород: глины (аллювий), скальные породы (гранит, базальт, порфирит), каменная соль [9].

Рассмотрим способы утилизации и ликвидации РАО, реализованные в атомной энергетике России.

РАО обычно подразделяют на отходы низкого, среднего и высокого уровня активности. Это могут быть газы, аэрозоли, жидкости и твердые вещества. Газообразные РАО, содержащие, например, радиоактивные изотопы: аргон-41, тритий, углерод, криптон, ксенон, йод и другие газы, а также пары кислот, обычно выбрасываются через высокие дымовые трубы (выше 150 м) после очистки и разбавляются воздухом до предельно допустимых концентраций (ПДК) и уровней излучения (ПДУ). Для очистки используют обычные методы и оборудование. Газы с тритием окисляются до воды. Углекислый газ, в состав которого входит радиогенный углерод, переводят в осадок карбонатов. Инертные газы, в первую очередь ^{85}Kr (период полураспада 10,3 года) выделяют с помощью криогенной техники и низкотемпературной адсорбции. Однако растворы и материалы, использованные для очистки, становятся радиоактивными жидкими и твердыми РАО и подлежат дальнейшей переработке или захоронению.

Радиоактивные вещества (РВ), растворенные в воде или жидкостях, можно удалить из раствора в виде осадков методами химического осаждения. Например, соединения радиоактивного стронция перевести в осадок, добавляя соли бария или свинца. Коллоидные и взвешенные в растворе РВ можно извлечь из раствора методами коагуляции, используя, например, глину и полиэлектролиты. Также применяют фильтрование, ионный обмен, выпаривание и др. Однако, очистив раствор, получаем твердые РАО.

Чугунное и стальное оборудование, загрязненное РВ, после окончания его эксплуатации, направляется на переплавку. При переплавке уран уносится со шлаком, а металл может вновь использоваться. В общем, уменьшение объемов твердых РАО (смолы, металлическое оборудование и др.) достигают путем сжигания, сплавления или переплавки, при этом концентрация РВ и активность полученной золы или сплава увеличиваются. Загрязненные глины обжигают. Полученные твердые РАО подлежат долговременному захоронению.

По уровню активности жидкие РАО подразделяют на пять категорий (табл. 1), а твердые — на четыре категории (табл. 2).

Таблица 1

Классификация жидких радиоактивных отходов

Категория	Объемная активность, A_v , Бк/л	Примечание
1	менее $3,7 \cdot 10^2$	Выбрасывают в окружающую среду без переработки; Переработка обычными методами, не требуют защиты; Переработка обычными методами, защита целесообразна; Переработка специальными методами, защита необходима; Необходимо охлаждение; переработка специальными методами, защита необходима;
2	$3,7 \cdot 10^2 - 3,7 \cdot 10^4$	
3	$3,7 \cdot 10^4 - 3,7 \cdot 10^6$	
4	$3,7 \cdot 10^6 - 3,7 \cdot 10^9$	
5	более $3,7 \cdot 10^9$	

Таблица 2

Классификация твердых радиоактивных отходов

Категория	Мощность дозы на поверхности, D' , мЗв/ч	Примечание
1	менее 2	Можно обрабатывать и транспортировать без специальных мер защиты; Можно транспортировать в обычных контейнерах, экранированных тонким слоем бетона или свинца; Обработка и транспортировка требуют специальных мер предосторожности; РАО не способны образовать критическую массу;
2	2 – 20	
3	более 20	
4	–	

Отходы с уровнем активности ниже регламентированных значений можно удалять в окружающую среду без очистки.

Проектирование, строительство и эксплуатация радиохимического предприятия для переработки и хранения ОЯТ и РАО экономически оправдано только для государства с развитой самостоятельной ядерной энергетикой, которое владеет соответствующими технологиями и высококвалифицированным персоналом. В настоящее время радиохимические заводы работают в России, Франции и Великобритании. США придерживаются отложенного решения, предпочитая консервировать ОЯТ в специальных хранилищах, чтобы в будущем либо заняться его переработкой, либо провести окончательное захоронение.

Государственная дума РФ приняла 21. 12. 2000 г. в первом чтении три законопроекта, позволяющие ввозить в Россию на хранение и переработку ОЯТ из других стран.

Любые операции с ОЯТ осуществляют с использованием мощной экранирующей защиты от проникающей радиации. Нарушение технологии в ходе переработки ОЯТ или аварийная ситуация неминуемо приводят к самым тяжелым последствиям.

Стержни (тепловыделяющие сборки) с ОЯТ хранятся на АЭС под слоем воды (мокрые хранилища) не менее 2,5 метров над сборкой, что обеспечивает надежную защиту от всех видов радиоактивных излучений. Срок хранения составляет от 3 до 5 лет. За это время активность ОЯТ падает и их можно транспортировать на большие расстояния. Хранилища ОЯТ и РАО на территории России представлены в табл. 3.

Таблица 3

Хранилища ОЯТ и РАО

№ п/п	АЭС	№ п/п	АЭС
1	Кольская	6	Волгодонская
2	Ленинградская	7	Балаковская
3	Калининградская	8	Белоярская
4	Смоленская	9	Нововоронежская
5	Курская	10	Билибинская
№ п/п	Комбинаты по переработке и хранению ОЯТ и РАО		
1	ПО «Маяк» (Челябинск-65)		
2	Сибирский химкомбинат (Томск-7)		
3	Горно–химический комбинат (ГХК, Красноярск-26)		
4	Плавучие технологические базы в составе военно-морского флота РФ (типа «Лепсе» на Кольском полуострове около 90 баз)		

Крупнейшее в России предприятие по переработке и хранению ОЯТ и РАО — это Горно–химический комбинат и радиохимический завод в Красноярском крае (ГХК).

ГХК был построен для наработки в промышленных реакторах оружейного плутония и его извлечения на радиохимическом производстве (по решению Совета министров СССР от 26. 02. 1950 г.). Для защиты от возможных ядерных ударов основные производственные объекты размещены в скальных выработках Атамановского кряжа на глубине 200 м. Инженерные решения по размещению в глубине горного массива масштабного ядерного производства не имеют аналогов в отечественной и мировой практике. Первый реактор был введен в эксплуатацию в 1958 г.

Радиохимический завод введен в эксплуатацию в 1964 г. и предназначен для переработки ОЯТ уран–графитовых реакторов ГХК.

С целью информирования общественности по всем актуальным вопросам, связанным с атомной энергетикой и для внедрения комплексных программ обучения населения вопросам радиационной безопасности 21. 01. 2002 г. создан Красноярский региональный информационный центр (КРИЦ) Минатома России. Целью КРИЦ является информирование населения о деятельности ГХК, радиохимического, электрохимического и химико-металлургического заводов.

В настоящее время ГХК получает ОЯТ с АЭС России, Украины и Болгарии.

Перевозка ОЯТ производится железнодорожным транспортом, специальными вагонами в защитных металлических контейнерах с толщиной стенки 0,35 м. Конструкция контейнеров обеспечивает ядерную и радиационную безопасность даже в случае крупной аварии на железной дороге.

В технологической схеме завода предусмотрена возможность выделения из ОЯТ нептуния и получения его диоксида. Конечным продуктом переработки ОЯТ являются соли урана и диоксид оружейного плутония.

Извлеченные из реакторов АЭС ОТВС хранятся в «мокром хранилище» в отсеках глубиной 8 м, заполненных дистиллированной водой, при этом от верхней части ОТВС до зеркала воды должен быть слой воды не менее двух метров для защиты от радиоактивного излучения. Система водоснабжения хранилища замкнутая, без сброса воды в окружающую среду. Проектная емкость хранилища (по урану ОЯТ) 6000 т или 14000 сборок. В 2002 г. хранилище было заполнено на 50 %. В настоящее время выполняются работы по увеличению полезной емкости до 8600 т. Через 10 – 20 лет хранения ОТВС переводят в «сухое» хранилище, в котором они охлаждаются воздухом. Перед установкой на длительное хранение ОТВС помещают в специальные пеналы из

нержавеющей стали. Для улучшения съема тепла и уменьшения коррозии пеналы заполняют азотом, а затем герметизируют сваркой. Установлена санитарно защитная зона как для «мокрого», так и «сухого» хранилищ радиусом 1000 м.

В состав завода входит также комплекс переработки и временного хранения жидких РАО, с целью подготовки их к подземному захоронению на полигоне «Северный» в глубоко залегающие геологические пласты (коллекторы). Коллекторы изолированы водоупорными породами от других горизонтов. Захоронение низкоактивных РАО осуществляют на глубину 200 – 300 м, средне-активных РАО — на глубину 400 – 500 м через специально оборудованные скважины.

Эксплуатация полигона «Северный» сопровождается контрольными наблюдениями за распределением (миграцией) отходов в недрах, за протекающими процессами ядерных и химических превращений РАО при долговременном захоронении, за состоянием окружающей среды — подземных и поверхностных вод, воздуха, почвы, растительного и животного мира. Влияние на биосферу практически не обнаружено [9].

Однако существуют и проблемы, например, в результате переработки РАО за 40 лет работы завода накоплено 6 тыс. м³ высокоактивных отходов (ВАО) — пульп (вторичное радиационное загрязнение растворов, использованных в технологии переработки, например, для экстракции). Задача переработки пульп и перевод их в безопасное состояние актуальна для большинства предприятий РФ и зарубежных стран. В настоящее время совместно с Радиевым институтом (г. Санкт-Петербург), институтом физической химии РАН, институтом неорганических материалов (г. Москва) и Свердловским НИИ химического машиностроения (г. Екатеринбург) ведутся научные исследования и работы по созданию технологии и оборудования для обезвреживания пульп с целью последующего безопасного долговременного хранения. В период с 2000 г. по 2003 г. на ГХК было создано 4 стенда для испытания оборудования по извлечению пульп и разработаны технологии переработки ВАО в рамках совместного российско-американского проекта.

В настоящее время признано, что наиболее эффективным и безопасным решением проблемы РАО является их окончательное захоронение в могильниках на глубине не менее 300–500 м в глубинных геологических формациях с соблюдением принципа многобарьерной защиты и обязательным отверждением РАО. Опыт утилизации и ликвидации РАО на ГХК это доказывает. Кроме того, опыт проведения подземных ядерных испытаний доказал, что при определенном грамотном выборе геологических структур не происходит утечки радиации из подземного пространства в окружающую среду.

Крупный новый могильник (саркофаг для РАО) предполагается построить в Иркутской области. РАО в металлических контейнерах будут погружены глубоко в грунт и окружены слоем специально подобранных глин.

Таковы же разрабатываемые в США, Канаде, Швеции, Швейцарии, Финляндии в настоящее время концепции захоронения ОЯТ в глубокие геологические формации, буровые скважины и штреки в кристаллических породах, туфах, соляных пластах.

Также в России остро стоит проблема утилизации плавучих хранилищ (табл.3).

Например, плавучая технологическая база «Лепсе» — одна из самых больших проблем Кольского полуострова. [10]. Почти 20 лет на нее выгружали ОЯТ с ледоколов «Ленин», «Арктика», «Сибирь». До середины 80-х годов XX-го столетия твердые РАО «Лепсе» сбрасывала в Карское море, а жидкие РАО сливала в Баренцево море. С появлением нового судна «Имандра» в 1981 г. «Лепсе» стала использоваться только для временного хранения ОЯТ и РАО и для перевозки их к местам захоронения. В 1990 г. судно перевели в категорию «судно в отстое», но экономические потрясения заставили отложить проблему его ликвидации. На судне в настоящее время хранится 639 ОТВС (260 кг урана-235 и 156 кг продуктов его деления за 30 лет хранения). Сборки разбухли, покрытие пошло трещинами, они деформированы настолько, что обычный способ (извлечь из пенала с помощью крана, погрузить в специальный контейнер и отправить по железной дороге на комбинат по переработке и хранению ОЯТ) непригоден. Если плавучую базу затопить, то она станет долговременным источником РЗ для окружающей среды. Процесс утилизации от выгрузки ОЯТ до демонтажа и переплавки металлических частей займет около 5 лет и обойдется в 31 млн. долларов. Учитывая финансовые проблемы РФ, в 1995 г. был создан консультативный комитет по международному экологическому проекту «Лепсе», в работе которого принимают участие Норвегия, Швеция, Франция, Великобритания. Из федерального бюджета РФ в 2002 г. было выделено 50 млн. руб. За счет этих средств выгрузили из самой большой цистерны жидкие РАО, залили оставшийся на дне радиоактивный осадок бетоном, провели тщательную дезактивацию. Ликвидация

«Лепсе» — дело будущего. Пока нет целостного проекта. Полная утилизация этой базы должна стать отработанным проектом, который можно будет с коррективами использовать при ликвидации других плавучих баз.

Список литературы

1. *Маркитанова Л.И.* Экологическая химия: Учеб. пособие. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 101 с.
2. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы. – М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999. 116 с.
3. Булатов В.И. Меняем ресурсы на ядерные отходы. К проблеме ввоза в Россию ядерного топлива // Всероссийский экологический журнал ЭКО. 2002. №4.
4. Бюллетень МАГАТЭ. – Вена, 2000. Т.42. №3
5. *Усманов С.М.* Радиация: Справочные материалы.— М.: Гуманит. изд. центр ВЛАДОС,2001.—176 с.
6. *Маркитанова Л.И., Маркитанова А.А.* Оценка радиационной обстановки и выбор режимов защиты: Учеб. пособие. – СПбГУНиПТ, 2008.- 143 с.
7. *Маркитанова Л.И., Маркитанова А.А.* Ликвидация и утилизация радиоактивных отходов // Известия Санкт-Петербургского университета низкотемпературных и пищевых технологий. 2008. № 10.
8. Охрана окружающей среды при обезвреживании радиоактивных отходов /И.А. Соболев, И.П. Коренков, Л.М. Хомчик, Л.М. Проказова – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 168 с.
9. Сайт <http://www.minatom.ru>.
10. *Денисенкова Е.* Плавучая зона //Эксперт. 2002. №41.

References

1. Markitanova L.I. Ekologicheskaya khimiya: Ucheb. posobie. – SPb.: SPbGUNiPT, 2005. – 101 s.
2. Normy radiatsionnoi bezopasnosti (NRB-99): Gigienicheskie normativy. – M.: Tsentr sanitarno-epidemiologicheskogo normirovaniya, gigienicheskoi sertifikatsii i ekspertizy Minzdrava Rossii, 1999. 116 s.
3. Bulatov V.I. Menyaem resursy na yadernye otkhody. K probleme vvoza v Rossiyu yadernogo topliva // *Vserossiiskii ekologicheskii zhurnal EKO*. 2002. №4.
4. Byulleten' MAGATE. – Vena, 2000. T.42. №3
5. Usmanov S.M. Radiatsiya: Spravochnye materialy.— M.: Gumanit. izd. tsentr VLADOS,2001.—176 s.
6. Markitanova L.I., Markitanova A.A. Otsenka radiatsionnoi obstanovki i vybor rezhimov zashchity: Ucheb. posobie. – SPbGUNiPT, 2008.- 143 s.
7. Markitanova L.I., Markitanova A.A. Likvidatsiya i utilizatsiya radioaktivnykh otkhodov // *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo universiteta nizkotemperaturnykh i pishchevykh tekhnologii*. 2008. № 10.
8. Okhrana okruzhayushchei sredy pri obezvrezhivanii radioaktivnykh otkhodov /I.A. Sobolev, I.P. Korenkov, L.M. Khomchik, L.M. Prokazova – M.: Energoatomizdat, 1989. – 168 s.
9. Sait <http://www.minatom.ru>.
10. Denisenkova E. Plavuchaya zona // *Ekspert*. 2002. №41.