

МІНІСТЕРСТВО УКРАЇНИ У СПРАВАХ ЗАХИСТУ НАСЕЛЕННЯ
ВІД НАСЛІДКІВ АВАРІЇ НА ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АЕС
АДМІНІСТРАЦІЯ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ

MINISTRY OF UKRAINE ON AFFAIRS OF PROTECTION OF THE POPULATION
FROM THE CONSEQUENCES OF THE ACCIDENT AT THE CHERNOBYL NPP
THE ADMINISTRATION OF THE EXCLUSION ZONE



ПРОБЛЕМИ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ

PROBLEMS OF CHERNOBYL EXCLUSION ZONE

4

УДК 551.4:551.34-556.388 628.14.39 541.15:546.83:546.96 502.55:621.039.7

Збірник містить результати наукових досліджень і дослідно-конструкторських робіт в Зоні відчуження ЧАЕС, які направлені на розробку технологій, устаткування і приладів для поводження з РАВта ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС, на вивчення складу і будови твердофазних носіїв активності ґрунту Зони відчуження, трансформації форм продуктів розподілу радіонуклідного складу паливних випадінь в ближній зоні ЧАЕС, просторовому розподілу радіонуклідів та на вирішення інших проблем радіоекології. Велика увага приділяється медико-біологічним проблемам впливу наслідків аварії на флору, фауну і здоров'я людини, умови праці і стан захворювання робітників, які працюють в Зоні відчуження.

Для науковців, працюючих у галузях екології, радіоекології, атомної енергетики, радіології, радіохімії та радіобіології, а також аспірантів та студентів.

The collection comprises the results of researches and design activity in the ChNPP exclusion zone with the aim to develop technology, equipment and instruments for RAW management and accident clean-up, studying of the composition and structure of the activity solid bearers in the soil of the exclusion zone and transformation of the radionuclides in the nearest zone of ChNPP. Much attention is paid to medical and biological problems of the accident, influence on the flora, fauna and people's health, labour conditions and incidence of the people involved.

The collection comprises the information for scientists, experts, postgraduates and students engaged in ecology, radioecology, nuclear engineering, radiology, radiochemistry and radiobiology.

Редакційна колегія

Г.Ф. Ярославцев (відповідальний редактор), М.І. Проскура (заст. відповідального редактора), Е.В. Соботович (заст. відповідального редактора), А.А. Єфімов (відповідальний секретар), В.І. Купний, М.П. Архипов, В.І. Берчій, І.Ф. Вовк, О.В. Войцехович, В.Д. Вохмеков, В.А. Гайченко, С.П. Джепо, Ю.П. Іванов, В.В. Жилінський, С.В. Казаков, О.П. Коваленко, В. О. Кашпаров, О.С. Паршин, Б.С. Пристер, С.С. Саверський, А.М. Сердюк,

В.М. Стародумов, А.К. Сухоручкін, В.В. Токаревський, В.С. Давидчук, О.К. Авдєєв, О.Г. Седлецький, І.Л. Лось

Адреса редколегії
25 5620 Чорнобиль, вул. Радянська, 14
Адміністрація Зони відчуження
Тел. 225 30 58
8 2893 5 11 52

Затверджено до друку Науково-технічною радою при Адміністрації Зони відчуження

Редакція фізико-математичної та технічної літератури
Редактор Т.В. Кацовенко

ISBN 966-00-0050-2
© Адміністрація Зони відчуження, 1996

МІНІСТЕРСТВО УКРАЇНИ У СПРАВАХ ЗАХИСТУ НАСЕЛЕННЯ ВІД НАСЛІДКІВ АВАРІЇ НА
ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АЕС
АДМІНІСТРАЦІЯ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ

ПРОБЛЕМИ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ **PROBLEMS OF CHERNOBYL EXCLUSION ZONE**

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК
ЗАСНОВАНО У 1994 Р.

Випуск 4

КИЇВ НАУКОВА ДУМКА 1996

ЗМІСТ

<i>Балашев Л. С., Францевин Л. И., Шерстюк Н. И.</i> Состояние объектов природно-заповедного фонда в Зоне отчуждения	3
<i>Алесина М. Ю., Архипов Н. П., Логинова Л. С., Бескровный А. М.</i> Влияние биологически активных металлоорганических соединений на поступление и распределение радионуклидов в сельскохозяйственных растениях	12
<i>Новиков Б. И.</i> Аккумуляция радиоактивных церия и цезия в верхней части Киевского водохранилища (1986-1990 гг.)	22
<i>Сорочинский Б. В.</i> Биодозиметрия радионуклидных загрязнений водоемов на основе нарушений в морфологических признаках ряски многокоренной	25
<i>Герасимова Т. С., Марченко В. А., Симановская И. Я.</i> Изучение влияния химической природы кислот на эффективность сухой полимерной дезактивации в условиях ЧАЭС	29
<i>Рейхтман Г. И.</i> Характеристика состояния объекта "Укрытие" и пути преобразования его в экологически безопасную систему	33
<i>Белоусов Е. Л., Сидоренко М. И.</i> Стратегия поэтапной стабилизации объекта "Укрытие-1"	52
<i>Павлюченко И. И., Хоренко И. П.</i> Обзор работ по изучению техногеологического разреза и загрязнения радионуклидами грунтовых вод промплощадки объекта "Укрытие"	58

Чернюк В. И., Захаренко М. И., Носовский А. В., Ластовченко В. Б., Петриченко А. А., Панченко В. И., Липовой В. В., Пугач А. Б. Результаты исследований функционального состояния оперативного персонала ЧАЭС при 8- и 12-часовых графиках работы	66
Максин В. И., Стандритчук О. З. Отражение общих эволюционных процессов природы в радионуклидных рядах	70
Кедровский О. Л., Мельниченко В. М. Локализация низко- и среднеактивных отходов в глинистых залежах	77
Кожанов В. А., Проскура Н. И., Шулепов Ю. В., Маляренко В. В. Определение кинетических параметров выщелачивания радионуклидов из "горячих" частиц по экспериментальным данным	81
Кожанов В. А., Шулепов Ю. В., Проскура Н. И. Математические модели выщелачивания радионуклидов в почвенном слое	85
Бузинный М. Г. Аварийный выброс радиоуглерода в результате аварии на Чернобыльской АЭС и связанные с ним проблемы	91
Матошко А. В. Типизация и районирование осадочного чехла Чернобыльской зоны отчуждения для гидрогеологического мониторинга	95
Репин В. С. Ретроспективная реконструкция доз и оценка роли отдельных факторов в облучении жителей, эвакуированных из тридцатикилометровой зоны после аварии на ЧАЭС	108
Вишневский А. С., Кузьмина И. Е., Токаревский В. В. Процессы кристаллизации и деструкции вторичных урановых минералов объекта "Укрытие"	135
Кузьмина И. Е., Токаревский В. В. Частицы дисперсной фазы аэрозолей объекта "Укрытие"	141

Приведена общая краткая характеристика ландшафта, флоры и фауны Чернобыльской Зоны отчуждения. Описаны заповедные объекты, потери в результате пожаров и неразумной деятельности человека. Приведены краткие сведения о радиационной обстановке на объектах природно-заповедного фонда, намечены критерии отбора перспективных для заповедования объектов Зоны отчуждения.

Флора и фауна Зоны отчуждения. Территория правобережной части Зоны отчуждения относится к Вильчанско-Чернобыльскому геоботаническому району [1]. В западной части (Вильчанский подрайон) северная половина на 60-70% покрыта лесами, а южная – почти вся распахана. Верхнее положение в рельефе занимают сосновые леса, представленные чаще всего зеленомоховой и вересково-зеленомоховой ассоциацией. Склоны обычно заняты дубово-сосновыми лесами с преобладанием крушиново-черничной и орляково-черничной ассоциаций. В понижениях располагаются дубовые и грабово-дубовые леса чернично-орляковые или волосисто-осоковые, а также встречаются смешанные лиственные леса из осины, ольхи, дуба и граба с покровом из звездчатки ланцетовидной или ясменника душистого.

Восточная часть (Чернобыльский подрайон) в прошлом была покрыта дубово-сосновыми, дубовыми и грабово-дубовыми лесами, росшими на цепях моренных горбов и лессовой части надпойменной террасы р. Припять. Ко времени аварии леса были сведены на значительней площади, оставались лишь отдельные сосновые посадки различного возраста и вторичные леса.

Луга сосредоточены в поймах рек Припять, Уж и их малых притоков. В пойме р. Припять в пределах Зоны отчуждения преобладала луговая растительность (70-80%), болотная занимала до 15%, а древесно-кустарниковые насаждения, в том числе пойменные дубравы, составляли менее 10 %. В пойме нижнего течения р. Уж преобладали болотистые и торфянистые луга (50 %) и болота (7 %), до 20 % поймы распахивалось [2, 3]. В притеррасных частях пойм и речных долинах болота занимали не менее 5% площади (до проведения осушительных работ). Преобладали эвтрофные лесные болота – ольховые, березово-ольховые и ивовые с осоковым и крупнотравно-болотным покровом. В понижениях

песчаных террас и на водоразделах описаны небольшие котловинные болота, относящиеся к олиготрофной и мезотрофной стадиям развития болот. Их растительный покров характеризовался влагалищнопушицево-осоково-сфагновыми и редколесными сосново-березово-сфагновыми ассоциациями [4, 5].

Левобережье р. Припять (Зимовищанский геоботанический район) занято поймой Припяти и остатками размытой бортовой террасы с бедными, главным образом, сажеными сосновыми лесами. Надпойменная терраса, составляющая плохо выраженный водораздел рек Припяти и Брагинки, рассечена долинными понижениями, которые заняты низинными болотами. После осушения большая часть территории использовалась для посева.

Флора Киевского Полесья включает в себя свыше 1300 видов сосудистых растений [6]. В окрестностях Чернобыля зарегистрировано 13 видов растений, занесенных в "Красную

© Л. С. Балашев, Л. И. Францевич, Н. И. Шерстюк, 1996

3

книгу Украины" и подлежащих охране [7]. К ним относятся лилия лесная (*Lilium martagon* L.), пальчатокоренник майский (*Dactylorhiza majalis* P.P.Hunt & Sun.), пальчатокоренник Фукса (*D. fuchsii* (Druce)), любки двулистная (*Platanthrea bifolia* (L.)) и зеленоцветная (*P. chlorantha* Cust.), пыльцеголовник красный (*Cephalanthera rubra* (L.)) дремлик чемерицевидный (*Epipactis helleborine* (L.)), гнездовка обыкновенная (*Neottia nidus-atis* (L.)), плаун колючий (*Lycopodium annotinum* L.), водяной орех (*Trapa natans* L.), сальвиния плавающая (*Salvinia natans* (L.)), альдрованда пузырчатая (*Aldrovanda vesiculosa* L.), рослянка промежуточная (*Drosera intermedia* Hayne).

Наземная фауна Киевского Полесья включает в себя до десяти видов земноводных, семь видов пресмыкающихся, около 180 видов гнездящихся птиц, а считая с пролетными и зимующими – 270 видов, около 60 видов млекопитающих [8], множество видов беспозвоночных. Ареалы 29 видов животных, занесенных в "Красную книгу Украины" [9], охватывают также Зону отчуждения. Вероятно, к ним можно добавить еще столько же видов. Уже после Чернобыльской катастрофы в Зоне отчуждения отмечены летом и на пролете редкие птицы: серый журавль (*Grus grus* L.), черный аист (*Ciconia nigra* L.), кулик-сорока (*Haematopus ostralegus* L.), лебедь шипун (*Cygnus olor* Gm.), утка пеганка (*Tadorna tadorna* L.), нырок белоглазый (*Aythya nyroca* Gmel.), сокол балобан (*Falco cherrug* Gray), орлан-белохвост (*Haliaeetus albicilla* L.), орел беркут (*Aquila chrysaetos* L.), полевой лунь (*Circus cyaneus* L.), скопа (*Pandion haliaetus* L.); редкие звери: выхухоль (*Desmana moschata* L.), выдра речная (*Lutra lutra* L.), горностай (*Mustela erminea* L.), рысь (*Lynx lynx* L.); охраняемая бабочка махаон (*Papilio machaon* L.).

Объекты природно-заповедного фонда. Когда в 1986 г. после Чернобыльской катастрофы была выделена 30-километровая зона вокруг ЧАЭС, то за колючей проволокой оказалось 11 объектов природно-заповедного фонда (ПЗФ) Украины, охраняемых государством (заказник, памятники природы, заповедные урочища). Урочище "Загорье" было объявлено заповедным решением Киевского облисполкома № 510 от 29.10.79, Ильинский заказник республиканского значения учрежден Постановлением Совета Министров УССР № 132 от 25.02.80. Большинство памятников природы местного значения было объявлено еще в 1968 г. и подтверждено решением Киевского облисполкома № 441 от 18.12.84 [10].

Все эти объекты были подчинены соответствующим гослесхозам, действовавшим вблизи ЧАЭС (Чернобыльскому, Новошепеличскому и Полесскому) и после эвакуации населения остались без ответственных хранителей. Документация на объекты ПЗФ, хранившаяся на местах, была по большей части затеряна. Мы искренне признательны старшему научному сотруднику Института зоологии НАН Украины А.П. Федоренко, нашедшему оригинальные учредительные документы. Это позволило отметить заповедные выделы на картах лесоустройства, дать им надежную топографическую привязку и разыскать их на местности.

Осенью 1994 г. комиссия в составе авторов настоящего сообщения и старшего научного сотрудника Центрального научно-природоведческого музея НАН Украины Л.М. Сипайловой, научного сотрудника Института зоологии НАН Украины В.Б. Шуваликова, ведущего инженера предприятия "Чернобыльлес" В.М. Цыбули провела обследование объектов ПЗФ, находящихся в Зоне отчуждения. После составления паспортной документации все объекты были переданы под охранные обязательства Государственному специализированному производственному комплексному лесному предприятию "Чернобыльлес". Обновленные долговечные шлагбаумы извещают посетителей о нахождении на территории охраняемого объекта.

4

Краткое описание заповедных объектов. Объекты ПЗФ перечислены в табл. 1. В дальнейшем при их упоминании мы будем ссылаться в косых линиях: // на номера паспортов. По назначению Ильинский заказник /1/ является гидрологическим, памятник природы "Городище" /4/ – комплексным, остальные – ботаническими. Ильинский заповедник /1/ был обследован экспедицией Института ботаники НАН Украины, проведено картирование растительности заказника [11]. В пойме р. Ильи сохранились участки высокотравных ольховых болот, перемежающиеся с полосами высокотравья, в которых доминируют тростник (*Phragmites australis* Cav.), двукисточник тростниковый (*Phalaroides arundinacea* Rausch.), осока островидная (*Carex acutiformis* Ehrh.), манник большой (*Glyceria maxima* Holmb.), лабазник вязолистный (*Filipendula ulmaria* (L.)), а также с зарослями ивы пепельной (*Salix cinerea* L.).

В долине реки выравненные участки заняты сосново-дубовыми, дубовыми и грабово-дубовыми лесами, а бугристые, с песчаными почвами – сосновыми. В заказнике сохранились участки высоковозрастных дубовых лесов (около 150 лет). Среди них преобладают лещиново-снытевые дубравы. Сосновые боры представлены всеми гидротипами бедного ряда от сосняка лишайникового до сосняка сфагнового. В пониженных местах последние сменяются мезотрофными сосново-березово-сфагновыми болотами с голубикой (*Vaccinium uliginosum* L.), багульником (*Ledum palustre* L.), осокой волосистоплодной (*Carex lasiocarpa* Ehrh.) и пушицей влагалищной (*Eriophorum vaginatum* L.). На одном из болот заказника представлена редкая ассоциация березы пушистой с тростником и клюквой обыкновенной (*Oxycoccus quadripetalus* Gilib.) по сфагнуму (*Sphagnum fallax* Klinggr.).

Из редких видов растений в заказнике интересно отметить страусник обыкновенный (*Matteucia struthiopteris* (L.) Tod.).

Таблица 1. Охраняемые объекты природно-заповедного фонда в Зоне отчуждения

Объект	Площадь, га	Местонахождение	
		Лесное отделение	Квартал (выдел)
1. Ильинский заказник (гидрол.)	2000	Яковецкое	32-37, 41-47, 51-54, 58-60
2. Вековые дубовые насаждения	12	Яковецкое (бывшее Речицкое)	75(3)
3. Ольховые насаждения профессора Д.И. Товстолеса	4,8	Яковецкое (бывшее Толстолесское)	71 (10)
4. Городище	5	Старошепеличское	49 (25, 28, 29)
5. Участок сосны обыкновенной	5,8	Дитятковское	71 (2, 13)
6. Дуб	0,02	Старошепеличское	51 (31)
7. Насаждения дуба черешчатого	11	Денисовичское (бывшее Речицкое)	8 (4)
8. Сосна	2,1	Лубянское (бывшее Толстолесское)	74 (8)

9. Вековые дубовые насаждения	14,6	Яковецкое (бывшее Толстолесское)	23 (14, 18, 21)
10. Загорье	110	Денисовичское	68, 69
11. Черноольховые насаждения над рекой Припять	14,3	Старошепеличское	7(3), 14(8) 15(12)

В урочище "Загорье" /10/ представлен типичный для Полесья болотно-борового комплекс. Преобладают обильно увлажненные участки с торфowo-болотными почвами, зарослями ольхи черной с тростником, камышом лесным, осоками и лабазником вязолистным, а также заросли ивы пепельной с теми же компонентами и вейником сероватым (*Calamagrostis canescens* Web.). Реже встречаются открытые травяные и травяно-моховые болота, кочкарно-осоковые болота с осокой омской (*Carex omskiana* Meinsch.), вейником сероватым и сфагновыми мхами (*Sphagnum pahistre* L., *S. compactum* D.C.). Повышенные участки занимают сосновые боры разного типа, среди которых преобладают сосняки-зеленомошники.

5

Памятник природы "Городище" /4/ – это, пожалуй, самый любопытный из объектов ПЗФ. Славянское городище милоградской культуры эпохи раннего железа (VII-III вв. до н.э.) построено на острове среди болот [12, 13]. Даже сейчас, когда уровень грунтовых вод значительно снизился вследствие мелиорации, это кольцо болот труднопроходимо. Вдобавок к естественной защите, городище было хорошо укреплено – обнесено двойным валом. Остатки валов, особенно более высокого внутреннего, хорошо различимы и сегодня, через две с половиной тысячи лет. Очевидно, в древности между валами был ров с водой. Раскопок на территории городища не проводили, оно было датировано на основании подъемного материала.

Остров зарос столетними дубами (*Quercus robur* L.), грабом (*Carpinus betulus* L.), березой (*Betula pendula* Roth.), сосной (*Pinus sylvestris* L.). Видимо, посадка сосны на острове была ошибкой, так как по типу почвы и обводнения здесь должны расти (и растут) растения и породы, присущие свежему сугроду. Из-за неравномерной полноты лес освещен, имеет лесопарковый характер. Поэтому в травянистом покрове доминируют злаки, и к ним добавляются типичные судубравные и опушечные виды: подмаренники душистый, мягкий и северный (*Galium odoratum* (L.), *mollugo* L., *boreale* L.), душица обыкновенная (*Origanum vulgare* L.), майник двулистный (*Majanthemum bifolium* Schm.), звездчатка ланцетовидная (*Stellaria holostea* L.), чина весенняя (*Lathyrus vernus* (L.)). В короткой экскурсии, несмотря на осеннее время, удалось найти и краснокнижное растение – орхидею дремлик широколистный *Epipactis helleborine* (L.)).

Из небольших по площади памятников природы примечателен могучий старый дуб /6/, возрастом 420 лет (рис. 1). На окружающем его выделе лиственного леса растет еще полтора десятка довольно старых дубов (до 120 лет). На многих из них висят борти (пчелиные ульи из выдолбленных колод), уже нежилые. На выделе встречаются куртины плауна булавовидного (*Lycopodium clavatum* L.).

В долине р. Ильи много поселений бобров (*Castor fiber* L.), встречаются редкие виды птиц: черный аист, змееед (*Circaetus ferox* Gm.), большой подорлик (*Aquila clanga* Pall.), серый журавль, тетерев (*Lyrurus tetrix* L.).

6

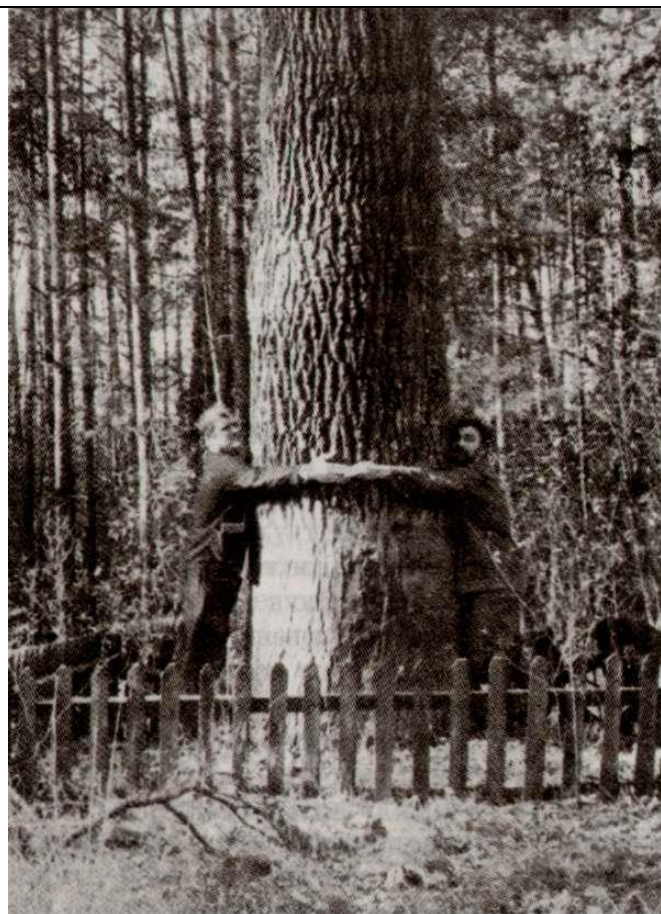


Рис. 1. Четырехсотлетний дуб с бортями /6/
6



Рис. 2. Сгоревшая 250-летняя сосна /8/

7

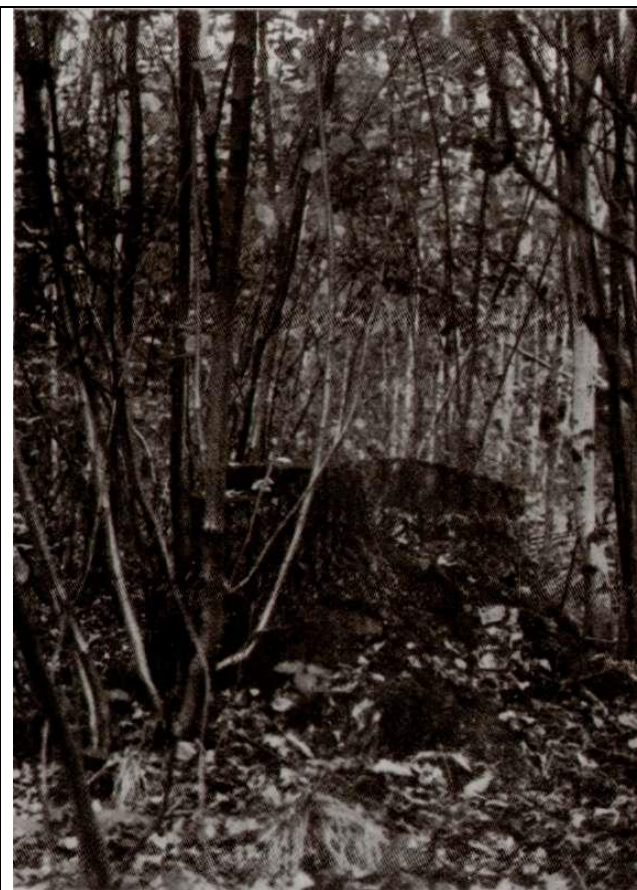


Рис. 3. Срубленная ольха, посаженная проф.
Д.И.Товстолесом /3/.

8

Остальные объекты природно-заповедного фонда слишком малы по площади в сравнении с территориями обитания крупных животных, чтобы описывать их как специфические места поселения. Все они, особенно заболоченные или граничащие с болотами, привлекают крупных копытных (лось *Alces alces* (L.), кабан *Sus scrofa* L., косуля *Capreolus capreolus* (L.)). Самые яркие следы деятельности кабанов мы нашли в вековых дубовых насаждениях у станции Толстый Лес /9/: в поисках желудей животные регулярно перекапывали землю и буквально уничтожили весь первичный травяной покров. Где копытные, там и волки (*Canis lupus* L.), присутствие которых на заповедном участке легко было узнать по свежим следам.

Потери заповедных объектов. К сожалению, не все объекты ПЗФ сохранились после Чернобыльской катастрофы в надлежащем состоянии. Ни один из объектов ПЗФ не находился так близко от ЧАЭС, чтобы попасть в зону летального или сублетального поражения хвойных лесов [14]. Поэтому от радиации растительность не пострадала. Все повреждения были нанесены рукой человека.

На выделе вокруг старой сосны /8/ во время низового пожара в 1992 г. погибло 60-70 % деревьев, в том числе охранявшееся дерево возрастом 250 лет (рис. 2). Наземный травяной покров выдела после пожара полностью денатурирован. Восстановить погибший памятник природы невозможно; подано представление об исключении его из состава природно-заповедного фонда Украины.

Ольховые насаждения проф. Д.И. Товстолеса /3/, как оказалось, подверглись сплошной вырубке примерно 10-12 лет назад (рис. 3). На выделе не осталось ни одного старого дерева. Однако от всех пней пошла густая корневая поросль. Подлесок из лещины (*Corylus avellana* L.), крушины ломкой (*Rhamnus frangula* L.) и бузины красной (*Sambucus racemosa* L.) имеет среднюю густоту. Травянистый покров вследствие вырубки и трелевки

7

был нарушен и восстановился в измененном видовом составе. Поскольку деревья не погибли, объект заслуживает охраны как типичный ландшафтный элемент Полесья, где происходит интенсивный процесс демутиации: восстановление всех трех ярусов леса. Он вносит необходимое разнообразие на территории, занятой сосновым лесом. Здесь может быть заложен стационар для наблюдений за демутиационным процессом растительного покрова, и перемещениями копытных животных.

В насаждении дуба /7/ произошло подтопление части территории памятника из-за того, что дорожная насыпь или дамба, была сооружена (в 1987 г.) без водопропускного устройства. Многие дубы страдают суховершинностью, а часть деревьев совсем погибла, в том числе трехсотлетний дуб. Стоило бы уложить водопропускную трубу в злосчастную насыпь.

Природа взяла своеобразный реванш за затопление заповедного участка – в другом месте, у границы Ильинского заказника, бобры забили ветками водопропускную трубу под шоссе и затопили десяток дворов с домами и сараями в с. Кливины.

Радиационная обстановка. На объектах ПЗФ не делали специального пробоотбора для измерения загрязнения почвы и растений. Во время обследования нами проводились измерения МЭД с помощью рентгенометра "Припять" (в табл. 2 указаны в скобках). Радиационная обстановка оценена по карте загрязнения лесных кварталов, составленной отделом радиационной безопасности предприятия "Чернобыльлес", по карте загрязнения

8

почвы ^{137}Cs и ^{90}Sr , составленной в объединении "Аэрогеология" и по карте загрязнения почвы ^{137}Cs и ^{90}Sr в точках реперной сети Госкомгидромета. В табл. 2 мы приводим последние оценки. Как видно из таблицы, максимально загрязнены "Городище" /4/ и выдел вокруг старого дуба /6/, находящиеся на линии западного высокотемпературного (овручского) следа выпадений, в заболоченном лесном массиве между сс. Новая Красница и Старые Шепеличи.

Таблица 2. Радиационная обстановка на объектах природно-заповедного фонда

Объект	МЭД, мкр/ч	β -излучение, см ² •мин	^{137}Cs , Ки/км ²	^{90}Sr , Ки/км ²
--------	------------	---	---	--

1. Ильинский заказник	50-250	115-300	-	-
2. Вековые дубовые насаждения	225	195	5-10	–
3. Ольховые насаждения профессора Д. И. Товстолеса	65-70(80)	75	10-20	4
4. Городище	390-410(85)	1450-2100	25-55	26
5. Участок сосны обыкновенной	33	113	1-3	1,6
6. Дуб	400(65)	2800	25-35	15
7. Насаждения дуба черешчатого	36(25)	41	5	10
8. Сосна	(93)	–	7-20	3
9. Вековые дубовые насаждения	105(70)	205	25-100	10
10. Загорье	33-36(30)	36-48	2	8
11. Черноольховые насаждения над р. Припять	195-210(57)	218-315	20-30	15

Известно, что р. Илья является самой загрязненной ^{90}Sr рекой Зоны отчуждения. По данным Украинского НИИ гидрометеорологии, среднегодовая активность ^{90}Sr на створе с. Рудня-Ильинецкая, вблизи устья, составляла в 1989-1990 гг. 4,5 Бк/л, а в 1994 г. – 2,8 Бк/л (весной 3-4, осенью меньше 1 Бк/л). Мы попытались оценить загрязнение воды в реке на входе и выходе из Ильинского заказника /1/ (створы сел Александровка и Кливины), используя биоиндикаторы – раковины моллюсков, в которых избирательно накапливается стронций [15]. Измеряли бета-радиоактивность раковин прудовика (*Lymnaea*) и катушки (*Planorbis*), радиоактивность воды оценивали по известному коэффициенту накопления 5000 для воды с днепровской минерализацией (табл. 3). Видимо, загрязнение воды ^{90}Sr на выходе из заказника не превышает 1 Бк/л, хотя для окончательного разрешения вопроса, сохранять ли за заказником статус гидрологического, следует провести серию радиохимических определений качества воды на створе с. Кливины.

Перспективы расширения заповедной зоны. Уже в первые месяцы после Чернобыльской катастрофы ведущие специалисты нашей страны по сельскохозяйственной радиологии предлагали заповедать природные угодья тридцатикилометровой зоны, понимая нереальность возвращения их для нормального хозяйственного использования в ближайшие десятилетия. В Беларуси приняли именно этот способ обращения с Зоной отчуждения, учредив на всей ее территории Государственный Полесский радиоэкологический заповедник. Ситуация в украинской части Чернобыльской Зоны отчуждения иная – здесь, наряду с лесами и залежными полями, существует и эксплуатируется атомная электростанция, существует связанная с ней промышленная, городская и транспортная инфраструктура, здесь находится печально знаменитый объект "Укрытие" и пункты захоронения послеаварийных радиоактивных отходов, которые требуют преобразования в экологически безопасные объекты; наконец, загрязненные радиацией воды сбрасываются с территории Зоны отчуждения на населенную территорию, в главный источник водоснабжения Украины – р. Днепр. Поэтому на всей территории Зоны отчуждения активная человеческая деятельность не может быть прекращена.

9

Концепция Чернобыльской Зоны отчуждения на территории Украины [16] предполагает выделение специальной заповедной зоны, куда войдут наиболее ценные в природоохранном и научном отношении природные угодья, которые с целью сохранения коренных ландшафтов и экосистем Полесья будут охраняться от вмешательства человека. Зона займет около 10 % природных угодий. На территории этой зоны осуществляется режим заповедности, который исключает нарушение природного самовосстановления экосистем ограничивается пребывание персонала в соответствии со статусом заповедности.

Особенность заповедной зоны в том, что она не должна представлять собой компактного ядра, а будет мозаичной, так же как мозаично разбросаны по территории существующие памятники природы, разделенные пространствами, испытывшими на себе сильнейшее антропогенное воздействие: мелиорацию, многовековую распашку, монокультурную и одновозрастную лесопосадку.

Можно наметить критерии, по которым будут отбираться перспективные для заповедания объекты: лесные массивы с преобладанием широколиственных или вообще лиственных пород, выделы старых сосен, верховые болота, водоохранные полосы вдоль водотоков, пойменные луга и водоемы [17], места произрастания охраняемых видов растений [7], места обитания краснокнижных видов животных, места скоплений пролетных птиц, колонии бобров [8]. В заповедную зону войдут участки залежных полей для наблюдения над естественным процессом лесовосстановления. Кроме того, в нее будут включены природные уголья ближней зоны с высоким радиоактивным загрязнением, где наиболее заметны радиобиологические эффекты: остатки "рыжего леса", леса, залежные поля, пойменные луга и озера.

Таблица 3. Удельная бета-радиоактивность (А) раковин моллюсков, кБк/кг, и оценка активности ^{90}Sr , Бк/л, в р. Илья

Пункт пробоотбора	Дата	А раковин	А воды
с. Александровка	28.07.92	1,7	0,3
с. Кливины	05.10.94	2,1	0,4
с. Рудня Ильинецкая (река)	19.07.90	34,0	7,0
с. Рудня Ильинецкая (водоем лесного отделения)	05.10.94	2,8	0,6

РЕЗЮМЕ

В Зоне отчуждения имеется 11 объектов природно-заповедного фонда Украины, находящихся под охраной государства (Ильинский заказник общегосударственного значения, заповедное урочище "Загорье", памятник природы "Городище" и др.). Проведено обследование их состояния. Отмечена гибель одного объекта в результате пожара в 1992 г. и существенное повреждение двух объектов. Заповедные объекты переданы под охранное обязательство предприятию "Чернобыльлес", обнаруживаются перспективы выделения новых заповедных объектов в Зоне отчуждения ЧАЭС.

1. Геоботаничне районування Української РСР. – Київ.: Наук. думка, 1977. – 303с.
2. Афанасьев Д.Я. Короткий геоботаничний нарис заплавлених лук р. Уж // Укр. ботан. журн. – 1968. – 25, вип. 4. – С. 30-37.
3. Афанасьев Д.Я. Заплавні луки Прип'яті // Там само. – 1959. – 16, вип. 2. – С. 22-29.
4. Бачурина Г. Ф. Мезотрофні і оліготрофні стадії розвитку боліт в басейні р. Уж в межах Центрального Полісся // Там само. – 1963. – 20, вип. 3. – С. 81-93.
5. Кучерява Л.Ф. Болота поліської частини Київської області // Там само. – 1965. – 22, вип. 5. – с. 61-73.
6. Бортняк М.М. Новини флори Київського Полісся // Там само. – 1962. – 19, вип. 2. – С. 83-89.
7. Устименко П., Попович С., Мовчан Я. Зелені раритети зони відчуження // Ойкумена. – 1993. – № 2. – С. 22-24.
8. Францевич Л.И., Гайченко В.А., Крыжановский В.И. Животные в радиоактивной зоне. – Киев: Наук. думка, 1991. – 128 с.
9. Червона книга України. Тваринний світ / Под ред. Н.Н. Щербака. – Киев: УРЕ, 1994. – 464 с.
10. Природно-заповідний фонд Української РСР / Под ред. М.А. Воїтвенського. – Киев: Урожай, 1986. – 224 с.
11. Андриенко Т.Л., Шеляг-Сосонко Ю.Р. Растительный мир Украинского Полесья в аспекте его охраны. – Киев: Наук. думка, 1983. – 216 с.
12. Печера М.П. Городище Милоградської культури в Київському Поліссі // Археологія. – 1976. – Вип. 20. – С. 88.
13. Шендрік Н.І. Довідник з археології України. Київська область. – Киев: Наук. думка, 1977. – 142 с.
14. Радиационное воздействие на хвойные леса в районе аварии на Чернобыльской АЭС / Под ред. Г.М. Козубова, А.И. Таскаева. – Сыктывкар: КНЦ УрО АН СССР, 1990. – 136 с.
- 11
15. Францевич Л.И., Захарчук Т.Н., Корнюшин А.В. и др. Загрязнение рек бассейна Днепра стронцием-90 по данным измерений на биоиндикаторах – раковинах моллюсков // Гидробиол. журн. – 1993. – 29, вып. 2. – С. 38-46.
16. Холоша В.І., Соботович Е.В. Концепція Чорнобильської зони відчуження // Проблеми Чорнобильської Зони відчуження. – 1994. – Вип. 1. – С. 3-16.

Институт ботаники НАН Украины, Киев
Институт зоологии НАН Украины, Киев
Предприятие "Чернобыльлес", Чернобыль

Поступила 10.07.95

УДК 577/15/17:614.876+539.L.074:631.42:-58.04

М. Ю. Алесина, Н. П. Архипов, Л. С. Логинова, А. М. Бескровный
**ВЛИЯНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ
НА ПОСТУПЛЕНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ
В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЯХ**

Изучена возможность раздельного и совместного использования фитобиорегуляторов в качестве средств, воздействующих на процессы накопления ^{137}Cs в сельскохозяйственных растениях в условиях 30-километровой зоны. Использованы биологически активные металлоорганические соединения (биомосы), синтезированные на основе растительного сырья: биомос-Ч, полученный из дубильного экстракта и обладающий выраженными комплексообразующими свойствами, и биомос-Т, полученный из ботвы томатов, антистрессорные свойства которого доказаны на многих сельскохозяйственных культурах. В результате проведенного исследования выбран наиболее рациональный вариант совместного применения двух препаратов, позволяющих получить достоверное снижение перехода ^{137}Cs в кукурузе с сохранением удовлетворительных фенологических показателей.

ВВЕДЕНИЕ

При разработке мероприятий, способствующих снижению накопления радионуклидов (РН) в сельскохозяйственной продукции, мало изучены подходы, основанные на физиологических принципах регуляции поступления и передвижения питательных и минеральных веществ по растению. Одним из таких подходов является использование биологически активных веществ (БАВ), воздействующих на проницаемость клеточных мембран и интенсивность проникновения через нее различных ионов. К преимуществам БАВ относится и то, что они применяются в очень малых дозах и не загрязняют почву. Кроме того, БАВ природного происхождения практически не токсичны и безопасны в экологическом аспекте. Высокая степень антропогенных нагрузок на почву и ее микробиологическая "усталость" выдвигают на первый план биологические способы регуляции продуктивности сельскохозяйственных растений.

Анализ данных литературы о механизме действия различных БАВ на рост и развитие растений дает основание высказать некоторые предположения о возможных точках приложения биорегулирующих средств на процессы поглощения и распределения РН в растениях.

Доказано, что в кинетике накопления РН в растениях потенциально доступны для управления три переменные: количество водорастворимой фракции РН; скорость поглощения и выведения растением; суммарная биомасса, снимаемая с единицы загрязненной площади [1]. Рассмотрим возможность влияния БАВ на каждую из этих переменных.

© М. Ю. Алесина, Н.П. Архипов, Л. С. Логинова, А. М. Бескровный, 1996

12

Как известно, корневой путь поглощения связано растворимой, т.е. биодоступной, фракцией РН, в процессе формирования которой участвуют абиотические факторы (кислотность, водный потенциал и адсорбционные свойства почвы, определяющие подвижность элементов, ее механический и химический состав) и биотические, важнейшими из которых являются активность почвенной микрофлоры и различные по своей природе корневые выделения (сидерофоры) высших растений. Сдвиги биодоступности элементов-загрязнителей под влиянием абиотических факторов происходят в течение длительного периода времени (100-1000 лет), тогда как участие микроорганизмов почвы и органических

веществ, выделяемых корнями, может существенно ускорить процесс изменения растворимости РН [2].

Показано, что внесение в почву БАВ, полученных из древесной коры хвойных деревьев [3], виноградных косточек [4], продукта гидролиза морских водорослей [5], биомоса-Т [6, 7], а также комплексных органических удобрений из растительных элементов, гумусовых веществ и органических веществ морской природы [5], существенно повышает биопотенциал почвы за счет активизации микрофлоры. Эти вещества обладают свойствами активировать бактерии минерализирующего блока, в результате значительно повышается коэффициент минерализации и коэффициент иммобилизации органических соединений почвы. При этом биогенность почвы усиливается за счет увеличения численности агрохимически ценных групп микроорганизмов при одновременном снижении содержания микромикетов, что в целом улучшает фитосанитарное состояние почвы.

Следовательно, БАВ, внесенные в почву или попавшие в нее при опрыскивании вегетирующих растений, могут влиять на численность и активность микрофлоры. Изменяя рН почвы и биодоступность радиоизотопных соединений, можно воздействовать на процесс их поглощения корнями, а также, возможно, и на интенсивность выделения корнями органических веществ, участвующих в кондиционировании РН.

БАВ усиливает полупроницаемость клеточной мембраны и активируют процесс переноса кальция на внутреннюю сторону мембраны, что приводит к более интенсивному поглощению ионов, в том числе и калия [8]. Вероятно, в этот момент происходит и компенсаторное увеличение поступления кальция до его реутилизации внутри клетки [9]. Кроме того, влияние эффектов биорегулирующих средств на скорость поглощения и распределения калия и кальция (а также по аналогии ^{137}Cs и ^{90}Sr) может происходить посредством стимуляции синтеза ауксинов на различных фазах роста растений, влияющих на мембранный потенциал и свойства поверхностной мембраны цитоплазмы, на ионное равновесие в клетке [8, 9].

Как правило, обработка БАВ растений увеличивает их биомассу, в связи с чем может усиливаться вынос РН с урожаем. Наиболее интенсивное поглощение РН происходит в фазе формирования третьего листа и на фазе выхода в трубку, т.е. в период самого активного роста. С началом образования репродуктивных органов процесс поглощения РН растениями резко снижается [1, 2].

Возможен и другой путь влияния биорегуляторов на активность поглощения РН растениями. В частности, при использовании антагонистов гиббереллинов (фитогормонов) - ретардантов, рост растений замедляется, стебель укорачивается и утолщается; при этом усиливается накопление ассимилятов в генеративных органах [10, 11]. Наряду с изменением

13

архитектоники растений происходят сдвиги в биохимическом статусе, обнаруживаются большие количества флавоноидных соединений, локализуемых по периметру стебля и вокруг проводящих пучков. В настоящее время показано, что флавоноиды активно захватывают тяжелые металлы (ТМ) и РН, поэтому растения с высоким содержанием флавоноидов обладают повышенной способностью к поглощению указанных выше токсинов.

Одним из предполагаемых механизмов влияния БАВ на снижение поглощения РН корнями растений может быть их воздействие на образование в подземной части повышенных количеств абсцизовой кислоты, которая проявляет свой антиоксидантный эффект и препятствует проницаемости ионов через мембрану.

Гипотетический характер высказанных предположений, а также отсутствие данных в литературе по настоящей проблеме способствовали проведению экспериментального исследования, цель которого - изучение возможности использования фитобиорегуляторов в качестве средств, регулирующих процессы поступления и распределения РН в сельскохозяйственных растениях в условиях радиоактивного загрязнения почвы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе применялись биологически активные металлорганические соединения - биомосы, синтезированные на основе растительного сырья.

Биомос-Ч (Б-Ч) представляет собой кахетин-резорциновый полимер растительного происхождения (из дубильного экстракта), импрегнированный группировками неорганической природы, усиливающими комплексообразование веществ сходной субстанции. Например, комплексообразующая способность Б-Ч по отношению к железу проявляется в весовом соотношении "биомос-металл" в пределах (6-10):1. В экспериментах с применением неорганических мембран, не подвергающихся процессу радиолитического распада, выявлено свойство Б-Ч задерживать стабильный стронций.

Биомос-Т (Б-Т) получен путем полимеризации продуктов экстракта ботвы томатов. Его биологическая активность предопределена набором высокополимерных металлокомплексов на основе полисахаридов, органических многоосновных кислот, полифенолов, а также глюкоалкалоидов типа стероидов. В отличие от Б-Ч, в структуре которого практически отсутствуют аминокислотные группы, содержание азота в Б-Т близко по своему значению к нативному гумусу.

Б-Т является эффективным биорегулирующим средством для многих растительных культур (гороха, огурцов, капусты, редиса, лука, свеклы, сои и др.). Применение препарата для замачивания семян и опрыскивания вегетирующих растений не только повышало продуктивность овощей, увеличивая массу вегетативных и число генеративных органов, но и улучшало качество получаемой продукции, снижая содержание нитратов [7].

Антистрессовые свойства препарата выявлены при низкотемпературных условиях, а также при засолении почвы. Комплексообразующие свойства Б-Т по отношению к ТМ были обнаружены в вегетационных экспериментах (поглощение свинца салатом курчавым снижалось в 7 раз, кадмия - в 4 раза, цинка - в 2 раза). Адаптогенные свойства Б-Т в условиях 30-километровой Зоны отчуждения ЧАЭС проявились в засушливое лето 1992 г. на саженцах сосны. Опрыскивание растений 0,01 %-ным раствором Б-Т усиливало их рост: по длине главного побега на 63%, а бокового - на 200%, по сравнению с контролем.

14

Действие препаратов в условиях Зоны отчуждения в 1993 г. изучалось в вегетационных и полевых экспериментах в двух направлениях:

проверки возможности снижения поступления РН в сельскохозяйственные растения после обработки почвы раствором Б-Ч (фитокомплексона) и выбора оптимальных доз препарата по фенологическим и радиометрическим показателям;

разработки наиболее рациональных схем отдельного и совместного применения Б-Ч и Б-Т с учетом их специфических эффектов на процессы поглощения РН в развитие растений.

Эксперименты в теплицах проводились на 25 микроучастках размером 0,5 м² по пять вариантов в пятикратной повторности. Для этого использовали почву, завезенную с полигона "Чистогаловка", на котором выполнялись полевые опыты. Уровни загрязнения в этом районе по ¹³⁷Cs составляют около 600 Ки/км² и более.

При каждой повторности выделяли контрольный участок, на котором почва до посева была полита водой и посеяны семена черносеменной кукурузы, замоченные на 24 ч в воде. На двух участках почву до посева поливали растворами Б-Ч из расчета соответственно 50 и 100 г/м² и высевали семена кукурузы, замоченные в воде. На остальных двух участках почву обрабатывали таким же способом, но семена предварительно замачивали в 0,01%-ном растворе Б-Т.

Полевые опыты закладывались на 28 участках полигона "Чистогаловка" площадью 1,5х0,2 м, из которых два варианта, в четырех повторностях для люпина и пять вариантов в четырех повторностях для кукурузы. В экспериментах с кукурузой изучали влияние однократной обработки почвы большими дозами Б-Ч (150 и 300 г/м²), воздействие повторной обработки через две недели после всходов на показатели роста и развития растений, а также поглощения и распределения РН.

В опыте с люпином предусматривалось исследование влияния предпосевной обработки Б-Ч в дозе 150 г/м² и семян в 0,01%-ном растворе Б-Т.

В течение всего вегетационного периода проводились фенологические наблюдения и фиксировались метеорологические показатели. Радиоспектрометрические измерения ¹³⁷Cs и

⁴⁰K проведены на гаммаспектрометре "ORTEG-CANBERRA". Полученные результаты подвергнуты статистической обработке.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вегетационные эксперименты. Визуальных отличий в развитии чернотеленной кукурузы между опытными и контрольными растениями не наблюдалось. Следует отметить, что растения, выращенные из семян, обработанных раствором Б-Т, отличались более зеленой окраской.

Фенологические показатели, зафиксированные при снятии урожая кукурузы, приведены в табл. 1. Результаты анализировались по параметрам роста и формирования образцов, отобранных по максимальной и минимальной высоте стебля.

Полученные данные свидетельствуют о том, что внесение раствора Б-Ч до посева кукурузы приводило к приросту стебля у растений с минимальной высотой побега. Достоверно это проявилось в варианте с сочетанием обработки почвы и семян (соответственно биомосами – Ч и Т). Усиление роста стебля кукурузы у низкорослых растений сопровождалось увеличением количества междоузлий и увеличением площади листа, в наибольшей степени проявляющимися также при обработке семян Б-Т. Кроме того, при сочетании двух препаратов отмечена тенденция к повышению урожая початков на делянке (см. табл. 1).

15

Таблица 1. Фенологические наблюдения воздействия В-Ч и Б-Т на кукурузу в условиях теплицы

Показатель	Контроль	Способ обработки			
		Б-Ч до посева (50 г/м ²)	Б-Ч до посева (100 г/м ²)	Б-Ч (50 г/м ²) + семян в 0,01 % Б-Т	Б-Ч (100 г/м ²) + семян в 0,01 % Б-Т
Высота растений, см	<u>191±8</u> 86±7	<u>198±12</u> 93±9	<u>199±8</u> 88±11	<u>197±7</u> 143±8	<u>203±14</u> 82±15
Число междоузлий	<u>17</u> 11	<u>16</u> 13	<u>16</u> 14	<u>17</u> 15	<u>18</u> 14
Число початков	<u>3</u> 1	<u>3</u> 1	<u>3</u> 1	<u>3</u> 1	<u>3</u> 1
Ширина листа, см	<u>6,1±0,6</u> 3,5±0,4	<u>6,51±0,4</u> 3,4±0	<u>6,1±0,2</u> 3,2±0,2	<u>6,2±0,8</u> 4,0±0,8	<u>5,8±0,8</u> 3,8±0,6
Длина листа, см	110±3 80,4±6,2	107±2 89,3±5,4	111±3 71±7	112±2 81±6,4	105±0,6 84±11
Площадь листьев, см ²	<u>670±6</u> 284±36	<u>697±27</u> 305±38	<u>639±26</u> 548±37	<u>694±80</u> 326±37	<u>607±24</u> 338±45
Масса сухих листьев с делянки, кг	1,54±0,12	1,38±0,13	1,40±0,2	1,61±0,3	
Масса сухих початков с делянки, кг	0,15±0,03	0,14±0,002	0,17±0,002	0,19±0,03	0,16±0,03

Примечание. Над чертой приведены максимальные значения, под чертой - минимальные.

Таблица 2. Действие Б-Ч и Б-Т на распределение РН в различных частях кукурузы (в вегетационных условиях)

Показатель	Часть растения	Контроль	Способ обработки			
			Б-Ч до посева (50 г/м ²)	Б-Ч до посева (100 г/м ²)	Б-Ч (50 г/м ²)+ семян в 0,01 % Б-Т	Б-Ч (100 г/м ²)+ семян в 0,01% Б-Т
⁴⁰ К, кБк/кг	Вегетативная масса	0,52±0,03	0,65±0,06*	0,77±0,08*	0,68±0,13	0,73±0,05**
	Початок	0,72±0,06	0,54±0,05*	0,48±0,05**	0,80±0,07	0,69±0,08
	Корень	0,80±0,20	1,16±0,24	0,99±0,25	1,65±0,09	1,70±0,07*
¹³⁷ Cs, кБк/кг	Вегетативная масса	41,02±3,76	33,2±5,5	29,1±2,9*	24,5±2,7	43,3±7,5
	Початок	28,2±3,7	22,44±2,0	20,4±2,2	25,9±2,5	29,2±5,2
	Корень	20,4±5,8	18,3±6,3	15,1±2,2	20,6±3,3	22,2±8,5
КН ⁴⁰ К	Вегетативная масса	2,9±0,20	3,8±0,4*	4,4±0,4**	4,0±0,7	4,2±0,3**
	Початок	4,4±0,5	3,0±0,3	2,7±0,3*	4,5±0,4	3,9±0,5
	Корень	4,5±1,1	6,6±1,3	5,6±1,4	9,4±0,4**	9,6±0,4**
КН ¹³⁷ Cs	Вегетативная масса	0,61±0,06	0,55±0,08	0,48±0,05	0,41±0,04*	0,71±0,12
	Початок	0,47±0,06	0,37±0,03	0,33±0,04	0,42±8,04	0,48±0,09
	Корень	0,33±0,09	0,30±0,04	0,25±0,04	0,34±0,05	0,36±0,09
¹³⁷ Cs ⁴⁰ К	Вегетативная масса	79	50,8	37,6	36	59,3
	Початок	39,2	41,9	42,9	32,9	42,5
	Корень	25,5	15,8	15,2	12,4	13,1

* $p < 0,05$;

** $p < 0,01$ и более по сравнению с контролем.

Оптимальным вариантом для улучшения фенологических показателей кукурузы в закрытом грунте можно считать сочетание обработки почвы до посева раствором Б-Ч в дозе 50 г/м² и обработку семян в 0,01 %-ном растворе Б-Т.

16

Таблица 3. Фенологические наблюдения воздействия Б-Ч на кукурузу в полевых экспериментах

Показатель	Контроль	Способ обработки			
		Однократно Б-Ч (150 г/м ²)	Однократно Б-Ч (300 г/м ²)	Двукратно Б-Ч (150+150 г/м ²)	Двукратно Б-Ч (300+150 г/м ²)
Высота растений, см	<u>59±6</u> 38±7	<u>59</u> 30	<u>55</u> 42	<u>54±13</u> 34±8	<u>53±12</u> 34±9
Число междоузлий	<u>13,8±1,3</u> 10,8±0,8	<u>12,5</u> 11,5	<u>12,5</u> 11,5	<u>12,5±0,4</u> 10,8±0,8	<u>12±0,8</u> 9,5±1,3
Ширина листа, см	<u>5±0,4</u> 5±0,4	<u>5</u> 4	<u>4</u> 4,5	<u>5±0,4</u> 4±0,4	<u>4,5±0,4</u> 3,8±0,8
Длина листа, см	<u>65±6</u> 83±5	<u>65</u> 57	<u>66</u> 64	<u>67</u> 3	<u>61±7</u> 57±5
Площадь ассимилирующей поверхности, см ²	<u>308±29</u> 303±46	<u>325</u> 228	<u>264</u> 288	<u>318±38</u> 223±50	<u>280±55</u> 215±70
Масса сухих надземных органов, кг/м ²	0,27±0,054	0,65	0,41	0,57±0,23	0,72±0,21
Масса сырых надземных органов, кг	1,15±0,25	1,2	0,95	1,19±0,28	1,25±0,42

Радиометрические измерения содержания ¹³⁷Cs и ⁴⁰К в зеленой массе (стебель и листья), початках и корнях кукурузы показали, что апробированный метод внесения Б-Ч в почву перед посевом в дозах 50-100 г/м² способствует снижению накопления ¹³⁷Cs во всех перечисленных органах растения. Одновременно усиливается поступление ⁴⁰К в корень и

зеленую массу. Следует отметить, что в початках кукурузы уровень ^{40}K падает наряду со снижением ^{137}Cs (табл. 2).

Предварительное замачивание семян черносеменной кукурузы в растворе Б-Т приводило к интенсификации поглощения корнями и надземными органами (включая и початки) ^{40}K и ^{137}Cs на фоне улучшения фенологических показателей.

Наиболее рациональным вариантом применения двух препаратов представляется сочетание предпосевной обработки почвы Б-Ч в дозе 50 г/м² и семян в 0,01 %-ном растворе Б-Т (табл. 2).

Полевые эксперименты. В условиях открытой почвы для обработки почвы применяли большие дозы Б-Ч (150 и 300 г/м²). При этом в эксперименте с люпином почва обрабатывалась препаратом однократно в дозе 150 г/м², а семена замачивались в 0,01 %-ном растворе Б-Т. В опыте с черносеменной кукурузой почву обрабатывали дважды - до посева и через две недели после всходов без замачивания семян в растворе Б-Т.

Как в первом, так и во втором эксперименте отмечено явное ухудшение фенологических показателей, несмотря на применение Б-Т в опыте с люпином (табл. 3 и 4).

В отличие от вегетационных опытов, в полевых условиях у кукурузы не сформировались початки, поэтому для радиометрии были взяты только зеленая масса и корни. Эти данные указывают на угнетающее влияние Б-Ч на рост и развитие растений, если его применяют в больших дозах.

В опытах с кукурузой на полигоне "Чистогаловка" снижение содержания ^{137}Cs при одновременном повышении уровня ^{40}K в зеленой массе обнаружено в варианте с однократной обработкой почвы Б-Ч в дозе 300 г/м² (табл. 5).

17

Таблица 4. Фенологические наблюдения воздействия биомосов на люпин

Способ обработки почвы	Высота растения, см	Число бобов	Масса сухой зеленой массы, кг	Масса сухих бобов, кг	Общая масса сухой зелени, кг/м ²	Общая масса сухих бобов, кг/м ²	Общая масса сырой зелени, кг/м ²
Контроль (полив водой до посева)	60	20	0,020	0,02	1,60	1,32	10,2
Раствором Б-Ч до посева (150 г/м ²) + замачивание семян Б-Ч	54	9	0,015	0,01	1,36	1,03	9,33

Примечание: Средние величины рассчитаны из суммы образцов с максимальной и минимальной высотой растения.

Таблица 5. Переход ^{137}Cs в зеленую массу кукурузы при различных способах обработки почвы Б-Ч

Показатель	Контроль	Способ обработки			
		Однократно Б-Ч (150 г/м ²)	Однократно Б-Ч (300 г/м ²)	Двукратно Б-Ч (150+150 г/м ²)	Двукратно Б-Ч (300+150 г/м ²)
^{40}K , кБк/кг	0,672	0,822	1,01	0,868	0,897
^{137}Cs , кБк/кг	2,85	3,18	2,08	2,86	3,16
КН ^{40}K	3,8	4,7	5,8	4,9	5,1
КН ^{137}Cs	0,046	0,052	0,034	0,046	0,052
$^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$	4,30	3,84	2,05	3,40	3,76

Примечание: Первый раз почва обрабатывалась до посева, второй – через две недели после всходов.

Таблица 6. Влияние В-Ч и Б-Т на переход ^{137}Cs в надземные органы люпина (зеленую массу и бобы)

Показатель	Контроль		Обработка почвы Б-Ч (150 г/м ²) + семена, обработанные Б-Т 0,01 %	
	Зеленая масса	Бобы	Зеленая масса	Бобы
⁴⁰ K, кБк/кг	0,237	0,357	0,489	0,477
¹³⁷ Cs кБк/кг	35,19	59,66	52,72	68,11
КН ⁴⁰ K	1,35	2,03	2,78	2,72
КН ¹³⁷ Cs	0,58	0,98	0,86	1,12
¹³⁷ Cs/ ⁴⁰ K	148	167	114	146

К сожалению, в данных экспериментах сделано значительно меньше замеров радиоактивности по ¹³⁷Cs в образцах растений, чем в вегетационных, поэтому выявленные сдвиги не подтверждены.

18

Радиометрический анализ образцов зеленой массы и бобов люпина позволил выявить усиление перехода в эти органы ¹³⁷Cs и ⁴⁰K. При этом интенсивность накопления РН в бобах выражена в большей степени, чем в зеленой массе (табл. 6).

Поскольку бобовые культуры обладают большей способностью к поглощению РН, для них, вероятно, применение Б-Т в качестве биостимулирующего средства в зонах с радиоактивным загрязнением нецелесообразно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интерпретируя полученные результаты, следует остановиться на влиянии испытываемых фитобиорегуляторов на рост и развитие растений в условиях радиоактивного загрязнения.

Усиление роста боковых побегов саженцев сосны (являющееся признаком радиорезистентности этой лесной культуры), наблюдавшееся после опрыскивания растений раствором Б-Т в период засушливого лета 1992 г., а также рост активирующий эффект препарата, отмеченный в настоящем эксперименте у наиболее слабых растений кукурузы, можно расценивать как проявление антистрессовых свойств биорегулятора. Можно предположить, что при обработке семян Т-Б за счет его высокой проницаемости в клетку [12] происходит высвобождение фитогормонов - гиббереллинов, усиливающих гидролиз запасных питательных веществ в эндосперме набухших семян [13], а также свободных ауксинов, запускающих начальные ростовые реакции [14].

О стимулирующем действии Б-Т на развитие кукурузы в условиях закрытого грунта свидетельствовали также некоторое увеличение площади листьев и их более зеленая окраска, указывающие на активацию фотосинтетических процессов. Усиление фотосинтеза, в свою очередь, положительно коррелирует с интенсивностью поглощения минеральных элементов корневой системой [15] и, по всей вероятности, может усиливать поступление калия и его радиоизотопного аналога в растения (обнаруженное в экспериментах с применением Б-Ч при обработке почвы Б-Ч).

В наших исследованиях применение фитокомплексов Б-Ч и Б Т имело свои положительные и отрицательные стороны. К последним можно отнести высокое содержание фенольных соединений в Б-Ч (полученном из дубильного экстракта), тормозящих рост растений [3]. Вероятно, по этой причине увеличение дозы и кратности обработки почвы препаратом приводило к существенному ухудшению фенологических показателей у кукурузы и люпина в полевых опытах. С ингибирующим влиянием полифенолов, по-видимому, можно связать и нарушение формирования репродуктивных органов у кукурузы в открытом грунте, обработанном Б-Ч в дозе 300 г/м². Вместе с тем следует отметить, что однократный полив почвы перед посевом Б-Ч в дозах 50 и 100 г/м² в теплицах благоприятно влиял на рост и развитие кукурузы. Ранее (1992 г.) нами были получены результаты при внесении 90 г/м² препарата в почву в полевых условиях, свидетельствующие об увеличении всхожести кукурузы и высоты ее проростков в течение первых двух недель после всходов.

Анализируя изложенное выше, можно предположить, что обработка поверхностного слоя почвы препаратом с выраженными комплексообразующими свойствами в определенных дозах (около 100 г/м²) препятствует поступлению токсикантов в корни растений и улучшает условия их роста. Кроме того, у биомосов, полученных на основе дубильного экстракта, обнаружена способность существенно влиять на десорбционные характеристики почвы, способствуя удерживанию в ней влаги, что также может создавать более благоприятные условия для прорастания семян.

19

Наши предположения о возможном механизме действия Б-Ч базируются на способности препарата образовывать комплексы с ТМ и РН в почве подобно гуминовым кислотам. Следовательно, присутствие указанного вещества в почве должно определенным образом сказываться на соотношении поступающих в растение калия и радиоцезия (ввиду их конкуренции при транспорте через мембрану). Полученные результаты свидетельствуют о стимулирующем влиянии Б-Ч на поступление ⁴⁰K в корни и надземную часть кукурузы в вегетационных и полевых опытах. При этом переход ¹³⁷Cs в эти органы достоверно снижается (в опытах на закрытом грунте), а соотношение ¹³⁷Cs и ⁴⁰K сдвигается в сторону превалирования ⁴⁰K. Учитывая подвижность калия в почве и его более быструю десорбцию из комплексов почвы, чем ¹³⁷Cs, увеличение его поступления в корни растения под воздействием препарата представляется возможным.

Однако нельзя исключить возможность участия и других факторов, влияющих на интенсивность поглощения ⁴⁰K корневой системой при внесении препарата в почву. Этот эффект можно объяснить способностью Б-Ч удерживать влагу в зоне развития корня, что может содействовать усилению диффузного потока, с которым калий транспортируется к поверхности корня. Кроме того, в составе Б-Ч содержится большой набор микроэлементов (медь, кобальт, марганец, цинк и др.), дефицитных для дерново-подзолистых почв [16]. Некоторые из них, в частности цинк, существенно влияют на проницаемость клеточных мембран растений. Суммируя изложенное выше, можно сделать вывод, что однократная обработка Б-Ч почвы до посева растений каким-то образом изменяет калиевый потенциал и снижает биодоступность радиоизотопных аналогов калия. Вероятнее всего, этот эффект можно связать с комплексообразующими свойствами препарата.

В отличие от Б-Ч, воздействие Б-Т на процессы поступления РН в растения ассоциируется с его усиливающим влиянием на проницаемость клеточных мембран и поглощением ионов калия (во всех органах кукурузы, выросших из обработанных Б-Т семян, несмотря на предварительную обработку почвы Б-Ч, обнаруживалось повышение содержания ¹³⁷Cs и ⁴⁰K). Аналогичная тенденция к усилению перехода изучаемых элементов в надземную массу и бобы наблюдалась и у люпина.

Обнаруженные нами особенности в характере изменении в процессах поступления и распределения РН в различных органах сельскохозяйственных растений под воздействием биомосов подтверждает возможность их использования в качестве средств, регулирующих направленность миграции элементов-загрязнителей в системе почва-растение.

Для усиления этой направленности и достижения конечной цели - снижения радионуклидного загрязнения сельскохозяйственной продукции - целесообразно включать биологически активные металлорганические фитопрепараты в комплекс контрмер.

ВЫВОДЫ

1. Однократная обработка почвы раствором Б-Ч перед посевом кукурузы снижает переход ¹³⁷Cs в зеленую массу, початки и корень (в вегетационных экспериментах в дозах 50-100 г/м², в полевых - 300 г/м²). При этом в вегетативную и корневую части растений усиливается поступление ⁴⁰K.

2. Замачивание семян кукурузы в 0,01 %-ном растворе Б-Т (в течение 24 ч) до посева способствует аккумуляции ¹³⁷Cs и ⁴⁰K во всех органах растения, даже на фоне предварительной обработки почвы Б-Ч, снижающей переход радиоцезия.

3. В условиях радиоактивного загрязнения почвы обработка семян Б-Ч приводит к интенсификации ростовых и фотосинтетических процессов у наиболее слабых растений кукурузы, что свидетельствует о проявлении адаптогенного эффекта препарата.

4. Применение Б-Ч в дозах свыше 100 г/м² и увеличение кратности полива почвы препаратом существенно ухудшает показатели роста и развития кукурузы в открытом грунте без усиления выявленных тенденций в поглощении и распределении радионуклидов в различных органах растений.

5. Совместное использование биомосов в вегетационных экспериментах позволяет получить достоверное снижение перехода ¹³⁷Cs в кукурузу с сохранением адекватности фенофаз в онтогенезе при однократной предпосевной обработке почвы Б-Ч в дозе 50 г/м² и замачивании семян в 0,01 %-ном растворе Б-Т.

1. *Антропогенная радионуклидная аномалия и растения* / Под ред. Д.М. Гродзинского. - Киев: Либідь, 1991. - 153 с.

2. *Рост растений. Первичные механизмы* / Под. ред. В.И. Кефели. - М.: Наука, 1965. - 200 с.

3. *Рункова Л.В. Фитогормоны - регуляторы роста растений.* - М.: Наука, 1980. - 119 с.

4. *Деева В. П. Применение регуляторов роста для повышения продуктивности сельскохозяйственных культур.* - Минск: Наука и техника, 1986. - С. 26-33.

4. *Ковалев В.П. Испытание и применение регуляторов роста для повышения продуктивности сельскохозяйственных культур* // Регуляторы роста растений. - М.: Агропромиздат, 1990. - С. 96-105.

5. *Бескровный А.М., Котляренко И.П., Сукачева А.А. и др. Биологически активные искусственные гуминоподобные соединения* // Научн. докл. высш. школы. Биологические науки. - 1979. - № 3. - С. 85-89.

6. *Шульгина Л.М., Зелендина Р.Д., Криворучко Л.Г. и др. Биомос-Т повышает продуктивность растений* // Картофель и овощи. - 1987. - № 1. - С. 39-40.

7. *Регуляторы роста растений* // Сб. научн. трудов. - Л., 1989. - 118 с.

8. *Регуляторы роста растений и нуклеиновый обмен* // Под ред. Б.И. Хорькова. - М.: Наука, 1965. - 200 с.

9. *Блиновский И.К., Калашиников Д.В. Разработка синергических смесей ретардантов на основе изучения механизма их действия* // Регуляторы роста растений. / Под ред. В.С. Шевелухи - М.: Агропромиздат, 1990. - С. 36-43.

10. *Шевелуха В.С., Хрусталева Л.И., Блиновский И.К. и др. Оценка генетического риска применения регуляторов роста* // Там же. - С. 132-143.

11. *Ионенко В.И., Головачев Е.А., Сукачева О.И. и др. Феноменология функциональных структурных моделей природных гуминовых и синтезированных гуминоподобных веществ* // Сиб. вестник сельскохоз. наук. - 1988. - № 5. - С. 91-103.

12. *Гамбург К.Э. О возможных связях действия гиббереллина с обменом нуклеиновых кислот* // Регуляторы роста растений и нуклеиновый обмен. - М.: Наука, 1965. - С. 48-56.

13. *Полевой В.В. Влияние ауксина на нуклеиновый и белковый обмен растительных тканей* // Там же. - С. 27-46.

14. *Кефели В.И., Филимонова М.В., Розина И.М. Рост, образование и фотосинтез - как элементы продуктивности растений* // Изв. АН СССР. Сер. биол. - 1985. - № 6. - С. 200-201.

15. *Головина Л.П., Рыбалкина А.В., Лысенко М.Н. Баланс микроэлементов в системе почва-растение в условиях дерново-подзолистых почв Левобережного Полесья УССР* // Агрохимия. - 1985. - № 2. - С. 88-89.

ЧЕНЦМИ НПО "Припять", Чернобыль
Поступила 15.03.95

21

УДК 577.34:550.424

Б. И. Новиков
**АККУМУЛЯЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЦЕРИЯ И ЦЕЗИЯ
В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ КИЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (1986-1990 гг.)**

Приведены результаты исследования ¹⁴⁴Ce, ¹³⁷Cs и ¹³⁴Cs в иле староречий - меандр рек Припяти и Днепра, которые были затоплены Киевском водохранилищем и расположены возле восточной границы Зоны отчуждения. Установлено, что такие донные образования являются концентратами радиоактивных загрязнений и могут быть использованы для индикации их поступления с водным стоком через восточную границу Зоны отчуждения. Показана хронология аккумуляции на дне меандр ¹⁴⁴Ce, ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs за период 1986-1990 гг.

Авария на IV энергоблоке ЧАЭС привела к интенсивному радиоактивному загрязнению значительной территории водосборного бассейна р. Припять, в которую почти подлостью вписываются и границы Зоны отчуждения. Восточная граница этой Зоны пересекает затопленное верхней частью Киевского водохранилища устье реки в месте, где она впадает в Днепр. Следует отметить, что р. Припять - один из крупнейших притоков Днепра, который в средний по водности год приносит в него $13,2 \text{ км}^3$ воды. Отсутствие больших регулирующих емкостей в формировании стока определяет преимущество (50%) доли весеннего половодья. В годовом объеме стока 35 % приходится на подземные воды [3].

После сокращения (в мае 1986 г.) атмосферных выбросов радиоактивного материала, основными факторами, определяющими его миграцию, являются поверхностный и подземный стоки. В пределах водосборного бассейна р. Припять результирующий фактор этого стока - восточная граница Зоны отчуждения - верхняя часть Киевского водохранилища, затопившая устье р. Припять. Образовавшийся подпор лишь частично, на расстоянии 25 км, может блокировать поступление подземных вод, а наличие артезианских бассейнов еще более снижает влияние подпора.

Представление, что р. Припять является основным источником поступления радионуклидов в Киевское водохранилище и, соответственно, в весь каскад Днепра к обусловило задачу исследований, т.е. установление количественных показателей аккумуляции радионуклидов на восточной границе Зоны отчуждения, в верхней части Киевского водохранилища.

Исследования, проведенные до 1986 г. [4], показали, что в верхней части водохранилища затоплены меандры русел рек Припяти и Днепра, которые превратились в естественные седиментационные "ловушки", интенсивно накапливающие тонкодисперсные иловые отложения. Данные указанных выше исследований позволили уже на первых этапах (1986 г.) радиологического мониторинга донных отложений, проводившегося Институтом гидробиологии НАН Украины, определить постоянные участки - полигоны для отбора проб с целью освещения процесса аккумуляции и миграции радионуклидов в донных отложениях. Первый из них, расположенный в затопленном устье р. Припять, имеет в плане форму сопряженных выпукло-вогнутых дуг. Площадь участка составляет $1,07 \text{ км}^2$, глубина - 4-6 м. У противоположного берега, выше затопленного русла устья р. Припять, расположена меандра русла Днепра. Однако исследования, проведенные в первые месяцы после аварии,

© В. И. Новиков, 1996

22

показали, что в последней аккумулируется значительно меньше радионуклидов, тем в устье р. Припять. Так, содержание ^{137}Cs в мае 1986 г. составляло: в илах Днепровской меандры - $6,7 \cdot 10^3$ Бк/кг, Припятской - $1,9 \cdot 10^4$ Бк/кг, ^{144}Ce соответственно $6,7 \cdot 10^2$ и $4,8 \cdot 10^4$ Бк/кг. Аналогичное различие наблюдалось и в июне 1986 г.: по ^{137}Cs - $3,0 \cdot 10^2$ и $1,7 \cdot 10^4$ Бк/кг, по ^{144}Ce - $2,0 \cdot 10^2$ и $5,2 \cdot 10^4$ Бк/кг [6]. Поэтому данные по этому участку нами не использованы. В 18-ти километрах ниже устья р. Припять почти кольцевая меандра днепровского русла площадью $2,54 \text{ км}^2$ на глубине до 9 м принята как участок № 2. В 1987 г. в двух километрах выше этого участка сооружена искусственная "ловушка" площадью $0,21 \text{ км}^2$ на глубине до 16 м (участок № 3). Таким образом, для решения поставленной задачи использованы данные, полученные на участках: с подавляющим влиянием стока р. Припять (№ 1) и с влиянием смешанных вод рек Припять и Днепр (№ 2 и 3).

В пределах каждого участка сбор проб донных отложений производился в постоянных точках, определяемых по береговым ориентирам и навигационным знакам. Для отбора использовалась модернизированная модель дночерпателя Экмана с площадью захвата грейдера в 250 см^2 , позволяющая отбирать пробы по слоям от 3 до 10 см [2]. Содержание радионуклидов определялось в отделе радиоэкологии нашего института на гамма-спектрометрических установках с использованием детекторов ДГДК-40А, ДГДК-100В и анализаторов АИ-4096-Ф90, АИ-1024-95М-16. В настоящей работе использованы данные восьми серий исследований (съемок) за 1986-1990 гг. и анализа 170 проб донных отложений.

Результаты исследований приведены в виде содержания ^{144}Ce и суммы ^{137}Cs и ^{134}Cs , рассчитанного как средневзвешенное по слоям ила (табл. 1), а также в виде удельных запасов

этих радионуклидов на единице площади дна участка (табл. 2). В приведенных данных отразилась хронология поступления радионуклидов в верхнюю часть Киевского водохранилища. Так, количество радионуклидов, зафиксированное в мае 1986 г., сформировано за счет седиментации материала пылеаэрозольных выбросов, а к осени того же года оно дополнилось выносом со стоком р. Припять. Весной 1987 г., несмотря на мероприятия по блокированию смыва радионуклидов - сооружение дамб и фильтрующих перемычек на малых водотоках бассейна, насыщенность радионуклидами взвесей р. Припять не только не снизилась, но даже возросла [6].

Таблица 1. Средневзвешенное содержание (10^4 Бк/кг сухой массы) радионуклидов в иле верхней части Киевского водохранилища (1986-1990 гг.)

Дата исследования (съемка)	Номер участка**					
	1		2		3	
	^{144}Ce	$^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$	^{144}Ce	$^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$	^{144}Ce	$^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$
20-22.05.1986 г.	4,8	2,5	5,6	2,1	*	*
08-10.07.1986 г.	9,6	3,4	4,4	1,6	*	*
28.09-3.10.1986 г.	9,6	3,9	1,4	1,1	*	*
23-30.05.1987 г.	21,5	3,5	4,1	1,9	14,8	4,8
6-16.10.1987 г.	10,4	4,4	1,4	0,5	5,6	2,7
25-31.10.1988 г.	4,1	3,4	1,2	2,4	1,3	2,5
2-9.06.1989 г.	2,7	2,8	1,0	1,8	1,3	2,5
25-29.09. 1990 г.	1,2	3,2	0,2	0,6	0,5	3,0

*Исследование не проводилось

** Описание в тексте

23

Таблица 2. Удельные запасы (10^6 Бк/м²) радионуклидов в иле верхней части Киевского водохранилища (1986-1990 гг.)

Дата исследования (съемка)	Номер участка**					
	1		2		3	
	^{144}Ce	$^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$	^{144}Ce	$^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$	^{144}Ce	$^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$
20-22.05. 1986 г.	4,9	2,4	5,6	2,0	*	*
28.09-3.10. 1986 г.	8,1	3,3	0,6	0,5	*	*
23-30.05. 1987 г.	23,3	3,8	2,8	1,3	12,6	4,3
6-16.10. 1987 г.	10,7	4,5	1,0	3,3	4,6	2,3
25-31.10. 1988 г.	5,2	4,3	1,2	1,9	4,1	5,0
2-9.06. 1989 г.	4,4	4,8	0,7	1,9	1,8	3,6
25-29.09. 1990 г.	1,8	5,0	0,1	0,7	0,5	3,3

*Исследование не проводилось

** Описание в тексте

Так как в период весеннего половодья увеличивается и общее количество взвесей в воде, то аккумуляция их в иле исследуемых участков резко повысила, как содержание ^{144}Ce , так и его удельные запасы при сравнительно стабильном состоянии цезиевого компонента. В последующий период содержание и удельные запасы ^{144}Ce уменьшались, хотя и медленнее, чем происходил его полураспад. Среднее содержание ^{134}Cs и ^{137}Cs к осени 1990 г. оставалось сравнительно стабильным в меандре устья р. Припять (участок № 1) и в искусственной "ловушке" (участок № 3), но существенно уменьшилось в днепровской меандре (участок № 2). На этом участке заметно уменьшился и удельный запас радионуклидов (табл. 2). Степень

его уменьшения не соответствует скорости полураспада ^{134}Cs (2,06 г.), следовательно, вероятен процесс миграции, признаки которого были выявлены нами уже осенью 1988 г. [5]. Противоположно отмеченному, на участке № 1 (припятская меандра) наблюдался устойчивый рост удельного запаса цезиевого компонента, хотя за счет полураспада отношение содержания ^{134}Cs к ^{137}Cs уменьшилось с 0,32-0,48 (1886 г.) до 0,11-0,15 (1990 г.). Следовательно, на участке продолжается аккумуляция этого компонента, поступающего с водосборного бассейна р. Припять, включая Зону отчуждения.

По опубликованным данным [6] суммарная активность ^{137}Cs , аккумулярованного в донных отложениях Киевского водохранилища, составляла: в 1986 г. - $8,5 \cdot 10^{13}$ Бк, 1987 г. - $1,3 \cdot 10^{14}$ Бк, 1988г. - $8,5 \cdot 10^{13}$ Бк, 1990 г. - $9,6 \cdot 10^{13}$ Бк. Если исходить из общей активности этого изотопа в зоне наблюдения [7], равного $7,7 \cdot 10^{15}$ Бк, то ее вынос и аккумуляция в Киевском водохранилище едва превышает один процент. Казалось бы, что это незначительное количество, но следует учесть, что с Киевского водохранилища начинается миграция радионуклидов по всему каскаду Днепра, а ил устья р. Припять и других исследованных участков все еще сохраняет концентрацию радионуклидов на 2-3 порядка выше, чем до аварии. Так, осенью 1993 г. удельный запас ^{137}Cs в иле искусственной "ловушки" составлял $3,4 \cdot 10^3$ Бк/м². Примем, условно, что место отбора проб в каждом из участков-полигонов достаточно характерно для всей его площади. Это позволяет рассчитать вклад каждого из участков в общую аккумуляцию радионуклидов в водохранилище. С 1987 по 1990 гг. на исследованные участки приходилось 11,2-14,2% суммарного количества аккумулярованного в водоеме ^{137}Cs . При этом суммарная площадь всех трех участков равна только 0,35% площади дна водохранилища. Таким образом, подобные формы донного рельефа являются своеобразными концентраторами радионуклидного загрязнения.

24

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. В современный период радиоактивное загрязнение донных отложений ^{144}Ce практически потеряло свое значение и основную роль играет ^{137}Cs .
2. Организация регулярных наблюдений (мониторинг) за радиоактивным загрязнением иловых отложений на участках-полигонах дает возможность индикации миграции радионуклидов, в том числе и через восточную границу Зоны отчуждения, в начало каскада водохранилищ Днепра.
3. Детальное исследование радиоактивного загрязнения в углублениях дна позволяет оценить возможность локального изъятия радиоактивных илов как мероприятия по снижению вторичного самозагрязнения водных масс и распространения радионуклидов по биотическим и абиотическим цепям экосистемы водохранилищ Днепра.

1. Войцехович О. В. Радиоактивное загрязнение бассейна Днепра // Природа. - 1991. - № 5. - С. 52-56.
2. Кузьменко М.И., Насвит О.И., Новиков Б.И. Методика отбора, предварительной обработки и подготовки проб донных отложений для определения радионуклидов // Гидробиол. журн. - 1989. - 25, вып. 3. - С. 91-94.
3. Левковский С. С. Водные ресурсы Украины. - Киев: Вища шк. 1979. - 200 с.
4. Новиков Б.И. Донные отложения днепровских водохранилищ. - Киев: Наук. думка, 1985. - 170 с.
5. Новиков Б.И., Чижмакова Н.А., Юрчук Л.П. Аккумуляция и миграция радиоактивного цезия в илах Киевского водохранилища // Докл. НАН Украины. - 1994. - № 1. - С. 137-140.
6. Романенко В.И., Кузьменко М.И., Евтушенко Н.Ю. и др. Радиоактивное и химическое загрязнение Днепра и его водохранилищ после аварии на Чернобыльской АЭС. - Киев: Наук. думка, 1992. - 194 с.
7. Соботович Э.В., Бондаренко Г.Н., Ольховик Ю.А. и др. Радиогеохимия в зоне влияния Чернобыльской АЭС - Киев: Наук. думка, 1992. - 146 с.

Институт гидробиологии НАН Украины, отдел гидрологии, Киев
Поступила 15.03.95

УДК 574:538.1.04

Б. В. Сорочинский
**БИОДОЗИМЕТРИЯ РАДИОНУКЛИДНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ВОДОЕМОВ
НА ОСНОВЕ НАРУШЕНИЙ В МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКАХ РЯСКИ МНОГОКОРЕННОЙ**

Предложен метод регистрации радионуклидных загрязнений в водоемах, основанный на изучении морфогенеза в популяции ряски многокоренной (*Spirodela polyrrhiza*). На примере популяций ряски, обитающих в водоемах 10-километровой зоны ЧАЭС, показана возможность использования этого метода при экспресс-оценке значений поглощенной дозы для биологических объектов этих водоемов. Ключевые слова: Биодозиметрия, биоиндикация, радионуклидные загрязнения, *Spirodela polyrrhiza*.

Антропогенные воздействия на окружающую среду требуют разработки способов и методов индикации таких влияний. Помимо инструментальных и физико-химических методов детекции различных факторов весьма перспективными выглядят попытки использовать для этой цели биологическую тест-систему. Особую задачу представляет выбор тест-систем для индикации радиобиологических эффектов в зонах радиоактивных загрязнений [1].

© Б. В. Сорочинский, 1996

25

Биологические системы, предлагаемые для индикации радиобиологических эффектов, разработаны, в основном, для регистрации пострадиационных эффектов, индуцируемых острым облучением [2]. В качестве лабораторных методов индикации лучевых поражений предложен большой перечень цитогенетических, гематологических, морфологических, биофизических, биохимических и иммунологических показателей организма животных и человека, подвергшихся облучению [3]. Для оценки действия ионизирующих излучений на объекты растительного мира также предложен ряд тестов. Они основываются на изучении роста и развития облученных растений [4], либо на исследовании генетических эффектов облучения [5]. Однако предлагаемые способы биоиндикации позволяют, как правило, тестировать радиобиологические эффекты на уровне конкретной особи и не позволяют определять действие излучения на популяционном уровне и уровне биологических сообществ. Хотя именно этот уровень организации биологических систем представляет собой наибольший интерес для прогнозирования отдаленных эффектов.

С проблемой индикации действия ионизирующего излучения сопряжены также вопросы биологической и ретроспективной дозиметрии. И если в лабораторных условиях этот вопрос удастся решить с помощью ЭПР спектроскопии [6], изучением особенностей кариотипа облученных особей [3], некоторыми другими методами, то в натурных экспериментах сложно ответить на вопрос о том, была ли та или иная экосистема подвержена воздействию облучения и, если да, то в какой дозе. По-видимому, важнейшие условия, которым и должны соответствовать биодозиметры и индикаторы излучений, заключаются в том, что они должны быть естественными компонентами экосистем; показатели, которые используются для индикации действия излучений, должны сохраняться во времени достаточно долго; изменения этих показателей должны иметь четкую дозовую зависимость.

Эффективной моделью для биоиндикации радионуклидов и различных токсических веществ могут служить некоторые гидробионты, которые являются чувствительными индикаторами на токсиканты в среде в диапазоне концентраций от 10⁻³ до 10⁻¹² г/л [7]. Особый интерес в этом отношении представляют растения семейства рясовых (*Lemnaceae*). Особенности физиологии развития и размножения этих растений обуславливают очень высокие коэффициенты накопления в них многих радионуклидов [8], что, в свою очередь, создает возможность высоких дозовых нагрузок на растения в течение всего периода их вегетации. Помимо этого, сложный характер коррелятивных связей "единичная особь - колония организмов" вызывает множественные радиобиологические реакции, которые зарегистрированы для рясовых [9], что приводит к значительным нарушениям морфогенеза даже при относительно невысоких значениях поглощенной дозы. В этой статье сообщаются результаты исследований использования некоторых морфологических показателей, которые характерны для растений, входящих в семейство рясовых, с целью индикации радионуклидов в естественных водоемах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для натурных экспериментов с популяциями ряски многокоренной (*Spirodela polyrrhiza* L.) избрано озеро в районе с. Копачи, 10-километровая зона ЧАЭС (I). В качестве

контрольного выбрана р. Припять в районе г.Чернобыль (II). Для учета возможного влияния географического фактора на морфогенез растений в качестве контрольных взяты также

26

некоторые водоемы в Полтавской (III) и Ривненской (IV) областях. Особи ряски подсчитывались в течение всего сезона вегетации в 1991-1993 гг.

Гамма-спектроскопию образцов проводили на спектрометре А-МА Г102, общую радиоактивность образцов определяли на сцинтилляционном счетчике RackBeta.

РЕЗУЛЬТАТЫ. ОБСУЖДЕНИЕ

Предлагаемый метод биологической дозиметрии основан на изучении индивидуального развития и процессов морфогенеза ряски многокоренной (*Spirodela polyrrhiza*). Речь идет об инверсии признака "правый - левый" щиток под воздействием облучения.

В течение индивидуального развития материнская особь ряски дает начало двум дочерним особям. В зависимости от того, на какой стороне материнского щитка появляется первая дочерняя особь, на левой или правой, отдельные особи ряски относят к семейству левых (L-) или правых (R-) форм. Отличительной особенностью процессов развития этого растения является то обстоятельство, что L-формы всегда образуют субпопуляцию левых форм. В свою очередь, R-формы дают всегда начало правым формам. Инверсия этого признака (переход правых форм в левые, и наоборот) в нормальных условиях практически не происходит [10]. Этот морфогенетический признак не кодируется геномом, что было подтверждено опытами по половому размножению ряски многокоренной, где проводили перекрестное скрещивание R- и L- форм [10]. По-видимому, кодируют этот признак какие-то цитоплазматические структуры. Однако под воздействием ряда внешних факторов, в том числе ионизирующего излучения, возможна инверсия признака асимметрии у ряски. В случае ионизирующего излучения частота появления инвертированных форм имеет четко выраженную дозовую зависимость [11]. Это обстоятельство и послужило основой предположения о том, что доля инвертированных форм ряски в водоемах, загрязненных радионуклидами, может быть использована в качестве меры поглощенной дозы популяциями ряски, обитающими в этих водоемах.

Образцы растений и воды, отобранные из каждого водоема, подвергались гамма-спектроскопии с целью определения содержания в них гамма-излучателей, при этом определялась также общая радиоактивность образцов. Пробы воды по уровню загрязнения радионуклидами располагались в такой последовательности I>II>III>IV, а общая радиоактивность образцов изменялась в пределах от 2,4 кБк/кг (I) до 0,11 кБк/кг (IV).

Развитие ряски в течение всех лет регистрации начиналось довольно поздно. Турioны всплывали на поверхность только лишь в конце мая, что объясняется поздними и затяжными веснами. Поэтому начинать регистрировать интересующий нас феномен можно было только с конца июня. В таблице представлена информация о доли инвертированных форм ряски в различных водоемах в течение летнего сезона 1993 г.

Как видно из таблицы, инвертированные образцы встречаются во всех исследованных водоемах, что может быть обусловлено воздействием разнообразных факторов. Но наибольшая доля инвертированных форм встречается в водоемах с высоким уровнем загрязнения радионуклидами. Если воспользоваться дозовой зависимостью, установленной для этого показателя в лабораторных условиях [11], максимальная суммарная поглощенная доза популяцией ряски, обитающей в озере возле с. Копачи по состоянию на 01.07.1993 г. будет эквивалентна поглощенной дозе острого облучения в 10-20 Гр. С увеличением

27

времени вегетации значение расчетной суммарной поглощенной дозы будет эквивалентно дозе внешнего облучения в 80-100 Гр и 150-190 Гр по состоянию на 30.07.93 г. и 10.09.93 г. соответственно.

Доля инвертированных форм *Spirodela polyrrhiza*, %, в различных водоемах в течение сезона 1993 г.

Полученные значения для суммарной поглощенной дозы кажутся очень высокими, и поэтому могут вызывать много вопросов. По-видимому, свой вклад в частоту проявления инвертированных форм ряски в

Водоем	Spiro	исследованных водоемах вносят, помимо ионизирующего излучения, также различные химические агенты. Нужно принять во внимание и высокие значения ОБЭ для комбинированного хронического внешнего и внутреннего облучения биологических объектов в условиях 30-километровой зоны ЧАЭС [12]. Однако предложенный метод, на наш взгляд, можно успешно использовать "в первом
Озеро, с. Копачи	6	
р. Припять, г. Чернобыль	1	
р. Сула, Полтавская обл.	2	
р. Устья, Ривненская обл.	1	

приближении", в полевых условиях, для экспресс-оценки загрязнения водоемов и в качестве предварительного метода определения значения поглощенной дозы для биологических объектов, обитающих в этих водоемах.

Отметим, что результаты, полученные в 1993 г., хорошо коррелируют со значениями расчетной поглощенной дозы, полученными в течение других сроков наблюдения, в 1991-1992 гг., поскольку в эти сроки уровень радиоактивности водоемов практически не изменялся, а колебания в содержании радионуклидов в воде всегда имели сезонную зависимость и, начиная с июня, практически не менялись. Как уже отмечалось выше, для всех отобранных образцов осуществлялась гамма-спектрометрия. Наиболее активными были образцы, отобранные в 10-километровой зоне ЧАЭС. С апреля по июнь активность воды возрастала на порядок. Столь заметное повышение активности воды, очевидно, обусловлено деятельностью гидробионтов, которые переводят ряд радионуклидов в растворимую форму. В частности, в образцах, отобранных в июне, значительный вклад в общую активность вносит ^{144}Ce (40%) и ^{154}Eu (5%). Отмечен очень высокий коэффициент накопления радионуклидов особями ряски. Для ^{137}Cs в наших экспериментах он составлял 350, что служит основой предположения о возможности использования этого объекта для дезактивации малых водоемов [8].

1. Марчуленине Д., Душаускене-Дуж Р., Мотеюнене Э., Швабене Р. Радиогеохимическая ситуация оз. Друшкяй - водоема-охладителя Ингалинской АЭС. - Вильнюс, 1992. - 216 с.
2. Гродзинский Д.М. Радиобиология растений. - Киев: Наук. думка, 1989. - 384 с.
3. Комар В.Е. // Радиобиология. - 1992. - 32, вып. 1. - С. 84-97.
4. Гродзинский Д.М., Коломиец О.Д., Кутлахмедов Ю.А., Булах А.А. Антропогенная радионуклидная аномалия и растения. - Киев: Либідь, 1992. - 160 с.
5. M.Delpoux, M.A.Dalebrou. // Mutat. Res. - 1981. - 82, N 1. - P. 101-110.
6. Баран Н.П., Баряхтар В.Г., Барчук В.И. и др. / Тез. докл. Радиобиологического съезда (Киев, 20-25 сентября, 1993 г.). - Пушино, 1993. - 1. - С. 83.
7. Брагинский П. П. Критерий токсичности и принципы методик по водной токсикологии. - М.: Изд-во МГУ, 1971. - С. 171-182.

28

8. Тимофеев-Ресовский Н.В. / Тр. Уральск. филиала АН СССР. - 1962. - Вып. 22. - С. 77-91.
9. Кутлахмедов Ю.А. Количественные закономерности радиобиологических реакций многоклеточного организма: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. - Киев, 1984. - 24 с.
10. Касинов В.Б. Биологическая изомерия. - Л.: Наука, 1973. - 268 с.
11. Касинов В.Б. // Докл. АН СССР. - 1966. - 167. - С. 201-204.
12. Серкиз Я.И., Пинчук В.Г., Пинчук Л.Б. и др. Радиобиологические аспекты аварии на Чернобыльской АЭС. - Киев: Наук. думка, 1992. - 172 с.

Институт клеточной биологии и генетической инженерии НАН Украины, Киев
Поступила 15.03.95

УДК 661.879:541:572.52

Т. С. Герасимова, В. А. Марченко, И. Я. Симановская
ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ КИСЛОТ

НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СУХОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ДЕЗАКТИВАЦИИ В УСЛОВИЯХ ЧАЭС

Исследована взаимосвязь вида кислоты, в полимерной композиции, и дезактивирующей способности состава. Показано, что эффективность дезактивации зависит не только от ее кислотности (рН), но и от комплексообразующих свойств кислоты.

В настоящее время на объектах атомной техники все большее распространение приобретает так называемый сухой метод очистки от радиоактивных загрязнений с использованием дезактивирующих защитных полимерных покрытий [1-4]. Высокая эффективность этого метода была продемонстрирована при ликвидации последствий аварии на ЧАЭС [5, 6]. Для получения таких покрытий используют растворы или дисперсии пленкообразующих веществ, при отверждении которых (обычно в результате испарения растворителя) образуется полимерная пленка, легко отслаивающаяся с поверхностей различных материалов. Технология применения дезактивирующей полимерной композиции заключается в том, что ее в жидком виде наносят на загрязненную радионуклидами поверхность и после отверждения образовавшееся полимерное покрытие удаляют с поверхности вместе с перешедшими в нее радиоактивными веществами.

Дезактивирующий состав обычно подбирается таким образом, чтобы входящий в него растворитель обеспечивал смачивание и растворение загрязнения. В этих условиях эффективность дезактивации определяется полнотой взаимодействия компонентов состава с частицами, содержащими радионуклид.

Исследования в области сухой полимерной дезактивации показали, что составы, способные образовывать снимаемые покрытия, довольно легко удаляют с поверхности так называемое нефиксированное загрязнение, т.е. ту его часть, которая связана с поверхностью за счет слабых адгезионных сил [4, 7]. Типичным примером подобного загрязнения является сухой остаток, образующийся при высыхании пролива радиоактивного раствора.

При нанесении на такое загрязнение жидкого пленкообразующего состава происходит переход радиоактивного вещества в полимерную пленку и локализация радионуклида в отвержденном покрытии. При этом удаляется не только сухой остаток радиоактивного раствора, но и часть загрязнения, сорбированного поверхностью за счет слабых химических сил (так называемое слабофиксированное загрязнение).

© Т. С. Герасимова, В. А. Марченко, И. Я. Симановская, 1996

29

После снятия нефиксированного и слабофиксированного загрязнения на поверхности остаются радиоактивные частицы, связанные с материалом поверхности более прочными химическими силами, для разрушения которых необходимо присутствие в полимерном составе специальных добавок, являющихся детергентом (поверхностно-активные вещества, кислоты, комплексообразователи, сорбенты [2-4]).

Задачей данной работы являлась проверка взаимосвязи вида кислоты, введенной в полимерную композицию, и дезактивирующей способности состава. С этой целью была определена эффективность дезактивации стали марки 12Х18Н10Т рядом полимерных составов, имеющих своей основой одно и то же пленкообразующее вещество - поливинилбутираль (ПВБ), но содержащих в качестве активной добавки различные кислоты, взятые в одинаковом количестве (2% мол.). Кислоты выбраны таким образом, чтобы составы имели достаточно широкий интервал изменения кислотности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эффективность дезактивации характеризуется величиной коэффициента дезактивации (K_d) [1]:

$$K_d = \frac{A_{исх}}{A_{ост}},$$

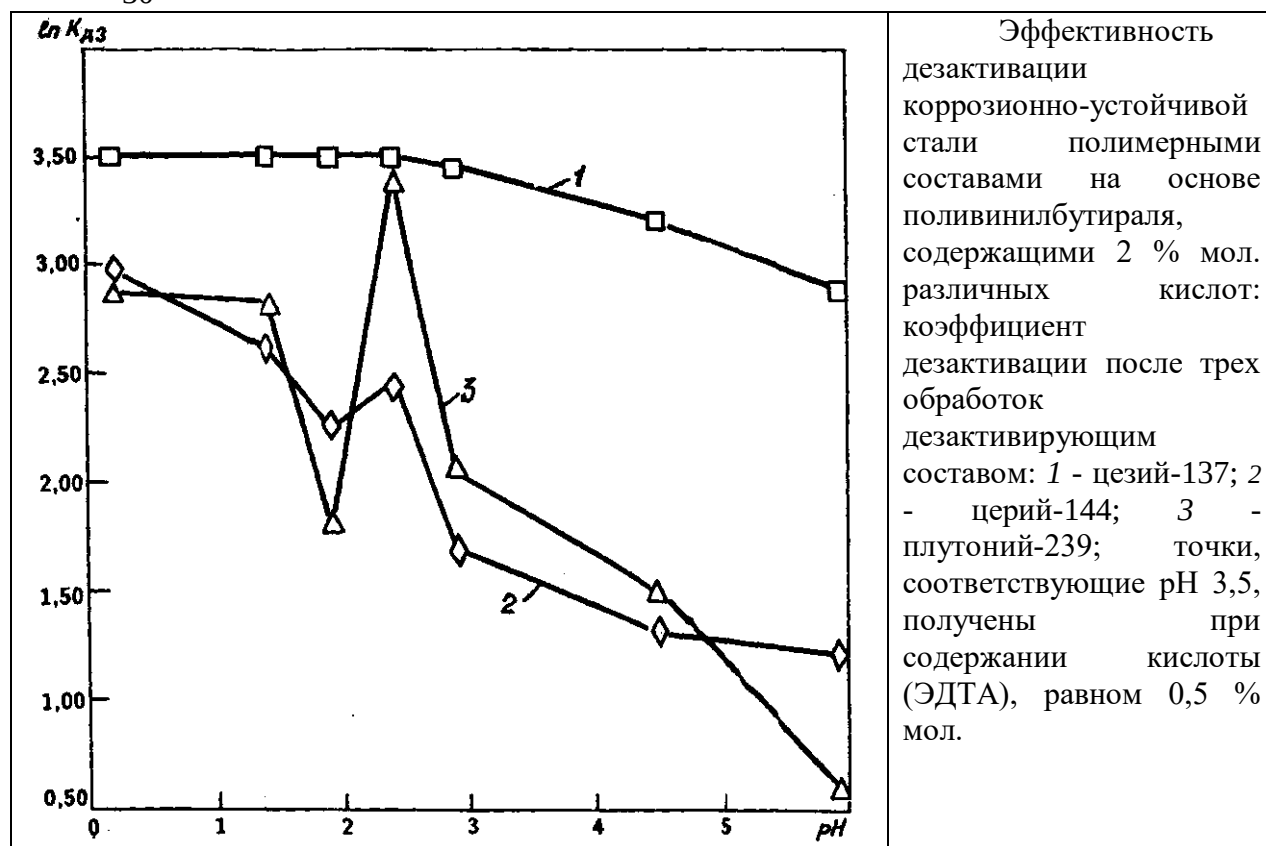
где $A_{исх}$ - исходная загрязненность поверхности до дезактивации, выраженная в единицах активности, отнесенной к единице времени и площади (например, Бк/см², α-частиц/см²·мин и т.д.); $A_{ост}$ - остаточная загрязненность поверхности после дезактивации, выраженная в тех же единицах, что и $A_{исх}$.

Коэффициент дезактивации определяли следующим образом. На образцы из стали 12Х18Н10Т диаметром 35 мм и толщиной 0,8 мм наносили 0,15 мл загрязняющего раствора, содержащего цезий-137, церий-144 (при pH 6,0) или плутоний-239 в одномолярной HNO_3 . Через 18 ч определяли $A_{\text{исх}}$ на установке БДБСЗ-ІеМ со сцинтилляционными детекторами. На загрязненные образцы наливом наносили полимерный состав, по высыхании которого образовавшуюся пленку (толщиной 120 ± 10 мкм) удаляли, определяли $A_{\text{ост}}$ и рассчитывали значение K_d после обработки поверхности дезактивирующим составом (K_{d1}). Затем полимерный состав наносили повторно и определяли значение K_{d2} и K_{d3} . Средняя квадратическая погрешность величин K_d не превышала 20% при доверительной вероятности 0,9.

Дезактивирующие композиции представляли собой раствор поливинилбутирала в водно-спиртовой смеси с необходимыми технологическими добавками. Составы различались между собой только видом кислоты при постоянном ее содержании (% мол.). Единственным исключением является состав с этилендиаминтетрауксусной кислотой (ЭДТА), концентрация которой - 0,5% мол., что обусловлено ее ограниченной растворимостью.

Как видно из представленных в табл. 1 и на рисунке данных, кислотность состава по-разному сказывается на эффективности удаления плутония, церия и цезия. Действительно, для цезия значение K_d монотонно возрастает по мере увеличения кислотности состава (снижения pH). Иная картина наблюдается для церия и плутония.

30



Полученные результаты свидетельствуют о том, что эффективность удаления этих элементов определяется не только кислотностью состава. Действительно, в целом тенденция значений K_d к повышению с падением pH есть, но простая корреляция между этими величинами отсутствует, что свидетельствует о наличии других факторов, влияющих на эффективность дезактивации.

Таблица 1. Эффективность дезактивации стали марки 12Х18Н10Т полимерными составами на основе поливинилбутирала при содержании кислоты, 2% мол.

Кислота	рН состава	Плутоний-239		Церий-144		Цезий-137	
		$A_{\text{всг}} \frac{\alpha \cdot \text{ЧАСТНОСТЬ}}{\text{СМ}^2 \cdot \text{МНН}}$	K_d	$A_{\text{всг}} \frac{\alpha \cdot \text{ЧАСТНОСТЬ}}{\text{СМ}^2 \cdot \text{МНН}}$	K_d	$A_{\text{всг}} \frac{\alpha \cdot \text{ЧАСТНОСТЬ}}{\text{СМ}^2 \cdot \text{МНН}}$	K_d
	6,5	$1,8 \cdot 10^5$	4	$3,5 \cdot 10^5$	17	$1 \cdot 10^5$	750
CH ₃ COOH	5,0	То же	30	То же	22	То же	1600
ЭДТА*	3,5	То же	110	То же	55	То же	2800
H ₃ PO ₄	3,0	То же	2200	То же	280	То же	3200**
H ₂ C ₂ O ₄	2,5	То же	60	То же	170	То же	3200**
H ₂ SO ₄	2,0	То же	600	То же	420	То же	3200**
HNO ₃	<1,0	То же	750	То же	900	То же	3200**

* Концентрация ЭДТА - 0,5 % мол. (предельная растворимость в составе);

** Соответствует фоновому значению остаточной загрязненности поверхности образца.

31

Рассмотрим полученные результаты с учетом особенностей химического строения радионуклидов и взаимодействующих с ними кислот. Известно, что цезий в растворе при всех значениях рН сохраняет состояние одновалентного катиона [8], в связи с чем он легко вступает в реакции ионного обмена. Это и объясняет легкость его дезактивации более кислыми составами.

Церий является редкоземельным элементом, характеризующимся наличием нескольких валентных форм (+2, +3, +4) [8]. Для церия в большей степени, чем для цезия, характерно образование донорно-акцепторных связей, причем, благодаря наличию вакантных 5d-орбиталей и поливалентности катиона, он способен координировать многоцентровые молекулы с образованием сложных комплексов хелатного типа. Способность церия, так же, как к плутония, к донорно-акцепторному взаимодействию подтверждается результатами, приведенными в табл.1 и на рисунке.

Ионы плутония в растворах существуют в четырех состояниях окисления: +3, +4, +5, +6, которым соответствуют формы Pu³⁺, Pu⁴⁺, PuO₂²⁺ и PuO₂²⁺. В результате протекания реакций диспропорционирования возможно присутствие в одном и том же растворе всех четырех форм [9].

Наиболее устойчивой формой плутония в растворе является четырехвалентный катион. В этом состоянии он преимущественно находится в водных растворах, содержащих более 1 моль/л азотной кислоты. Катион Pu⁴⁺ имеет очень высокое значение ионного потенциала ($p=4,44$), в связи с чем он образует прочные соединения с комплексообразователями кислотного типа. Так, постоянная устойчивости комплекса Pu(HPO₄)₅⁶⁻ равна $1,1 \cdot 10^{52}$ [7]. Высокая способность ортофосфорной кислоты координироваться вокруг ц.а. металла объясняется тем, что молекула этой кислоты может образовать связь с катионом по двум механизмам: солеобразования в донорно-акцепторного взаимодействия. Наличие в атоме плутония вакантных d-, f-орбиталей создает условия для их эффективного взаимодействия с неподеленной электронной парой фосфорильного кислорода. Этим, по-видимому, и объясняется "всплеск" значений K_d (рисунок) при введении в раствор ПВБ ортофосфорной кислоты. Донорно-акцепторное взаимодействие возможно и в случае кислот, содержащих группы =S=O, =C=O, но электронно-донорные свойства кислорода, связанного с серой или углеродом, выражены слабее.

Таким образом, на основании рассмотренных экспериментальных данных можно сделать вывод, что H₃PO₄ взаимодействует с Pu(IV) по двум механизмам: ионного обмена и донорно-акцепторного. Для проверки правильности такого вывода была проведена

32

Таблица 2. Влияние замены растворителя в составе на основе поливинилбутирала, содержащем 5 % мас. H₃PO₄, на эффективность дезактивации стали марки 12Х18Н10Т от плутония-239

Растворитель	ДП растворителя	$A_{\text{вск}} \frac{\alpha \cdot \text{частица}}{\text{см}^2 \cdot \text{мин}}$	K _{д2}
Вода+этанол	40,5	$4,8 \cdot 10^3$	110
Этанол	24,3	$4,8 \cdot 10^3$	230
Этанол+гексан	17,6	$4,8 \cdot 10^3$	203
Этанол+диоксан	13,3	$4,8 \cdot 10^3$	820*
Этанол+бенрол	13,3	$4,8 \cdot 10^3$	820*
Диоксан	2,2	$4,8 \cdot 10^3$	320

* Соответствует фоновому значению остаточной загрязненности поверхности

32

серия экспериментов с составами на основе ПВБ, растворенного в смеси этанола с апротонным растворителем (бензол, гексан, диоксан). Приведенные в табл. 2 результаты свидетельствуют о том, что замена воды на апротонный растворитель приводит к повышению эффективности дезактивации плутония, несмотря на снижение диэлектрической проницаемости растворителя (ДП). Следовательно, электронно-донорное взаимодействие превалирует над ионным и усиливается в апротонной среде за счет сольватации катиона растворителем [10] и снятия блокирующего действия ионов гидроксила на фосфорильный кислород ортофосфорной кислоты.

Таким образом, эффективность дезактивирующей полимерной композиции зависит не только от ее кислотности, но и от комплексообразующих свойств кислоты. Это дает возможность достичь высокой степени очистки поверхностей, загрязненных радионуклидами, способными к донорно-акцепторному взаимодействию при сравнительно низкой кислотности дезактивирующего состава, что имеет большое практическое значение.

1. ГОСТ 1946.5-74 Покрyтия полимерные защитные для yлучшены радиационной обстановки. Термины и определения. - М.: Изд. стандартов, 1987. - 7 с.

2. Амелогова Н.И., Симоновский Ю.М., Трапезников А.Л. Дезактивация в ядерной энергетике. - М.: Энергоиздат, 1982. - 256 с.

3. Белов А.И., Галкин Г. А., Мамаев Л.А., Сербяева И.П. Доклады совещания специалистов стран - членов СЭВ по теме 1-3.4. Совершенствование методов и средств предотвращения радиоактивного загрязнения и дезактивации оборудования АЭС, исследовательских центров и установок по переработке ядерного горючего. - М., 1975. - С. 68-72.

4. Городинский С.М., Гольдштейн Д.С. Дезактивация полимерных материалов. - М.: Энергоиздат, 1981. - 248 с.

5. Зимон А.Д., Пикалов В.К. Дезактивация. - М.: Атомиздат, 1994. - 336 с.

6. Романов Г.Л. Ликвидация последствий радиоактивных аварий. Справочное руководство. - М.: Атомиздат, 1993 - 336 с.

7. Зимон А.Д. Дезактивация. - М.: Атомиздат, 1975. - 280 с.

8. Старик И.Е. Основы радиохимии. - Л.: Наука, 1969. - 647 с.

9. Милуков М.С., Гусев Н.И., Сентюрин И.Г., Скляренко И.С. Аналитическая химия плутония. - М.: Наука, 1965. - 454 с.

10. Марченко В.А., Якушин Ф.С., Цветков Е.Н. и др. // ЖОХ. - 1973. - 43, № 1. - С. 3-9.

Межотраслевой Научно-технический центр "Укрытие" НАН Украины, Чернобыль
Поступила 15.03.95

УДК 621.039.58

Г. И. Рейхтман

ХАРАКТЕРИСТИКА СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА "УКРЫТИЕ" И ПУТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЕГО В ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНУЮ СИСТЕМУ

Исследование состояния 4-го энергоблока, проведенное разными организациями в 1986-1993 гг., а также выполненные в этот период технические мероприятия позволили изучить состояние строительных конструкций и характеристики топливо-вмещающих масс в доступных местах. Исходя из данных этих исследований, пришли к выводу, что решать проблему преобразования объекта "Укрытие" в экологически безопасную систему нужно в два этапа. Разработана концепция, которая дает возможность решить основные задачи - предотвратить выход радионуклидов в окружающую среду и стабилизировать состояние объекта "Укрытие".

© Г. И. Рейхтман, 1996

Строительством объекта "Укрытие", который предотвращал выход радиоактивности в атмосферу, закончилась первая фаза ликвидации аварии на ЧАЭС.

Эксплуатация объекта "Укрытие" в 1986-1987 гг. проводилась управлением строительства 605 (УС-605) и реакторным цехом № 4 ЧАЭС с привлечением ИАЭ им. И.В. Курчатова, ВНИПИЭТ и сил гражданской обороны.

В конце 1987 г. для выполнения научно-исследовательских и строительно-монтажных работ на объекте "Укрытие" создана комплексная экспедиция (КЭ) ИАЭ им. И.В. Курчатова. Решением № 269 СМ СССР и МАЭ СССР от 26.06.8 г. ответственность за состояние объекта "Укрытие" была возложена:

- на КЭ ИАЭ им. И.В. Курчатова по выполнению научно-исследовательских и строительно-монтажных работ;

- на Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт энергетических технологий (ВНИПИЭТ) по осуществлению функций Генерального проектировщика по объекту "Укрытие" и авторского надзора за реализацией проектных решений;

- на ЧАЭС по осуществлению технического обслуживания объекта "Укрытие";

- на ПО "Комбинат" по осуществлению функций заказчика, выдачи в производство проектной документации.

При этом ЧАЭС передала ответственность КЭ ИАЭ им. И.В. Курчатова по акту-допуску за:

- сохранение устойчивости строительных конструкций при производстве строительно-монтажных работ;

- пожарную и радиационную безопасность при производстве работ; организацию и выполнение мероприятий по охране труда и технике безопасности;

- соблюдение требований техники безопасности и радиационной безопасности персоналом, выделенным для производства работ;

- качество строительно-монтажных работ;

- транспортировку радиоактивных отходов и делящихся материалов.

Началась вторая фаза изучения состояния объекта "Укрытие" и повышение уровня его безопасности. В сложной радиационной обстановке специалистам удалось определить разрушения строительных конструкций в результате взрыва и провести их частичное укрепление, определить основные местонахождения топлива в подреакторных помещениях. Через специально пробуренные скважины проведены необходимые замеры и теленаблюдения для определения состояния топлива и степени опасности, в том числе ядерной. Проведена дезактивация крыш машинного зала и деаэрационной этажерки (ДЭ). По своей значимости и сложности эти работы сравнимы со строительством "Укрытия".

Достаточно сказать, что в 1989 г. общее количество персонала, ежедневно привлекаемого к работам на объекте "Укрытие" с учетом сил гражданской обороны составляло 2500 чел. со средней кратностью замены в течение года (с целью исключения переоблучения), равной трем.

В конце 1989 г. специалисты на основании проведенных обследований пришли к выводу, что, несмотря на тридцатилетний проектный срок службы объекта "Укрытие" необходимо приступить к преобразованию объекта "Укрытие" в экологически безопасную систему.

Приказом МАЭП СССР от 24.09.1990 г. № 620 в составе ПО ЧАЭС создано предприятие "Объект "Укрытие", на которое возложены функции:

34

- обеспечение безопасной эксплуатации оборудования и сооружений, относящихся к объекту "Укрытие";

- организация научно-исследовательских и строительно-монтажных работ по объекту "Укрытие";

- выполнение функций заказчика при сооружении объектов предприятия "Объект "Укрытие";

дезактивацию и ликвидацию последствий аварии на оборудовании, зданиях на территории ЧАЭС и г. Славутича.

В результате образования предприятия "Объект "Укрытие" часть производственных подразделений из КЭ ИАЭ им. И.В. Курчатова вошли в состав предприятия "Объект "Укрытие".

В 1990 г. Генеральный проектировщик ВНИПИЭТ выполнил ТЭО "Укрытие-2" по преобразованию объекта "Укрытие" в экологически безопасную систему, состоящую из IX томов:

том I - Общая пояснительная записка; том II - Радиационная обстановка объекта "Укрытие"; том III - Состояние топливных масс и топливной пыли в объекте "Укрытие"; том IV - Гидрогеологические и геофизические характеристики объекта "Укрытие"; том V - Архитектурно-строительная часть; том VI - Сбор, переработка и хранение РАО; том VII - Охрана окружающей среды; том VIII - Экономическая часть; том IX - Сметная часть.

В ТЭО рассмотрены следующие варианты преобразования объекта "Укрытие":

вариант "Холм", предусматривающий захоронение блока на месте; вариант "Зеленая лужайка" - разборка и захоронение конструкций реактора и топливосодержащих масс (ТСМ); вариант "Арка", изолирующий объект от окружающей среды;

вариант с промежуточным омоноличиванием реакторного энергоблока, позволяющий в дальнейшем провести разборку энергоблока;

ряд смешанных вариантов с частичной разборкой конструкций разрушенного энергоблока и локализацией "загрязнений" на месте.

Подробные проработки указанных выше вариантов по радиационной и ядерной безопасности, экологических аспектов, в том числе по выбранным основным критериям:

возможность осуществления данного преобразования в наиболее сжатые сроки;

использование при производстве работ имеющихся в стране технических средств;

наиболее низкая стоимость;

безопасность проведения работ (коллективная доза или дозозатраты);

обеспечение абсолютной экологической безопасности; возможность в дальнейшем провести разборку энергоблока наиболее простыми и безопасными методами;

показали, что все варианты имеют существенные недостатки и слабые места и к рассмотрению на проектирование Коллегией МАЭПа не приняты.

После такого решения 27 февраля 1992 г. Правительство Украины принимает решение провести Международный конкурс на проект и техническое решение по преобразованию объекта "Укрытие" ЧАЭС в экологически безопасную систему.

В это же время Советский Союз распадается и бывшие республики объявляют себя независимыми государствами, в результате чего проблема 4-го энергоблока стала украинской проблемой.

В феврале 1992 г. постановлением Кабинета министров Украины на базе ликвидированной КЭ ИАЭ им. И.В.Курчатова создан МНТЦ "Укрытие", подчиненный Национальной академии наук Украины, которому поручено:

35

проектно-конструкторские работы по преобразованию объекта "Укрытие" в долговременную экологически безопасную систему;

научные и опытно-конструкторские работы по радиационной и ядерной безопасности объекта "Укрытие", создание робототехники и радиационных технологии для отбора проб, удаления из объекта и хранения ядерного топлива и радиоактивных веществ;

контроль и прогнозирование изменений свойств материалов, содержащих ядерное топливо, состояния материалов и конструкций объекта "Укрытие" и экологической безопасности в зоне его влияния;

внедрение современных отечественных и зарубежных технологий для решения поставленных задач.

В соответствии с решением Правительства Украины проведение конкурса поручалось Министерству Украины по делам защиты населения от последствий аварии на ЧАЭС,

Национальной академии наук Украины и Украинскому отделению Международного центра научной культуры "Всемирная лаборатория".

Для подготовки и проведения конкурса был создан Организационный комитет, которых разработал "Положение о проведении конкурса" и пакет документов, регламентирующих экспертизу конкурсных предложений. Окончательный срок подачи конкурсных предложений был определен 26 апреля 1993 г.

18 июня 1993 г. подведены итоги Международного конкурса проектов и технических решений по преобразованию объекта "Укрытие" в экологически безопасную систему.

На конкурс было представлено 394 предложения из Украины, России, Беларуси, Франции, Англии, Германии, Италии. В течение трех недель, с 10 по 29 мая, группа международных экспертов в составе 92-х высококвалифицированных специалистов проводила экспертизу всех представленных на конкурсе проектов, технических решений и идей. Всесторонний анализ конкурсных предложений показал, что ни в одном из них не выработано оптимальное решение проблемы экологической безопасности объекта "Укрытие".

По этой причине жюри единогласно решило первую премию не присуждать, а победителем по результатам тайного голосования было объявлено конкурсное предложение под девизом RESOLUTION, разработанное французско-украинским консорциумом. Одновременно жюри Международного конкурса выработало концепцию преобразования объекта "Укрытие" в экологически безопасную систему, состоящую из семи этапов (направлений):

1. Исследование состояния объекта "Укрытие", мониторинг окружающей среды.
2. Информационное обеспечение общественности о состоянии объекта "Укрытие" и окружающей его промплощадки.
3. Стабилизация состояния объекта "Укрытие".
4. Сооружение нового защитного сооружения вокруг объекта "Укрытие" - "Укрытие-2".
5. Сооружение приповерхностных хранилищ радиоактивных отходов.
6. Создание технологического участка по сортировке, переработке РАО.
7. Извлечение, кондиционирование и складирование в хранилищах радиоактивных материалов, находящихся внутри "Укрытия-2".

36

Для определения подрядчика по выполнению ТЭО на 3-й и 4-й этапы объявлен тендер (конкурс). В результате эта работа поручена и заканчивается консорциумом "Альянс".

Остальные этапы концепции требуют принятия решений в плане финансирования, проектирования и исполнения. Сложность Чернобыльской проблемы делает необходимым сотрудничество многих украинских и международных организаций и фирм. Это существенно для определения обязанностей и ответственности. Кроме того, необходимо определить приоритеты на ближайшие 3 - 5 лет с конечной целью, для того чтобы, когда придет время осуществления проектов, можно было бы начать работы, эффективно оптимизируя ресурсы, и сократить риск для персонала и населения.

В связи с тем, что проблема преобразования объекта "Укрытие" в экологически безопасную систему подразумевает многочисленных исполнителей, важно адекватно определить ответственность каждого. Причем ответственность должна быть определена в трех областях (полюсах): области решений, промышленной области (реализации), области безопасности.

Ответственность в области решений относится к финансовым и политическим аспектам и является обязанностью Правительства Украины и эксплуатирующей организации. Она должна определяться решениями Кабинета министров.

Ответственность в промышленной области определяется обязанностью изучать и реализовывать все проекты и работы по повышению безопасности объекта. Она ложится на эксплуатирующую организацию и персонал, принимающий участие в выдаче техзаданий, проектировании и реализации проектов.

Ответственность по безопасности имеет четкую задачу оценивать безопасность ситуации и выдать адекватные полномочия для всех предполагаемых работ по ее улучшению.

В связи с тем, что международными организациями охвачены только 3-й и 4-й этапы концепции преобразования объекта "Укрытие", появилась необходимость решать проблему реализации остальных пяти этапов. Ответственность за их своевременное решение лежит на эксплуатирующей организации, т.е. на ПО "Чернобыльская АЭС".

Понимая эту ответственность, эксплуатирующая организация предприняла необходимые шаги для поиска путей решения:

- подключила к поискам ведущих специалистов и организаций Украины, имеющих определенный опыт в решении сложных технических проблем;

- проанализировала поданные на Международный конкурс проекты и предложения;

- участвовала во всех симпозиумах, советах, семинарах, где обсуждались проблемы 4-го энергоблока ЧАЭС;

- провела организационно-развивающийся семинар по подготовке программы преобразования объекта "Укрытие" в экологически безопасную систему, на который пригласила ведущих специалистов Украины и России, знающих 4-й энергоблок и имеющих опыт работы на АЭС.

В результате проведенной работы было доказано, что необходима долгосрочная программа, учитывающая все аспекты 4-го энергоблока.

Исследования состояния 4-го энергоблока, проведенные различными организациями в 1986-1993 годах, а также выполненные в этот период технические мероприятия позволили изучить состояние строительных конструкций и определить характеристики ТСМ в доступных, до радиационной обстановке местах. Однако следует сделать вывод,

37

что исследования не позволили до конца представить четкую картину состояния ТСМ, в связи с чем на первом этапе должна быть определена полная картограмма (с указанием координат) мест локализации и соответствующих им масс ядерного топлива с погрешностями и доверительными вероятностями, оценкой состава топлива, его агрегатного состояния, физических, химических и структурных характеристик. Необходим долгосрочный прогноз консервативного состояния картограммы ядерноопасных делящихся материалов в естественных условиях внутри существующего объекта "Укрытие" и выполнение условия глубокой подкритичности локальных, взаимодействующих и условно бесконечных систем с ТСМ; расчетные и экспериментальные результаты по определению коэффициента размножения нейтронов в реальных и гипотетических (физически не исключаемых) системах; сценарий, оценка масштабов и последствий самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР) вследствие внешнего воздействия и (или) внутренних процессов, а также технически реализуемые меры искусственного ограничения наиболее опасных последствий (обнаружение разгона мощности СЦР, воздействие на систему, защитные мероприятия).

В настоящий момент наиболее изучены нижние отметки блока, а ситуация с верхними и, особенно, с центральным залом оставляет желать лучшего. Это связано с большими мощностями экспозиционных доз в основных местах расположения ТСМ и сложностью доступов к ним из-за обрушения строительных конструкций в момент развития аварии и последующих работ. Реальные условия работы на энергоблоке таковы, что исследования следует проводить в местах, где мощности доз достигают 1500 Р/ч, но поскольку аварийное переоблучение исключено, то необходимо предусматривать развитие дистанционных методов исследования и робототехники.

Наличие в объекте большого количества радиоактивных веществ, находящихся как в перемешанных с бетоном формах, так и в пылевидном состоянии, наличие неорганизованных водо- и воздухопотоков создает проблему локализации пылемассопереноса радиоактивных веществ, организацию наблюдения за ним и защиту оперативного персонала станции от вредных воздействий излучения. Эти обстоятельства приводят к необходимости создания надежных систем контроля за состоянием параметров объекта и его влияния на окружающую среду. В прошедшее с момента аварии время

отсутствовали экстремальные внешние воздействующие факторы, к которым можно отнести высокие паводки ураганы, смерчи, сильные землетрясения, что, к сожалению, только повышает вероятность их возникновения в будущем. В связи с этим необходимо продолжить работы по определению состояния строительных конструкций, выполнить долгосрочный прогноз их поведения и, в случае необходимости, принять меры к укреплению ответственных конструкций.

Необходимость этих работ обусловлена, прежде всего, тем, что их выполнение должно позволить получить ответ на вопрос о надежности отдельных частей защитного сооружения, а затем принять меры к усилению слабых мест, а также обеспечить комплекс мероприятий по нормализации условий температурно-влажностного режима вентиляции.

Кроме этого, необходимо оценить влияние изменения уровня грунтовых вод на устойчивость объекта и деформации строительных конструкций, поскольку в результате изучения гидрогеологической среды на промплощадке ЧАЭС определено, что уровень грунтовых вод поднялся в некоторых местах и происходит постепенное оседание основания, на котором расположены блоки А, Б и В. Подъем уровня грунтовых вод приводит к тому,

38

что вся масса водонасыщенных песков до водоупора находится в напряженном состоянии и необходимо определить предельное состояние, после которого будет происходить деформация, связанная с переходом твердых частиц грунтовой массы во взвешенное состояние с полной или частичной потерей контактов между ними. Такой же эффект может быть вызван также сильным землетрясением. Характеристика грунтов в районе промплощадки по сейсмическим свойствам отнесена к III категории, которая дает приращение к балльности на +1 балл, что в соответствии с требованиями обеспечения работоспособности АЭС позволяет учитывать максимальное расчетное землетрясение силой 7 баллов.

В комплексе с работой по изучению устойчивости основания ведутся работы, направленные на обеспечение безопасного состояния строительных конструкций объекта. Первоочередными являются исследования и оценка состояния, численное моделирование поведения ответственных конструкций аварийного энергоблока (балки Б1, Б2, балки "мамонт", мест их опирания и северного контрфорса) и исследование физико-механических характеристик конструкционных материалов. Важность этих работ и создание на их основе банка данных необходимы для разработки технологии укрепления отдельных строительных конструкций и выполнению расчетов для прогноза их поведения на ближайшее время. Выполнение этих работ позволит оценить необходимость укрепления строительных конструкций, а разработка трехмерной модели с соответствующей базой данных даст инструмент для проведения прогнозных расчетов. Сложность этих работ заключается в том, что доступ к строительным конструкциям затруднен из-за высоких мощностей экспозиционной дозы в центральном зале энергоблока и создание компьютерной системы с возможностью обработки видеoinформации позволит спланировать подходы и проведение работ, предварительно оценить состояние конструкций по видео- и фотосъемкам, а также обобщить информацию по состоянию отдельных помещений, конструкций. Компьютерная модель позволит в дальнейшем выполнить варианты расчетов по оценке долгосрочного поведения отдельных элементов сооружения при изменении конструктивов отдельных сечений энергоблока.

Подход к этой задаче необходимо рассматривать не только в аспекте эксплуатации существующего "Укрытия", приведения его в стабильное состояние, но и для решения, ряда вопросов, связанных с сооружением "Укрытия-2", под защитой которого может быть выполнена разборка объекта. Однако следует учесть, что проведение тендера, после окончания конкурса на лучший проект, может затянуться: сложное экономическое положение Украины не позволит быстро найти средства на осуществление строительства нового объекта, перед которым, к тому же, необходимо выполнить комплекс проектно-изыскательских работ и в ближайшее время решить задачи по выработке мероприятий для укрепления строительных конструкций. При этом следует учесть, что при разборке энергоблока незначительные изменения в одном из его сечений, например, организация

транспортного проема для выгрузки радиоактивных отходов, могут привести к нарушению прочности самого сечения или его отдельных элементов. Кроме того, не исключена вероятность того, что при проектировании и сооружении защитной оболочки, из-за чрезвычайности ситуации и сложности получения информации о состоянии элементов конструкций после взрыва, были допущены грубые ошибки.

Указанные работы должны выполняться в комплексе с работами по оптимизации температурно-влажностного режима на объекте. Повышение влажности однозначно

39

уменьшает прочность металлоконструкций из-за ускорения процесса коррозии, а неорганизованные воздухопротоки могут привести к пылемассопереносу. Вместе с тем избыточная влажность и наличие больших скоплений воды сможет привести к изменению размножающих свойств ТСМ, последствия чего трудно предсказуемы. Для контроля за неорганизованными водо- и воздухопотоками целесообразнее разработать и создать систему контроля, которая позволит фиксировать изменение температурно-влажностных режимов внутри объекта.

Исследование влияния влаги и неорганизованных потоков на объект "Укрытие" важны для обеспечения радиационной и ядерной безопасности объекта, поэтому разработка проектных предложений по предотвращению попадания и накопления влаги в объекте "Укрытие" крайне актуальна, а проведение герметизации кровли позволит существенно уменьшить попадание влаги внутрь объекта.

Создание системы с осушкой и очисткой от аэрозольных фракций радиоактивных элементов является необходимым элементом работ, направленных на уменьшение содержания влаги в объекте "Укрытие". Выполнение же всего комплекса работ по предотвращению попадания и накопления влаги в объекте "Укрытие" должно существенно повысить общетехническую безопасность.

Ранее основное внимание уделялось обеспечению ядерной и радиационной безопасности объекта, и большая часть исследований проводилась именно в этом направлении. Однако не следует забывать, что возникновение пожаров на объекте может привести к следующему:

- изменению теплообмена, что нарушит надежность отдельных строиконструкций и вызовет их обрушение;

- выходу пылевых форм радиоактивных веществ наружу из-за изменения конвективных воздухоперетоков;

- выходу из строя датчиков систем контроля, что сразу лишит возможности непрерывно контролировать состояние объекта;

- обрушениям, которые могут изменить геометрию расположения и размножающие свойства ТСМ.

Вот почему важность работ по определению мест и количеств горючих материалов, путей возможного распространения пожаров и выработка предложений по их блокированию должны быть выполнены безотлагательно. Очень важно разработать установку газового и порошкового пожаротушения на основе материалов, не приводящих к изменению размножающих свойств ТСМ. Крайне важно разработать подсистему контроля, обнаружения и прогнозирования пожароопасных ситуаций. Такую систему желательно создавать в рамках единой системы контроля, где по показаниям датчиков других систем (например, повышение температуры по показаниям датчиков состояния ТСМ) можно определять корреляцию адекватности пожароопасной ситуации и принимать решения по включению установок тушения.

Объект "Укрытие" - уникальное сооружение, не имеющее аналогов в мировой практике. Как правильно признано в Решении научно-технического совета (НТС) Госпроматомнадзора и Комиссии Госатомэнергонадзора от 16.05.91 N-12-91-НТС, "...по большинству своих характеристик он не отвечает и, по всей видимости, не может отвечать требованиям норм и правил ядерной, радиационной и общетехнической безопасности объектов атомной энергетики..."

Поэтому необходимо разработать специальные нормативные документы по вопросам радиационной безопасности (РБ) для объекта "Укрытие", поскольку анализ существующей нормативно-технической документации (НТД) показывает, что в полном объеме

40

объект "Укрытие" не соответствует ни одному документу и должен быть разработан специальный нормативно-руководящий документ, в котором будут указаны отступления от требований существующих нормативных документов, приведены обоснования этих отступлений и даны рекомендации на согласование отступлений от нормативных документов с органами, их утвердившими.

Организационные мероприятия по обеспечению РБ и экологической безопасности (ЭБ) направлены на выполнение требований по разработке санитарного паспорта объекта, наличие которого является необходимым требованием НТД для объектов атомной энергетики.

Разработка организационно-технических мероприятий по защите персонала при возникновении аварийных ситуаций направлена на разработку инструкций действий персонала при возникновении разного рода аварий (будь-то СЦР, пожары, обрушение строительных конструкций) и связанного с этим изменения радиационной обстановки, определение путей и схем эвакуации, проведение зонного контроля при производстве работ на объекте в полуобслуживаемых и необслуживаемых помещениях. Кроме этого, необходимо определить, насколько эффективными являются средства индивидуального дозконтроля с учетом внутреннего поступления радионуклидов. Это необходимо выполнить не только для получения достоверной информации о дозе облучения, но и для оценки последствий этого облучения и внесения Корректировок в существующие и разрабатываемые инструкции поведения персонала при авариях.

Логическим продолжением этих работ является разработка и реализация рекомендаций по оптимизации радиационного состояния на объекте и уменьшению его влияния на окружающую среду. В результате должен быть выполнен комплекс мер по ограничению воздействия объекта на радиационную обстановку на промплощадке вследствие выборов пылевых форм радиоактивных отходов (РАО) и аэрозолей. Необходимо продолжить исследования по миграции радионуклидов на промплощадке, возможность их проникновения в грунтовые воды и дальнейшую миграцию в водоносные слои, разработать и выполнить соответствующие защитные мероприятия.

Для этого необходимо разработать комплекс технических средств и метрологически аттестованные методики, что само по себе является сложной задачей, связанной с исследованием гидрогеологической среды и бурением специального комплекса скважин для размещения датчиков уровня грунтовых вод, определения характеристик почв, использования специальных зондов для определения миграции радионуклидов.

Кроме этого, необходимо выработать рекомендации по организации контроля радиационной обстановки как внутри объекта, так и вне его, включая промплощадку. Для этого разработана концепция системы контроля радиационной обстановки, в которой отражено, что при построении системы контроля необходимо учитывать изменение МЭД на промплощадке от действующих блоков, за счет выбросов радиационно-безопасных газов (РБГ) через вентиляционные трубы, сценарии развития возможных аварий на блоках, сценарии аварий на объекте "Укрытие", которые могут существенно изменить радиационную обстановку. Должны быть продолжены работы по контролю миграции радионуклидов на территории, прилегающей к объекту "Укрытие", и контроль радиационной безопасности внутри объекта "Укрытие", поскольку эти работы непосредственно связаны с определением и прогнозированием экологической опасности объекта "Укрытие".

41

В качестве средств реализации данных задач разработка технического задания и техпроекта на систему радиационно-дозиметрического контроля является тем комплексом мер, который в условиях зонного контроля позволит обеспечить радиационную безопасность работ и определить содержание аэрозолей в помещениях объекта. Оснащение персонала переносными дозиметрическими приборами, а также приборами экспресс-контроля

содержания радионуклидов в помещениях и почве позволит оперативно определять изменение обстановки как в объекте, так и вне его и вводить эту информацию в базу данных автоматически, поскольку развитие микропроцессорной техники позволяет хранить и передавать информацию от переносных приборов в сложные автоматические системы хранения и обработки информации

Разработка и создание комплекса технических средств для поиска и обследования интенсивных гамма-источников должно строиться по двум направлениям. Первым является создание дистанционно-управляемых средств радиационного контроля, а вторым - разработка программно-аппаратного комплекса для обработки видео- и дозиметрической информации. Создание специальных программ обработки такой информации может позволить определять местоположение недоступных источников гамма-излучения. Это необходимо для детальной подготовки не следований по огромному количеству видеоматериалов, с помощью которых можно на первом этапе визуально оценить наличие ТВЭЛов, кассет, графита, пути подхода, и на втором - выработать программу и маршруты проведения измерений.

Особое значение здесь приобретает разработка методики и создание экспериментального образца установки экспресс-контроля содержания альфа-аэрозолей в воздухе помещений объекта. Сложность данной задачи заключается в малом времени экспозиции (в связи с большой опасностью для персонала) и определении незначительных концентраций аэрозолей на достаточно высоком уровне фона естественных излучателей. Ранее такого рода установки не создавалась, поэтому работа по своему характеру является важной и уникальной. Существующие иностранные аналоги таких установок очень дорогостоящие, а по времени измерения не удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Работы по исследованию источников гамма-излучения ставят перед собой еще одну задачу - определить места и категорию РАО, а также разработать комплекс мер по подготовке к сбору, транспортировке и хранению РАО. После исследования характеристик топливных масс необходима разработка технических средств для сбора, сортировки, транспортировки и хранения РАО. Прежде всего, необходимо выполнить большой объем работ по классификации отходов, хотя, исходя из специфики объекта, основная часть отходов относится к высокоактивным, содержащим делящиеся материалы, что сразу ставит задачу обеспечения их ядерной безопасности.

При взрыве внутри энергоблока образовалось много фрагментов конструкционных материалов, которые следует отнести к низко и среднеактивным отходам. Сложность задачи по их удалению состоит в необходимости разработки нестандартных контейнеров, которые должны обеспечить сбор и транспортировку в условиях объекта, где обрушения и разрушения затрудняют доступ и извлечение РАО. Контейнеризация РАО позволит создать защитные барьеры на пути распространения радиоактивности, осуществить захоронение после временного хранения, проконтролировать состояние отходов. Требования к контейнерам определяются Правилами безопасной транспортировки РА веществ (ПБТРВ-88), однако следует учесть, что РАО объекта относятся в основном к высокоактивным,

42

а наличие делящихся материалов накладывает на разработку еще и требование непрерывного контроля как при транспортировании, так и хранении, для того чтобы исключить возможность образования критических значений параметров согласно ПБЯ-06-00-88. Кроме этого, необходимо решить вопрос о создании временного хранилища РАО, поскольку наличие делящихся материалов в их составе однозначно относит их к отходам I и II группы и имеет сходные характеристики с отходами отработанного топлива на АЭС, а поскольку штатные хранилища должны обеспечивать хранение топлива при выводе АЭС из эксплуатации, сразу же возникает вопрос об организации хранилища для РАО объекта. В качестве такого хранилища может быть использован первый этаж бассейна-барботера, который необходимо очистить от ТСМ, протекших с верхних отметок и в виде лавообразных масс заполнивших пол. Проект технологий по очистке первого этажа бассейна-барботера от ТРО и ЖРО и создание на его основе временного хранилища отходов явилось бы логическим завершением исследований ТСМ и изучения их характеристик. Знание специфики ТСМ

бассейна-барботера позволит разработать эффективные меры по их удалению и хранению. Сложность этой работы состоит в том, что необходимо разработать технологию очистки первого этажа и реализовать ее, по возможности поместив ТСМ там же, локализовав их в контейнерах.

При извлечении и транспортировании РАО возникает проблема пылепереноса, поэтому необходимо решать задачу по связыванию пыли как внутри самого энергоблока, так и при транспортировании РАО. Эту задачу можно успешно решить с помощью осаждающих пен, которые свяжут пыль на поверхности и не позволят ей распространиться как по объекту, так и вылететь наружу.

Вопрос о ядерной безопасности объекта обсуждался много раз. Исследования характеристик ТСМ и проведение вариантных расчетов по определению степени подкритичности, выполненные в 1991 г. рядом коллективов, требуют повторения, с учетом тех знаний, которые были получены за последние два года.

Основной задачей является дальнейшее исследование состояния ТСМ и прогноз их поведения. Задача крайне важна, постольку накопление информации о характеристиках ТСМ позволит в дальнейшем использовать ее при выработке стратегии разборки энергоблока и будет являться исходной при создании комплекса мер по сбору, хранению и транспортированию РАО.

Четвертый энергоблок претерпел запроектную аварию и целью работ по управлению запроектной аварией является приведение его в контролируемое состояние, необходимое для обеспечения ядерной и радиационной безопасности согласно ОПБ-88. На энергоблоке были разработаны и созданы системы контроля "Шатер" и "Финиш", которые выполняли задачи, поставленные перед ними в 1986 г. - ответить на вопрос об основных параметрах, характеризующих состояние доступных ТСМ.

Однако данные системы не отвечают в полной мере требованиям, предъявляемым к ним. Они должны были бы обеспечить безопасность и включить в свой состав дополнительные подсистемы пожарной безопасности, контроля целостности строительных конструкций, контроля гидрогеологической среды и сейсмоконтроля. Учет всех требований и организация всестороннего контроля является важной задачей, которая позволит не только контролировать состояние энергоблока, но и накопить информацию, необходимую для выработки предложений по разборке энергоблока и контроля за его состоянием в процессе преобразования объекта в экологически безопасную систему (ЭБС).

43

Поскольку из-за специфики объекта и сложности экономического положения Украины невозможно быстро разработать и создать единую систему контроля, проведен анализ существующих систем контроля и на их базе разработан комплекс мероприятий по организации временной системы аварийной сигнализации о возникновении СЦР, которая впоследствии должна стать основой единой системы и без которой невозможен полный контроль за состоянием объекта.

Наряду с задачей дальнейшего исследования стоит вопрос о разработке комплекса технических средств но дальнейшему исследованию подкритичности ТСМ и созданию системы ввода нейтронно-поглощающих материалов, как при исследованиях, так и при разборке энергоблока. Здесь возникает дополнительная сложность, обусловленная обращением с делящимися материалами высокой активности, работа с которыми возможна лишь с помощью "горячих" технологий. Для этого необходимо разработать комплекс мер по технологии "горячего" бурения и создания "горячих" камер по обработке и исследованию делящихся веществ.

Одной из сложнейших задач, решаемых в мировой практике, обращения с высокоактивными отходами, является разработка комплекса дистанционно управляемых технических средств, который позволит проводить разведку интенсивных источников излучения, доставлять приборы контроля в труднодоступные места, и выполнять ряд операций по разборке и утилизации РАО. Все эти технические мероприятия сложны по своей реализации не только из-за того, что радиационные поля внутри объекта превышают все допустимые пределы, но и в связи с отсутствием НТД для объекта. Требования,

предъявляемые Госкомитетом по ядерной и радиационной безопасности к объекту, базируются на стандартных правилах, однако, они не могут быть применены к объекту, так как в нем фактически нет ни реакторной установки, ни специальных барьеров локализации РА веществ. Разработка НТД по объекту и новой редакции "Регламента ...", где будут содержаться требования, на основании которых необходимо проводить комплекс мероприятий по постепенному превращению объекта в ЭБС, а также разработка новой - редакции ТОЯБ объекта, на базе новых исследований должны стать юридической основой технического обслуживания объекта.

Программа работ, представленная выше, является, по сути, руководящим документом по реализации первого этапа. Все работы взаимосвязаны и выделение каких-то в первостепенные или второстепенные неправильно. Если рассматривать энергоблок как сложную систему с распределенными параметрами, то недоучет каких-то граничных условий может вылиться в накопление ошибок интерпретации отдельных явлений. Так, разработка и создание единой системы контроля должны базироваться не только на контроле состояния ТСМ, дальнейшего изучения их характеристик, но и отслеживании корреляций изменений состояния гидрогеологической среды, изменения которых могут вызвать нарушение целостности строительных конструкций за счет неустойчивости основания фундамента, а их обрушение, в свою очередь, может привести к выходу РА пыли за пределы объекта. Таким образом, система радиационно-дозиметрический контроль (РДК) с контролем аэрозолей как внутри, так и снаружи становится важной для радиологической защиты персонала.

Кроме этого, выполнение таких работ, как изучение состояния строительных конструкций и выработка мероприятий по раскреплению ослабленных конструкций,

44

настолько важно, что при их отсутствии значительно повышается фактор риска при обрушении строительных конструкций, следствием чего может быть:

- изменение подкритичности отдельных фрагментов ТСМ, в частности соединение целых ТВЭЛов на схеме "Е" с топливом пом. 305/2, которое может привести к ухудшению ядерной безопасности объекта;

- изменение радиационной обстановки как внутри объекта, так и за его пределами, за счет большого количества радиоактивной пыли, находящейся внутри;

- миграция радионуклидов на промплощадке и изменение объемных полей объекта.

Таким образом, выполнение работ по разработке подсистемы контроля строительных конструкций и изучение их целостности влечет за собой необходимость проведения расчетов по изменению подкритичности ТСМ за счет возможных обрушений и изучение и разработку аппаратных средств по определению объемных полей и миграции радионуклидов как внутри объекта, так и за его пределами.

Выполнение работ на высоком современном уровне необходимо проводить с использованием новейших средств вычислительной, фото- и видеотехники.

Необходимо помнить, что данные работы имеют главную цель - постоянный контроль объекта и создание условий его преобразования в ЭБС. Завершив успешно указанные выше работы, можно утверждать, что цель первого этапа достигнута.

Однако не следует забывать, что получение информации о состоянии объекта не является конечной целью исследования объекта. Изучение невозможно завершить до конца, поскольку состояние ТСМ непрерывно изменяется, поэтому нельзя снимать вопрос о безопасности объекта, даже зная значения мощности экспозиционных доз и потоки нейтронов в каждой точке. Собственно и работы, выполненные на первом этапе, не дают полного основания считать проблему объекта "Укрытие" закрытой.

Несомненно, работы по контейнеризации и временному хранению РАО, намеченные на первом этапе, позволят локализовать топливо и постоянно контролировать его состояние. Однако проблема захоронения топлива с объекта в самом объекте - не решение задачи, а лишь промежуточный этап для комплексного подхода к решению вопроса переработки и захоронения отходов атомных станций на всей Украине. Данная проблема является очень сложной, ибо подбор площадки для размещения как временных, так и постоянных хранилищ

требует не только больших объемов геологических изысканий, но и обоснования выбранной площадки в соответствии с требованием правил и норм атомной энергетики.

Нет необходимости доказывать, что временное и постоянное хранилище будут разнесены друг от друга на значительное расстояние. Перемещение контейнеров с отходами потребует создания специальных служб и транспортных средств для перевозки больших объемов топлива, для чего необходимо разработать специальные мероприятия по информированию населения с обоснованием безопасности производства таких работ и учетом общественного мнения, отрицательного после Чернобыльской катастрофы к атомной энергетике и всему, что с ней связано.

Как уже отмечалось выше, большой проблемой является подборка и подготовка кадров для выполнения всего комплекса работ по преобразованию. Целью работ является не только преобразование объекта в экологически безопасное состояние, но и создание таких

45

технологий и технологических процессов, которые позволили бы Украине выйти на международный уровень сотрудничества в области ядерных технологий. По всей видимости для этих работ необходимо привлечь мощный потенциал военно-промышленного комплекса, с его уникальными разработками в электронном обеспечении вплоть до космических технологий. Но одно дело, это создание конструкторскими отделами и производственными мощностями конверсионных предприятий дистанционно-управляемых механизмов, технологий по переработке топлива, системы контроля и диагностики, а другое - их эксплуатация таким персоналом как на объекте "Укрытие" и всей ЧАЭС. Следует отметить, что уже сейчас некоторые разработки выполнены на таком высоком техническом уровне, с использованием новейших технических достижений, что оператору необходимо иметь как минимум среднетехническое образование, а знание минимальных навыков обращения с вычислительной техникой - уже неоспоримое требование. Кроме этого, стабилизация состояния объекта не дает стопроцентной гарантии возникновения неординарных ситуаций, в которых, возможно, потребуются принять быстрое решение на уровне физика-ядерщика. Подготовка специалистов такого класса осуществляется в основном в ближнем зарубежье, и обеспечение собственными специалистами не просто кадровая задача. Эта задача имеет еще и социальный аспект - защищенности персонала от психологических потрясений, связанных с обсуждением закрытия ЧАЭС, а также материального вознаграждения за свой труд, связанный с жестокой политикой налогообложения и необычными условиями труда не только на объекте "Укрытие", но и на ЧАЭС. Таким образом, поскольку проблема персонала является одним из основных звеньев успешной реализации программы работ на объекте, к ней надо уже сейчас подходить серьезно и продуманно.

В чем же суть нашей программы?

Во-первых, четко определено, что решать проблему преобразования объекта "Укрытие" необходимо в две очереди:

I - снятие проблемы опасности от объекта "Укрытие" для окружающей среды, и требования необходимого контроля за объектом и его эксплуатация;

II - предусмотрение комплекса работ, в результате которых отпадет необходимость контроля за объектом и его эксплуатации.

Во-вторых, определено конечное состояние после выполнения работ первой и второй очереди.

В-третьих, определен набор работ и их последовательность по хронологии, а также их возможные исполнители, хотя возможны дополнения и изменения, но думаем, что они будут незначительны и принципиально могут только дополнять программу.

В-четвертых, зафиксировано исходное состояние объекта "Укрытие" и определены слабые места.

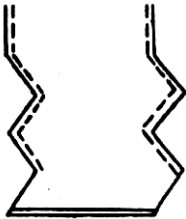
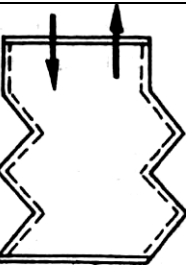
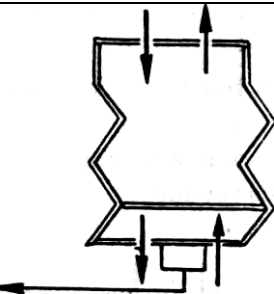
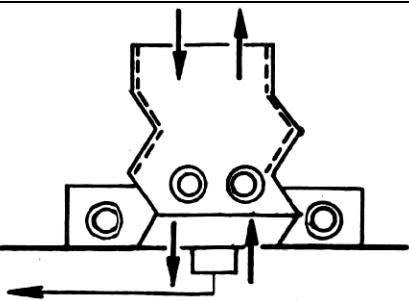
В-пятых, ясно, что за нас наши проблемы никто не решит, хотя допускаем возможность инвестирования при их решении.

В-шестых, решение проблем объекта "Укрытие" поможет загрузить предприятия Украины наработкой новых технологий, с которыми возможен выход на мировой рынок.

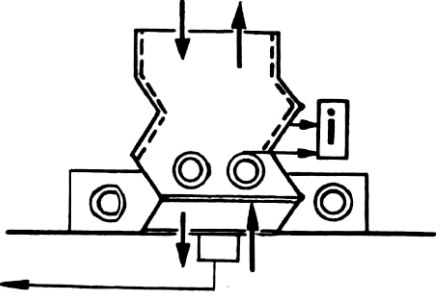
Для того чтобы определить работы первой очереди, нужно четко знать исходное состояние объекта "Укрытие" и конечную цель, чтобы привести его в безопасное состояние.

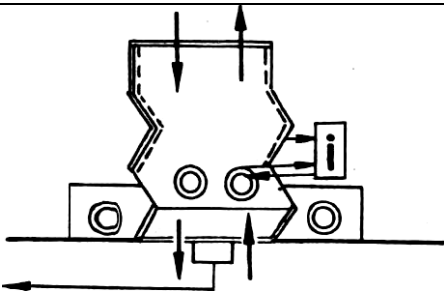
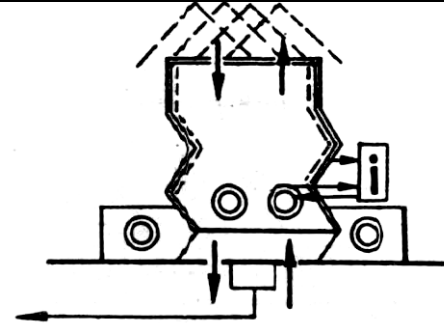
Что же мы имеем в исходном состоянии с точки зрения отрицательного влияния?

46

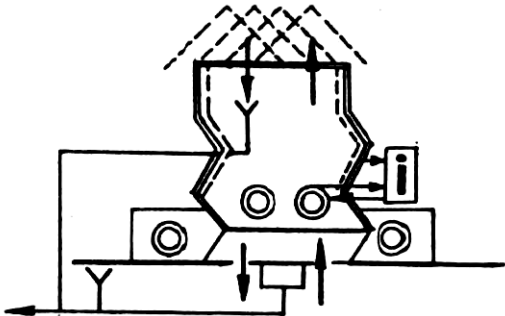
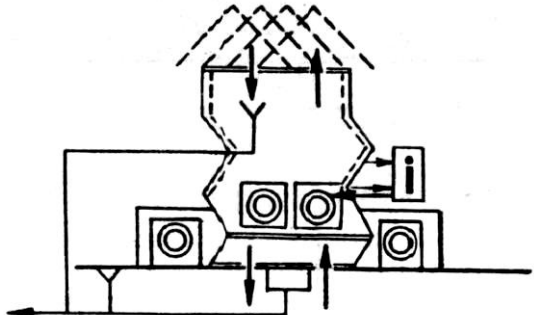
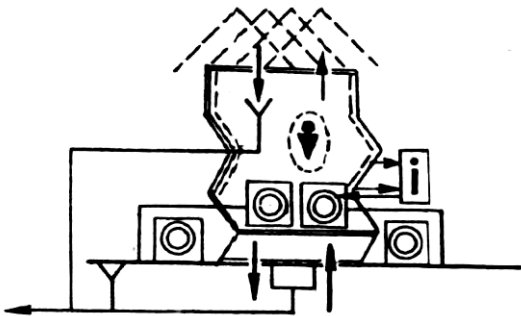
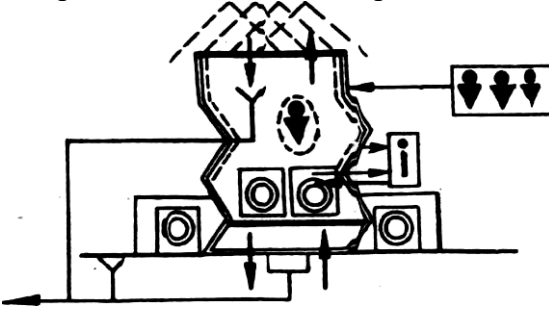
1. Относительно строительных конструкций картина не полностью ясна, но часть ненадежных мест известна, и можно приступить к реализации проекта укрепления (опора балки Б1-Б2). Поставлена задача: постоянно исследовать состояние строительных конструкций и решать проблемы слабых мест:	
2. Негерметичность крыши опасна по двум причинам: попадание воды внутрь объекта и выход радиоактивной пыли в окружающую среду. По герметизации крыш работы ведутся и в настоящий момент, 50-60 % работ уже выполнено:	
3. На нижних отметках имеется вода, загрязненная радионуклидами, в том числе и трансурановыми. Поставлена задача: - откачать и переработать воду; определить влияние грунтовых вод на фундамент; - определить миграцию нуклидов в грунтовые воды.	
4. Топливо 4-го энергоблока изучено только на нижних отметках, хотя данные по его количеству очень приблизительны. Нужно изучить топливо центрального зала. Этот вопрос важен, поскольку от точного знания места, состояния и количества топлива зависит выбор технологии обращения с ним как с высокоактивными отходами (ВАО). Одними из важных являются работы по закреплению пылеобразных топливных частиц на поверхностях строительных конструкций и оборудования. Кроме того, на территории вокруг 4-го энергоблока находится топливо, закрытое слоем бетона и щебня, которое тоже необходимо контейнеризовать:	

47

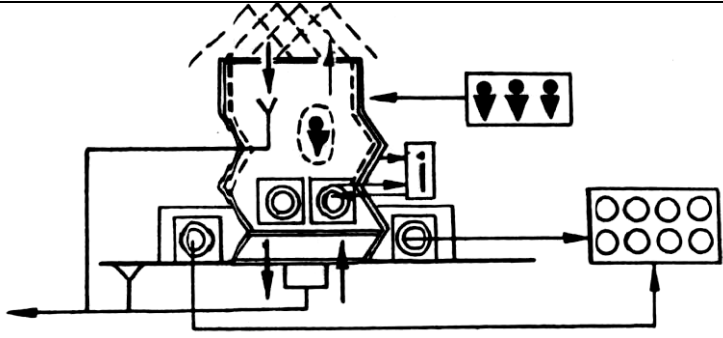
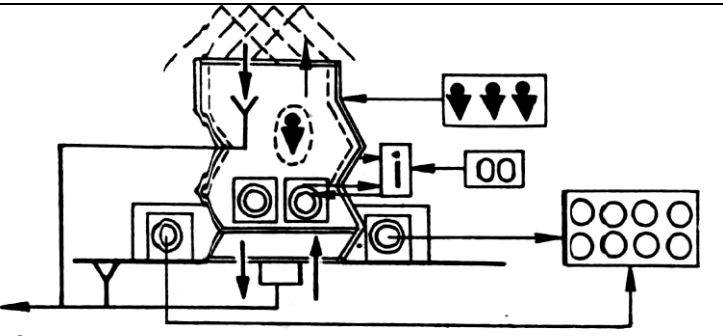
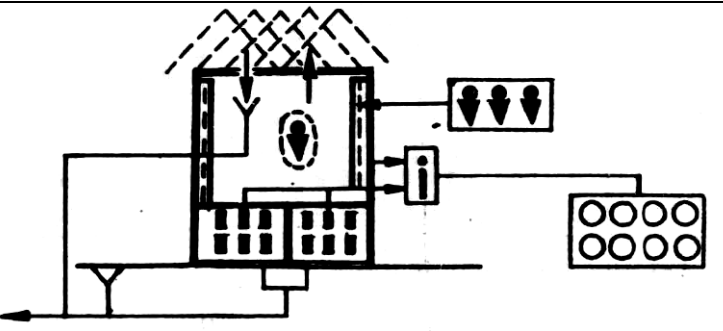
5. Информация состояния энергоблока неполная по двум причинам: старые системы выработали свой ресурс; новые системы находятся в стадии проектирования. Системы информации должны проектироваться с учетом непотери информации в процессе преобразования, и эти работы считаются первичными. В настоящее время монтируется система контроля за СЦР. Необходимы также проектирование и монтаж системы контроля радиационной безопасности (КРВ): Полностью перепроектирован и уже реализуется	
---	---

проект системы энергоснабжения энергоблока.	
6. В случае возможных отклонений на энергоблок не воздействуют системы: 6.1. Ввода нейтроно-поглощающих материалов (в скопления топлива на случай роста потока нейтронов):	
6.2. Аварийного пылеподавления, находящаяся в стадии проектирования и работающая автономно в автоматическом режиме:	

48

6.3. Сток воды с крыш и территории не организован: 	7. Не разработана технология контейнеризации топлива: 
8. Нет необходимых средств защиты персонала для выполнения вышеуказанных работ: 	9. Проблема подготовки персонала: 

49

10. Строительство "Укрытия-2" упростит решение многих задач, оно требует очистки территории, что невозможно без хранилища РАО, т.е. строительство хранилища РАО должно осуществляться раньше строительства "Укрытия-2":	
11. На протяжении работ контролируется влияние на окружающую среду:	 50
12. Для контейнеризации топлива внутри объекта "Укрытие" необходимо подготовить помещения и снабдить их необходимыми средствами контроля:	 50

Чем же должна закончиться первая очередь работ?

1. Устранить все вышеуказанные (пп.1-12) неопределенности и обеспечить безопасность, в том числе и возникшую при выполнении этой задачи.

2. Топливо всех видов должно быть заключено в контейнеры и храниться внутри объекта "Укрытие", в подготовленных для этого помещениях, или в построенных хранилищах. Технология контейнеризации безлюдная.

Решая проблемы работ первой очереди, мы планомерно решаем проблему безопасности объекта "Укрытие" и готовим технологии для полного решения этой проблемы, что важно с точки зрения планирования финансирования.

При таком подходе решение проблемы 4-го энергоблока возможно и в случае отказа от строительства "Укрытия-2" по финансовым соображениям.

Однако основная цель работ первой очереди выполнена: выход радионуклидов в окружающую среду предотвращен, и состояние объекта "Укрытие" застabilизировано.

Опыт общения с научными и производственными предприятиями Украины показывает, что привлечение западных партнеров не обязательно, а если такая помощь будет оказана, то часть проблем из программы можно поручить западным фирмам. Решение проблемы безопасности 4-го энергоблока имеет большое политическое значение. Украина имеет достаточный технический потенциал для решения проблемы 4-го энергоблока при такой постановке. Кроме того, на сегодняшний день имеется неплохой задел выполнения работ первой очереди:

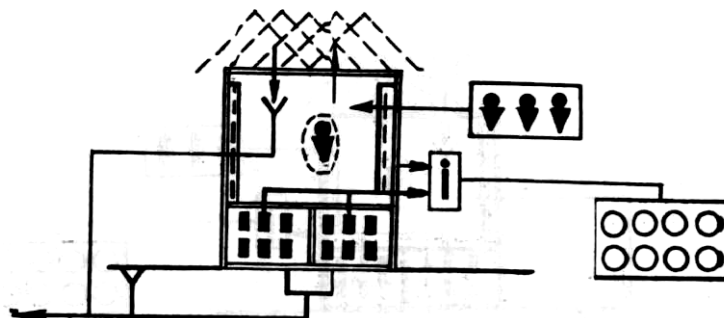
знания месторасположения, количества и состава топлива составляют приблизительно 50 %;

усиление строительных конструкций составляет приблизительно 15-20 %;
герметизация - 60 %;
проблема удаления ЖРО - 5 %;
дезактивация территории - 10 %;
система аварийного пылеподавления - 5 %.

Остальные работы запланированы с 1995 г. и выполняются или находятся в стадии поиска исполнителей.

При пересмотре множества вариантов мы пришли к выводу, что работы первой очереди нужно выполнить в любом варианте и остановиться на этом, так как дальнейшие работы можно начинать только с такого состояния, а именно: укрепленные строительные конструкции, полная информация за ситуацией и необходимые средства воздействия в случае непредвиденного. Графически работы выглядят так:

51



Наиболее трудновыполнимая работа - сбор и контейнеризация топлива (ВАО) внутри объекта "Укрытие". Для этого необходимо создать безлюдную технологию с использованием дистанционно-управляемых механизмов и подготовить помещения для хранения контейнеров внутри объекта "Укрытие". Она посильна Украине и выполнима. Для проведения работ первой очереди не требуется хранилище ВАО, этот вопрос очень важен и пока не решен на Украине.

Когда проблемы первой очереди работ будут исчерпаны, можно сказать, что состояние объекта "Укрытие" застabilизировано, и не представляет опасности с точки зрения ядерной и радиационной.

Что касается строительства "Укрытия-2", то, безусловно, наличие дополнительного барьера выхода РА из объекта упростит решение наиболее сложной задачи - сбор и контейнеризация топлива (ВАО) внутри объекта. Однако следует помнить, что объем РАО увеличивается на количество строительных материалов "Укрытия-2". Поэтому требуется обосновать необходимость его строительства.

Работы второй очереди представляют собой большой комплекс, связанный с РАО. Он включает в себя работы по переработке всех видов РАО и захоронение в хранилище. К нему можно приступить после решения проблемы места хранения ВАО или завода по переработке для дальнейшего использования. Время между работами первой и второй очереди может быть продолжительным. Однако подготовительные работы можно уже начинать, все зависит от финансирования. Проблему обращения с РАО "Укрытия" необходимо решать как можно быстрее, их нужно увязать в общем комплексе, так как радиоактивные отходы всей Украины по количеству и качеству несоизмеримы с РАО объекта "Укрытие".

Производственное объединение (Объект "Укрытие") ЧАЭС, Припять
Поступила 10.04.95

УДК 621.039.58

Е. Л. Белоусов, М. И. Сидоренко
СТРАТЕГИЯ ПОЭТАПНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТА "УКРЫТИЕ-1"

Дана оценка состояния объекта "Укрытие", исходя из которой сделаны выводы о необходимости проведения его поэтапной стабилизации. Приведены результаты применения метода ретроспективного анализа перегрузок.

Представленная стратегия поэтапной стабилизации объекта "Укрытие" охватывает только строительный аспект проблемы безопасности объекта. Она разработана в условиях дефицита конкретных данных о предполагаемом технологическом решении физической

© Е. Л. Белоусов, М. И. Сидоренко, 1996

52

проблемы ликвидации ядерной и радиационной опасности. Поэтому все оценки и мероприятия по стабилизации рассматривают только те части "Укрытия-1", которые создают его наружную оболочку, предохраняющую население от опасного воздействия аварийного блока. По мере получения информации о предполагаемых технических решениях данная стратегия будет уточняться, и перечень необходимых мероприятий - пополняться. Эти предположения подготовлены на основе информации по проблеме на конец 1994 г. с целью широкого обсуждения специалистами разного профиля связанных с проблемой ЛПА на ЧАЭС для выработки максимально обоснованного и рационального подхода.

Предполагается, что безопасность объекта может быть обеспечена по одному из двух сценариев.

ПЕРВЫЙ сценарий предполагает кратковременную (в течение нескольких, видимо, десятков лет) эксплуатацию существующего укрытия и возведенного над ним нового "Укрытия-2". Ядерная и радиационная опасность будет ликвидироваться в основном под защитой нового "Укрытия-2". Таким образом, при первом сценарии необходима кратковременная стабилизация "Укрытия-1".

Первый сценарий пока принят как единственно возможный. Но при его оценке следует учесть, что возведение нового "Укрытия-2" еще не означает допустимость самопроизвольного разрушения старого "Укрытия-1" и протекания неконтролируемых процессов. Процесс ликвидации последнего все время должен быть управляемым. Конечно, после возведения "Укрытия-2" нагрузки на "Укрытие-1" изменятся, да и последствия неуправляемого разрушения будут другие, но все-таки необходимо обеспечить его устойчивое состояние на весь период ликвидации ядерной и радиационной опасности.

ВТОРОЙ сценарий предполагает длительное (порядка 50-100 лет) существование современного "Укрытия-1". Ядерная и радиационная опасность будет ликвидирована под защитой усиленного "Укрытия-1". Принятие его требует решения проблемы стабилизации существующего "Укрытия-1" на более длительный период (50-100 лет). При этом впоследствии не исключен вариант возведения "Укрытия-2", но уже в новых экономических условиях.

Таким образом, в обоих сценариях возникает необходимость решения проблемы стабилизации существующего укрытия, правда на разные сроки. Поэтому ее полезно рассмотреть в широком временном интервале.

Стабилизация должна осуществляться поэтапно путем непрерывного преобразования - перехода от предыдущей к новой стадии существования на основе прогнозирования будущих проектов преобразования.

Стратегия поэтапной стабилизации должна быть гибкой и обеспечивать эффективные работы физиков-технологов по извлечению и переработке радиоактивных отходов. В соответствии с этими задачами на каждом этапе должна быть предусмотрена возможность выбора дальнейшего сценария: от немедленного строительства "Укрытия-2" до полного отказа от такого строительства.

В связи с этим мероприятия по стабилизации на каждом этапе должны:

иметь перспективу использования на последующих этапах стабилизации (по мощности, по технологии возведения и т. д.);

быть легко устранимыми (при необходимости);

не ухудшать доступа к топливосодержащим массам, так как предполагается, что их следует извлечь и удалить;

53

допускать устройство технологических проемов значительного размера (порядка 6х6 м), а также демонтаж (разборку) отдельных элементов сооружения;

учитывать необходимость восприятия дополнительных технологических нагрузок. Их реальные размеры должны быть оценены как можно раньше;

не увеличивать габаритные размеры сооружения - на случай необходимости возведения "Укрытия-2" (см. выше).

Учитывая чрезвычайную значимость объекта и особенность его изучения и оценки, нужно отметить еще один важный принцип:

мероприятия по стабилизации должны обеспечивать безопасную эксплуатацию объекта даже при наличии невыявленных дефектов.

Необходимо также на каждом этапе прогнозировать характер и размеры нагрузок и воздействий на объект.

На начальной стадии стабилизации должны быть учтены:

собственный вес элементов "Укрытия";

атмосферные воздействия - ветер, снег и изменения температуры. Эти нагрузки, естественно, должны быть назначены с учетом возможности длительной эксплуатации.

При длительной эксплуатации (по второму сценарию) необходимо учесть дополнительно:

неравномерные деформации основания;

возможность аварийной ветровой нагрузки (смерч);

воздействие землетрясения интенсивностью максимально проектного.

Разработка конкретных решений по стабилизации (разборка или усиление, технические решения усиления, степень усиления, очередность и т. п.) для любого объекта всегда предшествуют работы по оценке его состояния.

Состояние основания и фундаментно-подвальной части сооружения не требует каких-либо срочных мер по их усилению при кратковременной эксплуатации.

Относительно надежности собственно металлоконструкций покрытия, - то ранее НИИСКом был сделан вывод об их безусловной надежности, так как эти конструкции проектировались под значительно большую нагрузку (биологическая защита из слоя бетона толщиной 200 мм). Как показали более поздние исследования, этот вывод требует уточнения, поскольку НИИСК вышел с такими предложениями:

узел опирания балок покрытия Б1 и Б2 по осям 50/Ж необходимо усилить. Усиления, выполненного по проекту ВНИПИЭТ - недостаточно. Необходимо реализовать еще и предложение НИИСК (удлинение балок Б1 и Б2 и опирание их на стену по оси 50);

усилить консоль южных балок Б1 (установка дополнительных связей, обеспечивающих работу нижнего сжатого пояса консолей без потери устойчивости);

провести подробные исследования опасности дефектов опирания щитов покрытия на балки Б1 с южной стороны, влияющих на работу балок Б2 (дополнительная нагрузка на эти балки, их кручение).

Однако наибольшие сложности неопределенности возникают при оценке надежности железобетонной многоэтажной части сооружения, используемой для опирания металлоконструкций покрытия. Эти сложности связаны с известными особенностями таких конструкций:

многие из них имеют значительные дефекты (трещины большого раскрытия, обрывы арматуры и т.п.), ко многим нет доступа для детального осмотра. Для их оценки могут быть построены разные расчетные модели. Но эти модели будут отражать лишь предположения

54

авторов (может быть, и правильные) о работе конструкций и не являются проверенными, доказанными моделями, а их использование для данного объекта представляется недостаточно осторожным. Поэтому в исследованиях НИИСКА применялся метод ретроспективного анализа перегрузок, с использованием которого к настоящему времени получены оценки надежности только при обычных климатических воздействиях (снег, ветер, температура). Установлено:

а) показатели надежности участка покрытия над реакторным отделением (трубный настил) весьма низкие: доказательная оценка вероятности отказа при возможной снеговой нагрузке достигает 10%. Нужно отметить явную двойственность этой оценки: у нас

нет доказательств "неминуемости" обрушения, но и нет доказательств более надежной работа конструкций опирания (вентшахт и стены по оси 50) этого участка покрытия.

Подробный анализ работы опорных зон этого фрагмента сооружения позволил сформулировать конструктивные мероприятия, обеспечивающие снижение вероятности отказа до относительно приемлемого уровня (0,1%);

б) показатели надежности всех остальных частей сооружения (балок "Мамонт" и "Осьминог", диафрагменная этажерка, контрфорсная и каскадная стены и т. д.) относительно спокойные: доказательная вероятность отказа не превышает 0,1%.

По показателям начальной надежности был выполнен ориентировочный прогноз долговечности разных частей сооружения. Прогноз долговечности выполнялся для двух случаев: без учета деструктивных сил и с их учетом.

В первом случае (прочность конструкций не уменьшается со временем) получены следующие оценки долговечности (n лет): для зоны опирания Б1 и Б2 - $n=9,6$ лет; для остальных частей сооружения - $n=693$ года. Во втором случае принималось, что прочность конструкций уменьшается со временем пропорционально скорости коррозии арматуры. Если принять коэффициент пропорциональности равным 0,2% в год, то получим следующие показатели долговечности: для зон опирания балок Б1иБ2 - $n=9,1$ года; для остальных частей сооружения - $n=40$ лет. Во всех случаях уровень риска принятия решения задавался равным $p=0,5$.

Из этих данных можно сделать следующие выводы: для зоны с большой начальной вероятностью отказа (зона опирания участка покрытия из трубчатого настила) деструктивные процессы не являются решающими, долговечность этой зоны определяется величиной $n=10$ лет;

для зон с малой начальной вероятностью отказа долговечность очень зависит от интенсивности деструктивных процессов. При принятой ориентировочной оценке интенсивности коррозии арматуры долговечность этих зон составляет 40 лет.

Относительно долговечности собственно металлоконструкций покрытия можно отметить следующее:

имеющиеся запасы прочности основных несущих элементов (балок) настолько велики, что их долговечность (после ликвидации отдельных местных дефектов) при наблюдающейся в настоящее время интенсивности коррозии может быть оценена величиной 80 лет;

ограждающие конструкции (щиты) при необходимости могут быть заменены.

55

Оценивая в целом состояние изученности объекта на сегодняшний день и дальнейшие его перспективы, нужно отметить два направления: традиционное (поиск и выявление критических дефектов - грубых ошибок проектирования, возведения, эксплуатации и ликвидации этих дефектов) и, второе - "страховочное".

Традиционное направление, несомненно, уже дало и еще возможно даст полезные результаты (например, узел опирания балок Б1 и Б2 по оси 50/Ж и консоль балок Б1). В связи с этим определенный интерес представляет собой выполненный НИИСКом прогноз остаточного количества грубых ошибок.

Такой прогноз был произведен на базе простейших гипотез: вероятность появления грубых ошибок одинакова во времени, места появления ошибок равновероятны по всему возможному полю и все возможное поле появления грубых ошибок доступно для обследования. Кроме того, для получения необходимых граничных условий был рассмотрен условный вариант деятельности организаций, сопровождающих объект после 1986 г: было проведено две экспертизы (ВНИПИЭТ и НИИСК), при которых было выявлено соответственно пять и две грубые ошибки.

Результат прогноза следующий:

остаточное (после экспертизы НИИСК) количество грубых ошибок - 1-3, что заметно отличается от 0.

Дальнейший анализ методологии прогноза остаточного количества грубых ошибок приводит к необходимости учета (уточнения) дополнительных усложняющих обстоятельств:

вероятность появления (в том числе и пропуска при экспертизе) грубых ошибок не одинакова во времени (радиационная обстановка с 1986 г. существенно изменилась);

не все возможное поле появления ошибок доступно для обследования (в связи не только с радиационной обстановкой, а и с наличием разного рода помех, завалов, исключающих возможность получения исчерпывающей информации).

Первое усложняющее обстоятельство можно компенсировать и сделать задачу решаемой, проведя третью последовательную экспертизу. Но второе усложняющее обстоятельство (наличие закрытых для обследования зон) делает этот путь тупиковым: единственный способ выявления грубых ошибок - это сплошной контроль, но его нельзя реализовать в закрытых для обследования зонах.

Поэтому можно прогнозировать следующую неблагоприятную ситуацию, которая может сложиться по окончании натурных работ:

будет выявлено какое-то количество критических дефектов и их, предположим, можно устранить. Означает ли это, что с критическими дефектами покончено? При наличии полностью закрытых для обследования зон (завалов) положительно ответить на этот вопрос пока нельзя.

Поэтому основной целью дальнейших работ должен стать не столько поиск и устранение критических дефектов (такая работа по-прежнему нужна и полезна), сколько поиск доказательств или решений, обеспечивающих надежную работу конструкций, даже при наличии невыявленных дефектов (т.е. обоснование необходимости и эффективности страховочных мероприятий).

Это позволило сформулировать специально оговоренный принцип разработки страховочных мероприятий по стабилизации, обеспечивающих безопасную эксплуатацию объекта даже при наличии невыявленных дефектов.

Изложенное позволяет сформулировать предложения как для кратковременной, так и для длительной стабилизации.

56

Перечень локальных мероприятий для кратковременной стабилизации:

а) усилить узел опирания балок Б1 и Б2 по осям 50/Ж (удлинить балки, приварив к их торцам дополнительные элементы и обеспечив тем самым страховочное опирание их на стену по оси 50);

б) завершить сварочные работы по установке связей между балками южного блока Б1 на консольном участке, страхующих нижний сжатый пояс этих балок от потери устойчивости;

в) перенести опору балок Б2 на вентилях (северной и южной) с ближайшей стенки вентиля на следующую стенку (на ось 43, т.е. на 3,2 м в сторону третьего блока). Это уменьшит эксцентриситет приложения вертикальной нагрузки на вентилях и тем самым улучшит условия ее работы;

г) снять часть труб (6 шт.) на участке покрытия из трубного наката возле стены по оси 50. Заменить этот участок покрытия (30х7,2 м) легкой решетчатой конструкцией. Тем самым уменьшится нагрузка на стену;

д) связать между собой южные блоки балок Б1 и Б2 вертикальными связями на опорах и через 12 м по длине пролета.

Это мероприятие следует реализовать при неблагоприятном исходе выполняемой в настоящее время расчетной оценки опасности выявленных дефектов опирания щитов покрытия на указанные балки.

До реализации всех перечисленных мероприятий необходимо назначить (обосновать) безопасный уровень воздействия (снеговой, ветровой и температурной нагрузки) при превышении которого эксплуатацию объекта считать недопустимой (вывести людей, привести в соответствующую готовность аварийные службы и т.д.).

Все эти мероприятия относительно несложные. Перечень таких решений и их более детальная проработка может быть представлена на следующих стадиях разработки ТЭО.

Кроме этих чисто производственных мероприятий, необходимо продолжить обследования и оценку состояния натуральных конструкций, для подробного обоснования мероприятий по временной стабилизации. В частности:

провести дополнительные обследования состояния и оценку надежности стены по оси 50 и прилегающего к ней железобетонного каркаса для обоснования страховочных мероприятий, обеспечивающих безопасную работу этого фрагмента сооружения;

выполнить прогноз поведения грунтов основания сооружения при сейсмическом воздействии в 7 баллов, а также при изменении нагрузки на основание вследствие строительства "Укрытия-2" или разборки "Укрытия-1";

отработать методологию и заложить основы долговременных наблюдений за реологическими деформациями каркаса, и осадками оснований, за степенью и интенсивностью коррозии основных несущих конструкций;

отработать методологию и начать экспертное сопровождение строительной части проблемы освоения технологических зон по извлечению и переработке радиоактивных отходов.

Основной задачей этих работ является разработка страховочных мероприятий, обеспечивающих безопасную работу сооружения при больших горизонтальных нагрузках (сейсмика и смерч). Предусматривается обоснование необходимости и достаточности тех или иных мероприятий в обязательном сочетании этих двух терминов. Причем при таком обосновании, учитывая нерешенную проблему груб ых ошибок для объекта, следует стремиться к тому, чтобы рекомендуемые мероприятия обеспечивали надежную работу конструкций даже при наличии невыявленных дефектов.

57

Еще одна особенность. Все приведенные выше оценки надежности получены при обычных климатических воздействиях (снег, ветер, температура). По этим оценкам самые неблагоприятные места - вентиляционные шахты и стена по оси 50. При больших горизонтальных воздействиях (например, сейсмика) необходимо получить новые оценки надежности для всех фрагментов сооружения. При этом неблагоприятными могут оказаться и другие (кроме оговоренных) фрагменты сооружения.

По результатам этих работ можно будет уточнить мероприятия по долговременной стабилизации.

Рассматриваемыми мероприятиями по долговременной стабилизации по состоянию изученности наконец 1994 г. являются:

а) полная замена тяжелого покрытия из трубного наката над реакторным отделением более легким решетчатым покрытием.

Реализация этого мероприятия решает проблему восприятия вертикальных нагрузок и делает реальным решение проблемы восприятия горизонтальных нагрузок от сейсмического толчка 7 баллов;

б) раскрепление балок покрытия в горизонтальном направлении с конструкциями каркаса третьего энергоблока;

в) установление системы связевых элементов между ограждающими щитами покрытия, преобразовывающих это покрытие из плоской системы в складчатую;

г) установление вертикальных связевых элементов между стеной по оси 51 и контрфорсной стеной в осях установки южных и северных блоков балок Б1 и Б2 для восприятия горизонтальных усилий от стены 50 и прилегающего каркаса при сейсмическом толчке.

По мнению специалистов, представляется, что реализация этих мероприятий (их мощность, очередность, необходимость и достаточность будет обоснована при выполнении перечисленных выше дополнительных обследованиях объекта) позволит безопасно эксплуатировать объект 50-80 лет. Если за это время не удастся решить технологическую проблему извлечения и переработки радиоактивных отходов, то можно будет опять вернуться к вопросу об "Укрытии-2" при тех же исходных данных, но в других, более благоприятных экономических условиях.

Поступила 5.06.95

УДК 556.3 : 504.3.64.36

Н. И. Павлюченко, И. П. Хоренко
**ОБЗОР РАБОТ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕХНОГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА
И ЗАГРЯЗНЕНИЯ РАДИОНУКЛИДАМИ ГРУНТОВЫХ ВОД
ПРОМПЛОЩАДКИ ОБЪЕКТА "УКРЫТИЕ"**

Представлен краткий обзор работ по программе "Ареал". Цель программы - изучение процессов миграции радионуклидов в грунтовые воды с промплощадки объекта "Укрытие", оценка количества ядерного топлива и продуктов деления на промплощадке. Впервые приводятся данные по глубине залегания, мощности (толщине) и (мощности экспозиционной дозы) загрязненного слоя доаварийной поверхности, определенные по результатам гамма-каротажа скважин.

В 1991 г. в соответствии с программой "Ареал" начались работы по исследованию подземной миграции радионуклидов на территории промплощадки объекта "Укрытие". На первом этапе работ было выполнено следующее:

© Н. И. Павлюченко, И. П. Хоренко, 1996

58

сбор априорной информации о промплощадке (геолого-гидрогеологической, геодезической, радиометрической);

бурение и оборудование исследовательских скважин 1-г, 2-г и 3-г (глубиной до 10 м) в северной части промплощадки по профилю субширотного направления;

измерение мощности экспозиционной дозы (МЭД) по стволу скважины шагом 10 см (точечный гамма-каротаж скважин);

отбор проб керна и грунтовых вод из скважин для определения концентрации радионуклидов.

На основании этих работ определены методика и систематика: отбора проб и замеров уровня грунтовых вод (УГВ); контроля технического состояния скважин; гамма-каротажа скважин.

Кроме того, сделана предварительная оценка количества ядерного топлива на промплощадке, начаты работы по исследованию экологической опасности процессов вымывания радионуклидов из загрязненного слоя, приуроченного к доаварийной поверхности (в дальнейшем - активный слой).

В последующие годы исследовательские и сопутствующие им работы по этой теме продолжались. В результате, для систематических наблюдений, в дополнение к существующим, пробурены скважины 4-г, 5-г и 6-г (рис. 1), а кустовой метод заложения и оборудования скважин на разные уровни в верхних слоях разреза позволил провести опытные работы по изучению вертикального влагопереноса радионуклидов в зоне аэрации.

Полученная информация позволила уточнить техногеологический разрез в северной части промплощадки, получить дополнительные сведения о радиоактивном загрязнении техногенного слоя и отложений, залегающих выше уровня грунтовых вод (зоны аэрации).

К сожалению, буровые работы в 1993 г. по данной программе прекращены, что не позволяет получить более полную информацию по динамике и прогнозу

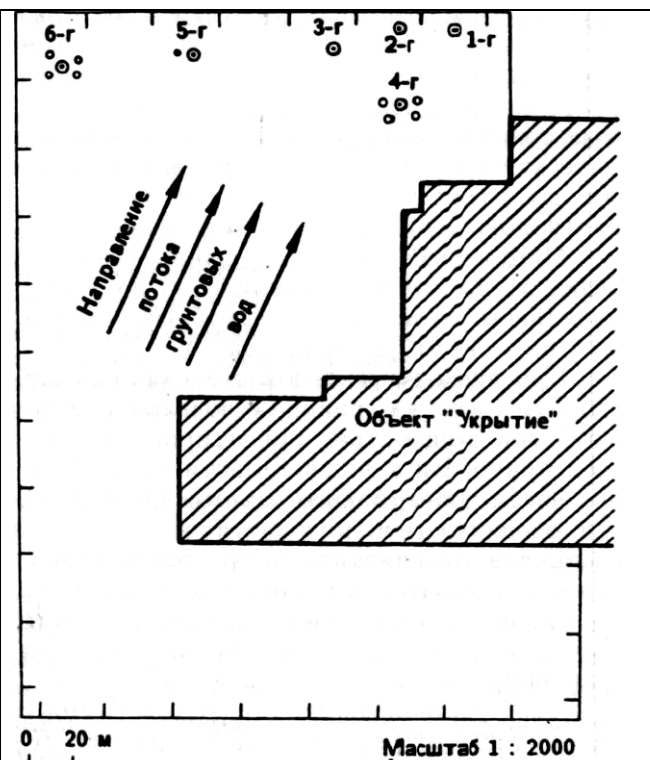


Рис. 1. План-схема расположения исследовательских скважин на

процессов миграции, распределению и количеству радионуклидов в целом по промплощадке.	промплощадке объекта "Укрытие"
---	--------------------------------

Бурение исследовательских и наблюдательных скважин. За предыдущий период, в северной части промплощадки оборудовано шесть фильтровых скважин по профилю субширотного простирания с расположением скважины 4-г вблизи стен объекта "Укрытие". Кроме того, в непосредственной близости у скважин 4-г, 5-г и 6-г пройдено соответственно 4; 1 и 4 наблюдательных безфильтровых скважины на изучение поровых вод зоны аэрации.

59

Главным при выборе метода и технологии бурения было предотвращение загрязнения пород ниже доаварийной поверхности (в дальнейшем, активный слой) при проходке ствола скважины, а также полное исключение возможности перетока по затрубному пространству. Для этого было предусмотрено перекрытие активного слоя и зоны аэрации (толщи пород до уровня воды) дополнительными колоннами труб (кондукторами) с обязательной цементацией всего затрубного пространства и башмака (низ колонны обсадных труб). Кроме того, для исключения привноса в "чистый" разрез и, в особенности, водоносный горизонт активных частиц, при бурении не применялись промывочные жидкости для выноса разбуренной породы на поверхность бурение велось "всухую". Для оперативного контроля за разрезом, проходка за один рейс не превышала 1 м. Такая технология вскрытия водоносного горизонта проверена многолетней практикой при разведке подземных вод и рекомендуется современными методиками для проходки скважин в сложных гидрохимических условиях при малейшей возможности загрязнения.

Характеристика техногеологического разреза. Первичное описание кернового материала, скорректированное по результатам гамма-каротажа, зоны аэрации, позволило охарактеризовать техногеологический разрез северной части промплощадки объекта "Укрытие" (рис. 2).

Насыпной слой в пределах северной части промплощадки имеет мощность от 1,80 м (скважина 2-г) до 2,60 м (скважина 4-г). При проходке скважин в различных интервалах вскрыты бетон, щебень, гравий, наливной цементный раствор, супесь, суглинок со щебнем, песок, фрагменты металлоконструкций. Закономерности размещения по глубине перечисленных литологических разностей, при анализе разрезов, не отмечено. Таким образом, насыпной слой представляет собой сложнослоистую структуру, обладающую значительной неоднородностью, как в плане, так и в разрезе. Составляющие насыпного слоя в их современном состоянии (трещиноватость, рыхлость, гранулометрический состав, плотность и т.д.) являются вполне водопроницаемыми для атмосферных осадков и различных водных технологических растворов.

МЭД насыпного слоя, по данным гамма-каротажа, находится в пределах от 0,5 мР/ч (скважина 6-г) до 2 мР/ч (скважина 3-г) при значительном увеличении в отдельных интервалах до 17,4 мР/ч (скважина 1-г) - 45 мР/ч (скважина 4-г).

При проходке исследовательских скважин непосредственно под насыпным слоем на границе с доаварийной поверхностью вскрыт активный слой мощностью, ориентировочно, 0,1-0,3 м. Практически этот слой приурочен к нижней части (до 0,15 м) насыпного слоя и к верхней части доаварийного разреза (до 0,15 м). Образование верхней части, очевидно, связано с частичным перемешиванием с выпавшими высокоактивными частицами при создании насыпного слоя, а нижней части с механическим проникновением мелкодиспергированного топлива вглубь. Следует отметить, что уточнение мощности активного слоя будет выполнено после детальной отработки методик гамма-каротажа и интерпретации его результатов.

МЭД активного слоя, по данным гамма-каротажа, находятся в пределах от 20,4 мР/ч (скважина 5-г) до 2190 мР/ч (скважина 4-г). Следует отметить тенденцию уменьшения активности с удалением от схематизированной границы объекта: скважина 4-г 38 м 2190 мР/ч, скважина 6-г - 148 м - 60 мР/ч.



Рис. 2. Геолого-литологический разрез по линии 6-г - 1-г

Ниже по разрезу от повсеместно распространенного активного слоя, в скважинах 2-г, 4-г и 5-г вскрыты доаварийные техногенные отложения мощностью от 1,10 м (скважина 4-г) до 3,70 м (скважина 1-г), представленные строительным мусором, песками разномерными, бетоном, наливным цементом. МЭД в этих отложениях, по данным гамма-каротажа, находятся в пределах от фоновых значений (скважина 5-г) до 12,3-12,6 мР/ч (скважина 4-г, 1-г). Загрязнение отдельных интервалов данных отложений, исходя из фактической конструкции скважин (интервалы посадки кондукторов) произошло при бурении из-за перемещения активных частиц вниз по необожженному (на момент проходки интервала) стволу скважины.

61

Всеми скважинами на глубинах от 2,20 м (скважина 3-г) до 4,5 (скважина 2-г) от современной поверхности вскрыты верхнечетвертичные аллювиальные отложения первой надпойменной террасы р. Припять, в отдельных местах, перекрытые почвенно-растительным слоем, мощностью до 0,30 м. Литологически - это пески кварцевые разномерные с прослоями и линзами супесей и суглинков, в отдельных интервалах, с примесью органики. С глубины 6,70-7,30 м (абсолютные отметки 109,9-110,0 м) - по данным замеров за 1994 г. - отложения водонасыщенные. МЭД близка к фону для данных литологических разностей в пределах данного района. Для более детальной характеристики их гамма-активности выполнен гамма-каротаж с аппаратурой более высокой чувствительности (стандартный для обычных условий). Характерная для промплощадки кривая гамма-каротажа приведена на рис. 3.

Динамика уровня грунтовых вод. Режимные наблюдения за УГВ в пределах северной части промплощадки на протяжении 1991-1994 гг., позволяют сделать вывод о

постоянном повышении уровней вплоть до июля 1994 г. (рис. 4). Максимальное повышение отмечено в скважине 1-г (1,44 м) и минимальное, заданный период наблюдений - в скважине 2-г (0,94 м).

По состоянию на 14.12.1994 г. абсолютные отметки уровней грунтовых вод находятся в пределах 109,69 м (скважина 2-г) - 110,23 м (скважина 4-г). Среднегодовые (за 1994 г.) значения следующие: максимум - 110,16 м (скважина 4-г), минимум - 109,96 м (скважина 2-г).

Для характеристики динамики УГВ следует отметить, что абсолютные отметки нижних уровней фундамента 4-го энергоблока и уровней в естественных условиях (до строительства ЧАЭС) были близки. Поэтому во избежание нарушения устойчивости фундамента при возможном подтоплении, постоянно действовала дренажная система фильтровых скважин, понижающих уровни в пределах АЭС. При аварии эксплуатация части этих скважин стала невозможной, а остальные впоследствии были вовсе отключены. Анализ динамики уровней и техногенной обстановки свидетельствует, что причиной повышения уровней являются:

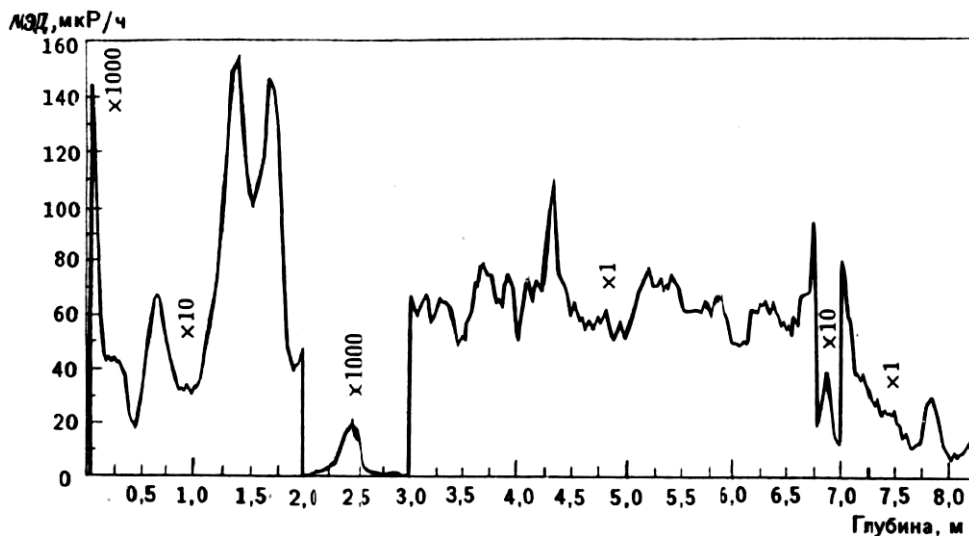


Рис. 3. Диаграмма гамма-каротажа скважины 5-г
62

первоначального, с начала наблюдений по июль 1993 г. - частичное отключение и выход из строя части дренажной сети;

скачкообразного, июль-август 1993 г. - выпадение за этот период значительного количества осадков (270 мм) и, очевидно, отключение оставшихся скважин дренажной сети.

Стабильность уровней, в период сентябрь 1993 г. - июль 1994 г., наиболее вероятно, объясняется постоянством гидрометеорологической обстановки и близостью уровней к естественным.

Падение уровней, в период июль-декабрь 1994 г., является следствием незначительного количества атмосферных осадков.

Незначительное снижение УГВ наблюдается до настоящего времени. Однозначно, причиной этого - метеорологические условия, характеризующиеся незначительным количеством атмосферных осадков.

Графики изменения уровней во времени, совмещенные с графиками изменения концентрации радионуклидов в грунтовых водах и данными по атмосферным осадкам представлены на рис. 4.

Следует отметить, что минимальные отметки таких объектов 4-го энергоблока, как машинного зала и отдельных помещений ВСПО (минимум - 8,40 м или 105,60 м), при современном положении УГВ (средняя абсолютная отметка 109,88 м по состоянию на 31.12.1994 г.), в настоящее время подтоплены, т.е. находятся ниже УГВ.

При одновременных измерениях УГВ во всех шести скважинах отклонения уровня от среднего не превышали 0,10 м, систематически отмечались минимальные значения уровня в скважине 2-г, максимальные - в скважинах 3-г и 4-г.

Вертикальный влагоперенос радионуклидов в зоне аэрации. Разработка методики по изучению влагопереноса радионуклидов в зоне аэрации была начата в 1993 г. По результатам опыта получены данные, подтверждающие наличие ^{137}Cs и ^{90}Sr в поровой влаге (до глубины исследований - 6,60 м). Если на основании работ нельзя численно характеризовать параметры процесса миграции, качественный анализ дает основание предполагать наличие процессов переноса в породах зоны аэрации.

Присутствие радионуклидов ^{137}Cs , ^{134}Cs и ^{90}Sr в породах зоны аэрации также фиксируется по результатам гамма-спектрометрического и радиохимического анализов керн. Их удельная активность в образцах керн колеблется в пределах от долей единицы до нескольких сотен беккерель в год. В скважинах 5-г и 6-г соотношение между ^{137}Cs и ^{90}Sr близко к единице, а в керне скважин 1-г и 2-г содержится в основном ^{137}Cs , активность ^{90}Sr в 100 и более раз меньше. По скважинам 4-г и 5-г информация отсутствует.

Концентрация радионуклидов в грунтовых водах. В пределах промплощадки из шести исследовательских скважин (за период 1991-1994 гг.) отобрано 253 пробы грунтовых вод на определение ^{137}Cs (в фильтрате и осадке), ^{90}Sr (в фильтрате). По результатам гамма-спектрометрического и радиохимического анализов среднегодовые содержания радионуклидов в грунтовых водах следующие:

	1992 г.	1993 г.	1994 г.
^{137}Cs (фильтрат)	346 Бк/л	201 Бк/л	133 Бк/л
^{137}Cs (осадок)	5371 Бк/л	254 Бк/л	153 Бк/л
^{90}Sr (фильтрат)	428 Бк/л	255 Бк/л	271 Бк/л

Данные по содержанию ^{90}Sr рассчитаны с учетом аномальных содержаний по скважине 3-г. Среднее содержание ^{90}Sr в грунтовых водах по этой скважине в 1992 г. составляло 1027 Бк/л, в 1993 г. - 981 Бк/л, в 1994 г. - 1450 Бк/л.

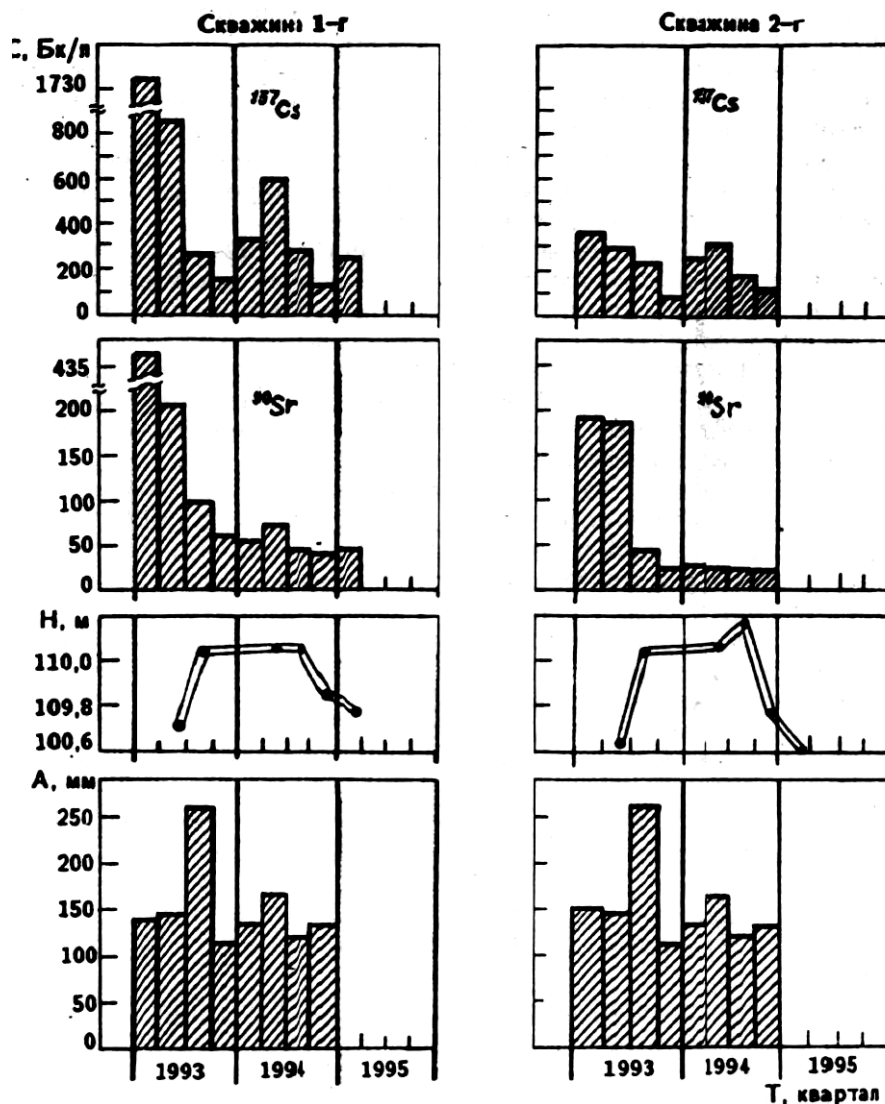


Рис. 4. Хронологические графики содержания радионуклидов (С, Бк/л), уровня грунтовых вод (Н, м) и количества атмосферных осадков (А, мм). Программа "Ареал"

Согласно анализу полученных данных, за период 1992-1994 гг. наметилась некоторая тенденция к снижению содержаний вышеперечисленных радионуклидов в грунтовых водах, за исключением скважины 6-г (наиболее удаленной от объекта "Укрытие"), где средние содержания повысились, и в скважине 3-г, после снижения в 1993 г., в 1994 г. отмечается некоторое повышение (рис. 4).

К сожалению, малое количество точек наблюдения и приуроченность их только к северной части промплощадки, не дает возможности сделать обобщающие выводы, более детально представить механизм миграции радионуклидов в грунтовые воды.

Закключение. Анализ литературных данных [1-3] позволяет предполагать, что распространение радионуклидов за пределы промплощадки будет носить локальный характер. Однако до получения полной ясности в данном вопросе, необходимо учитывать:

64

наличие облученного топлива на промплощадке объекта "Укрытие" и близость к нему грунтовых вод (4-5 м);

наличие топлива в помещениях объекта, его контакт с большим количеством воды, попадающей в разрушенный энергоблок, а. также возможность контакта блочных и грунтовых вод;

близость р. Припять, в которую возможно поступление радионуклидов.

Исходя из вышеперечисленных факторов, объект "Укрытие" следует признать одним из наиболее радиологически опасных, который требует организации систематического контроля подземной миграции радионуклидов.

Выполненные в 1993 г. работы по оценке степени сорбции изотопов цезия (^{137}Cs) и ^{90}Sr с использованием реального кернового материала и грунтовой воды с промплощадки "Укрытия" позволяют утверждать, что наибольшую радиэкологическую опасность представляет миграция изотопов стронция.

Существует несколько предположений, объясняющих повышенное содержание ^{90}Sr в скважине 3-г, но получение достоверной информации требует проведения исследований.

Отмечая наличие ^{137}Cs в грунтовых водах, следует учитывать, что он хорошо сорбируется на естественных минеральных компонентах почвы, и не мог попасть в грунтовые воды в виде растворимых соединений. Поэтому механизм миграции данного радионуклида требует дальнейшего изучения.

По результатам гамма-каротажа в скважинах впервые определены радиометрические параметры активных пересечений: глубина и мощность (толщина) активных слоев, значение МЭД по стволу скважин в геометрии 4П, что позволило уточнить техногеологический разрез по профилю, определить методику секционного отбора представительных проб керна (длина секции не более 10 см), более корректно оценить объем загрязненного пласта (по установленным границам), распределение загрязнения в плане и разрезе.

Доаварийная поверхность во всех скважинах фиксируется интенсивными пиками МЭД от 20,5 мР/ч (скважина 5-г) до 2190 мР/ч (скважина 4-г). При этом мощность (толщина) загрязненного пласта не превышает 10 см за исключением скважины 3-г, где толщина слоя около 30 см.

Во всех скважинах отмечены повышения МЭД на нулевом уровне (от 1 до 7 мР/ч) по отношению к нижележащим породам, что объясняется наличием на промплощадке поверхностных источников гамма-излучения.

В общем, комплексность, систематичность и долговременность исследований по программе "Ареал" направлены на получение представительных выборок данных для статистической обработки с целью математического прогноза (создание динамической модели) миграции радионуклидов в грунтовые воды, установление количества, состава и дифференциации в плане и разрезе ядерного топлива и продуктов его деления на территории промплощадки объекта "Укрытие".

1. Белицкий А.С., Орлова Е.И. Охрана подземных вод от радиоактивного загрязнения. - М.: Медицина, 1968.

2. Гольдберг В.М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. - М.: Недра, 1984.

3. Рэн Ф. и др. Справочник по ядерной энерготехнологии. - М.: Энергоиздат, 1989. - 752 с.

Межотраслевой научно-технический центр "Укрытие" НАН Украины, Чернобыль
Поступила 15.03.95

65

УДК 612.1:612,8+577.3.001.5

В. И. Чернюк, М. И. Захаренко, А. В. Носовский, В. Б. Ластовченко,
А. А. Петриченко, В. И. Панченко, В. В. Липовой, А. Б. Пугач

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА ЧАЭС ПРИ 8- И 12-ЧАСОВЫХ ГРАФИКАХ РАБОТЫ

Проведены исследования функционального состояния операторов блочных и центрального щита управления ЧАЭС в дневных и ночных 8- и 12-часовых сменах. На основании сменной динамики показателей субъективного состояния, уровня активизации центральной нервной системы, артериального давления, частоты пульса, температуры тела установлено, что дневные смены характеризуются высоким функциональным напряжением, ночные - выраженным утомлением. Работа по 8-часовому графику в сравнении с 12-часовым оказалась менее благоприятной для функционального состояния операторов, так как приводила к развитию состояния перевозбуждения центральной нервной системы и характеризовалась более выраженным утомлением в ночной смене.

Характерной особенностью труда оператора энергопредприятия является нервно-эмоциональное напряжение. Развитие этого состояния у оператора обусловлено большим объемом поступающей производственной информации, необходимостью принимать

решения в условиях дефицита времени, ответственностью за жизнь и здоровье других людей и сохранность технологического оборудования, постоянным ожиданием аварийной ситуации. Нервно-эмоциональное напряжение характеризуется повышением возбудимости в центральных звеньях функциональной системы, обеспечивающей переработку информации, а также повышением напряжения систем энергетического обеспечения, в первую очередь сердечно-сосудистой системы.

Работа на предприятиях энергетики организована по графикам, включающим в себя ночные смены. Согласно гигиенической регламентации труда, сменность является фактором условий труда. Известно, что особенности сменного графика такие, как продолжительность смены, время суток, в которое осуществляется работа, длительность отдыха - между сменами во многом определяют работоспособность и функциональное состояние человека. Отсюда очевидна необходимость выбора рационального сменного графика для условий конкретного производства. Существует более ста видов графиков, различающихся разной последовательностью утренних, вечерних и ночных смен и соответственно разной продолжительностью межсменного отдыха: Наиболее часто используются графики с 8-часовыми сменами. Существуют также графики с большей (10-12-часовой) продолжительностью смен. Эти графики относятся к нестандартным. Их внедрение требует осуществления психофизиологических исследований, по результатам которых можно сделать заключение о приемлемости того или иного графика. Следует отметить, что графики с 12-часовой продолжительностью смен оказываются предпочтительнее для работающих по социальным мотивам.

В связи с переводом оперативного персонала ЧАЭС на 12-часовой график взамен существующего 8-часового сменного графика, возникла необходимость в проведении физиологических исследований функционального состояния операторов. Основанием для проведения таких исследований явились известные данные о том, что работа по сменному графику требует значительного функционального напряжения физиологических систем. Это связано с необходимостью работы в ночные смены. Выполнение деятельности в ночное

©В. И. Чернюк, М. И. Захаренко, А. В. Носовский, В. Б. Ластовченко, А. А. Петриченко, В. И. Панченко, В. В. Липовой, А. Б. Пугач, 1996

66

время суток сопровождается перестройками в системе суточных ритмов организма, направленных на повышение уровня активности профессионально-важных функций и систем энергетического обеспечения. Известно, что перестройка различных функций на новый уровень активности в соответствии со сдвигом фазы ритма сон - бодрствование происходит с различной скоростью. Неодновременность перестройки приводит к рассогласованиям в системе суточных ритмов организма, т.е. к развитию десинхроноза. Состояние десинхроноза характеризуется снижением работоспособности и надежности человека и сопровождается ухудшением самочувствия, снижением аппетита, нарушением сна.

Известно, что нервно-эмоциональное напряжение высокого уровня имеет характерные черты стресса и может самостоятельно приводить к развитию десинхроноза. Имеются основания полагать, что сочетанное влияние факторов сменности и напряженности труда может приводить к снижению работоспособности и развитию выраженного утомления у операторов, а также к неблагоприятным изменениям в состоянии здоровья.

Исследования были проведены у операторов блочных и центрального участка управления ЧАЭС в условиях 8-часового сменного графика, а затем по истечении двух месяцев с момента перехода на 12-часовой график в условиях нового графика. При 8-часовом графике замеры проводились в утренних и ночных сменах трехкратно: в начале, середине и конце смен. При 12-часовом графике в начале смены и через восемь часов работы в конце смены. При обоих видах графиков исследованиям подвергались одни и те же физические лица, всего 30 чел.

Исследования функционального состояния оперативного персонала ЧАЭС проводились с использованием методов, позволяющих оценивать состояние центральной нервной и сердечно-сосудистой систем, а также терморегуляцию.

Для оценки функционального состояния центральной нервной системы (ЦНС) применялся разработанный ими способ, позволяющий определять изменение уровня активации в центральных звеньях функциональной системы, ответственной за переработку информации. В основу способа положено измерение латентных периодов сложной зрительно-моторной реакции, анализ распределения по их длительности, выделение стабильной и динамических характеристик. С помощью оценочной таблицы по соотношению указанных характеристик можно диагностировать 7 типов изменений уровня активации. При этом повышение уровня активации соотносится с состоянием напряженного разной степени в том числе и пограничным состоянием - перенапряжения. Снижение уровня активации с состоянием утомления разной степени, в том числе и пограничным переутомлением. Реализация способа осуществлялась с помощью устройства "Психодиагност-04", позволяющего диагностировать функциональное состояние за 3 мин.

Исследование субъективного состояния операторов проводилось с помощью теста "САН". Эта методика позволяет получить количественные показатели (в баллах) для трех категорий - самочувствия, активности, настроения.

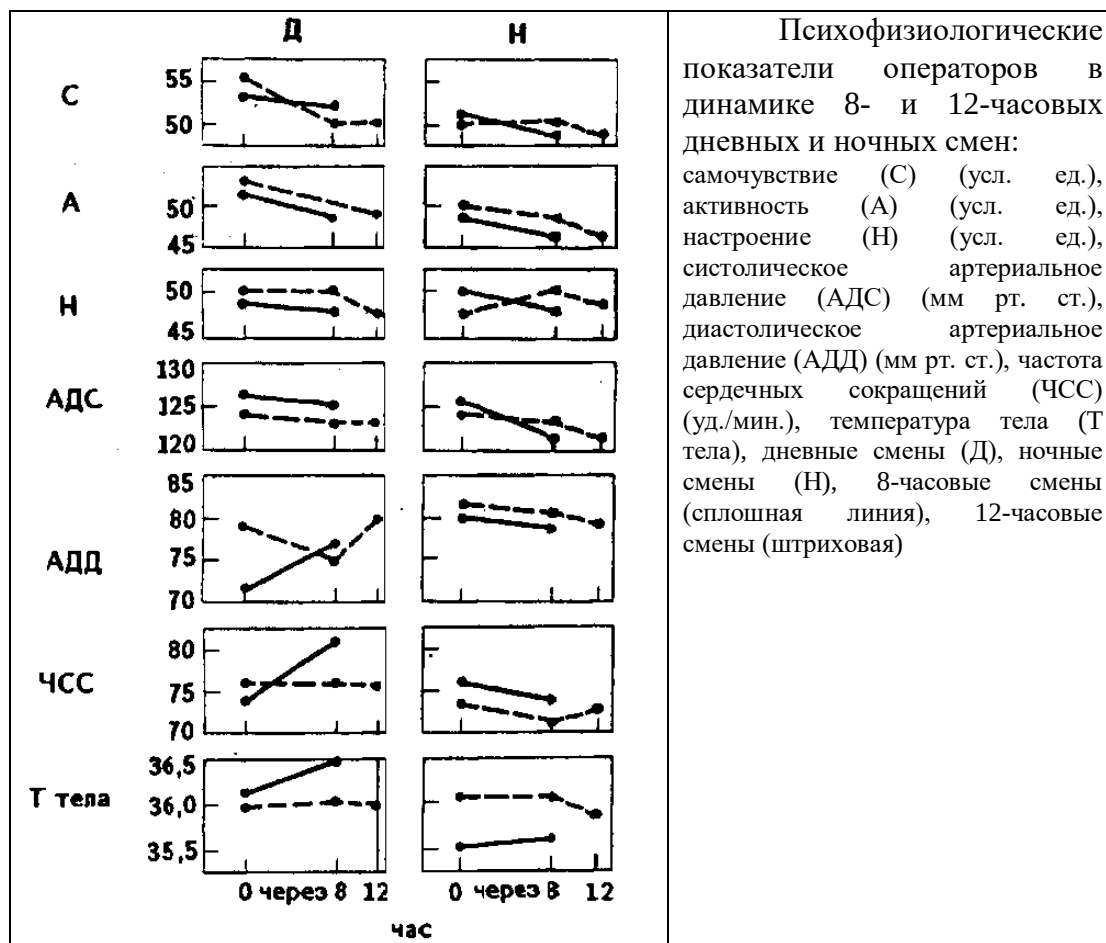
Состояние сердечно-сосудистой системы оценивалось по артериальному давлению и частоте пульса. Измерялась температура тела в подмышечной впадине с помощью электротермометра. Анализу подвергались среднегрупповые и индивидуальные данные операторов.

Работа в утренней 8-часовой смене сопровождалась изменениями только со стороны отдельных среднегрупповых показателей операторов. К концу смены наблюдалось небольшое повышение диастолического артериального давления на 5,9 мм рт. ст. (P 0,05),

67

увеличение частоты сердечных сокращений на 6,7 уд./мин. (P 0,05), повышение температуры тела на 0,5°C (P 0,05). Показатели самооценки состояния на протяжении смены практически не изменялись. В ночной 8-часовой смене достоверных сдвигов со стороны изучаемых показателей не обнаружено. Результаты представлены на рисунке.

Полученные данные свидетельствуют о том, что работоспособность операторов, оцениваемая по среднегрупповым показателям, в дневных и ночных сменах при работе по 8- и 12-часовым графикам поддерживается на достаточно стабильном уровне. Об этом можно судить по отсутствию значимых изменений в первую очередь со стороны показателей самооценки состояния. Обнаруженное в утренних 8-часовых и дневных 12-часовых сменах небольшое повышение диастолического артериального давления, частоты сердечных сокращений, температуры тела свидетельствуют о наличии состояния напряжения, развивающегося под влиянием работы. Таким образом, изучение динамики среднегрупповых: показателей не обнаружило признаков утомления к концу смен. В соответствии с имеющимися в литературе теоретическими разработками, мы полагаем, что отсутствие изменений со стороны показателей еще не говорит об отсутствии процесса утомления. Высокое нервно-эмоциональное напряжение, развивающееся у операторов, как известно, сопровождается повышением активности функций центральной нервной и сердечно-сосудистой систем. Рабочая активация, необходимая для деятельности, маскирует проявления утомления. В этом случае можно говорить о "скрытом утомлении".



Психофизиологические показатели операторов в динамике 8- и 12-часовых дневных и ночных смен:

самочувствие (С) (усл. ед.),
 активность (А) (усл. ед.),
 настроение (Н) (усл. ед.),
 систолическое артериальное давление (АДС) (мм рт. ст.),
 диастолическое артериальное давление (АДД) (мм рт. ст.), частота сердечных сокращений (ЧСС) (уд./мин.), температура тела (Т тела), дневные смены (Д), ночные смены (Н), 8-часовые смены (сплошная линия), 12-часовые смены (штриховая)

Справедливость этого предположения подтверждается данными индивидуального анализа изменений уровня активации в центральных звеньях функциональной системы, ответственной за переработку информации. Использование экспресс-метода оценки позволило выявить значительные индивидуальные различия в изменениях функционального состояния ЦНС под влиянием работы. Данные представлены в таблице. Как видно из таблицы, в утренних 8-часовых сменах обнаружено повышение активации III степени в 14,8 % случаев, в ночных - в 3,7%. Таким образом, работа в утренней смене способствует развитию состояния перевозбуждения в большей степени, чем работа в ночной смене.

68

В утренних сменах повышение активации I и II степени наблюдалось в 51,8% случаев, в ночных - в 22,2%. Это свидетельствует о большем напряжении ЦНС в утренних сменах по сравнению с ночными. В утренних сменах снижение активации I и II степени обнаружено в 14,8 %, в ночных - 33,3 %, т.е. утомление больше проявляется в ночных сменах. Снижение активации III степени, свидетельствующее о переутомлении, обнаружено только в ночных сменах.

В дневных и ночных 12- часовых сменах случаев повышения активации III степени не обнаружено, а повышение активации I и II степени наблюдалось у 13,2% и 15,8% случаев соответственно. Таким образом, напряжения ЦНС в этих сменах очень мало различаются. В дневных сменах снижение активации I и II степени наблюдалось в 13,2% случаев, в ночных - 15,8%. Снижение активации III степени, т.е. переутомление обнаружено только в ночных сменах.

Следует отметить, что в значительном проценте случаев активация ЦНС на протяжении 8- и 12-часовых смен оставалась на неизменном уровне.

Таким образом, данные индивидуального анализа оказались более информативными для оценки функционального состояния операторов по сравнению со среднегрупповыми.

Активация ЦНС в значительном проценте случаев на протяжении 8- и 12-часовых дневных и ночных смен сохранялась на неизменном уровне. По всей вероятности, это обусловлено значительным нервным напряжением, необходимым для успешной

деятельности в условиях поступающего большого объема производственной информации, высокой личной ответственности, опасности возникновения аварии. В утренних 8-часовых сменах у половины операторов эти факторы приводили к повышению уровня активации, очевидно обусловленному высоким нервным напряжением; в дневных 12-часовых - также обнаружено повышение активации, однако в значительно меньшем проценте случаев.

Изменения уровня активации нервной системы у операторов

В ночных 8-часовых сменах утомление, оцениваемое по снижению уровня активации, больше, чем в дневные. Можно предположить, что, кроме влияния самой работы, снижение уровня активации во многом обусловлено суточной периодикой функций. В то же время в ночных 12-часовых сменах проявление утомления очень мало отличаются от таковых в дневных сменах. Вероятно, в процессе адаптации к работе по 12-часовому графику происходит угнетение суточного ритма физиологических функций. В этом случае наблюдается только снижение активации ЦНС производственной деятельности.	Уровень активации, степень	Утренние
	Повышение III	14,
	Повышение II	44,
	Повышение I	7,4
	Состояние не изменилось	18,
	Снижение I	11,
	Снижение II	3,7
	Снижение III	-
	12-часовая	Днев
	Повышение III	-
Рассматривая точки зрения на график можно с 12-часовой не оказывал воздействия на часовым. Имеются работа по новому является причиной состояний, чем по сменами.	Повышение II	5,
	Повышение I	7,5
	Состояние не изменилось	42,
	Снижение I	7,5
	Снижение II	5,
	Снижение III	-
	графику в меньшей степени развития пограничных графику с 8-часовыми	

1. Ашофф Ю. Биологические ритмы. М.: Мир, 1984. - Т. I - 412 с.
2. Деряпа Н.Р., Мошкин И.П., Посный В.С. Проблемы медицинской биоритмологии. М.: Медицина, 1985. - 201 с.
3. Степанова С.И. Биоритмологические аспекты проблемы адаптации - М.: Наука, 1986. - 244 с.

Институт медицины труда МЗ Украины, Киев
Поступила 15.03.95

УДК 577.22+576.1+539.16

В. И. Максин, О. З. Стандритчук ОТРАЖЕНИЕ ОБЩИХ ЭВОЛЮЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИРОДЫ В РАДИОНУКЛИДНЫХ РЯДАХ

Выявлен детерминизм в заполнении радионуклидами временной шкалы согласно периодам их полураспада ($T_{1/2}$). Этот детерминизм подчиняется тем же волнообразным функциям, что и эволюционные процессы природы. Предложено новое классификационное деление радионуклидов по величине их $T_{1/2}$.

Радиационное загрязнение окружающей среды является потенциально наиболее опасным для экосистем [1, 2], поскольку согласно основному радиобиологическому

парадоксу последствий в природе такого загрязнения существует большое несоответствие между ничтожной величиной лучистой энергии, поглощаемой биосферой, и крайней выраженностью реакций биологических объектов вплоть до летального исхода. Это стало ещё более очевидным с проявлением отдаленных последствий таких аварий, как в Тримгил-Айленде и, особенно, на ЧАЭС. Именно с этого времени следует начинать отсчёт накопления и распространения полного спектра "молодых" изобарных цепочек (свидетелей нарушения векового изотопного равновесия в окружающей среде). С этого поворотного с позиций экологии момента в открытых водоемах появились аналитически определяемые количества радионуклидов [3] из "молодых" изобарных цепочек распада, хотя еще до недавнего времени вековое равновесие изотопов в водах бассейна Днепра, открытых водоемах северной части Украины, в Беларуси и на юго-западе России было обусловлено парциальной долей радионуклидов звездного происхождения с периодами полураспада от 10^5 до 10^7 лет и получаемых при естественной активации [4, 5]. Сейчас уже ясно [6], что к 2000 г. доза облучения этим специфическим спектром жесткого излучения превысит среднегодовую по сравнению с естественным фоном в два раза и, следовательно, увеличится порог устойчивости биосистем [1, 2]. В то же время, несмотря на большой теоретический и практический материал по изучению данного вопроса, не удалось получить надежной разработки, объединяющей вопросы физико-химических, физических и биологических свойств радионуклидов с проблемами экологии и эволюции жизни [1-14]. Выявление связей феноменологического порядка между природой радионуклидов и развитием живого вообще позволило бы по новому взглянуть на проблему отдаленных последствий радиационного загрязнения вследствие аварии на ЧАЭС, а также могло бы стать предпосылкой к

© В. И. Максин, О. З. Стандритчук, 1996

70

разработке и обоснованию новой классификации радионуклидов. Частично эти вопросы уже рассматривались [15-17], но только на уровне обоснования концепции, развитие которой остается актуальным. В связи с изложенным, поиск критериев оценки опасности радиационного загрязнения окружающей среды "молодыми" изобарными цепочками распада вследствие аварий на АЭС или же неизбежного вывода из эксплуатации отработавших ресурс ядерных реакторов с разработкой концепции поведения в условиях нарушения векового изотопного равновесия интересен с научной и практической точек зрения.

В данной статье в порядке дискуссии представлены результаты теоретического поиска взаимосвязей глубинных процессов развития материи на уровне нуклидов с общими эволюционными процессами природы, выполненного нами по известным на сегодня данным фундаментального и прикладного характера из различных областей науки.

Радиоактивные явления, как и явления жизни, в своем развитии в конечном пространстве-времени противоречат известному принципу Клаузиуса, поэтому В.М. Вернадский [5] придавал особое значение идее выявления их причинно-следственных связей, освещаемых впоследствии различными направлениями наук [8-19].

В процессе распада радионуклидов образуются изобарные цепочки с определенным количеством радиоизотопов различной продолжительности жизни, для которых суммарная величина радиоактивности всех членов радиоактивного семейства при достижении векового равновесия одна и та же [5, 13, 20]. Распадаясь с определенными периодами полураспада ($t_{1/2}$), испуская соответствующие кванты лучистой энергии, которые сопровождаются при этом зарождением и эволюцией жизни, радионуклиды не могли не стать как бы эталоном квантования энергетических и пространственно-временных характеристик живых систем [5, 10, 14, 18, 19], своеобразными матрицами пространственно-временных и энергетических процессов - "часами жизни", а шкала $t_{1/2}$ - их "циферблатом". Однако для подтверждения этой гипотезы требовался поиск более конкретных примеров.

Как известно [5, 13, 20], изменение количества (активности) радионуклидов во времени описывается соотношением

$$N_n = N_0 \cdot 2^{-n}, \quad (1)$$

где N_0 и N_n начальное, до момента отсчета, и текущее количество радионуклида, $n = \Delta t/T_{1/2}$ - количество отрезков времени Δt сопровождающих распад в единицах $T_{1/2}$ соответствующего

радионуклида. Соотношение (1) при достижении векового равновесия может трактоваться как строгая закономерность накопления "неделимых" (стабильных изотопов) физических систем. В этом плане было полезно сравнить закономерность (1) с развитием живых систем, для которых количество "неделимых" (отдельных особей) живых организмов, создаваемых в течение каждого поколения в пространстве времени дает природную меру последнего, свою, отличную для каждого вида. [5]. Такое развитие (размножение), описывается уравнением геометрической прогрессии

$$N_{n*} = N_0 \cdot 2^{n*}, \quad (2)$$

где n^* - количество равных промежутков времени (например, суток), по истечении которых из каждой двух особей, образовавшиеся при первом "делении" их исходного количества N_0 , получится N_{n*} особей. Показатель степени в уравнении (2) также характеризует темп развития (размножения), определяемый эмпирически для каждого вида [5].

71

Не прибегая к сложным преобразованиям, можно показать, что выражения (1) и (2) могут быть легко сведены к уравнению простых геометрических рядов с обертонами 2^ω (где ω - целые числа 1, 2, 3,..., m), свойственных волнообразным процессам. Логарифмическая форма такого уравнения имеет вид

$$\lg N_0 - \lg N_n = \omega \lg 2. \quad (3)$$

Коэффициент ω включает в себя характеристики темпа распада материнских и накопления дочерних стабильных нуклидов (химических элементов) для радиоактивного распада или темпы видового размножения организмов. Налагая эти ряды друг на друга, нетрудно выявить моменты условий резонанса, обуславливающие периоды усиленного роста, замедления или вымирания его вида. Подобные ряды и обусловленности моментов усиленного роста коринебактерии ("большие факторы") под действием импульсов мощной коротковолновой радиации космического происхождения с циклами, равными циклам пятнообразовательной деятельности солнца, обнаружены уже давно [14]. Нам предстояло показать, что детерминизм в истоках химических элементов (на уровне $T_{1/2}$ радионуклидов) содержит объединяющие начала, с функциональным распределением свойств химических элементов в процессе эволюции [21-25].

Для химической и биологической форм организации материи в пространстве - времени и эволюции жизни такое унаследование подтверждено экспериментальным и исследованиями [18, 19]. При этом было обнаружено сопряжение структурных элементов основных скелетных минералов (карбоната и фосфата кальция, диоксида кремния) с органическим веществом при биополимеризации у живых организмов от прокариот до человека [18, 19]. На основании этого в работе [19] сделано заключение, что если биополимеризацию как процесс матричного формирования минеральных кристаллов предположить идущим в обратном направлении, то получим количественную модель происхождения жизни на абиогенных матрицах тех же минералов. Без существенных оговорок трудно полностью согласиться с таким заключением (вряд ли здесь можно говорить о полной модели происхождения жизни как генетическом кодировании множества ее форм и структурных элементов), но идею поиска отражений этапов эволюции жизни в развернутой цепочке реального процесса, несомненно, следует проверить и на уровне закономерностей распределения радионуклидов по величине их $T_{1/2}$.

В связи с изложенным выше интересно изучить закономерности распределения всех известных на сегодня [26-28] радионуклидов по величине их $T_{1/2}$ (прежде всего представляющих элементы феноменологического влияния на развитие жизни [5, 18, 19, 21-25]) и сопоставить полученные при этом результаты с периодизацией филогенеза (видового развития) и онтогенеза (индивидуального развития) человека [5, 9, 11, 17, 18, 29-32]. В этом плане первоочередное внимание заслуживали 14 так называемых элементов жизни H, C, N, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca и Fe, принадлежащих к первой концентрационной функции живых систем [5, 24]. Однако особую роль всеобщего влияния на развитие биологических форм жизни занимают: среди неметаллов - C и H ("строительные кирпичики" органической природы), а среди металлов - Ca (основной строительный элемент скелетов, функции поддержания устойчивости живых коллоидов, транспорта и общего обмена веществ), Fe

(основной функциональный элемент окислительно-восстановительной функции крови - дыхания), а также отдаленный аналог железа - U, как общепризнанный элемент "природных часов" [4, 13, 18, 19, 21-24].

72

При расположении радионуклидов на логарифмической временной шкале по величине $\lg T_{1/2}$ нами была обнаружена любопытная картина. Все известные на сегодня радионуклиды [26-28] распределяются на временной шкале по продолжительности жизни ($T_{1/2}$) не равномерно, а образуют своеобразные группы-серии (как бы "линейчатый спектр" по аналогии со светом) заселенности мировой шкалы пространства - времени в интервале примерно от 10^{-22} до 10^{40} с. Более детальный анализ показал, что в большинстве "густонаселенных" участков шкалы $\lg T_{1/2}$ представлены изотопы, играющие особую функциональную роль в развитии живых систем (Ca, Fe, C, H, U). В таком случае известное [20] условное деление радионуклидов на короткоживущие, среднеживущие и долгоживущие могло показаться простым только на первый взгляд. При обнаружении закономерностей их распределения по величине $T_{1/2}$ такое деление приобрело новый оттенок, стало возможно провести функциональную взаимосвязь с феноменологическим функциональным распределением химических элементов в жизненных процессах, а также сопоставить спектр заселенности $\lg T_{1/2}$ с эволюцией природы в целом. Такое сопоставление показало, что между характером заполнения временной шкалы $T_{1/2}$ радионуклидов и периодизацией онтогенеза и филогенеза *Homo sapiens* для всего отрезка эволюционной истории от прокариот до человека существует удовлетворительное совпадение особых ключевых моментов в развитии человека и природы в целом с наиболее заселенными участками временной шкалы [17]. В частности, на участке шкалы, где укладываются значения $T_{1/2}$ радионуклидов от ${}^1\text{H}^3$ до ${}^{60}\text{Co}^{14}$ явно прослеживаются такие "густозаселенные" участки: 12-14; 16-22; 29-33; 48-50; 69-102 и 150-179 (с минимумом "заселенности" ≈ 120) лет, а также 800-1100 и 1200-5730 (с минимумами "заселенности" при 920 ± 10 и 2025 ± 10) лет. Сравнение этих значений с возрастной периодизацией онтогенеза (утвержденной на VII Всесоюзной конференции по проблемам возрастной морфологии и биохимии АПН СССР, Москва, 1965 г.) [29] и филогенеза [30-32], показывает их совпадение.

В результате такого подхода нуклиды Периодической системы элементов Д.И. Менделеева всего изотопного спектра И.П. Селинова [26-28] предложено разделить по продолжительности жизни не на три группы (короткоживущие, среднеживущие и долгоживущие согласно используемой сегодня [20] условной классификации), а на 10 групп (табл. 1), обозначив тем самым хронологическую синхронизацию $T_{1/2}$ и ключевые события в эволюции природы. Временные пределы каждой из этих групп в предлагаемом в качестве дискуссии классификационном делении определены в значительной мере условно и, возможно, при дальнейших исследованиях могут быть уточнены или более детально обоснованы.

С учетом изложенного можно допустить, что при наложении всей истории эволюции природы и *Homo sapiens* как вида, идущей в обратном направлении, с характером "заселенности" на шкале времени $T_{1/2}$ радионуклидов, в ней должны бы отразиться основные периоды и ключевые события (начало и конец эпох смены видов, их господства, вымирания и т.п.) аналогично периодизации онтогенеза человека. Подобным образом, как уже отмечалось, при представлении процесса биополимеризации как матричного воспроизведения на биологическом уровне элементов структуры химической формы организации материи, идущем в обратном направлении, пришли к заключению [19] о возможности построения количественной модели происхождения жизни. Такие отражения [17, 19], на наш взгляд, следовало бы рассматривать не как исключение или совпадение, а как неотъемлемую часть феноменологических свойств пространства-времени.

73

Таблица 1. Классификация нуклидов по продолжительности жизни

Название группы	Символ группы	Интервал значений $T_{1/2}$ на шкале времени, с
Нестабильные (*)	НС	меньше 10^{-22}
Ультракоткороткоживущие	УК	10^{-9} - 10^0

Короткоживущие	КЖ	$1,5 \cdot 10^0 - 7,8 \cdot 10^5$
Инфракороткоживущие	ИК	$7,8 \cdot 10^5 - 3,5 \cdot 10^6$
Среднеживущие	СЖ	$3,5 \cdot 10^6 - 3,5 \cdot 10^8$
Долгоживущие	ДЖ	$3,5 \cdot 10^8 - 6,4 \cdot 10^{10}$
Инфрадолгоживущие	ИД	$6,4 \cdot 10^{10} - 2,1 \cdot 10^{15}$
Вековые (**)	ВЖ	$2,1 \cdot 10^{15} - 6,0 \cdot 10^{17}$
Протонуклиды (**)	ПН	$10^{18} - 10^{26}$
Стабильные	СТ	больше 10^{26}

(*) - Предполагается между УК и НС выделить подгруппу "запороговых" (ЗН) радионуклидов для которых $T_{1/2}$ находятся в пределах времен протекания надбыстрых процессов, характерных для микромира.

(**) - выделены радионуклиды с $T_{1/2}$ соизмеримых с периодами вековой геохронологии к эволюции макромира Вселенной.

Сравнение ключевых этапов в эволюции природы (и человека, в частности) с характером "заселенности" и других участков шкалы $T_{1/2}$ также подтверждает выявленную закономерность. Выбор точки отсчета, для наложения ключевых событий эволюционной истории осуществлен при следующем допущении. Предположим, что Земля от начала своего образования, (примерно 4,5 млрд. лет тому назад) или Вселенная от времени Большого Взрыва (примерно 16 млрд. лет тому назад) [4, 9, 30, 31] в процессе эволюции не могли не испытывать синхронизации ключевых этапов с $T_{1/2}$ распадающихся радионуклидов, следовательно, и корреляции событий с характером их распределения по величине $T_{1/2}$. Далее, поскольку образование Земли и зарождение жизни неразделимо (согласно В.И. Вернадскому, жизнь как планетарное явление [5]), то следует считать, что события берут начало от соответствующих "заселенных уровней" шкалы $T_{1/2}$. Такие точки на "радионуклидной шкале", близкие к возрасту Земли и Вселенной, соответствуют "заселениям" ${}^{92}\text{U}^{238}$ с $T_{1/2}=4,47 \cdot 10^9$ и ${}^{90}\text{Th}^{232}$ с $T_{1/2}=1,41 \cdot 10^{10}$ лет [26, 27]. С учетом последнего, начиная события эволюционной истории, как по циферблату в обратном направлении, обнаруживаем совпадение "заселенностей" с хронологией ключевых событий в эволюции природы.

Анализируя полученные результаты, приходим к математической форме описания подобного ряда распределения событий:

$$f(m) = e \cdot 10^n \cdot 2^m, \quad (4)$$

где e - основание натурального логарифма, n - принимает дискретные значения от 0 до 10, m - величина шага от экстремума "истинной" функции распределения, принимающая значения -1, 0, +1, соответственно для событий f_- , f_0 и f_+ при заданном значении $n=0, 1, 2, \dots, 10$. Подтверждение выполнения условий (4) представлены в табл. 2. Однако из условия (4) и с учетом изложенного выше, пока трудно определить причину истинной взаимосвязи этапов эволюционных процессов в живых системах с характером распределения радионуклидов по их продолжительности жизни ($T_{1/2}$). Но при этом ясно, что выявленные закономерности и периодическое проявление реакций организмов человека и животных на действие ионизирующего излучения [2, 5, 7, 14] не исключают,

74

Таблица 2. Сопоставление хронологии известных ключевых этапов эволюции природы [5, 9, 11, 17, 18, 29-32] со значениями, предлагаемых для их расчета функций распределения

Основная характеристика этапа	Время от начала события, лет	Значения функции (4)		
		f_-	f_0	f_+
Период жизни Галактик	20-30 млрд.	$2,7 \cdot 10^{10}$		
Большой Взрыв, образование Вселенной	около 16 млрд.	$1,4 \cdot 10^{10}$		
Образование Солнечной системы	$5,2 \pm 0,1$ млрд.			$5,4 \cdot 10^9$
Переход от примитивных к многоклеточным формам жизни	$2,7 \pm 0,1$ млрд.		$2,7 \cdot 10^9$	
Всплеск скелетных форм	около 1,5 млрд.	$1,4 \cdot 10^9$		
Древнейшие корни млекопитающих (<i>Gomura</i>)	около 600 млн.			$5,4 \cdot 10^8$
?	-		$2,7 \cdot 10^8$	
?	-	$1,4 \cdot 10^8$		
Смена эры динозавров на эру млекопитающих	около 60 млн.			$5,4 \cdot 10^7$
Разделение линий <i>Primate</i> - <i>Homi</i>	26-28 млн.		$2,7 \cdot 10^7$	
Появление <i>Australopithecinae</i>	10-20 млн.	$1,4 \cdot 10^7$		
Появление <i>Gen. Paranthropus</i>				$5,4 \cdot 10^6$
Переход от животного к человеку - <i>Hominidae</i> (расчет по изменениям в генетическом коде)	2,7 млн.		$2,7 \cdot 10^6$	
Появление <i>Homo erectus</i>	1,2-1,5 млн.	$1,4 \cdot 10^5$		
Эпоха пещерного человека	около 500 тыс.			$5,4 \cdot 10^5$
Разделение линий <i>Homo erectus</i> и <i>Hominidae</i> , ведущих к <i>Homo sapiens</i>	220-230 тыс.		$2,7 \cdot 10^5$	
	-	$1,4 \cdot 10^5$		
Начало эры <i>Homo sapiens</i>	около 50 тыс.			$5,4 \cdot 10^4$
Появление следов всех основных веток <i>Homo sapiens</i>	25-30 тыс.		$2,7 \cdot 10^4$	
Ледниковый период, смена господства пещерного человека на господство <i>Homo sapiens</i>	11-14 тыс.	$1,4 \cdot 10^4$		
Начало эры цивилизаций	5,5 тыс.			$5,4 \cdot 10^3$
Период обновления цивилизаций (условно)	2,7 тыс.		$2,7 \cdot 10^3$	
?	-	$1,4 \cdot 10^3$		
?	-			$5,4 \cdot 10^2$
Период обновления империй (условно)	270	-	$2,7 \cdot 10^3$	-
Совпадение с основными оптимумами периодизации онтогенеза человека [29]	120 ± 20	$1,4 \cdot 10^2$		
	55-60			$5,4 \cdot 10^1$
	22-35		$2,7 \cdot 10^1$	
	12-16	$1,4 \cdot 10^1$		
	4-7			$5,4 \cdot 10^0$
	1,5-3,0		$2,7 \cdot 10^0$	
	0,75-1,49	$1,4 \cdot 10^0$		

как ни парадоксально это звучит, и "созидательной роли" радионуклидов "молодых" изобарных цепочек. Очевидно, в определении результирующего эффекта важную роль играет суммирование энергетических барьеров взаимодействующих систем, величина которого определяет: будет ли приобретен и развит иммунитет - "созидательная роль", или снижен и потерян иммунитет при накоплении критических деформаций (начало спонтанных процессов) - "разрушительная роль" радионуклидов.

В заключение отметим, как показывают результаты исследований, функция распределения ключевых событий эволюции экосистем и природы в целом,

75

представленных в обратном направлении, сводится к одному и тому же виду степенной зависимости, как и описание явления радиоактивного распада нуклидов: $f(x) = \text{const} A \cdot 2^{-x}$, где x - показатель, характеризующий темп и этапный уровень развития события. Отсюда напрашивается вывод, что загрязнение окружающей среды "молодыми" изобарными цепочками распада (с нарушенным вековым равновесием) вследствие аварий на атомных электростанциях в отдаленных последствиях неизбежно должно вызывать генетические изменения, предопределяющие дальнейшее направление эволюции экосистем. Причем последствия такого загрязнения должны существенно отличаться от последствий, вызванных воздействием нуклидов из природных радиоактивных рядов, находящихся в вековом равновесии. Поэтому радиоактивность выбросов тепловых электростанций, представленная природными радионуклидами звездного происхождения, не адекватна радиоактивным выбросам атомных электростанций, которые представлены "молодыми" радионуклидами с нарушенным вековым равновесием в их изобарных цепочках.

1. *Климатические и биологические последствия ядерной войны* / Под ред. Е.П. Велихова. - М.: Наука, 1987. - 289 с.
 2. *Ярмоненко С.П.* Радиобиологи человека и животных. - М.: Высш. шк., 1988. - 424 с.
 3. *Радиогеохимия в зоне влияния Чернобыльской АЭС* / Е.В. Саботович, Г.М. Бондаренко, Ю.А. Ольховик и др. - Киев: Наук. думка, 1992. - 146 с.
 4. *Природные изотопы гидросферы* / В.М. Ферронский, В.Т. Дубинчук, В.А. Поляков и др. - М.: Недра, 1975. - 280 с.
 5. *Вернадский В.И.* Химическое строение биосферы Земли и её окружения. - М.: Наука, 1987. - 340 с.
 6. *Радияция. Дозы, эффекты, риск*. - М.: Мир, 1989. - 79 с.
 7. *Биологические эффекты при длительном поступлении радионуклидов* / В.В. Борисова, Т.М. Воеводина, А.В. Федорова, Н.Г. Яковлева. - М.: Энергоиздат, 1988. - 168 с.
 8. *Зельдович Л.Б.* Избранные груды: Частицы, ядра, Вселенная. - М.: Наука, 1985. - 464 с.
 9. *Шкловский И. С.* Вселенная, жизнь, разум / Под ред. Н.С. Кардашева и В.И. Мороза. - М.: Наука, 1972. - 188 с.
 10. *Фоке Р.* Энергия и эволюция: жизни на Земле. - М.: Мир, 1992. - 216 с.
 11. *Терьяр де Шарден П.* Феномен человека. - М.: Наука, 1987. - 240 с.
 12. *Скоробогатов Г.А.* Больцмановское кинетическое уравнение от атомов до Вселенной // Химия - традиционная и парадоксальная / Д.К. Ступин, М.К. Хрипун, Г.А. Скоробогатов и др. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1985. - С. 289-311.
 13. *Богданов Р.В.* Судьба дочерного урана // Химия - традиционная и парадоксальная / Д.К. Ступин, М.К. Хрипун, Г.А. Скоробогатов и др. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1985. - С. 289-311.
 14. *Вельховер С.Т.* Микробы и факторы радиации // Тр. Татарского НИИ теорет. и клинич. медицины. - Казань. - 1936. - Вып. 3. - С. 23-30.
 15. *Максин В.И., Стандритчук О.З.* Некоторые аспекты очистки воды от радиоактивных элементов // Химия и технология воды. - 1992. - 14, № 15. - С. 128-145.
 16. *Максин В.И., Стандритчук О.З.* Нарушение векового равновесия изотопов в биосфере с позиций экологии // Проблемы экологии и пути их решения: Материалы научно-практ. конф., Киев 24-25 апр. 1991 г. Киев: Изд. Военной Академии ПВО и СВ, 1991. - С. 106-107.
 17. *Стандритчук О.З., Максин В. И.* Периодизация филогенеза и онтогенеза и распределение радионуклидов по периодам полураспада на единой шкале времени // Там же. - С. 108-109.
- 76
18. *Бернал Д.Д.* Происхождение жизни. - М.: Мир, 1969. - 351 с.
 19. *Голубев И. С.* Минеральные кристаллы внутри организмов и их роль в происхождении жизни // Журн. общ. биологии. - 1987. - 48, № 6. - С. 784-806.
 20. *Ядерная технология* / В.П. Шведов, В.М. Седов, Н.Л. Рыбальченко, И.И. Власов. - М.: Атомиздат, 1979. - 336 с.
 21. *Москалев Ю.И.* Минеральный обмен. - М.: Наука, 1985. - 288 с.
 22. *Романенко В.Д.* Физиология кальциевого обмена. - Киев: Наук. думка, 1985. - 180 с.
 23. *Виноградов А.П.* Основные закономерности в распределении микроэлементов между растениями и средой // Микроэлементы в жизни растений и животных. - М.: Изд-во АН СССР, 1952. - С. 321 - 333.
 24. *Покатилов Ю.Г.* Биогеохимия микроэлементов и эндемические болезни в Баргузинской котловине (Забайкалье). - Новосибирск: Наука, 1983. - 166 с.
 25. *Гусев Н.С., Дмитриев П.Л.* Радиоактивные цепочки; Справочник. - М.: Атомиздат, 1978. - 88 с.
 26. *Таблицы физических величин. Справочник* / Под ред. И.К. Кикоина. - М.: Атомиздат, 1976. - 1008 с.

27. *Семенишин В.И.* Периодическая система химических элементов Д.И. Менделеева. - М.: Химия, 1972. - 188 с.
28. *Смирнова Н.С., Соловьева В.С.* Биологический возраст человека. - М.: Знание, 1986. - 64 с.
29. *Гаврилов В. П.* Путешествие в прошлое Земли. - М.: Недра, 1987. - 144 с.
30. *Розанов А.Ю.* Что произошло 600 миллионов лет назад? - М.: Наука, 1986. - 95 с.
31. *Холлчер В.* Человек в научной картине мира. - М.: Прогресс, 1971. - 432 с.

Институт коллоидной химии и химии воды им. А.В. Думанского НАН Украины, Киев
Поступила 15.03.95

УДК 621.039.743

О. Л. Кедровский, В. М. Мельниченко

ЛОКАЛИЗАЦИЯ НИЗКО- И СРЕДНЕ АКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ГЛИНИСТЫХ ЗАЛЕЖАХ

Захоронение (хранение) радиоактивных отходов является одной из актуальных проблем Украины. Предлагается один из способов сооружения и обустройства могильников РАО средней и низкой активности, располагаемых в глинистых залежах. Могильник представляет собой шахтный ствол или скважину большого диаметра, пройденные бурением и заполненные после загрузки специальным герметизирующим раствором.

В тридцатикилометровой зоне отчуждения Чернобыльской АЭС сосредоточены основные объемы радиоактивных отходов Украины (95-97 % их общего количества). Это отходы чернобыльского (аварийного) происхождения, в том числе объекта "Укрытие", связанные с деятельностью атомной энергетики. В основном эти отходы относятся к классу неперерабатываемых перед направлением на длительное хранение или захоронение (строительные конструкции, зараженный грунт, бетонный щебень и др.). Технически и экономически нецелесообразно направлять подобные отходы в модульные секции единого центра переработки и захоронения РАО. На наш взгляд, необходим поиск более дешевых и полностью надежных способов захоронения РАО.

Один из таких способов - захоронение в геофизических формациях, в частности глинах, для чего в Зоне отчуждения имеются благоприятные условия, например в районе с. Чистогаловка.

Идея экологически безопасной локализации низко- и среднеактивных отходов (НАО и САО) заключается в следующем: помещение РАО в незакрепленную вертикальную

© О. Л. Кедровский, В. М. Мельниченко, 1996

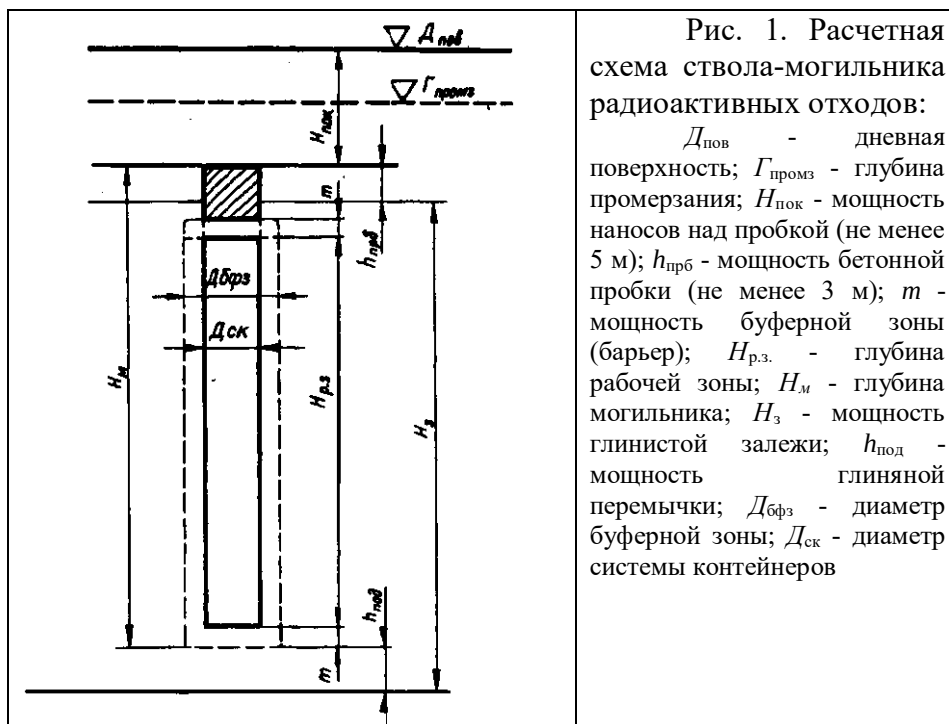
77

горную выработку, сооруженную в глинистой залежи, которая обладает достаточно высокими сорбционными свойствами, ограничивающими возможность миграции радионуклидов за пределы хранилища. Размеры буферной зоны зависят от поглощающей способности среды, причем миграция отдельных радионуклидов рассматривается как функция их коэффициента распределения в породах и времени полураспада.

Предлагается технология захоронения радиоактивных отходов низкой и средней активности в шахтных стволах, скважинах большого диаметра, пройденных в глинах.

Буровая установка для бурения в глинах на глубину 70-100 м и диаметром до 5-6 м обычно размещается на специальной передвижной платформе, установленной на рельсовую колею с целью сооружена нескольких выработок в пределах одной строительной площадки. Эта же колея используется и для установки мостового крана, который снимает контейнеры с радиоактивными отходами, перемещает их по фронту работ и опускает в хранилище.

Проходка без крепления стенок ствола осуществляется за счет использования тяжелого бурового раствора. Только в верхней, наиболее неустойчивой, части ствола (форшахта) на глубину до 10 м возводится легкое металлическое крепление из листа толщиной 10 мм. В отдельных случаях, когда буровой раствор не обеспечивает сохранение устойчивости стенок, ствол крепят на всю глубину. Глубина ствола определится мощностью глинистой формации и расчетом по условию устойчивости стенок с учетом деформационных свойств и структурных особенностей пород, естественного напряженного состояния массива и противодействия бурового раствора. Расчетная схема хранилища (могильника) радиоактивных отходов в глинистой формации приведена на рис. 1.



На днище ствола укладывается бетонная подушка, которая служит основанием для установки первого яруса пакета контейнеров. Эти пакеты с радиоактивными отходами, заключенные в обечайку, доставляются к стволу контейнеровозами и устанавливаются специальным подъемно-транспортным устройством, например мостовым краном. После установки пакетов первого яруса по специальному трубопроводу подается герметизирующая смесь из бетонитового порошка и расширяющегося цемента,

78

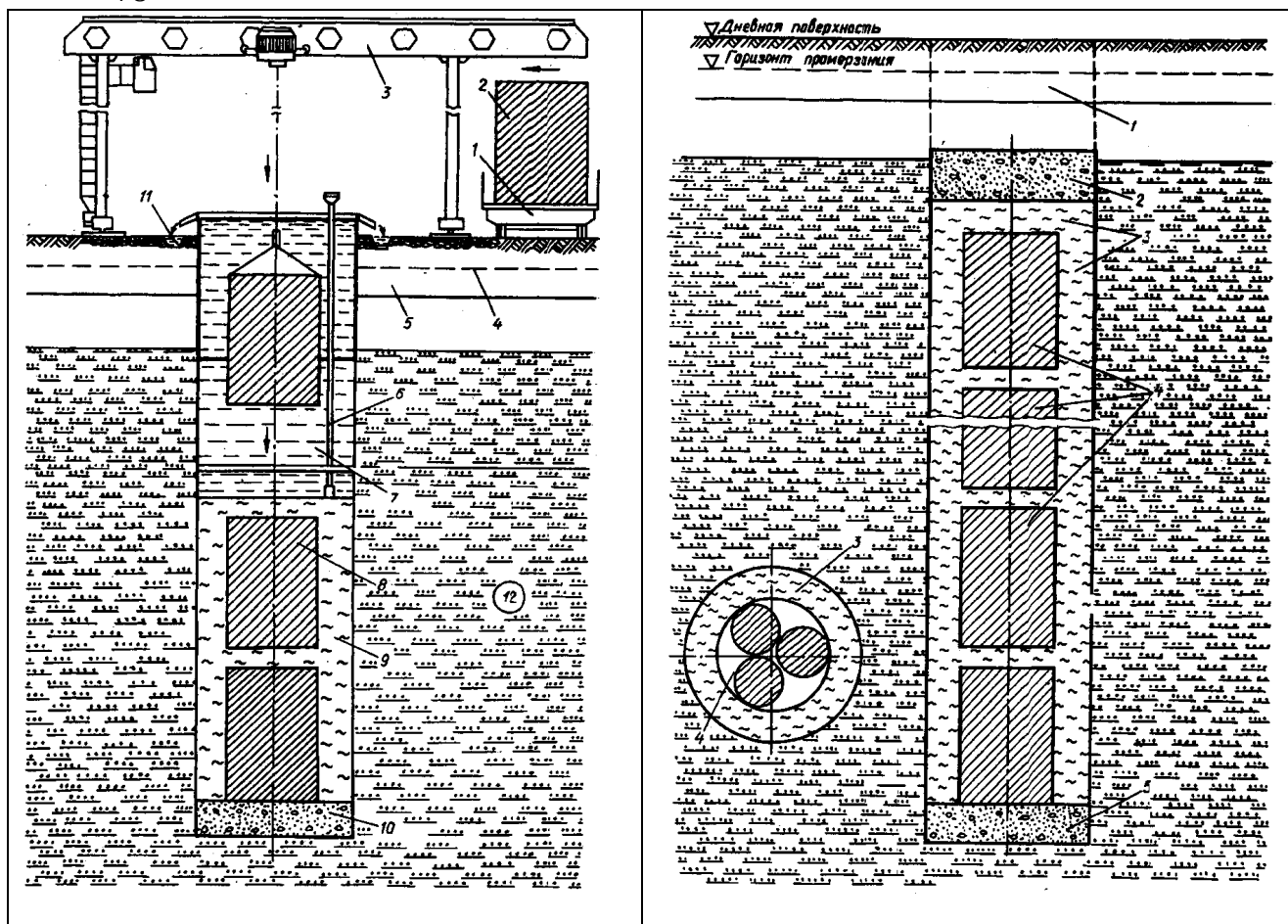


Рис. 2. Схема загрузки ствола-могильника: 1 - платформа для доставки пакетов с РАО; 2 - пакет РАО; 3 - мостовой кран; 4 - горизонт промерзания; 5 - осадочные породы; 6 - труба для подачи герметизирующего раствора; 7 - буровой раствор; 8 - изолированный пакет с РАО; 9 - буферная зона (герметизирующий раствор); 10 - бетонная подушка; 11 - кольцевой сборник бурового раствора; 12 - глинистая залежь	Рис. 3. Схема заполненного ствола-могильника: 1 - осадочные породы; 2 - бетонная плита перекрытия; 3 - буферная зона (герметизирующий раствор); 4 - пакеты с контейнерами РАО; 5 - бетонная подушка
---	---

причем в качестве жидкой фазы заполняющей смеси используется буровой раствор. Эта смесь заполняет пространство между пакетами и незакрепленными стенками ствола, а также между пакетами с отходами. Когда герметизирующая смесь заполнит все пустоты на высоту контейнера, обечайку поднимают на уровень следующего яруса и все операции повторяются. Вытесняемый буровой раствор поступает в кольцевой сборник, а оттуда - в специальную емкость (рис. 2).

79

Ствол-могильник после заполнения пакетами с контейнерами РАО герметизируют. Верхний уровень рабочей зоны - бетонное перекрытие - ограничивается горизонтом сезонного промерзания толщи пород и не доходит до него на величину, определяемую расчетом по условиям проницаемости герметизирующей перемычки. Перед тем как установить герметизирующую перемычку вокруг ствола, производят выемку грунта на глубину 1-3 м и по горизонтали на 2-4 м больше диаметра ствола. Затем демонтируют металлическое кольцо, которое крепило устье ствола. Обработавшийся котлован заполняют глиной и сверху засыпают грунтом. По завершению этих работ территорию рабочего участка

80

планируют и в дальнейшем она может быть использована для сельскохозяйственных работ (рис. 3). В ближайшее время планируется опытная проверка технологии захоронения средне- и низкоактивных отходов в глинистых отложениях Подмосквья.

Аналогичную технологию можно применять для захоронения нерадиоактивных токсичных и высокотоксичных отходов.

НПО "Радон", Москва;
НТЦ КОРО Минчернобыля Украины, Желтые Воды
Поступила 06.05.96

УДК 450.424.4

В. А. Кожанов, Н. И. Проскура, Ю. В. Шулепов, В. В. Маляренко **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ИЗ "ГОРЯЧИХ" ЧАСТИЦ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ**

Предложен метод определения коэффициента внутренней диффузии радионуклидов по результатам экспериментов по кинетике их выщелачивания из индивидуальных горячих частиц. Методика может быть использована для временных интервалов (50-380 сут.) начального периода наблюдений за процессом выщелачивания радионуклидов из образцов горячих частиц различных почв.

Порядок вычисленных коэффициентов внутренней диффузии для ^{137}Cs – $n=10^{-20}-10^{-21}$ см²/с, ^{90}Sr – $n=10^{19}$ см²/с.

Современный период миграции радионуклидов (РН) в большинстве почв, загрязненных в результате аварии на ЧАЭС, характеризуется поступлением подвижных форм радионуклидов из разлагающихся (выщелачивающихся) "горячих" частиц.

В работе [1], продолжением которой является данная публикация, согласно представленным там кинетическим выражениям для процесса выщелачивания "горячих" частиц, определены кинетические параметры по опубликованным в литературе экспериментальным данным.

В качестве источников экспериментального материала по выщелачиванию выбраны работы, в которых представлены результаты наблюдений за процессами выщелачивания и характеристики почв [2], методика реализации эксперимента [3], результаты изучения радионуклидного и вещественного состава "горячих" (суперактивных) частиц [4].

При проведении расчетов взяты "горячие" частицы, принадлежащие к трем видам почв: дерново-слабоподзолистая глеевая супесчаная (проба 270/3-1), дерново-подзолистая супесчаная (проба 270/3-2) и торфяно-болотная на водоледниковых отложениях (проба 270/3-3). Методика эксперимента состояла в том, что авторы работ [2, 3] брали навеску почвы, обрабатывали ее дистиллированной водой в аппарате Сокслета, первый результат отбрасывали и фиксировали время контакта, затем через определенный промежуток времени (1,5-2 мес.) обработку повторяли. Результаты наблюдений за временем выщелачивания (t) и значения параметра завершенности процесса ($F(t)$), взятые из [2], приведены в табл. 1 к 2. На основании этих данных мы считали коэффициенты внутренней диффузии радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в "горячих" частицах, взятых из указанных ранее типов почв. Используя первый член выражения (26) работы [1] (при $\rho=0$) для степени выщелачивания при внутридиффузной

© В. А. Кожанов, Н. И. Проскура, Ю. В. Шулепов, В. В. Маляренко, 1996

81

кинетики на начальном участке процесса выщелачивания в нерегулярном режиме, получаем

$$F(t) \approx 6\sqrt{\frac{\bar{D}t}{\pi R^2}}, \quad F(t) \ll 1, \quad (1)$$

где $\bar{D}$ - коэффициент внутренней диффузии радионуклида в частице; R - эквивалентный радиус частицы; t - время выщелачивания.

Из числовых значений степени завершенности процесса ($F(t) \leq 1$), приведенных в табл. 1 и 2, следует, что временные интервалы, используемые для оценки коэффициентов внутренней диффузии (50-380 сут.), являются начальными участками процесса выщелачивания.

Применение для этих экспериментальных данных выражения степени выщелачивания, полученного при внутридиффузной кинетике в регулярном режиме (формула (14) из [1], см. также [2, 8]),

$$F(t) = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 \bar{D}t}{R^2}\right) \frac{1}{n^2} \quad (2)$$

не корректно, так как эта формула не определяет поведение процесса выщелачивания при $F(t) \ll 1$.

Результаты расчетов коэффициентов внутренней диффузии, исходя из формулы (1), приведены в табл. 1 и 2 для каждого из временных интервалов и типов почв.

Характерным в поведении коэффициентов диффузии является меньшее значение коэффициента диффузии для более крупного изотопа ^{137}Cs ($n=10^{-20}$ - $n=10^{-21}$ см²/с) по сравнению с коэффициентом диффузии ^{90}Sr ($n=10^{-19}$ см²/с) для каждого из типов почв и временных интервалов (при расчетах коэффициентов диффузии эквивалентный радиус частиц принят равным 1,0 мкм, в соответствии с [2]).

Коэффициенты диффузии слабо зависят от типа почв, в которых находились частицы. Так, наименьшие коэффициенты диффузии изотопа ^{137}Cs для всех, временных интервалов на порядок меньше для дерново-слабоподзолистых почв. По возрастанию коэффициента диффузии изотопа ^{137}Cs почвы можно расположить в ряд: дерново-слабоподзолистая супесчаная (проба 270/3-1) < дерново-подзолистая супесчаная (проба 270/3-2) < торфяно-болотная на водоледниковых отложениях (проба 270/3-3). Такого же типа ранжирование почв по величине внутреннего коэффициента диффузии для изотопа ^{90}Sr приводит, к аналогичному ряду, т.е. ряды ранжирования почв по возрастанию внутреннего коэффициента диффузии для изотопов ^{137}Cs и совпадают.

Влияние типа почвы на величину коэффициента внутренней диффузии можно объяснить образованием более агрессивной внутрипоровой и межзерновой (межчастичной) влаги при наибольшем коэффициенте (торфяно-болотная почва) или же за счет различия в строении и составе частиц, что подтверждено в [4-7].

Полученные значения коэффициентов внутренней диффузии радионуклидов в индивидуальных частицах являются малыми. Это можно объяснить плохой окристаллизованностью частицы, наличием в ней минералов и примесей. Оплавленность частиц также не способствует выходу ионов в поверхностный слой для ионного обмена с окружающим частицу раствором.

Отметим еще один фактор, приводящий к столь малым значениям коэффициента диффузии. Фактически исследовался кинетический режим в нерегулярной области на начальном участке процесса выщелачивания при очень малых значениях степени завершенности процесса выщелачивания,

Таблица 1. Определение коэффициентов внутренней диффузии изотопов ^{137}Cs "горячих" частиц различных почв

Время выщелачивания 10^{-6} , с	Почва					
	Дерново-слабоподзолистая (проба 270/3-1)		Дерновая (проба 270/3-2)		Торфяно-болотная (проба 270/3-3)	
	Степень завершенности процесса, $F(t)$	Коэффициент внутренней диффузии 10^{21} , $\text{см}^2/\text{с}$	Степень завершенности процесса, $F(t)$	Коэффициент внутренней диффузии 10^{21} , $\text{см}^2/\text{с}$	Степень завершенности процесса, $F(t)$	Коэффициент внутренней диффузии 10^{21} , $\text{см}^2/\text{с}$
4,3	0,0026	1,37	0,002	0,08	0,0025	0,127
10,0	0,0066	3,80	0,011	1,06	0,0110	1,050
15,0	0,096	5,36	0,018	1,88	0,0230	3,080
19,0	0,0130	7,76	0,022	2,22	0,0280	3,600
28,5	0,0150	6,89	0,025	1,91	0,0360	3,970
33,0	0,0170	7,64	0,027	1,94	0,0370	3,620
Среднее значение		5,47		1,51		2,570

Таблица 2. Определение коэффициентов внутренней диффузии изотопов ^{90}Sr "горячих" частиц различных почв

Время выщелачивания 10^{-6} , с	Почва					
	Дерново-слабоподзолистая (проба 270/3-1)		Дерновая (проба 270/3-2)		Торфяно-болотная (проба 270/3-3)	
	Степень завершенности процесса, $F(t)$	Коэффициент внутренней диффузии 10^{19} , $\text{см}^2/\text{с}$	Степень завершенности процесса, $F(t)$	Коэффициент внутренней диффузии 10^{19} , $\text{см}^2/\text{с}$	Степень завершенности процесса, $F(t)$	Коэффициент внутренней диффузии 10^{19} , $\text{см}^2/\text{с}$
4,3	0,021	0,90	0,027	1,48	0,031	1,95
10,0	0,037	1,19	0,040	1,40	0,052	2,36
15,0	0,044	1,13	0,051	1,51	0,070	2,85
19,0	0,059	1,60	0,081	3,01	0,082	3,64
28,5	0,091	2,54	0,101	3,12	0,145	6,44
33,0	0,100	2,64	0,120	3,81	0,160	6,77
Среднее значение		1,67		2,39		4,00

где вопросы точности эксперимента и его воспроизводимости являются главными и существенно сказываются на результатах вычислений. Можно предположить, что механизм процесса выщелачивания на этом временном отрезке несколько отличается (разрушение внешней оболочки частицы, не идентичной построению внутренней области) от такового в регулярном режиме выщелачивания ($F(t) \ll 1$). Это положение подтверждается в большинстве рассмотренных случаев (см. табл. 1 и 2) увеличением коэффициента внутренней диффузии с возрастанием времени протекания процесса. Однако такое поведение коэффициентов диффузии можно связать и с уменьшением размеров (диаметров) частиц в процессе выщелачивания, которое не учитывается при расчетах.

Использование полученных результатов для прогноза радиационной обстановки в реальных условиях должно быть связано с пониманием отличий трансформации частиц в лабораторных и природных условиях (влияние циклов замораживания-оттаивания, разница температурных режимов, динамика контакта с атмосферными и почвенными водами и др.).

Рассмотрим один важный методический вопрос. Для оценки коэффициента внутренней диффузии мы пользовались кинетическим выражением в предположении контакта выщелачиваемых частиц с постоянно обновляющимся раствором. В лабораторной практике, когда раствор находится в сосуде ограниченного объема, такое предположение не всегда оправдано (см. [1]). Ограниченностью раствора можно пренебречь, если параметр

$$\omega = \frac{\bar{v}K}{v} \ll 1, \quad (3)$$

где K - постоянная Генри линейного участка изотермы; $\bar{v}$, v - соответственно объемы сорбента и раствора (см. [1]). Если параметр K невелик ($K \approx 1$), условие (3) сводится к требованию малости отношения объемов твердой и жидкой фаз в эксперименте ($T:Ж \ll 1$).

Таким образом, показано как непротиворечиво (т.е. не вступая в противоречие с выражениями для кинетики выщелачивания [1]) можно определить кинетические параметры системы (коэффициент диффузии из отдельной частицы). Такого рода исследования необходимы для прогнозирования радиационной обстановки как в почвах, так и в водах зоны аварии и прилегающих территорий.

1. Кожанов В.А., Шулепов Ю.В., Проскура Н.И. Математические модели выщелачивания радионуклидов // Наст. сб. - С. 85-91.
2. Собонович Э.В., Долин В. В. Механизм накопления миграционных форм ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах ближней зоны ЧАЭС // Проблемы Чернобыльской Зоны відчуження. - 1994. - № 1. - С. 55-60.
3. Рыбалко С.И., Скоробагатько Е.П., Долин В.В. Влияние условий эксперимента на степень водного выщелачивания радионуклидов из почв зоны отчуждения ЧАЭС // Там же. - С. 83-87.
4. Бондаренко Г.Н., Долин В.В., Вальтер А.А., Тиханов Э.К. Строение и состав твердофазных носителей активности в почвах зоны отчуждения ЧАЭС // Там же. - 1995. - № 2. - С. 147-152.
5. Синицын В.А., Кулик Д.А., Ходоровский М.С. и др. Компьютерные физико-химические модели растворимости горячих частиц в природных водах 30-км зоны ЧАЭС // НПО "Припять". - Препр. - Киев, 1992. - 48 с.
6. Тепикин В.Е., Рыбалко С. И., Рыбакова Э.А. и др. Диагностика элементарного и фазового состава матрицы "горячих" частиц / НПО "Припять". - Препр. - Киев, 1993. - 19 с.
7. Тепикин В.Е., Рыбалко С.И., Зимин Ю.И. и др. "Горячие" частицы уран-циркониевого состава чернойбыльской аварии. - Препр. - Киев, 1992. - 18 с.
8. Прохоров В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. - М.: Энергоиздат, 1981. - 99 с.

Научно-инженерный центр "Мета", ГСП "Техноцентр", Чернобыль
Поступила 10.05.96

УДК 541.183

В. А. Кожанов, Ю. В. Шулепов, Н. И. Проскура МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВЕННОМ СЛОЕ

Сформулирована задача кинетики выщелачивания радионуклидов из частиц на основании аналогии между процессами выщелачивания и ионного обмена или адсорбции до раствора частичками ионообменника или пористыми частичками. Произведена общая постановка задачи о кинетике сорбции (выщелачивали) частицей в предположении

линейности изотермы адсорбированных молекул (ионов) из объемного раствора. Приведены выражения для функции завершенности процесса диффузии в регулярном и нерегулярном режимах при смешанно-диффузионной кинетике процесса.

Современный этап исследования миграции радионуклидов (РН) в зоне, подвергшейся загрязнению вследствие аварии на ЧАЭС, характеризуется интенсивным проникновением долгоживущих изотопов (особенно ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,246}\text{Pu}$) в почвенные слои и, следовательно, в среду обитания человека. Поэтому исследование выщелачивания РН из частиц, первоначально образовавшихся при аварии на ЧАЭС, занимает ведущее место среди проблем: миграции радионуклидов.

Цель настоящей работы - построение наиболее полной диффузионной модели кинетики выщелачивания РН из твердых частиц с учетом смешанно-диффузионного механизма процесса выщелачивания и при существовании слоя частицы, обогащенного РН. Ограниченность объема раствора также принимается во внимание, что весьма существенно при исследовании процесса выщелачивания в лабораторных условиях.

Под выщелачиванием мы, как обычно [1, 2], понимаем переход РН из объема частицы на ее поверхность, т.е. в состояние, в котором они способны к ионному обмену или реакциям с ионами почвенного раствора или адсорбции на почвенных частицах. Разумеется, скорость этого процесса зависит от значений ряда термодинамических переменных (температуры, давления, концентрации и типа солей почвенного раствора), а также определяется термодинамическими функциями системы (теплотами растворения, смачивания, адсорбции, а также энергиями активации процессов).

В предлагаемой теории процесс выщелачивания описан на основе диффузионной модели. Зависимость кинетических параметров от термодинамических величин определяется термодинамическим состоянием системы.

Общая постановка задачи и вывод основных уравнений. Приведем общую постановку задачи кинетики процесса выщелачивания частицы сферической формы в предположении о линейности соотношения между концентрациями РН в частице $\bar{C}(r)$ и в объеме раствора $C(t)$ [3]:

$$\bar{C} = KC, \quad (1)$$

где K - постоянная Генри; r - радиус слоя поглощения; t - время.

© В. А. Кожанов, Ю. В. Шулепов, Н. И. Проскура, 1996

85

Учет отклонения формы частицы от сферы может быть произведен с помощью коэффициентов формы.

В постановке и решении задачи будем пользоваться известной аналогией между процессами выщелачивания и пропитки (сорбции) частиц.

Действительно, эти два процесса подобны друг другу с той лишь разницей, что количество заполненного вещества (адсорбата) в процессе пропитки соответствует количеству выщелоченного из частицы РН за то же самое время. Таким образом, если мы располагаем решением задачи о кинетике пропитки (сорбции) гранулы РН, то это означает, что результаты решения этой задачи можно использовать для определения количества выщелоченного вещества за время t .

Как уже отмечалось [3], для линейной изотермы (1), решения для каждого из РН раствора становятся независимыми друг от друга.

Рассмотрим задачу о кинетике сорбции какого-либо РН в слое радиуса r сферической поглощающей гранулы радиуса R . Концентрация РН $C(r, t)$ должна подчиняться уравнению диффузии

$$\bar{D}\Delta\bar{C}(r, t) = \frac{\partial\bar{C}(r, t)}{\partial t}, \quad (2)$$

где Δ - лапласиан в сферических координатах пространства зерна сорбента; $\bar{D}$ - коэффициент молекулярной диффузии РН в зерне сорбента.

На поверхности частицы предполагается равенство потоков РН внутри и вне сорбента, а также условие равенства нулю потока РН на внутренней границе поглощающей поверхности радиуса $r=R-l$ (l - толщина сферического слоя поглощающей частицы):

$$\bar{D} \frac{\partial \bar{C}(r, t)}{\partial r} = \bar{D} K \frac{\partial C(r, t)}{\partial r} = \frac{D}{\delta} [C(t) - C(r, t)], \quad r = R; \quad (3)$$

$$\bar{D} \frac{\partial \bar{C}(r, t)}{\partial r} = \bar{D} K \frac{\partial C(r, t)}{\partial r} = 0, \quad r = R - l, \quad (4)$$

где δ - средняя толщина диффузионного слоя обтекаемой частицы; D - коэффициент молекулярной диффузии РН в растворе. Концентрация РН внутри частицы обозначается как функция переменных r, t $C(r, t)$

Концентрация РН в растворе обозначается $C(t)$. Зависимость $C(t)$ от времени требует объяснения. Миграция РН в природных условиях приводит к зависимости концентрации как от времени, так и от пространственных координат. В эксперименте тщательное перемешивание обеспечивает усреднение концентрации по объему, т.е. независимость концентрации от времени. Однако, если адсорбция протекает в ограниченном объеме раствора, возможно изменение средней концентрации РН в растворе из-за поглощения частицами.

В начальный момент времени предполагается, что концентрация РН внутри поглощающей частицы отсутствует:

$$C(r, 0) = 0 \quad (5)$$

Решение кинетической задачи (2) при граничных и начальных условиях (3)-(5) при произвольном значении концентрации РН в растворе $C(t)$ все еще остается достаточно сложным. Для упрощения представим концентрацию $C(r, t)$ при произвольной концентрации РН в объеме $C(t)$ в виде интеграла Дюамеля [4]:

$$C(r, t) = \int_0^t C(r, t - t') \frac{\partial}{\partial t'} \left(\frac{C(t')}{C_0} \right) dt', \quad (6)$$

86

где C_0 - значение концентрации РН в объеме раствора; $C(r, t)$ - решение задачи (2) при граничных условиях (3), (4), в которых $C(t)$ заменено постоянным значением C_0 , и при начальном условии (5).

Для решения уравнения (2) с учетом (1) с граничными и начальными условиями (3)-(5) представим функцию $C(r, t)$ в виде

$$C(r, t) = C_0 \frac{R}{r} \vartheta(r, t), \quad (7)$$

Переходя к безразмерным переменным $y = r/l$, $\tau = \bar{D}t/l^2$, получаем

$$\frac{\partial^2 \vartheta(y, \tau)}{\partial y^2} = \frac{\partial \vartheta(y, \tau)}{\partial \tau}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial y} = Bi \left[1 - \vartheta \left(1 - \frac{1 - \rho}{Bi} \right) \right], \quad y = (1 - \rho)^{-1}; \quad (9)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial y} = \frac{\vartheta}{y}, \quad y = \frac{\rho}{1 - \rho}, \quad \rho = 1 - \frac{l}{R}; \quad (10)$$

$$\vartheta(y, 0) = 0, \quad (11)$$

где $Bi = Dl/(\bar{D}K\delta)$ - диффузионный критерий Био для сферического поглощающего слоя зерна толщиной l , определяющий соотношение вкладов внешней и внутренней диффузии.

Процесс поглощения или выщелачивания частицы характеризуется степенью заполнения (выщелачивания) поглощающего объема, которая может быть определена интегралом

$$F_0(t) = \frac{1}{V} \int_V \frac{C(r, t)}{C_0} dr, \quad (12)$$

$F_0(t)$ - функция степени завершенности процесса заполнения (выщелачивания) частиц; V - объем поглощающего пространства частицы.

В безразмерных переменных функция степени завершенности процесса принимает вид

$$F_0(\tau) = \frac{V(\tau)}{V}, \quad V(\tau) = 4\pi R^3(1-\rho)^2 \int_{\rho(1-\rho)^{-1}}^{(1-\rho)^{-1}} \vartheta(y, \tau) y dy, \quad (13)$$

$$V = \frac{4\pi}{3} R^3(1-\rho^3),$$

где $V(\tau)$ - объем поглощающего пространства частицы, заполненного сорбтивом ко времени τ .

Таким образом, основная проблема в решении задачи - интегрирование уравнения (8) при граничных и начальных условиях (9)-(11). Эта задача решалась многими авторами. Наиболее полное решение задачи кинетики заполнения зерна сорбента из непрерывно обновляющегося раствора постоянной концентрации приведено в [3], т.е. имеется ввиду, что там представлены наиболее полные точные выражения для функции $F_0(\tau)$ как со стороны малых, так и больших τ . Общим в решении задачи, определяемой уравнением (8) с граничными и начальными условиями (9)-(11), является применение преобразования Лапласа по времени с последующим интегрированием полученного уравнения [3].

87

В общем случае единое замкнутое выражение для функции завершенности процесса диффузии $F_0(\tau)$ получить трудно. Полезными в таком случае являются представления о регулярном и нерегулярном режимах кинетики [5]. Первый из них характеризуется большим обобщенным временем течения процесса τ и значительным заполнением объема частицы. Второй, нерегулярный режим, определяется малыми временами течения процесса τ и незначительным заполнением объема частицы. Наряду с этим, важными являются также и представления о характере протекания процессов кинетики: внутридиффузионном ($Bi \rightarrow \infty$) и внешнедиффузионном ($Bi \rightarrow 0$).

В каждом из определенных выше случаев можно получить достаточно простое выражение для функции завершенности процесса диффузии и из сравнения с экспериментальными данными определить кинетические характеристики процесса.

Выражения для функции завершенности процесса диффузии (выщелачивания) в частице. Приведем выражение для функции завершенности процесса диффузии $F_0(\tau)$ для смешанодиффузионной кинетики для регулярного режима при сорбции из непрерывно обновляющегося раствора [3, 5-8]:

$$F_0(\tau) = 1 - \sum_{\mu_n} B_n \exp(-\mu_n^2 \tau), \quad (14)$$

где $B_n = \frac{6Bi^2[\rho^2\mu_n^2 + (1-\rho)^2]}{(1+\rho+\rho^2)\mu_n^2 D_n(\mu_n)}$; μ_n - корень трансцендентного уравнения

$$\mu_n \operatorname{ctg} \mu_n = 1 - \frac{Bi - \rho\mu_n^2}{\rho Bi + (1-\rho)^2}, \quad (15)$$

не равный нулю:

$$D_n(\mu_n) = \rho^2\mu_n^4 + \mu_n^2[\rho^2 Bi(Bi+2\rho-1) + (1-\rho^3)(1-\rho)] + Bi(1-\rho)(Bi-1+\rho) \quad (16)$$

Если поглощающим слоем частицы является сфера радиуса $R(\rho=0)$, то

$$B_n = \frac{6Bi^2}{\mu_n^2[\mu_n^2 + Bi(Bi-1)]}, \quad (17)$$

и уравнение для μ_n

$$\mu_n \operatorname{ctg} \mu_n = 1 - Bi. \quad (18)$$

При регулярном режиме ($\tau \geq 1$) бесконечный экспоненциальный ряд (14) может быть аппроксимирован лишь своим первым членом

$$F_0(\tau) \approx 1 - B_1 \exp(-\mu_1^2 \tau). \quad (19)$$

Для внутридиффузионной кинетики, когда процесс заполнения (выщелачивания) частицы лимитируется диффузией ионов внутри частицы ($Bi \rightarrow \infty$),

$$F_0(t) \approx 1 - \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D t}{R^2}\right), \quad (20)$$

Из сравнения относительной величины выщелоченного РН $F_0(\tau)$ из частицы радиуса R с экспериментальным значением можно определить коэффициент диффузии $\bar{D}$ согласно предположению о внутридиффузионной кинетике выщелачивания.

88

В том же регулярном режиме ($\tau \geq 1$), но уже при внешнелдиффузионной (пленочной) кинетике ($Bi \rightarrow 0$), которая лимитируется миграцией ионов в диффузионной области частицы, выражение для завершенности процесса диффузии $F_0(\tau)$ будет определяться формулой (19) при следующих значениях постоянных:

$$B_1 \approx 1, \quad \mu_1^2 = \frac{3Bi}{1 + \rho + \rho^2}. \quad (21)$$

К настоящему времени при ограниченном объеме раствора решение задачи кинетики в смешанодиффузионной области получено лишь для сферического зерна [9] с коэффициентами перед экспоненциальными множителями

$$B_n = \frac{6(1 + \omega)Bi^2}{\mu_n^2(\mu_n^2 + Bi^2 - Bi + 6\omega Bi) + 9\omega Bi^2(\omega + 1)} \quad (22)$$

и ненулевыми корнями трансцендентного уравнения

$$\mu_n \operatorname{ctg} \mu_n = 1 + \frac{Bi \cdot \mu_n^2}{3\omega Bi - \mu_n^2}, \quad (23)$$

где $\omega = \frac{\bar{V}_K}{V}$ - параметр ограниченности раствора; $\bar{V}, V$ - соответственно объемы сорбента (без учета непоглощающего ядра) и раствора.

Уравнения (22), (23) для внутридиффузионной кинетики $Bi \rightarrow \infty$ переходят в соответствующие уравнения для регулярного режима, а при $\omega \rightarrow 0$ снова превращаются в уравнения смешанодиффузионной кинетики из постоянно обновляющегося раствора для сферы (17), (18).

Определим поведение функции завершенности процесса диффузии $F_0(\tau)$ для смешанодиффузионной кинетики в нерегулярном режиме. Фактически это разложение функции $F_0(\tau)$ в ряд по малым значениям обобщенного времени τ . Для постоянно обновляющегося раствора выражение для $F_0(\tau)$ имеет вид [3, 5]:

$$F_0(\tau) = \frac{Bi^2}{(1 + \rho + \rho^2)(Bi - 1 + \rho)^2} \left\{ 6\sqrt{\frac{\tau}{\pi}} - \frac{3(Bi - 1 + \rho)(1 - \rho)\tau}{Bi} - \right. \\ \left. - \frac{3}{Bi - 1 + \rho} \left[1 - \exp\left((Bi - 1 + \rho)^2\tau\right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \operatorname{erfc}\left((Bi - 1 + \rho)\sqrt{\tau}\right) \right] \right\} + O\left(\tau^{3/2}e^{-1/\tau}\right), \quad (24)$$

где $\operatorname{erfc} z = 1 - \operatorname{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty e^{-u^2} du$. Точность приведенного выражения порядка $\tau^{3/2}e^{-1/\tau}$.

При малых значениях Bi удобно использовать другое тождественное разложение [3, 5]:

$$F_0(\tau) = \frac{3Bi\tau}{1 + \rho + \rho^2} \left\{ 1 - Bi \sum_{n=0}^{\infty} (Bi - 1 + \rho)^{2n} \tau^n \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{2^{n+2}}{1 \cdot 3 \cdots (2n + 3)} \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} - \frac{Bi - 1 + \rho}{(n + 2)!} \right) \right\} + O\left(\tau^3 e^{-1/\tau} Bi^2\right). \quad (25)$$

Точность приведенного выражения $\tau^3 e^{-1/\tau} Bi^2$.

89

Наиболее простые выражения функция $F_0(\tau)$ принимает в предельных случаях внешней и внутренней диффузии:

$$F_0(\tau) = \begin{cases} \frac{3Bi\tau}{1+\rho+\rho^2} \left(1 - \frac{4Bi}{3\sqrt{\pi}}\tau^{1/2}\right), & Bi\sqrt{\tau} \ll 1, \sqrt{\tau} \ll 1, \\ \frac{3}{1+\rho+\rho^2} \left(2\sqrt{\frac{\tau}{\pi}} - (1-\rho)\tau\right), & Bi\sqrt{\tau} \gg 1, \sqrt{\tau} \ll 1. \end{cases} \quad (26)$$

В том же рассматриваемом нами нерегулярном режиме с учетом ограниченности объема раствора выражение для $F_0(\tau)$ [5] следующее:

$$F_0(\tau) = 3(\omega + 1)Bi\tau \left(1 - \frac{4Bi}{3\sqrt{\pi}}\tau^{1/2}\right), \quad Bi\sqrt{\tau} \ll 1, \sqrt{\tau} \ll 1. \quad (27)$$

Приведенные выражения для функции завершенности процесса диффузии (выщелачивания) в частицу позволяют исследовать кинетику заполнения (выщелачивания) частицы как при регулярном ($\tau \geq 1$), так и нерегулярном ($\tau \ll 1$) режимах. В предельных случаях внутренней и внешней диффузии выражения для $F_0(\tau)$ наиболее простые.

Обсуждение результатов и выводы. Основная цель данной работы - получение выражений для описания кинетики сорбции (выщелачивания) частицей ионов или молекул из объема раствора при разнообразных физико-химических условиях течения процесса. Так как выражения для функции завершенности процесса диффузии $F_0(\tau)$, полученные при регулярном режиме ($\tau \geq 1$), не позволяют определить параметры при достаточно малых обобщенных временах ($\tau \rightarrow 0$), представлены также выражения для функции завершенности процесса диффузии в нерегулярном режиме. Использование этих различных асимптотических выражений для основной функции, определяющей кинетику адсорбции (выщелачивания), - функции степени завершенности процесса диффузии - позволит достаточно точно на основе сравнения относительной величины выщелоченного РН $F_0(\tau)$ с экспериментальным значением определить кинетические постоянные.

В процессе такого сравнения важен учет полидисперсности системы, т.е. присутствие в эксперименте частиц различных размеров. Наиболее прямой путь учета полидисперсности - суммирование выражения для функции завершенности процесса по функции распределения частиц по размерам.

Таким образом, сформулирована задача кинетики выщелачивания (или экстрагирования) и адсорбции или ионного обмена пористыми частицами или гранулами ионообменника из раствора.

Произведена общая постановка задачи о кинетике сорбции поглощающей частицы в предположении о линейной связи между концентрацией поглощаемой компоненты раствора и находящейся с ней в равновесии на поверхности частицы.

Приведены выражения для основной функции кинетики поглощения РН частицей - функции завершенности процесса диффузии $F_0(\tau)$ - в регулярном ($\tau \geq 1$) и нерегулярном режимах при смешанодиффузионной кинетике процесса,

Определены пути сравнения теоретически рассчитанной величины выщелоченного РН $F_0(\tau)$ из частицы с его экспериментальным значением, а также способы расчета кинетических параметров.

1. Романов П.Г., Курочкина М.И. Экстрагирование из твердых материалов. - Л.: Химия, 1983. - 256 с.

2. Прохоров В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. - М.: Энергоиздат, 1981. - 99 с.

90

3. Шулепов Ю.В., Кожанов В.А. Решение общей динамической задачи сорбции из многокомпонентного раствора или из смеси газов для линейной, прямоугольной и слаболинейной изотерм // Химия и технология воды. - 1994. - 16, № 3. - С. 227-249.

4. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. - М.; Высш. шк., 1985. - 480 с.

5. Шатаева Л.К., Кузнецова Н.Н., Елькин Г.Э. Карбоксильные катионы в биологии. - Л.: Наука, 1979. - 286 с.

6. Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высш. шк., 1967. - 599 с.

7. Елькин Г.Э., Самсонов Г.В. Кинетика и динамика сорбции ионитами с поверхностным сорбирующим слоем // Иониты и ионный обмен. - Л., 1975. - С. 102-107.

8. Patterson S. The heating or cooling of a solid sphere a well stirred liquid // Proc. Phys. Soc. (London). - 1947. - 59, N 1. - P. 50-58.

9. Ting-Chia-huang, Ku Jen-li. Ion-exchange Kinetics for calcium radiotracers in a bath system // Ind. Eng. Chem. Pond. - 1973. - 12, N 1. - P. 50-59.

УДК 577.4:539.1.074

М. Г. Бузынный

АВАРИЙНЫЙ ВЫБРОС РАДИОУГЛЕРОДА В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС И СВЯЗАННЫЕ С НИМ ПРОБЛЕМЫ

Обобщена информация о радиоуглеродных исследованиях последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Рассмотрены вопросы информативности и практической значимости исследований, а также возможности применения радиоуглеродного метода для ретроспективных исследований, связанных с аварийными газообразными выбросами ЧАЭС.

Одной из компонент выброса радиоактивности в результате аварии на Чернобыльской АЭС был ^{14}C . Как один из наиболее долгоживущих радионуклидов из состава аварийного выброса ЧАЭС ($T_{1/2}=5730$ лет), ^{14}C весьма перспективен для ретроспективных исследований именно благодаря не подверженному последующему разрушению "следу", который остается в окружающей среде. С этим могут быть связаны дальнейшие исследования, направленные на ретроспективное определение аварийных выбросов и соответствующих уровней облучения населения за счет ^{131}I и других радионуклидов [1-3].

Практический интерес обусловлен прежде всего компонентом ^{14}C в составе CO_2 . Нарбатывался (накапливался) ^{14}C в графите во время штатной работы и во время аварии, а затем выбрасывался в окружающую среду в составе аварийных газообразных выбросов и, распространяясь с воздушными массами, усваивался растительностью в составе CO_2 воздуха. Усвоение ^{14}C растительностью формирует "след" в окружающей среде, который дает информацию об интегральном воздействии радиоуглерода из состава CO_2 . Это позволяет вести ретроспективные измерения ^{14}C . Другой компонентой ^{14}C является его выброс из аварийного блока ЧАЭС и перенос в окружающую среду в составе пылеобразного графита. Обе компоненты радиоуглерода аварийного выброса (газообразная и пылеаэрозольная)

© М. Г. Бузынный, 1996

91

представляют интерес для ретроспективных исследований. Газообразной компоненте, как более перспективной, уделено в исследованиях значительно большее внимание.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ретроспективные измерения ^{14}C в объектах окружающей среды, обусловленного выбросами во время аварии на ЧАЭС, проводились для оценки диапазона дозовых нагрузок, обусловленных выбросами ^{14}C и корреляционных связей уровня избыточного ^{14}C , накопленного в окружающей среде, с уровнями других радионуклидов, выброшенных в газообразной форме. Для исследований применяли современную технологию на основе жидкостно-сцинтилляционного счета с использованием химического оборудования для синтеза бензола и соответствующей технологии, разработанных в [4, 5]. При работе с пробами каждого годичного кольца сосны во избежание влияния процессов диффузионного обмена смолянистых веществ проводили их экстракцию при помощи спиртобензольной смеси, с последующим обугливанием (по методу, описанному в [6]). В процессе обугливания легколетучие вещества возгонялись и сгорали, т.е. не использовались для получения счетной формы. Поэтому удельная активность углерода определялась в структуре клетчатки, которая была сформирована в соответствующий год и не подвергалась изменению.

Для определения удельной активности ^{14}C в пробах использовали метод жидкостно-сцинтилляционного (ЖС) счета на основе ЖС спектрометра Quantulus 1220TM, производства фирмы Wallac, Финляндия, в сочетании с набором измерительных емкостей - виал объемом 7, 3 и 0,8 мл, выполненных из тефлона [7]. Для подготовки образцов в бензол добавлялись сцинтилляторы: 4 г·л⁻¹ РРО и 0,1 г·л⁻¹ РОРОР. Для всех типов виал выполнена полная процедура стандартизации - калибровки с учетом "гашения" образцов, что обеспечило абсолютную погрешность намерений не выше 2-3 %.

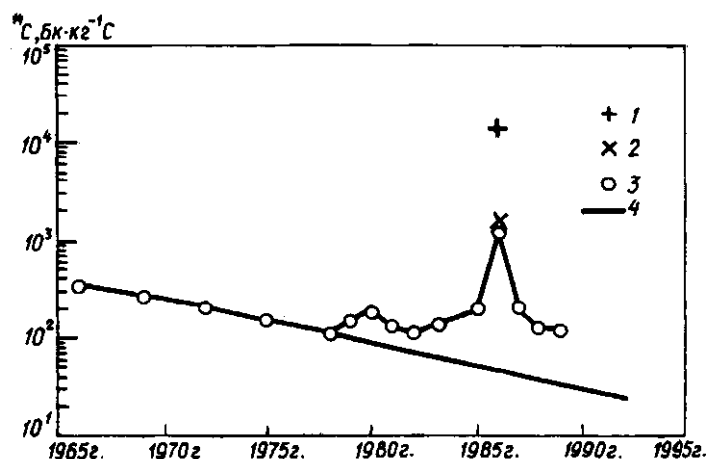
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Газообразные выбросы радиоуглерода. Минимальные выбросы ^{14}C в процессе штатной работы для реакторов типа РБМК-1000 составляют $1000 \text{ ГБк} \cdot \text{ГВт}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, а наработка в графите - $12000 \text{ ГБк} \cdot \text{ГВт}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ [8]. Прямые измерения ^{14}C , обусловленного аварийным выбросом ЧАЭС, проведены в Финляндии, повышенные уровни ^{14}C в составе воздуха наблюдались только 29 апреля - 1 мая 1986 г. (максимальное значение удельной активности ^{14}C в воздухе составило $0,82 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$, что в 30 раз превышает уровень естественного ^{14}C) [9].

Наработка ^{14}C в составе графита. Удельная активность наработанная в графите четвертого энергоблока ЧАЭС, по оценкам [1], достигает $25 \text{ МБк} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ C}$, что с учетом массы графита в реакторе (1800 т), а также в предположении, что до 25-50 % графита выгорело (поступило в окружающую среду в составе CO_2), позволяет оценить величину выброса ^{14}C только за счет выгорания графита в $(28 \div 56) \cdot \text{ТБк}$. Верхняя оценка коллективной дозы, которая формируется за счет этого выброса только для населения Украины, составляет $35 \text{ чел} \cdot \text{Зв} \cdot \text{год}^{-1}$ [1].

Усвоение ^{14}C растительностью. Вследствие того что радиоуглеродный метод основан на усвоении растительностью ^{14}C из состава CO_2 , в исследованиях, касающихся выбросов ^{14}C , рассматривается накопление избыточного радиоуглерода одногодичной растительностью и годичными кольцами 1986 г. Сосна выбрана для исследований по соображениям полноты усвоения ^{14}C потому,

92



Удельная избыточная активность ^{14}C ($\text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1} \text{с}$) в годичных кольцах сосен, отобранных в окрестностях ЧАЭС [1]:

1 - "Рыжий лес" - северо-запад, 4 км; 2 - "Рыжий лес" - запад, 2,5 км; 3 - "Рыжий лес" - юго-запад, 6 км; 4 - экстраполяция 1966-1978 гг.

что для нее усредненное содержание ^{14}C в годичном кольце равно усредненному за вегетационный период содержанию ^{14}C в воздухе и ее встречаемости в местах исследований.

Исследования одногодичной растительности. Определение удельной активности ^{14}C в образцах одногодичной растительности 1986 г. (гербарии) показало относительно высокую величину для структурного и поверхностного загрязнения. Метод термохимической обработки для покомпонентной подготовки проб растительности, где сочетание низко- и высокотемпературной обработки позволяет выделять счетную форму отдельно для поверхностного и структурного загрязнения растительности разработан в [5, 10]. Точное разделение указанных фракций весьма затруднительно и требует подтверждения практической информативности (прецизионности) самих измерений. Другая, более существенная причина, затрудняющая применение этого метода и образцов, заключается в том, что гербарии по их уникальности и общей загрязненности весьма редки и не могут использоваться для массовых исследований.

Исследования годичных колец деревьев. Древесина отбиралась как в пределах тридцатикилометровой зоны, так и на расстоянии до 200 км от ЧАЭС. Исследовали годичные кольца сосны. Возможности метода проверяли на образцах ближней зоны,

максимальный уровень ^{14}C составил $6500 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ C}$, что соответствует усредненной за время выброса концентрации радиоуглерода в воздухе в $50 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ [1, 2]. Ход долгосрочных колебаний ^{14}C , снятый для одного дерева, показан на рисунке. Колебания радиоуглерода за 1965-1978 гг. отражают колебания ^{14}C в атмосфере, связанные с глобальными испытаниями атомного оружия. Данные 1979-1985 гг. и после 1987 г. показывают уровни, повышенные за счет технологических выбросов в процессе эксплуатации ЧАЭС. На рисунке показаны также результаты, полученные для других образцов деревьев, расположенных на расстояниях 2,4 и 4 км от ЧАЭС. Диапазон колебания удельной активности образцов 1986 г. составляет $720\text{--}6500 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, что свидетельствует о высокой неравномерности пространственного распределения. Метод применим даже для наименее выраженного южного направления от ЧАЭС, где избыточный уровень ^{14}C можно определить для образцов, отобранных за пределами тридцатикилометровой зоны ($\Delta^{14}\text{C} 20\text{--}30 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ C}$) [2].

93

Дальнейшие исследования направлены на повышение чувствительности метода [11]. Идея, которая прорабатывалась, принадлежит I.Olson и сводится к выяснению вопроса, в какой части годичного кольца усвоен ^{14}C аварийного выброса [12]. Для выяснения этого вопроса проведена специальная пробоподготовка. Выполнено более тонкое щепление (деление) древесины 1986 г. на две части: раннюю и позднюю. В таблице приведена концентрация ^{14}C для годичных колец деревьев 1986 г., отобранных вокруг ЧАЭС и для образца, удаленного от ЧАЭС на 200 км. Существенное отличие активности ^{14}C

Концентрация ^{14}C в 1986 г. в образцах годичных колец сосны (погрешность около $3,5 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ C}$ для отдельных образцов ранней и поздней древесины и около 3 % для других образцов)

Место отбора проб	Направление от ЧАЭС	Расстояние, км	1986 г.	1986 г. (Р)*	1986 г. (П)**
"Рыжий лес"	Северо-Запад	4	857	-	-
Питомник	Запад	2,5	6533	-	-
с. Лелев	Юго-Запад	6	720	-	-
с. Парышев	Юго-Восток	10	327,0	350,7	303,3
с. Сахан	Север	12	308,6	345,5	271,2
с. Янов	Запад	2	9700 (Р)	17130 (1)***	302,5 (2)***
	Запад	2	302,1 (П)	305,0 (1)***	300,2 (2)***
г. Тараща**** Киевской обл.	Юг	200	272,6 (Р)	274,3 (1)***	270,8 (2)***
	Юг	200	268,7(П)	268,2 (1)"*	269,2 (2)"*

* (Р) ранняя древесина;

** (П) поздняя древесина;

*** 1 или 2 указывает, была ли ранняя и поздняя древесина разделена на две равные части;

**** "фоновая" проба

по образцам ранней и поздней древесины указывает на реальный путь повышения чувствительности и точности измерения избыточного радиоуглерода. Следующий шаг в повышении чувствительности метода - более тонкое щепление древесного кольца. Результаты измерения образцов, для которых проведено деление ранней и поздней древесины на две части, приведены в таблице, из которой следует, что практически вся избыточная активность радиоуглерода находится в первой половине ранней древесины.

ПЕРСПЕКТИВЫ РЕТРОСПЕКТИВНЫХ РАДИОУГЛЕРОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученные результаты отражают, прежде всего, методические подходы к проведению радиоуглеродных исследований. Выбор подходящих образцов древесины и последующее деление годичного кольца на две или четыре части дает возможность увеличивать соответственно в два-четыре раза разрешающую способность метода обнаружения избыточного. Проведенные работы позволили определить перспективность

радиоуглеродных исследований, связанных с аварией на Чернобыльской АЭС, а область территориальной применимости очертить границами, далеко выходящими за тридцатикилометровую зону. Ближайшая перспектива радиоуглеродных исследований - определение закономерностей распределения радиоуглерода вокруг ЧАЭС как по характерным направлениям, так и для конкретных населенных пунктов для последующего ретроспективного восстановления уровня аварийных выбросов ЧАЭС.

94

1. Бузинный М.Г., Зеленский А.В., Ковалюк Н.Н. и др. / Ретроспективное восстановление уровня аварийного выброса ^{14}C в атмосферу вследствие аварии на Чернобыльской АЭС // Материалы науч. конф., Киев, 27-29 окт. 1992 г. - Киев: Укр. науч. центр радиац. медицины МЗ и АН Украины, Предприятие по радиационным обследованиям и ситуационному анализу (РОСА) Минчернобыля Украины, 1993. - С. 118-124.

2. Бузинный М.Г., Лось И.П., Зеленский А.В. и др. О возможной корреляции уровней ^{14}C в растительности с ^{131}I в щитовидной железе после аварии на ЧАЭС // Актуальные проблемы ликвидации медицинских последствий аварии на Чернобыльской АЭС: Тез. докл. Укр. науч.-практ. конф., Киев, 20-22 апр. 1993 г. - Киев: МЗ Украины, Украинский научный центр радиационной медицины, 1993. - Ч. 1. - С. 48-49.

3. Ковалюх Н.Н., Скрипкин В.В., Соботович Э.В. и др. Радиоуглерод аварийного выброса Чернобыльской АЭС в годовых кольцах деревьев // Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej. Matematyka-Fizyka. Geochronometria - Gliwice, 1994. - N 1229. - С. 217-224.

4. Ковалюх Н.Н., Скрипкин В. В. Химическая подготовка образцов для радиоэкологических исследований радиоуглерода // Радиоизотопы в экологических исследованиях. - Киев: Наук. думка, 1992. - 160 с.

5. Skripkin V., Kovalyukh N. An Universal Technology for Oxidation of Carbon Containing Materials for Radiocarbon Dating. Conference of geochronology and dendrochronology of old towi's and radiocarbon dating of archeological findings Lithuania. - Vilnius, October 31 - November 4, 1994. - Abstracts and Papers: Vilnius University Press, 1994. - P. 37-42.

6. Арсланов Х.А. Радиоуглерод: геохимия и геохронология. - Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. - 295 с.

7. Buzinny M., Skripkin V. Newly designed 0,8-ml teflon vial for microvolume radiocarbon dating. In Proceedings of 15th International ^{14}C Conference, edited by G.T. Cook, D.D.Harkness, B.F.Millei and E.M Scott // Radiocarbon. - 1996. - 37, N 3. - P. 743-747.

8. Гайко В.Б., Кораблев Л.А., Соловьев Е.Н. и др. Выбросы ^{14}C атомных электростанции с реакторами типа РБМК-1000 // Атомная энергия. - 1985. - 59, № 144.

9. Salonen L. Carbon-14 and Tritium in Air in Finland after the Chernobyl Accident // Radiochimica Acta. - 1987. - N 41. - P. 145-148.

10. Skripkin V., Kovalyukh N., Buzinny M. Thermochemical separation of carbon, hydrogen and nitrogen from soil and other samples for isotope examination. 15th International Radiocarbon Conference. Glasgow. 15-19 August 1994. - 1994.

11. Buzinny M., Kovalyukh N., Likhtarjov I. et al. Ecological chronology of nuclear fuel cycle sites. Proceeding of the 15th International ^{14}C Conference / Edited by D.D. Harkness, B.F. Millerand E.M. Scott // Radiocarbon. - 1996. - 37, N 3. P. 469- 473.

12. Olson I. ^{14}C Activity in Different Sections and Chemical Fractions of Oak Tree Rings, AD 1938-1981 / Ibid. - 1992 - 34, N 3. - P.757-767.

Украинский научный центр радиационной медицины АМН Украины, Киев
Поступила 25.05.96

УДК (551.782/79:556.3):504.С64.36 (476.2+477.41)

А. В. Матошко

ТИПИЗАЦИЯ И РАЙОНИРОВАНИЕ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ ДЛЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Обобщены и проанализированы геологические материалы, полученные на территории Зоны отчуждения в до- и послеаварийный период. На основе генетического и стратиграфического расчленения разрезов буровых скважин и обнажений выделены типичные седименто-генетические и седименто-стратиграфические комплексы осадочного чехла, установлены особенности их строения и границы

© А. В. Матошко, 1996

95

распространения. Показано, что с каждым из них могут быть связаны определенные закономерности миграции радионуклидов с подземными водами. Последнее необходимо учитывать для размещения пунктов гидрогеологического мониторинга и анализа его результатов.

Обоснование и задачи исследований. Миграция радионуклидов с подземными водами, прежде всего, путем прямых наблюдений на ограниченном числе буровых скважин,

колодцев и шурфов. Надежность и достоверность получаемых результатов между точками наблюдения и на окружающих обширных территориях в значительной мере зависит от учета неоднородностей реальной геологической среды тридцатикилометровой зоны ЧАЭС и главным образом тех, с которыми связаны такие гидрогеологические характеристики пород и отложений, как водопроницаемость, пористость, катионообменная емкость и др.

Поэтому первая задача данных исследований состояла в обобщении и анализе разнообразных геологических материалов о геологической среде, которая на рассматриваемой территории представлена осадочным чехлом северо-восточного склона Украинского щита и Брагинско-Лоевского выступа фундамента. Была изучена его верхняя часть между дневной поверхностью и первым региональным водупором - карбонатными глинами (мергелями) и алевритами киевского и харьковского ярусов палеогена. Эта часть включает слоистую толщу неогеновых и антропогеновых отложений.

Вторая задача заключалась в типизации разрезов неоген-антропогеновой толщи и выделении ее отдельных блоков - седименто-генетических и седименто-стратиграфических комплексов (районирование). Третья задача предусматривала выработку предложений по оптимизации расположения сети наблюдательных скважин в пределах каждого района и проведение специальных геологических работ для гидрогеологических целей.

Предпосылки и методы исследований. Территория исследований неравномерно обеспечена геологическими материалами. Ее крайняя юго-западная часть покрыта относительно детальной гидрогеологической и инженерно-геологической съемкой масштаба 1:50 000, достаточно подробно вскрыто строение антропогеновых отложений на междуречье Днепр-Припять, тогда как остальные районы представлены редкой сетью скважин, связанных с различными видами съемок масштабов 1:200 000 и 1:50 000. Исключение составляют небольшие участки гидротехнических сооружений (мосты, пруд-охладитель), территория ЧАЭС, г. Припять, стройплощадка комплекса "Вектор", а также некоторые мелиоративные системы и участки поисково-разведочных работ на гравийно-галечное сырье. Эти материалы, результаты специальных исследований [2, 3] и личные материалы автора [10, 11, 13, 14] послужили фундаментом настоящих исследований.

В основу решения второй задачи положены методологические принципы изучения геологических тел, разработанные в [7] и примененные автором [14] относительно тел ледниковых отложений. Их ключевым моментом является обособление генетически однородных тел (в данном случае - макрослоев - горизонтов), с которыми связаны и главные литологические различия. Они отделены друг от друга поверхностями несогласия или поверхностями смены форм аккумуляции, при переходе через которые литологические свойства отложений меняются скачкообразно. Определенный набор горизонтов, выделенных в рассматриваемой части осадочного чехла по генетическим и возрастным критериям, составляет тип разреза каждого блока (района) территории. Причем стратиграфические

96

характеристики в этом отношении подчиненные, тогда как генетические отражают важнейшие различия в литологическом облике отложений, а таким образом и онтологически обусловленную разницу в гидрогеологических условиях. В ходе работы затронуты некоторые спорные вопросы геологического строения, которые автор решал, исходя из собственных концепций.

Результаты исследований. В качестве единиц районирования первого порядка выбраны "плато" и "долины". Термин "плато" полностью применим только к антропогенной части чехла, где процессы аккумуляции отложений преобладали над денудацией, в отличие от долин рек Припять, Уж и их притоков, где неогеновые отложения были полностью размыты.

Плато. Относительная площадь плато в пределах территории исследований (рис. 1) составляет не более 18%. Выделено четыре участка плато: два - его останцы, сохранившиеся от размыва в полосе сел Лелев-Чистоголовка и у с. Березовка и два - наиболее крупные массивы плато на левобережье р. Уж (западнее линии сел Речица-Толстый Лес) и на междуречье Уж-Тетерев, западнее с. Рассоха.

Полный разрез плато включает отложения полтавской серии (N_{1pl}), яруса пестрых глин (N_{1-2ps}), нерасчлененных бурых глин и суглинков (N_2-Q_1) и антропогеновой толщи (Q_{1-4}). В зависимости от особенностей состава этого разреза выделяется несколько его районов (рис. 2-4).

Район "Плато-1" ("П-1" - на рис. 1-4) находится на правом берегу р. Уж в юго-западной части территории. Подошва *отложений полтавской серии*, которые имеют в этом районе форму покрова, располагается на абсолютных отметках 115-132 м, постепенно понижаясь на север, мощность их изменчива, а максимальные значения достигают 17 м. Преимущественно это пески, светло-серые, малиновые, желтые, серые, кирпично-красные и белые, разно- и тонкозернистые, горизонтально- и косо-слоистые, в различной степени каолинистые. Для нижней части серии характерны прослои вторичных каолинов, маломощные прослои глин и относительно более мощные прослои слабо сцементированных кремнистых и углистых песчаников, местами прослои бурых углей и углистых глин. В верхней части серии встречаются прослои песчаников и вторичных каолинов. Цемент песчаников - монтмориллонитовый, каолинистый и кремнистый.

По минеральному составу неогеновые пески преимущественно кварцевые [8]. В легкой подфракции фракции 0,25-0,01 мм содержание кварца составляет 93-99%, слюды (мусковит) - 0,1-1,4%, полевых шпатов - 0,1-0,8%, кальцита - до 0,2%. Фракции крупнее 0,25 мм почти полностью сложены кварцем. В составе глинистой фракции преобладает каолинит и монтмориллонит.

Отложения полтавской серии сверху без перерыва сменяются *отложениями верхнего миоцена - нижнего плиоцена (ярус пестрых глин)*, которые также залегают в виде покрова. Абсолютные отметки их подошвы - 117-129 м, мощность достигает 6 м. Они представлены пестрыми глинами, светло-, темно-, желтовато-, зеленовато-серого и коричневого цвета, с прослоями тонкозернистого песка.

Предполагается, что сходные черты строения неогеновой толщи имеет останец плато в полосе сел Лелев-Чистогаловка, где в обнажениях морен напора и ряде скважин в коренном залегании (у с. Чистогаловка) вскрыты глины - бурые с шоколадным оттенком, плотные, отнесенные авторами работы к верхнему плиоцену. Этими же авторами в дислоцированной толще морен напора отмечены и полтавские пески.

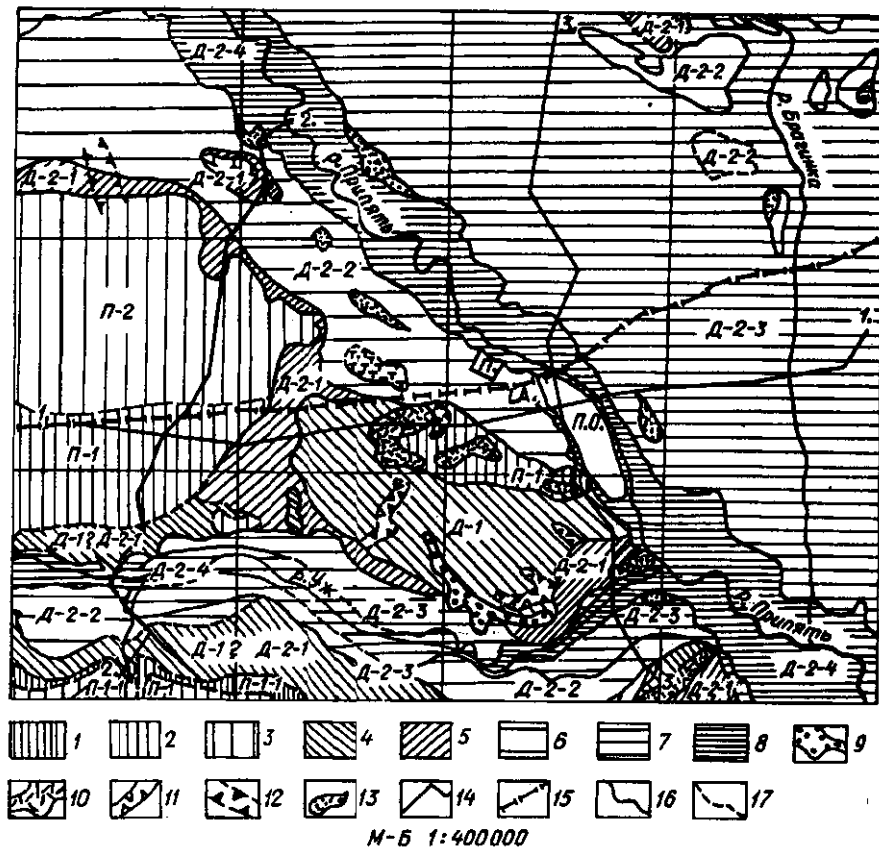


Рис. 1. Карта-схема генетико-стратиграфического районирования осадочного чехла Чернобыльской Зоны отчуждения

Условные обозначения: 1-3 - "Плато": 1 - полный стратифицированный разрез, включающий отложения полтавской серии, пестрые глины и антропогенные отложения; 2 - то же без горизонта пестрых глин; 3 - не стратифицированный разрез неогеновых отложений и антропогенные отложения; 4-8 - "Речные долины" (неогеновые отложения размыты, в основании разреза - отложения палеогена); 4 - "Древние долины" (аллювиальные отложения ранне-среднеантропогенного возраста, перекрытые чехлами ледниковых и эоловых отложений); 5-8 - "Молодые долины" - аллювиальные отложения средне-позднеантропогенного и голоценового возраста на ниже-среднеантропогенном аллювии (аллювиальные отложения надпойменных террас, частично перекрыты эоловыми отложениями): 5 - второй надпойменной террасы, 6 - первой надпойменной террасы высокого уровня, 7 - первой надпойменной террасы низкого уровня, 8 - современной поймы, 9-12 - некоторые ледниковые образования среднеантропогенного возраста (днепровское оледенение): 9 - озы, флювиогляциальные конусы выноса (повышенная мощность водноледниковых отложений), 10 - морены напора, 11 - ложбины стока талых ледниковых вод, 12 - ложбины размыва напорными подледниковыми водами; 13 - наибольшие массивы эоловых отложений позднеантропоген-голоценового возраста; 14 - положение геологических профилей (см. рис. 2-4) и их номера; 15 - железная дорога Овруч - Чернигов; 16-17 - геологические границы: 16 - установленные, 17 - предполагаемые. Буквенные обозначения: П. - г. Припять, А. - Чернобыльская АЭС, П.О. - пруд-охладитель. Объяснения к остальным буквенно-цифровым обозначениям смотрите в тексте. На карте-схеме показана разграфка листов топографической карты масштаба 1:50 000.

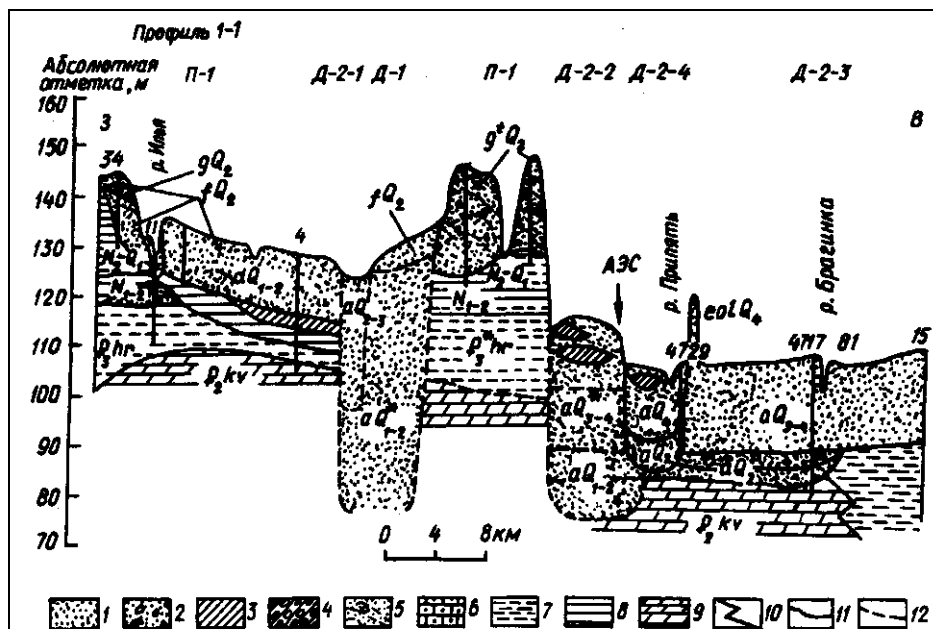


Рис. 2. Геологический разрез по профилю 1-1.

Условные обозначения: 1 - пески; 2 - пески с включением грубообломочного материала, 3 - суглинки-супеси; 4 - валунные супеси-суглинки; 5 - дислоцированные отложения морен напора; 6 - песчаники; 7 - алевриты; 8 - глины; 9 - карбонатные глины (мергели); 10 - фациальное замещение; 11, 12 - геологические границы: 11 - установленные, 12 - предполагаемые. Генетические обозначения отложений: *a* - аллювиальные, *g* - основные морены; *g'* - напорные морены; *f* - водноледниковые, *d* - делювиальные; *eol* - эоловые. * - геологические разрезы показаны по скважинам, расположенным рядом с профилем в пределах одного и того же гипсометрического уровня. Объяснения к буквенно-цифровым обозначениям в верхней части разрезов см. в тексте.

Положение профилей см. на рис. 1.

В подрайоне "Плато-1-1" (П-1-1) в результате денудационных процессов в фазы активизации колебательных тектонических движений, особенно в начале антропогена в придолинной части плато, верхи неогеновой толщи и прежде всего пестрые глины были размывы. Полоса такого редуцированного разреза плато протягивается по правобережью р. Уж приблизительно по линии сел Млачевка-Максимовичи-Омеляновка. Можно предполагать, что более узкие полосы этого типа разреза существуют у всех границ плато с долинами.

В северном направлении разрез плато существенно меняется. Приблизительно севернее линии с. Толстый Лес - пгт Вильча, что близко положению водораздела между реками Уж-Словечна, выделен район "Плато-2" (П-2). Здесь подошва неогеновой толщи на коротком расстоянии понижается до уровня 94-105 м абсолютной высоты, а ее мощность возрастает, достигая 37 м. Заметим, что кровля неогеновых отложений в наиболее высокой части междуречья Словечна-Уж достигает 130-140 м, а горизонты достаточно четко стратифицированных полтавских песков и пестрых глин сменяются сложно построенной нерасчлененной толщей (N_{1-2}) переслаивающихся глин, алевроитов, песков и песчаников, в которой преобладают глины. По-видимому, разрез останца плато у с. Березовка близок разрезам этого района.

Гранулометрический состав глин верхнего миоцена - нижнего плиоцена, судя по фоновым материалам (Бухарев, 1967; Карпушенко, 1973) и работе [8], также имеет очень большой разброс, хотя в нем заметно господство частиц менее 0,01 мм - до 80-90%. Установлено, что на территории Припятского прогиба и соседних с ним районов полные разрезы глинистых толщ неогена по составу глинистых минералов разделяются на три зоны: верхнюю монтмориллонитовую (монтмориллонит с примесью каолинита), нижнюю каолинитовую и промежуточную с примерно равным участием обоих главных минералов [6]. В верхней зоне, наибольшей по мощности, обычно содержится небольшая примесь гидрослюда и смешанослойного минерала. По данным работы [6] красно-бурые верхнеплиоценовые глины отличаются от пестрых повышенными концентрациями

98-99

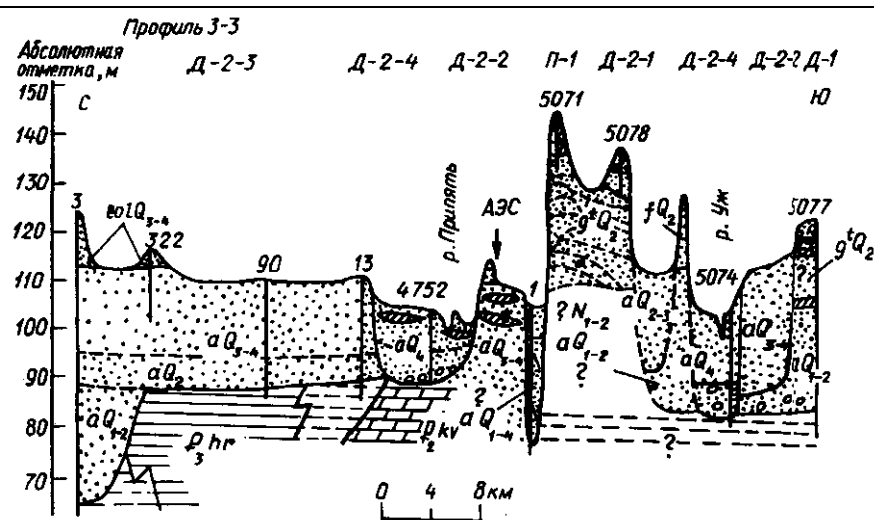
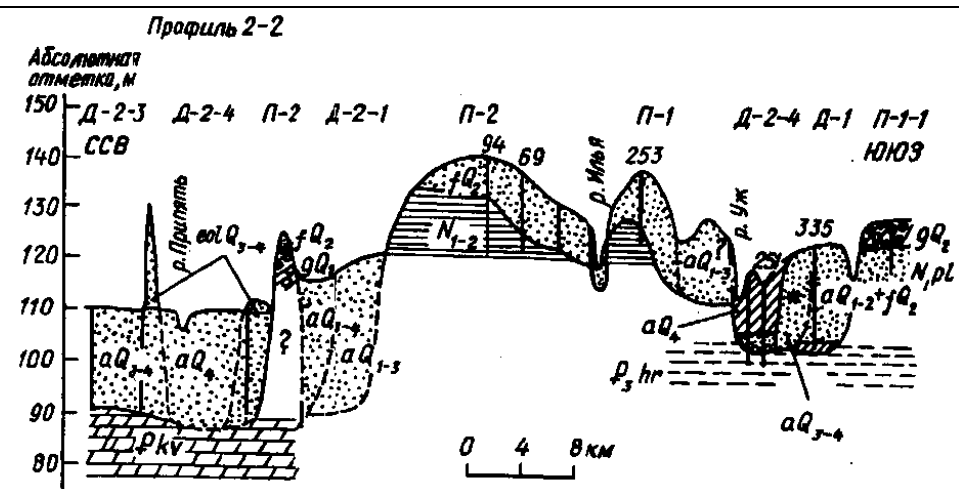
второстепенных по содержанию минералов - кальцита, гидрогематита и лимонита. Отмеченные в разрезах вторичные каолины состоят в основном из каолинита (до 70%).

Неогеновые отложения плато повсеместно перекрыты чехлом антропогеновых отложений, который имеет в целом однотипный разрез снизу вверх: элювиально-делювиальные, озерные отложения нижнего-среднего антропогена, ледниковые отложения среднего антропогена, эоловые, делювиальные и биогенные отложения среднего-верхнего антропогена и голоцена (см. рис. 2-4).

Нерасчлененные элювиально-делювиальные и озерные отложения нижнего-среднего антропогена залегают непосредственно на пестрых глинах, встречаются редко, за исключением участка "Толстый Лес", где они выделены почти на каждом инженерно-геологическом профиле в пределах плато. Можно предполагать, что в некоторых случаях они отнесены к верхам яруса пестрых глин. Указанные отложения включают суглинки-супеси, глины, реже глинистые пески серого и темно-серого цвета, мощность их достигает 7 м.

Отложения неогена и нижнеантропогеновых суглинков перекрыты преимущественно *ледниковыми отложениями днепровского горизонта* (средний антропоген - Q_{2-2}). Их мощность колеблется в широких пределах - от первых десятков сантиметров до 30-40 м. На части территории плато они непосредственно выходят на дневную поверхность. Условия их залегания, фациальный и литологический состав крайне изменчивы по разрезу и простирацию.

Обычно нижним членом ледникового горизонта являются водноледниковые (флювиогляциальные и лимногляциальные) подморенные отложения. Редкой сетью скважин они не обнаружены, но по аналогии с другими прилегающими районами [14] можно предположить, что они встречаются в виде небольших ареалов песков и супесей-суглинков, мощностью не более 1-2 м.



Реперный генетический и стратиграфический элемент ледникового горизонта - основные морены. Они распространены в виде останцов различной площади, мощностью 2-7 м, когда-то единого покрова, который был размыв в ледниковое и постледниковое время. В пределах плато

они вскрыты в небольшом количестве скважин. Основные морены представлены фацией монолитных морен, которые в литологическом отношении являются диамиктоном. Эти морены называют валунными супесями и суглинками, они имеют красновато- и желтовато-бурый цвет и характерные гляциодинамические текстуры, а также являются относительно более плотными по сравнению с другими генетическими типами антропогенных отложений.

В ряде мест встречены существенно песчаные локальные морены. В основных моренах территории широко распространены псевдоморфозы по полигонально-жильным льдам, представленные густой сетью клинообразных трещин (шириной в верхней части до 0,5 м), выполненных отложениями, как правило, песчаного состава [13]. Эти палеокриогенные структуры значительно увеличивают проницаемость морен для грунтовых вод.

Основные морены являются определяющим компонентом для всего комплекса ледниковых отложений с точки зрения их важнейших литологических показателей. В их гранулометрическом составе [14] существенно преобладает мелкозем, содержание грубообломочного материала редко превышает 1 %. Основные фракции мелкозема (песок, алеврит, глина) распределены достаточно однородно и на территории исследований испытывают незначительные колебания. Содержание глинистой фракции, за исключением небольших ареалов, находится в пределах 30-40 %, только в районе г. Чернобыль, сел Березовка и Опачичи оно уменьшается до 20-30%. Песчаность морен составляет 20-30%, возрастая на правобережье р. Уж до 40-50 %. У г. Чернобыль, сел Березовка и Опачичи наблюдаются аномальные значения содержания песчаной фракции - более 50%.

Минеральный состав морен очень непостоянен. Разница в соотношении основных породообразующих минералов - кварца и полевого шпата составляет от точки к точке до 35 % [1]. В морене у г. Чернобыль (девять образцов по разрезу) содержание кварца колеблется в алевритовой фракции от 93 до 100%, а в песчаной - от 70 до 95%. Следует отметить, что по сравнению с неогеновыми отложениями содержание полевых шпатов в морене в целом больше.

100-101

Глинистые минералы морен представлены гидрослюдами и монтмориллонитом, содержание которых в Полесье приблизительно одинаковое или несколько преобладают гидрослюды.

Главную часть разреза ледникового горизонта и антропогенного чехла в целом представляют водноледниковые надморенные отложения, преимущественно пески разного состава с включениями грубообломочного материала, неравномерно ожелезненные с линзами и прослоями суглинков-супесей и глин. Их мощность колеблется от 2 до 11 м. Залегают они плащеобразно, редко образуя самостоятельные формы рельефа. Особо следует выделить глубокую (до 60-70 м) ложбину водноледникового размыва, вскрытую двумя скважинами в районе с. Углы (междуречье Уж-Словечна) и выполненную на всю мощность песками.

Для водноледниковых отложений характерно крайнее непостоянство гранулометрического и минерального составов. Поэтому говорить можно лишь о их общих отличительных чертах в ряду других генетических типов отложений. Такой общей их чертой является пониженное в пять-шесть раз по сравнению с моренами содержание глинистой фракции и большая насыщенность песками на территории Белорусского Полесья [5]. Состав породообразующих минералов мало чем отличается от такового у морен. Основная ассоциация глинистых и сопутствующих им минералов представлена гидрослюдой, каолинитом, монтмориллонитом, смешаннослойными минералами типа гидрослюда-

монтмориллонит, тонкодиспергированным кварцем, иногда карбонатами, гидроокислами железа и редко - полевыми шпатами.

Наряду с надморенными водноледниковыми отложениями субстрат современных почв (поверхностные отложения) образуют *эоловые пески*, тонким (0,2-0,6 м) чехлом перекрывающие отложения иного генезиса. Их отличает однородный желтый, темно-желтый цвет и однородный гранулометрический состав. Местами эти пески собраны в дюны высотой от 2 до 8 м. Они характерны для междуречья Уж-Словечна. Эоловые отложения среди прочих генетических типов отложений территории выделяются высокой степенью однородности по разрезу и простираению горизонта, наилучшей сортировкой, существенным преобладанием фракции 0,1-0,5 мм, минимальным (доли процента) содержанием глинистой фракции, наибольшим содержанием SiO₂ и уменьшенным содержанием других химических компонентов.

Разрез антропогеновой части плато значительно меняется на территории распространения Чернобыльско-Чистогогавского комплекса краевых ледниковых образований [3, 11, 14], которая частично совпадает с останцом плато. Доднепровские отложения плато, начиная с мергелей и алевроитов палеогена здесь частью экзарированы и включены в состав морен напора. Последние образуют валы и купола мощностью до 20-30 м в полосе шириной 5-7 км между селами Лелев и Буряковка, а также угловой массив у с. Чистогогавка. В современном рельефе они выражены холмами и грядами высотой от 5 до 30 м.

В строении морен напора участвуют дислоцированные (преобладают чешуйчатые надвиги, складки и диапиры) отложения: аллювиальные ранне-среднеантропогеновые и водноледниковые среднеантропогеновые пески с высоким содержанием грубообломочного материала, чешуи и пласты основных морен, реже микроотторженцы ископаемых почв, неогеновых глин, песков полтавской серии и палеогеновых пород.

Из других ледниковых отложений указанного комплекса следует указать на межгрядовые участки и ложбины стока талых ледниковых вод (между валами и куполами морен напора), выполненные водноледниковыми песками разной зернистости, которые перекрываются делювиальными отложениями постднепровского или поздднепровского возраста с горизонтами ископаемых почв.

102

Современная эрозионная сеть в пределах плато разработана слабо. Судя по единичным скважинам, эрозионные врезы долин малых рек и ручьев выполнены преимущественно супесями-суглинками с подчиненным содержанием песков, частично с поверхности заторфованными.

Речные долины. На рассматриваемой территории распространены участки более древних долин ранне-среднеантропогенового возраста и молодых позднеантропоген-голоценовых долин. Различия в их разрезе обусловили выделение соответственно двух районов. Первый район (Д-1) представлен участками древних долин, которые сохранились (см. рис. 1) на междуречье -Припять, между селами Каменка и Опачичи на междуречье Уж-Тетерев и предположительно в виде полос по берегам р. Уж между плато и его молодой долиной. В рельефе они представлены так называемой "лихвинской террасой", усложненной ледниковым рельефом с отметками 128-140 м. Основу разреза древних долин составляют, по мнению автора, ниже- и среднеантропогеновые аллювиальные отложения, которые с размывом ложатся на образования палеогена. Из-за редкой сети скважин трудно составить представление о рельефе ложа этого аллювия. Можно предполагать, что аллювиальный разрез древних долин включает несколько свит, расположенных на разных эрозионных уровнях - от 89 до 105 м. Сохранились, как правило, нижние части свит, представленные песками разной степени зернистости.

Указанные свиты перекрыты, аналогично плато, ледниковыми, эоловыми и делювиальными отложениями, которые кроме отмеченных фациальных разновидностей включают и другие. В нескольких скважинах в пределах этого района встречены чешуйчатые морены, образованные чешуями основных морен, водноледниковых и иных отложений, которые имеют надвиговую гляциотектоническую структуру.

По морфологическим особенностям на правобережье р. Уж между селами Корогод и Черевач выделен маргинальный оз., а у с. Залесье - флювиогляциальный конус выноса. С ними связывается повышенная мощность песчаных флювиогляциальных отложений с увеличенным содержанием гравия и гальки. Там же между этим озем и полосой напорных морен протягивается поле зандровых отложений Чернобыльско-Чистоголовского комплекса краевых ледниковых образований. Зандры состоят из разнотерристых песков, крупность которых уменьшается к юго-западу и югу, в том же направлении уменьшается их мощность, составляя в среднем 0,5-2,0 м. На междуречье Уж-Припять установлены также ложбины стока талых ледниковых вод. Они представляют собой широкие растреды, раскрытые в сторону речных долин и частично или полностью погребенные выполненными их водноледниковыми отложениями. С поверхности они местами заторфованы.

Район "Молодые долины" включает серию террас рек Уж и Припять, каждая из которых отличается особенностями разреза и поэтому выделяется как отдельный подрайон.

Вторая надпойменная терраса (Д-2-1) протягивается узкой (0,5-1,5 км) полосой вдоль склона плато на междуречье Уж-Словечна и образует проходной участок между долинами рек Припять и Уж. Небольшие ее фрагменты выделяются вокруг останца плато в районе сел Опачичи-Каменка. Предположительно терраса показана узкими полосами по обоим склонам долины р. Уж. (см. рис. 1). Ее строение охарактеризовано единичными скважинами. Исключение составляет участок у с. Толстый Лес, где аллювий второй террасы вскрыт рядом изыскательских буровых профилей. На них отчетливо видно, что террасу составляет одна аллювиальная свита, в составе которой преобладают супеси-суглинки, занимающие среднюю часть разреза.

103

Пески образуют верхний (до 1,0 м) горизонт и приблизительно такой же по мощности - базальный, где часто встречается грубообломочный материал. Аллювий террасы у с. Толстый Лес лежит на палеогеновых алевролитах и глинах, на других участках, видимо, на ниже-среднеантропогеновом аллювии. Общая мощность свиты достаточно выдержанная - 9-12 м, абсолютные отметки ложа - 113-115 м, поверхность террасы - 122-127 м, она слабо наклонена в сторону долины. Верхняя часть аллювия террасы переотложена ветром, для нее характерны дюны. Ее возраст, исходя из общего стратиграфического положения, может быть оценен как средне-позднеантропогеновый.

Первая надпойменная терраса. Аллювиальные отложения, относимые к этой террасе, с размывом ложатся на ниже-среднеантропогеновый аллювий, от которого здесь сохранились только базальные горизонты и частично горизонты русловых фаций. В них преобладают разнотерристые пески с включениями грубообломочного материала. По нашему мнению, этот аллювий принадлежит не только двум наложенным свитам - кривичским, которые выделены Г.И. Горецким [2]. Его нижний горизонт, залегающий на породах харьковской и киевской свит, относится к двум прислоненным свитам, каждая из которых имеет эрозионную площадку соответственно на уровне 82-86 м и 89-92 м.

Кроме того, по ряду скважин в ложе антропогена прослеживается узкая ложбина, дно которой находится на отметках 72-75 м. Предполагается, что это долина небольшой реки, существовавшей еще до выработки долины Пра-Припяти. Весьма важно указать, что на рассматриваемой территории не наблюдается общего снижения подошвы наиболее древних аллювиальных свит вдоль долины р. Припять, на юго-восток от с. Довляды.

Обычно под названием "первая надпойменная терраса" понимается гипсометрически и хронологически единый аккумулятивный уровень. Однако, как показали настоящие исследования, относимые к этой террасе аллювиальные отложения принадлежат двум сериям разновозрастных свит, которые значительно различаются по строению. В связи с этим территории распространения этих серий выделены в два подрайона, первый из которых включает более древние серии, второй - более молодые. При этом более древние серии занимают и более высокое гипсометрическое положение.

Первая надпойменная терраса высокого уровня (Д-2-2) предположительно начала формироваться (фаза врезания) в конце позднего антропогена. Она охватывает широкую

полосу по правобережью рек Припять и Словечна и выделяется по обоим берегам р. Уж. На этой террасе расположена Чернобыльская АЭС (кроме пруда-охладителя) и г. Припять.

Контакт верхнеантропогенного аллювия с нижележащими отложениями кривичских свит не выражен, поэтому затруднительно говорить о количестве наложенных свит (наложение их несомненно, так как совокупная мощность аллювия достигает 30-32 м) и мощности каждой из них. Наряду с русловыми песками, составляющими основу разреза террасы, последний включает мощную (6-11 м) толщу пойменно-старичных отложений - переслаивающиеся толщи песков разной крупности (преимущественно тонко- и мелкозернистых) с супесями-суглинками, встречаются также прослои погребенных торфяников.

Поверхность террасы полого понижается от тылового шва (116-119 м) к бровке (112-115 м), незначительно снижаясь и вдоль долин. Рельеф и состав поверхностных отложений террасы имеет отчетливое зональное строение, особенно на ее припятском участке.

104

По периферии террасы обычно находится обширное заторфованное понижение (мощность торфа до 1,5 м), которое или унаследовало древнюю старицу или распространилось далеко за ее пределы. Центральная часть террасы относительно плоская и неравномерно заболоченная. Здесь также встречаются обширные неправильной формы поля бугристых песков. Узкая припойменная часть террасы хорошо дренирована, наблюдаются отдельные эрозионные ложбины и широко развиты дюны, особенно у самой ее бровки.

Первая надпойменная терраса низкого уровня (Д-2-3) занимает до трети площади всей рассматриваемой территории. Ее наибольший "ареал" представлен единой внутренней дельтой рек Припять и Днепр. По сути это несколько прислоненных террас средне-позднеголоценового возраста, в ряду которых современная пойменная терраса самая молодая.

Мощность аллювия террасы низкого уровня, судя по разрезу на линии Верхние Жары-Парышев, составляет 12-14 м [2]. Особенность ее состава - почти исключительное развитие русловых фаций, представленных песками. Он обусловлен качественно иным типом руслового процесса - многорукавным, в отличие от свободного меандрирования, с которым связано формирование аллювия первой надпойменной террасы высокого уровня и поймы. Побочни по берегам рукавов и осередки, разделяющие рукава, отчетливо выражены в современном рельефе террасы. Они занимают несколько более высокое гипсометрическое положение и почти повсеместно преобразованы эоловыми процессами в отдельные дюны. Цепи и массивы эоловых песков возвышаются на 5-20 м над поверхностью террасы как острова и придают ей неповторимый облик.

В целом поверхность террасы находится на абсолютных отметках - 106-112 м, незначительно понижаясь вдоль долины на юго-восток и практически сливаясь с поймой. Последнее обуславливает прорывы полых вод рек Днепр и Припять на террасу между "островами", что зафиксировано многочисленными следами современного меандрирования, что особенно четко видно на аэрофотоснимках. На месте древних рукавов наиболее глубокие их участки (ямы) заторфованы. Известная мощность торфа не превышает 1,0-1,2 м.

Пойменная терраса (Д-2-4) в долине р. Припять достаточно обособлена на топокартах и аэрофотоснимках от первой надпойменной террасы низкого уровня благодаря своему гравистому рельефу, тогда как на р. Уж она незаметно переходит в поверхность первой надпойменной террасы низкого уровня. Ширина современного пояса меандрирования р. Припять составляет около 7 км вблизи устья р. Словечна, уменьшаясь до 4 км в районе АЭС и затем вновь увеличиваясь до 10-11 км ниже впадения р. Уж. Ее строение охарактеризовано по Довлядскому створу [2] и многочисленными скважинами в районе ЧАЭС, г. Чернобыль, сел Парышев, Нивецкое и др. Судя по этим скважинам, мощность современного аллювия составляет 10-20 м, выражен базальный горизонт и две наложенные свиты, которые разделяются погребенными пойменно-старичными отложениями приблизительно на уровне 6-3 м от поверхности. Верхняя свита включает русловый аллювий мощностью 2-3 м и пойменный, мощностью 3-4 м. Строение последнего аналогично строению пойменных фаций первой надпойменной террасы высокого уровня р. Припять.

Существуют многочисленные определения грансостава аллювиальных отложений, однако за редким исключением они являются точечными, характеризующими отдельные серии отдельных фаций. На конкретном материале по аллювию рек Днепр, Припять и других

105

показано, что состав аллювия существенно меняется в разных аллювиальных свитах между фациями и внутри фаций [2]. Кроме того, при отборе образцов следует учитывать выраженность фаций, условия залегания свит (прислонение, наложение, вложение) и др. Все элементарные аллювиальные свиты равнинных рек умеренного пояса построены однотипно: сверху - пойменные (пойменно-старичные) фации, внизу - базальный горизонт, в средней части - русловые фации. В случае прислонения и вложения сохраняется весь разрез свиты, а при наложении свит - в нижней (нижних) свите сохраняются, как правило, только русловые и базальные горизонты.

Наблюдается также общая тенденция изменения грансостава аллювиальных свит по разрезу - его укрупнение. Однако в количественном отношении она различна у разновозрастных свит, а именно это и определяет реальный гранулометрический состав всей толщи аллювия. По данным [2], алеврит-глинистые фракции в русловых фациях аллювия на рассматриваемом участке Нижней Припяти составляют 1-3 %, возрастая до 10-12 % в базальном горизонте, тогда как пойменный аллювий имеет весьма широкий разброс значений, при этом максимум суммарного содержания алеврит-глинистой фракции достигает 18-22 %.

В бассейне р. Припять аллювиальные отложения состоят из кварца (92-96 %), полевого шпата (1-2 %), тяжелых (1-2 %) и глинистых (1-2 %) минералов [8]. Особенность отложений пойменных фаций - накопление гипергенных окислов железа, фосфатов, карбонатов, опала. В старицах образуются кальцит и арагонит в форме раковин моллюсков, пирит и марказит при разложении органического вещества.

Выводы. Выделенные районы, различающиеся по типу разреза неоген-антропогенной толщи, могут быть положены в основу ее гидрогеологического районирования с целью изучения миграции радионуклидов с подземными водами.

В районах "Плато" миграция радионуклидов в обозримом будущем будет ограничена толщей эоловых и ледниковых отложений на водоупоре из слабо проницаемых неогеновых глин, которые здесь являются главным механическим и сорбционным барьером. Роль основных морен в этом отношении значительно меньше. Они способны замедлить или задержать на какое-то время вертикальную миграцию на ограниченных участках. Дренаж в более глубокие горизонты, в частности пески полтавской серии, возможен только по некоторым наиболее глубоким эрозионным врезам, например в нижнем течении рек Бобер, Илья и др. Разгрузка грунтовых вод района "Плато" происходит на поверхность речных террас или в толщу их отложений.

Аллювиальные отложения районов "Речные долины", за исключением второй надпойменной террасы, представляют единую водовмещающую толщу, которая различается по степени вертикальной защищенности от миграции радионуклидов. В пределах древней долины ранне-среднеантропогенного возраста аллювиальные отложения перекрыты чехлом ледниковых отложений, которые включают основные морены. Этот чехол, несомненно, замедляет фильтрацию в нижележащие горизонты. Однако их значение как регионального защитного барьера, в частности для территории "Корогодской моренно-водноледниковой равнины" [4], не обосновано преувеличивается.

Большую роль в защите горизонтов грунтовых вод играют покровно залегающие отложения пойменных фаций первой надпойменной и современной пойменной террас, хотя они в отличие от морен представляют собой только более "густое сито". Песчаные толщи аллювия первой надпойменной террасы низкого уровня полностью лишены защиты и могут служить контрольным репером для изучения миграции радионуклидов для толщ, содержащих различные глинистые слои.

106

Предполагаемые "ловушки" и "барьеры" для проникающих радионуклидов связаны с экспонированными и погребенными отложениями (глинами, супесями-суглинками и

торфяниками) морен напора, суффозионно-просадочных и термокарстовых западин, котловин выдувания, ложбин стока талых ледниковых вод, эрозионных ложбин и балок, а также стариц. По отложениям, выполняющим некоторые эрозионные формы и ложбины стока ледниковых вод, возможен латеральный отток загрязненных грунтовых вод в сторону долин. В тех случаях, когда границы между выделенными районами и подрайонами представлены эрозионными субвертикальными поверхностями раздела, последние представляют интерес как линейные барьеры разного типа, а также зоны разгрузки грунтовых вод.

Обсуждение и предложения. Выполненная типизация разрезов неоген-антропогенной толщи тридцатикилометровой зоны и сделанные на этой основе выводы являются предварительным шагом в изучении геологической среды миграции радионуклидов с подземными водами. Заложена база для формализации геологической информации и ее совмещения с блоком гидрогеологических данных для последующего создания общих математических моделей и геоинформационных систем мониторинга. Полагаем, что только с учетом этой (или подобной типизации) должны интерпретироваться результаты натурных наблюдений и экспериментов над скважинами и другими водопунктами.

Кроме того, исходя из проведенного районирования, может быть предложена оптимальная сеть наблюдательных полигонов, охватывающая типичные участки каждого района и скорректировано размещение уже действующих наблюдательных участков вблизи Чернобыльской АЭС. В качестве новых первоочередных полигонов по геологическим критериям могут быть предложены участки у с. Толстый Лес (плато и вторая надпойменная терраса); севернее сел Нивецкое (пойма и первая надпойменная терраса низкого уровня) и Чистогаловка (напорные морены). В первых двух случаях участки обеспечены относительно густой сетью инженерно-гидрогеологических скважин под строительство осушительных систем, а в третьем - под строительство комплекса "Вектор". Предпочтение следует отдавать створному размещению наблюдательных скважин вкост возможного падения водоупоров и закладываемых с учетом особенностей геологического строения каждого участка.

Дальнейшая более детальная разработка вопросов о влиянии геологической среды на миграцию радионуклидов требует проведения дешифровочных работ на аэрофотоматериалах с целью выявления подповерхностных погребенных ловушек, барьеров и путей транспорта радионуклидов, а также зондировочного профильного бурения поверхностных отложений на наименее изученных в геологическом отношении участках плато на междуречье Уж-Словечна, в древней долине (район сел Корогод-Стечанка-Черевач) и напорных моренах - в районе сел Лелев-Буряковка. По нескольким опорным скважинам и обнажениям необходимо также получить литологические характеристики отдельных генетических и возрастных горизонтов по всему разрезу, а также увязать их с гидрогеологическими свойствами отложений.

1. Веклич М.Ф. Четвертинні відклади правобережної частини Середнього Придніпров'я. - Київ: Наук. думка, 1958. - 158 с.
2. Горецкий Г.И. Аллювиальная летопись Великого Пра-Днепра. - М.: Наука, 1970. - 492 с.
3. Гожик П.Ф., Лаврушин Ю.А., Чугунный Ю.Г. Чернобыльско-Чистогаловский комплекс краевых ледниковых образований. - Киев.: Наук. думка, 1976. - 30 с.
4. Давыдчук В.С., Зарудная Р.Ф., Михели С.В. и др. Ландшафты Чернобыльской зоны и их оценка по условиям миграции радионуклидов / Под ред. А.М. Маринича. - Киев.: Наук. думка, 1994. - 112 с.
5. Дромашко С.Г. Минералогия и геохимия флювиогляционных отложений Белоруссии. - Минск.: Наука и техника, 1981. - 248 с.
6. Ильин Е.А. Сравнительная литолого-минералогическая характеристика континентальных кайнозойских глин юга и юго-востока Белоруссии // Геология и геохимия антропогена Белоруссии. - Минск: Наука и техника, 1974. - С. 181-202.
7. Косыгин Ю.А. Основы тектоники. - М.: Недра, 1974. - 216 с.
8. Кузнецов В. А. Геохимия аллювиального литогенеза. - Минск: Наука и техника, 1973. - 278 с.
9. Левков Э.А., Манькин С.С. Основные особенности литологического состава верхнеолигоценых и неогеновых отложений Белоруссии // Литология, геохимия и полезные ископаемые Белоруссии и Прибалтики. - Минск, 1970. - С. 23-31.

10. Матошко А.В. О соотношении эндогенных и экзогенных факторов в развитии эоловых форм Полесья // Тектоника и стратиграфия. - 1978. - № 15. - С. 56-63.

11. Матошко А.В. Краевые ледниковые образования правобережной части Украинского Полесья // Докл. АН УССР. Сер. Б. - 1980. - № 4. - С. 14-19.

12. Матошко А.В. Особенности развития рельефа Белорусского Полесья в позднем плейстоцене и голоцене // Строение и вопросы корреляции четвертичных отложений Украины. - Киев: Наук. думка, 1981. - С. 36-43.

13. Матошко А.В. О перигляциальных надморенных образованиях Полесья // Вклад академика П.А. Тутковского в изучение геологического строения земной коры Белоруссии. - Минск: Наука и техника, 1985. - С. 47-56.

14. Матошко А.В., Чугунный Ю.Г. Днепровское оледенение территории Украины (геологический аспект). - Киев: Наук. думка, 1993. - 192 с.

Ин-т геологических наук НАН Украины, Киев

Поступила 18.05.96

УДК 539.1.074:621.384.613:614.73.539

В. С. Репин

РЕТРОСПЕКТИВНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ДОЗ И ОЦЕНКА РОЛИ ОТДЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ В ОБЛУЧЕНИИ ЖИТЕЛЕЙ, ЭВАКУИРОВАННЫХ ИЗ ТРИДЦАТИКИЛОМЕТРОВОЙ ЗОНЫ ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧАЭС

Представлены результаты реконструкции доз облучения жителей, эвакуированных из тридцатикилометровой зоны ЧАЭС. Реконструкция выполнена для основных дозообразующих источников: внешнего гамма-облучения, изотопов вода, доз от ингалированных радионуклидов, доз внешнего бета-облучения. Сравнительная характеристика факторов облучения дана в терминах риска.

ВВЕДЕНИЕ

Население тридцатикилометровой зоны, первым принявшее на себя удар Чернобыльской аварии, подверглось облучению со стороны многих факторов и источников облучения.

За период от начала аварии до момента эвакуации источники облучения жителей Зоны могут быть квалифицированы как переменные во времени и пространстве смешанные поля гамма- и бета-облучения, формирующиеся в процессе распространения и осаждения радиоактивности в форме полидисперсных аэрозолей моно- и полинуклидного состава.

Каждому источнику, или виду, облучения можно приписать совокупность органов, или тканей, на которые это облучение, прежде всего, было направлено.

© В. С. Репин, 1996

108

Мишенями облучения были при этом все тело, отдельные органы или даже ограниченный объем ткани. Наиболее облучаемыми органами явились щитовидная железа, легкие, нижний отдел толстого кишечника, открытые участки кожи и хрусталик глаза. Каждый из перечисленных органов испытал двойную лучевую нагрузку: от общего гамма-облучения тела и всех его органов и от специфических видов облучения, избирательно действующих только на данный орган.

Предварительный анализ радиационной ситуации и источников информации о дозах облучения показал, что воссоздание полной картины облучения возможно лишь на основе методов ретроспективной дозиметрии, при этом в литературе почти не описаны подходы, разработанные для анализа столь сложных ситуаций.

В процессе разработки методической схемы реконструкции доз показано, что наиболее корректная их оценка возможна на основе системного подхода, базирующегося на определенных принципах, базовой информации и соответствующих методах.

В работе сформулированы и положены в основу реконструкции следующие принципы: разбивка территории на зоны, в пределах которых можно пренебречь фактором неравномерности; выделение однородных по облучению групп населения; обобщение информации в виде закономерностей; перенос закономерностей с малых выборок на большие; взаимообусловленность параметров радиационной обстановки; использование альтернативных подходов к реконструкции доз; гарантия достоверности.

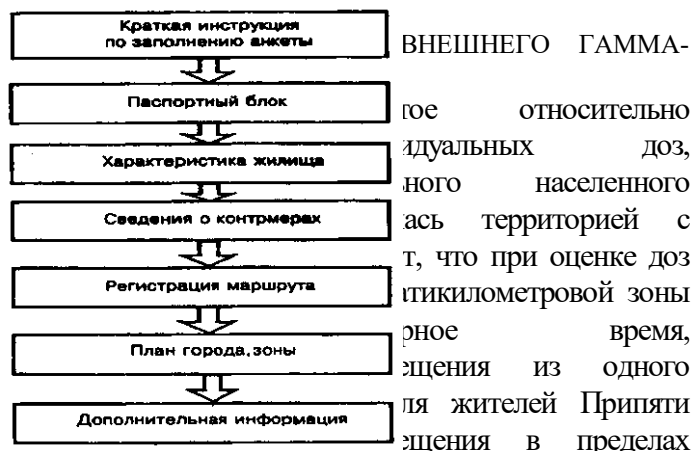
Информационную основу реконструкции составили базовые и вспомогательные источники информации. К числу базовых отнесены данные о динамике мощности экспозиционной дозы (МЭД) в населенных пунктах тридцатикилометровой зоны, результаты прямых измерений щитовидной железы и массового анкетного опроса жителей о маршрутах перемещения и режимах поведения, а также отдельных выборочных исследований.

РЕТРОСПЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА ОБЛУЧЕНИЯ

Принципиальное решение, метода реконструкции состояло в том, что территория пункта Зоны, кроме г. Припять, равномерным загрязнением. Отсюда облучения жителей необходимо было учитывать проведенное на улице или в доме и населенного пункта в другой, тогда необходимо было также учитывать и города.

В основу метода положены опросные листы, приведена на рис. 1.

Рис. 1. Структура анкеты, при реконструкции дозы внешнего гамма-облучения



реконструкции были структурная схема которых

заполняемой эвакуантом

Для установления индивидуальной дозы облучения, полученной жителем Зоны в период от начала аварии до момента эвакуации, необходимо иметь такие сведения: местонахождение и тип дома проживания или пребывания;

109

динамика гамма-фона в населенном пункте проживания или в отдельных точках г. Припять; фиксированные моменты пребывания на открытом воздухе; маршрут перемещения и его особенности; перечень предпринятых контрмер; момент, характер и место эвакуации.

Кроме того, метод предусматривал идентификацию личности эвакуанта в пределах его паспортной части и профессии, что позволило в последующем установить закономерности поведения и формирования доз облучения в зависимости от пола, возраста и рода занятий.

Расчет индивидуальной дозы внешнего облучения. В основу расчета положена динамика радиационной обстановки в населенных пунктах Зоны и в г. Припять.

Расчет индивидуальных доз внешнего облучения осуществлялся по формулам (1) и (2):

$$D_{\gamma} = \sum_n P_i(t_n) \Delta t_n + K_3 \times \sum_m P_i(t_m) \Delta t_m = D_{i0} + K_3 D_{i3} \quad (1)$$

где t_n и t_m - фиксированные моменты измерения МЭД; D_{i0} и D_{i3} - значения доз, накопленных на открытой местности в точке i за промежутки времени пребывания соответственно вне зданий и внутри; K_3 - коэффициент защиты зданий, частично равный отношению значений МЭД внутри и вне зданий.

При перемещении объекта облучения в различные точки пространства расчет накопленной дозы облучения можно выполнить по упрощенной схеме посредством суммирования доз в этих точках, однако, часть дозы, которая получена на маршруте перемещения, из расчета исключается:

$$D_{\gamma} = \sum_i D_{i0} + K_3 D_{i3}, \quad (2)$$

Здесь значения D_{i0} и D_{i3} являются результатом интегрирования функции МЭД в принципиально различающиеся и взаимно исключаяющие друг друга промежутки времени,

поэтому при существенных перепадах МЭД это обстоятельство необходимо обязательно учитывать.

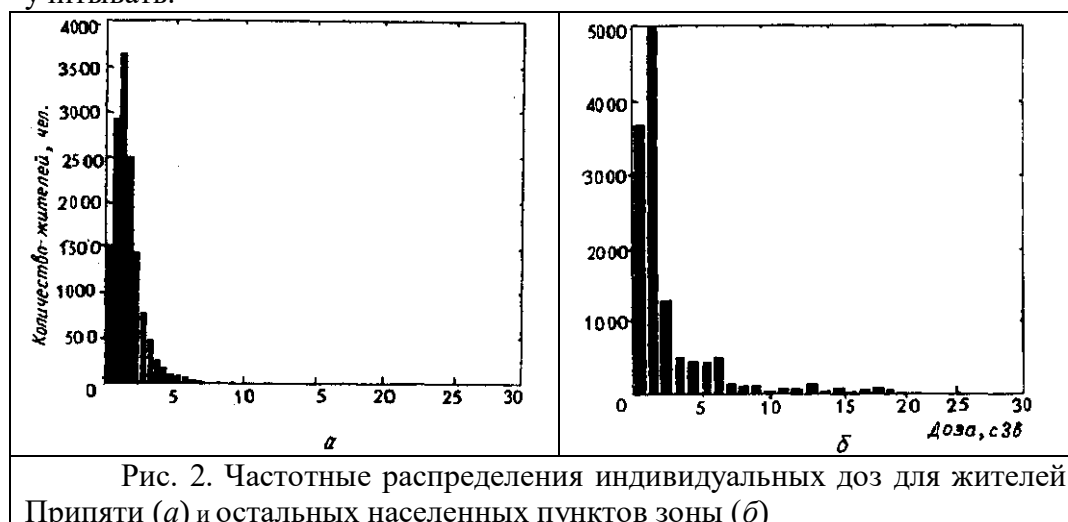


Рис. 2. Частотные распределения индивидуальных доз для жителей Припяти (а) и остальных населенных пунктов зоны (б)

Коэффициент защиты зданий принимался равным 10 - для высотных домов городского типа и 3 - для домов сельской местности. Последующие исследования коэффициента экранирования зданий показали, что значения этих коэффициентов намного выше [1]. При коррекции доз в будущем необходимо учитывать коэффициент экранирования.

110

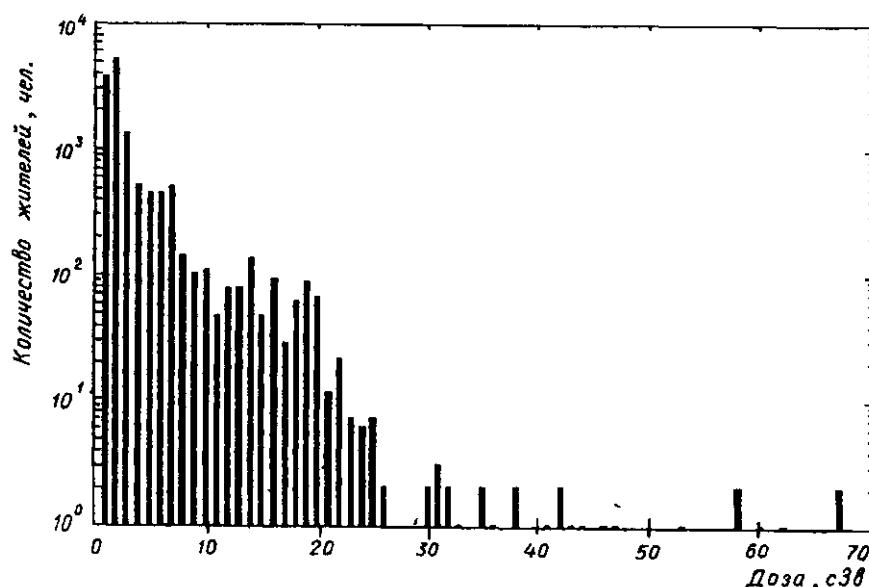


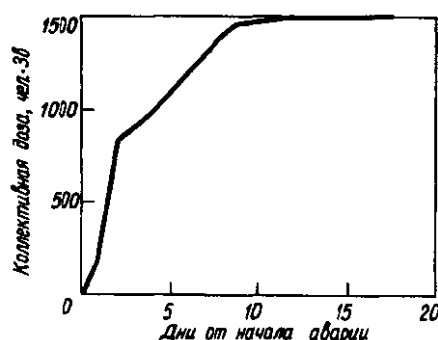
Рис. 3. Частотное распределение индивидуальных доз для жителей сел зоны (логарифмический масштаб)

Алгоритм расчета дозы внешнего облучения базировался на информации опросного листа о маршрутах перемещений. Кроме того, формулы расчета включали в себя динамику МЭД для фиксированных точек пространства, каковыми являлись либо населенный пункт, либо номер сектора в г. Припять.

Расчет дозы осуществлялся автоматически средствами базы данных, после чего результат заносился в специально выделенное поле.

В итоге реконструкции доз облучения получена база данных, содержащая сведения, необходимые для идентификации и расчета индивидуальных доз для 42473 из 89599 чел., эвакуированных с части тридцатикилометровой зоны, административно относящейся к Украине. Таким образом, в последующем обеспечивалась возможность сортировать массивы данных с целью построения дозовых распределений по выбранным признакам и выявить закономерности формирования доз в выделенных группах.

Общая характеристика дозовых распределений. Формирование доз внешнего облучения жителей населенных пунктов тридцатикилометровой зоны происходило в соответствии с радиационной обстановкой и заканчивалось к моменту эвакуации. Часть жителей, покидавших на короткий срок пункт проживания, могла в пункте посещения увеличить или уменьшить суммарную дозу облучения по сравнению с той, которая сформировалась бы в пункте проживания при условии непрерывного нахождения в нем.



Поскольку эвакуация жителей Зоны продолжалась две недели, то сопоставлять закономерности формирования доз жителей населенных пунктов, отселенных в разные дни, вряд ли имеет смысл. Вместе с тем, дозовые распределения для каждого населенного пункта в отдельности дают достаточно сумбурное представление о дозах облучения в целом. Учитывая, что почти половина населения тридцатикилометровой зоны жила в Припятском, а половина - в остальных пунктах Зоны, рассмотрим частотные распределения накопленных доз у этих двух обширных групп (рис. 2).

Для более наглядного представления о диапазоне доз облучения жителей Зоны это распределение дано на рис. 3 в логарифмическом масштабе.

111

Сравнивая эти распределения между собой, можно отметить следующие характерные особенности. Распределение для жителей г. Припять более гладкое. Оба распределения по форме напоминают логарифмически нормальные, однако, распределение доз у жителей населенных пунктов Зоны более растянуто в сторону больших доз.

Таким образом, получены два типа фактических распределений доз: для одномоментной эвакуации вскоре после начала аварии (г. Припять); для растянутой во времени эвакуации (населенные пункты зоны). Оба распределения позволяют обоснованно заключить, что относительно доз внешнего облучения эвакуация населения проведена без превышения существовавших на тот период критериев.

Формирование коллективной дозы. Для построения динамики накопления коллективной дозы у жителей тридцатикилометровой зоны производилось суммирование коллективных доз в населенных пунктах до момента их эвакуации (рис. 4). После эвакуации населенного пункта его коллективная доза оставалась неизменной и дальнейшее повышение этой дозы могло происходить только за счет не эвакуированных населенных пунктов.

На кривой зависимости (см. рис. 4) можно выделить два характерных участка. Первый из них заканчивается ко вторым суткам, т.е. к моменту эвакуации г. Припять. Коллективная доза достигает при этом 800 чел.·Зв. Дальнейший рост коллективной дозы в период со 2-го по 10-й день связан с постепенной эвакуацией населенных пунктов Зоны. Доза к десятым суткам возросла до 1500 чел.·Зв, и основная масса населения в этот период была эвакуирована. Дальнейший рост коллективной дозы был несущественным.

Рис. 4. Динамика изменения коллективной дозы внешнего облучения у жителей тридцатикилометровой зоны в период до эвакуации

Таблица 1. Характеристика дозовых подгрупп в процентах к численности населения г. Припять и других населенных пунктов тридцатикилометровой зоны (внешнее облучение)

Таблица 2. Характеристики некоторых параметров дозовых распределений для жителей г. Припять и тридцатикилометровой зоны

Дозовая подгруппа, сГр	г. Припять
0 - 5	98,58
>5	1,28
>10	0,14
>25	-
>50	-

Таким образом, последствия Чернобыльской аварии для жителей, эвакуированных из тридцатикилометровой зоны, по компоненте внешнего облучения могут быть выражены величиной коллективной дозы, равной 1500 чел. Зв.	
Территория	1,
г. Припять	2,
Населенные пункты тридцатикилометровой зоны	112

Характеристика дозовых подгрупп.

Из частотных распределений, представленных на рис. 2 и 3, видно, что диапазон доз облучения населения г. Припять и тридцатикилометровой зоны достаточно широкий. Интересно выяснить, в каких дозовых подгруппах находится та или иная часть эвакуантов. Деление на подгруппы выполнено условно, если учесть оценку эпидемиологических или радиобиологических последствий облучения. Однако основной является, по-видимому, доза 0,5 Гр - порог нестохастических эффектов [2, 3]. Процентные соотношения численности эвакуантов по дозовым подгруппам отдельно для г. Припять (49360 чел.) и тридцатикилометровой зоны (40239 чел.) приведены в табл. 1.

Отсюда видно, что дозы более 50 сГр, в соответствии с представленными частотными распределениями, получили лишь сотые доли процента жителей Зоны.



Рис. 5. Частотные распределения коэффициентов режима поведения жителей Припяти (а) и сел тридцатикилометровой зоны (б)

Оценка вероятности непланируемого облучения. Высокая степень неравномерности радиоактивного загрязнения территории тридцатикилометровой зоны и практически не ограничиваемый режим перемещений повышали вероятность переоблучения жителей. В связи с этим в практическом и теоретическом плане правомочным является вопрос о том, какова была вероятность получить дозы на уровне острой лучевой болезни (ОЛБ). Представленные ранее распределения доз на первый взгляд исключают такую возможность как для г. Припять, так и других населенных

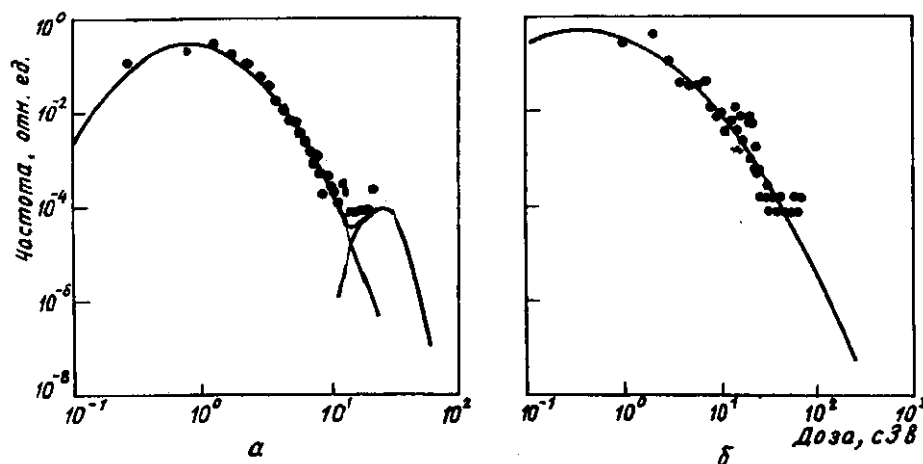


Рис. 6. Дифференциальные распределения доз внешнего облучения жителей Припяти (а) и тридцатикилометровой зоны (б)

пунктов Зоны. Однако следует учесть, что эти распределения построены для цензурированных выборок. Так, на основании результатов анкетирования было установлено, что около 15% жителей г. Припять перемещались за пределы городской черты. Данные об этих жителях не вошли в представленное дозовое распределение из-за отсутствия данных о радиационной обстановке на территориях, прилегающих к г. Припять, в частности в "рыжем лесу". Аналогичная ситуация возникла и относительно жителей Зоны, полный маршрут которых включал в себя точки пребывания с неизвестными параметрами радиационной обстановки, но с чрезвычайно высокой степенью загрязнения.

Таким образом, население Зоны условно можно разделить на две подгруппы: с ординарным и неординарным режимами перемещений, причем вторая подгруппа в дозовом распределении не представлена из-за отсутствия данных.

Рассмотрим детальнее, какие факторы могли влиять на дисперсию распределения, и что способствовало формированию более высоких значений доз. При равномерном загрязнении территории более высокие значения доз наблюдаются у лиц, эвакуированных в более поздние сроки и с более длительным временем пребывания на улице. Для г. Припять эвакуация прошла практически одномоментно и, следовательно, при ее равномерном загрязнении крайние значения доз должны были различаться максимум в восемь раз, а среднее и максимальное значения доз - приблизительно в три раза (рис. 5).

Аналогичные соотношения доз можно было бы наблюдать и для жителей тридцатикилометровой зоны при ее равномерном загрязнении. Причем максимальные и средние значения дозы различались бы даже меньше чем в три раза. Это следует из особенностей распределения коэффициентов режима поведения жителей тридцатикилометровой зоны и г. Припять, представленных на рис. 5, диапазон колебаний которых 0,1-0,8 как для г. Припять, так и для жителей населенных пунктов Зоны. Однако распределение этих коэффициентов для жителей населенных пунктов Зоны (рис. 5, б) смещено вправо, при этом средняя величина коэффициента примерно в два раза больше, чем для жителей г. Припять. Сроки эвакуации, растянувшиеся для сел тридцатикилометровой зоны с 6-го по 18-й день должны были бы дополнительно втрое увеличить дозу. В итоге, при равномерном загрязнении территории максимальная и средняя величины доз должны были бы различаться в три раза для г. Припять и в шесть-десять раз для жителей тридцатикилометровой зоны. Фактические значения средней и максимальной доз

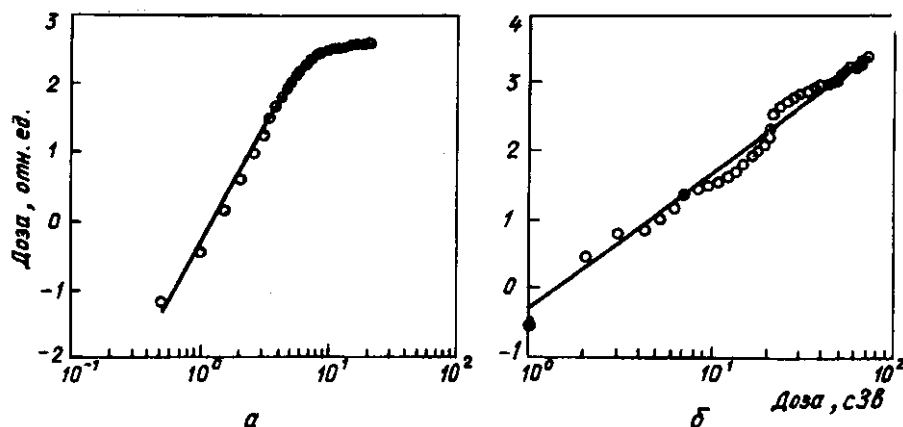


Рис. 7. Инверсия функции накопленных частот для кумулятивных распределении доз жителей Припяти (а) и населенных пунктов зоны (б)

приведены в табл. 2, где видны очень большие различия рассматриваемых величин, обусловленные фактором неравномерности.

Такое упрощенное описание, не претендующее на детальный анализ отдельных фрагментов фактического распределения, предполагает, что фактор неравномерности вносит в фактическое распределение более весомый, или, по крайней мере, сопоставимый вклад, чем режим поведения или срок эвакуации.

Полученные частотные распределения описаны логарифмически-нормальным распределением функции плотности вероятности или суммой двух распределений с учетом двух групп населения - с ординарным и неординарным режимами перемещений.

Фактические и теоретические распределения доз облучения приведены на рис. 6. Параметры теоретических распределений даны в табл. 3.

Таблица 3. Параметры теоретических распределений плотности вероятности доз для жителей г. Припять и тридцатикилометровой зоны

Территория	Параметр					
	p1	m1	s1	p2	m2	s2
г. Припять	0,997	1,23	0,66	0,003	25,20	0,86
Населенные пункты тридцатикилометровой зоны	1,0	1,40	1,15			

Параметры подбирались по двум критериям: наименьшее отклонение от фактического частотного распределения доз и наименьшее отклонение от кривой кумулятивного накопления частот.

Инверсное представление функций накопленных частот для г. Припять и населенных пунктов Зоны приведено на рис. 7.

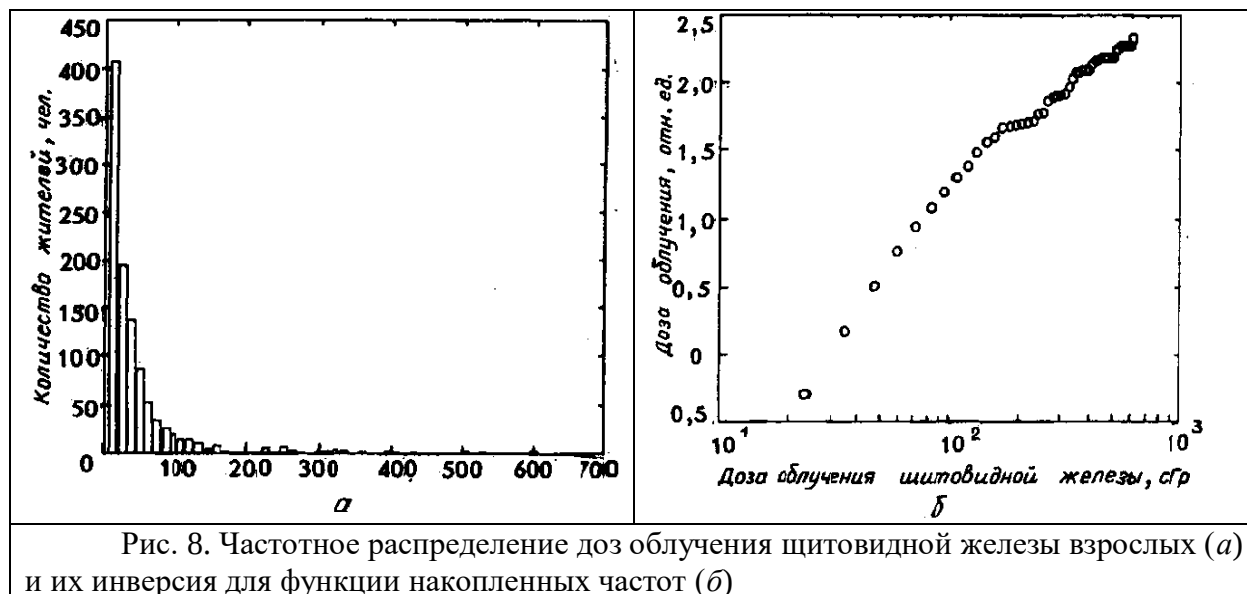
Из сопоставления распределений на рис. 6 и 7 видно, что правые части теоретических распределений для г. Припяти обозначены некоторым ростом вероятности облучения в диапазоне повышенных значений доз, и тем самым оправдывают существование второго распределения с параметрами, данными в табл. 3. Кривые, описывающие аналогичным образом распределения доз для жителей населенных пунктов Зоны, позволяют убедиться в том, что обычное логнормальное распределение позволяет отразить лишь наиболее общую тенденцию.

115

Сравнивая кривые на рис. 6 и 7, можно убедиться, что разложение фактического распределения для Зоны на сумму нескольких распределений намного сложнее, чем для г. Припять. Это и послужило аргументацией в пользу использования только одного распределения.

Таким образом, с одной стороны, мы имеем цензурированные выборки фактических данных, а с другой - теоретические распределения, не подтверждаемые прямыми данными в диапазоне высоких значений доз.

Тем не менее, общие тенденции дают нам некоторое право распространить теоретические значения плотности вероятности в область доз, где фактические данные отсутствуют.



Проинтегрировав теоретические функции плотности вероятности в диапазоне 25-50, 50-100 и более 100 сГр), получим интересующие нас значения вероятности непланируемого облучения жителей в диапазонах высоких значений доз. Результаты расчета представлены в табл. 4, из которой видно, что вероятность получения жителями г. Припяти (в пределах городской черты) доз на уровне острой лучевой болезни очень мала, но при этом могла быть реальностью для нескольких приблизительно из 50 тыс. чел. жителей сел Зоны.

116

Таблица 4. Оценка вероятности получения доз в диапазонах до 100 и свыше 100 сГр

Территория	Вероятность реализации доз в диапазонах		
	25-50 сГр	50-100 сГр	> 100 сГр
г. Припять	0,015	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-10}$
Населенные пункты тридцатикилометровой зоны	0,045	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$

Сложнее оценить вероятность получения высоких значений доз для жителей г. Припять, выезжавших за пределы городской черты. Для этого использовали информацию о соотношении локальной и фактической дозы у лиц, мигрирующих за пределы населенного пункта. Из анализа распределения отношений локальных и фактических доз оказалось, что величина фактической дозы может с вероятностью до 1 % превышать локальную дозу в 100 раз. В 10% случаев фактические дозы могли превышать локальные в 10-50 раз. Это значит, что из 7500 жителей г. Припять, составивших 15 % населения, выезжавшего за пределы города, около 75 чел. могли получить дозы более 100 сГр, а 750 чел. - от 10 до 50 сГр.

Представленные расчеты и оценки имеют очень приближенный характер и их следует воспринимать лишь как сигнал к тому, что проблема переоблучения могла затронуть определенную часть населения.

ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Дозы облучения щитовидной железы формировались за счет ингаляционного поступления - в период распространения облака и за счет поступления с продуктами питания (главным образом, с молоком и зеленью).

Таблица 5. Характеристика изотопов йода в реакторе на момент аварии

Радионуклид	Период полураспада	Активность, Бк/т	A_i/A_{131}
^{134}I	52,6 мин	$3,58 \cdot 10^{16}$	2,14
^{133}I	20,8 ч	$3,29 \cdot 10^{16}$	1,97
^{135}I	6,61 ч	$3,07 \cdot 10^{16}$	1,84
^{132}I	2,28 ч	$2,37 \cdot 10^{16}$	1,42
^{131}I	8,04 сут.	$1,67 \cdot 10^{16}$	1,0
^{137}I	24,7 с	$1,41 \cdot 10^{16}$	0,84
^{136}I	44,8 с	$1,22 \cdot 10^{16}$	0,73
$^{136\text{m}}\text{I}$	85,1 с	$1,03 \cdot 10^{16}$	0,62
^{138}I	6,40 с	$7,08 \cdot 10^{15}$	0,42
$^{134\text{m}}\text{I}$	3,56 мин	$4,15 \cdot 10^{15}$	0,25
^{139}I	2,47 с	$2,73 \cdot 10^{15}$	0,16
$^{133\text{m}}\text{I}$	9,0 с	$1,36 \cdot 10^{15}$	0,08
^{140}I	0,86 с	$6,26 \cdot 10^{14}$	0,04
^{130}I	12,36 ч	$5,58 \cdot 10^{14}$	0,03
$^{130\text{m}}\text{I}$	9,2 мин	$2,98 \cdot 10^{14}$	0,02
$^{132\text{m}}\text{I}$	83,6 мин	$2,09 \cdot 10^{14}$	0,01
^{128}I	24,99 мин	$1,17 \cdot 10^{14}$	0,01
^{141}I	0,42 с	$6,87 \cdot 10^{13}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
^{129}I	$1,57 \cdot 10^7$ лет	$9,18 \cdot 10^8$	$5,5 \cdot 10^{-8}$
^{126}I	13,02 сут.	$6,39 \cdot 10^6$	$3,8 \cdot 10^{-10}$
^{132}Te	78 ч	$2,33 \cdot 10^{16}$	1,40

117

Второй путь поступления радиоиода в организм имеет наибольшее значение для жителей, отселенных из Зоны в более поздние сроки, или для оказавшихся отселенными в Зону радиоактивного загрязнения за пределами тридцатикилометровой зоны.

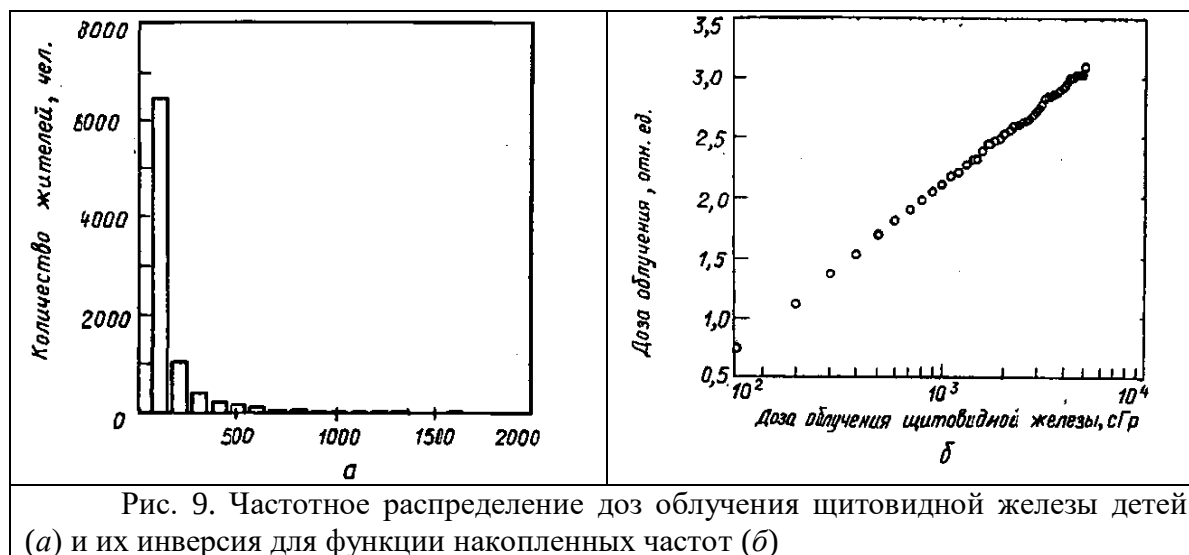
Изотопы йода по территории Зоны распространялись в тех же направлениях, что и другие радионуклиды. Однако наблюдалась существенная температурная сепарация изотопов йода, благодаря которой происходило обогащение или обеднение осколочной смеси радиойодом по направлениям выброса.

Метеообстановка в этот период определила и главные направления йодной атаки: северо-западное, северное и северо-восточное.

Характеристика изотопов йода в выбросе. Перечень для 21 изотопа йода, образовавшегося в реакторе, представлен в табл. 5.

Большинство приведенных радионуклидов не представляет опасности. Можно исключить из расчета дозы облучения радионуклиды, период полураспада которых составляет секунды и минуты или те из них, удельная активность которых на 1 т топлива на один или несколько порядков ниже, чем активность радионуклидов верхней части таблицы. Наибольшее значение при облучении щитовидной железы имеют следующие изотопы: ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{135}I и ^{132}Te

Информационная основа для анализа и оценки доз облучения щитовидной железы. Массовые измерения содержания радиойода в щитовидной железе у эвакуированных жителей составили основу анализа закономерностей формирования доз у жителей Зоны отчуждения. Было выполнено 10 690 измерений, из которых 9625 - у детей и 1065 - у взрослых.



Важный момент при анализе дозовых распределений - выбор возрастных подгрупп. Современные дозиметрические модели имеют шесть градаций возраста: 3 мес., 1; 5; 10; 15 и старше 20 лет. В настоящей работе, для увеличения статистики в пределах младших возрастных групп, целесообразно выделить следующие возрастные диапазоны: менее 1 года, 1-3; 4-7; 8-11; 12-15; 16-18 и более 18 лет.

118

Таблица 6. Параметры частотных распределений доз облучения щитовидной железы у обследованных жителей тридцатикилометровой зоны в различных возрастных подгруппах

Возрастная группа, лет	Медиана распределения, сГр	Дисперсия	Максимальная доза, сГр	Число измерений	Процент лиц с дозой облучения более 2 Гр
Менее 1	247,70	690,70	4472	100	57,0
1-3	167,60	536,90	4997	1228	42,6
4-7	79,80	307,30	4978	1785	19,9
8-11	26,12	110,20	1661	2679	5,41
12-15	17,22	72,70	1241	3107	2,37
16-18	14,80	55,20	570	726	2,07
Более 18	24,66	67,70	800	1065	3,62
Всего измерений 10676					

Общая характеристика дозовых распределений. Наиболее общее представление о дозах облучения щитовидной железы дают частотные распределения доз и соответствующие им пробит-графики.

Распределение доз у детей (рис. 8) подчиняется логарифмически-нормальному закону, а у взрослых (рис. 9) диапазон высоких значений доз обозначается изломом пробит-графика, что свидетельствует о дополнительной составляющей распределения.

Диапазон доз облучения детей существенно шире, чем взрослых, и количество детей, получивших дозы облучения щитовидной железы более 2 Гр (порога возможного развития острого тиреоидита) намного больше.

Параметры представленных на рис. 8 и 9 дозовых распределений приведены в табл. 6, из которой следует, что с увеличением возраста медиана распределения постепенно смещается влево и снижается процент лиц, облученных дозами более 2 Гр. Некоторое исключение составляет лишь группа взрослого населения, у которых медиана распределения почти вдвое превышает медиану старшей возрастной группы детей от 16 до 18 лет.

Закономерности формирования доз облучения щитовидной железы

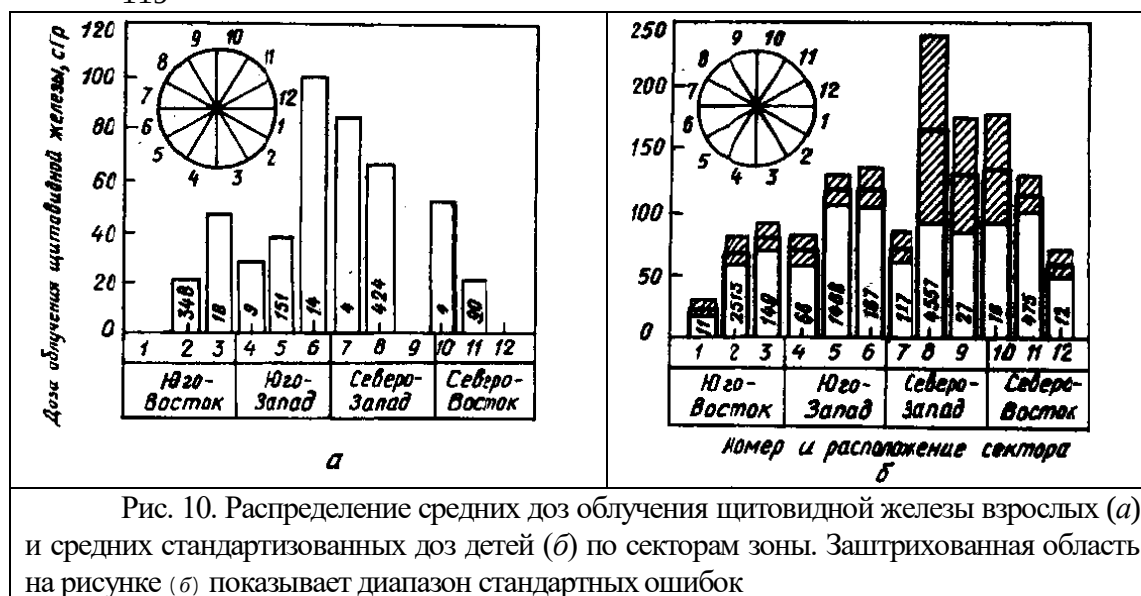
Из предварительного анализа дозовых распределений трудно сказать, насколько именно эти распределения адекватны для всего населения Зоны. Дело в том, что количество измерений щитовидной железы у взрослых жителей не превышало 2% общей численности взрослого населения, а сравнительно большое количество измерений у детей проведено в основном в Припяти и Чернобыле.

Очевидно, что закономерности формирования доз облучения способствовали бы выделению дозовых подгрупп, внутри которых присвоение доз происходило бы с наибольшей степенью достоверности.

Поиск закономерностей проводился в следующих направлениях: исследование пространственных закономерностей формирования доз; исследование влияния фактора времени; исследование роли защитных мероприятий.

За основу сравнительного анализа доз облучения будем брать населенный пункт, полагая, что в пределах его условия формирования доз внутри отдельных возрастных групп идентичны.

119



Понятие стандартизованной дозы облучения щитовидной железы. Если учитывать, что разброс доз облучения между возрастными группами достаточно велик, то поиск закономерностей в отдельных возрастных группах при множестве факторов, влияющих на дозы облучения, затруднителен. Необходимо найти такую однородную возрастную группу, численность которой была бы достаточна для статистического обобщения. К сожалению, такую группу найти невозможно, поскольку группы одного возраста разбиваются еще по принципу момента эвакуации из тридцатикилометровой зоны.

Для повышения статистической мощности обобщения предлагается ввести понятие стандартизованной дозы облучения щитовидной железы, т.е. дозы, приведенной к одному возрасту. В данной работе стандартизованные дозы облучения детей приводятся к дозам облучения взрослых путем деления на коэффициент, равный отношению дозовых коэффициентов в соответствующей детской группе к дозовому коэффициенту взрослых.

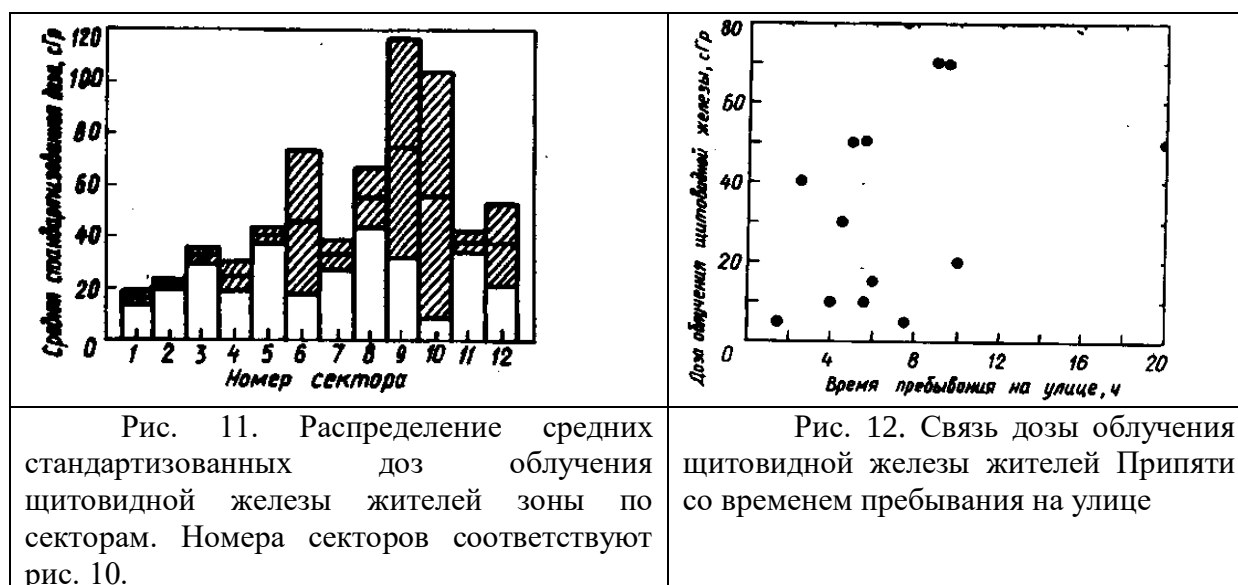
Пространственное распределение доз облучения щитовидной железы. Темп выброса изотопов йода из реактора и перемена направлений и скорости ветра привели к тому, что различные секторы Зоны подверглись йодной атаке в различной степени. Рассмотрим, как средние значения доз облучения щитовидной железы детей и взрослых распределены по секторам. Каждый сектор представляет собой часть Зоны, ограниченную радиусами, расходящимися под углом 30 градусов. Начало отсчета секторов ведется с юго-восточного направления. Информация о средних дозах облучения приведена на рис. 10, из которого видно, что дозы облучения щитовидной железы жителей северной части Зоны выше доз облучения, чем южной, что согласуется с основными направлениями йодной атаки. Однако размеры выборок по секторам резко различаются. В некоторых секторах средние значения доз представлены единичными измерениями, а для взрослых, проживавших в 1, 9 и

11 секторах Зоны, информация вообще отсутствует. Соотношение численности возрастных групп по секторам также не одинаково, что затрудняет возможность сравнения доз облучения у детей в различных секторах.

Использование
доз позволяет устранить отмеченные
Распределение средних
доз по секторам показано на рис. 11.

стандартизованных
недостатки.
стандартизованных

120



Следует отметить, что характер распределения доз в целом сохранился. Кроме того, абсолютные значения стандартизованных доз согласуются со средними дозами для взрослых, представленных на рис. 10.

Для наиболее пострадавшей северной части Зоны прямых измерений недостаточно, о чем свидетельствуют большие значения стандартных ошибок (заштрихованные области на рис. 10 и 11).

Влияние на дозы фактора времени. Среди факторов, оказывающих влияние на дозу облучения щитовидной железы, фактор времени должен иметь важное значение. В частности, более длительное время пребывания на улице или более поздние сроки эвакуации должны приводить к возрастанию дозы. Однако проверка этого предположения наталкивается на ряд трудностей, связанных с выбором однородной группы, т. е. группы лиц примерно одного возраста, не принимавших препараты йода, проживающих в одном населенном пункте и имеющих сведения о режиме поведения. Для оценки связи дозы с временем пребывания на улице была отобрана группа взрослых лиц, эвакуированных из Припяти в Ленинград и обследованных в Военно-медицинской академии. Установлено, что 14 чел. из 64 эвакуированных не принимали препараты йода, поэтому после измерения активности ^{131}I в щитовидной железе и для расчета дозы был проведен подробный опрос режима поведения обследуемых в период от начала аварии до момента эвакуации. С увеличением времени пребывания на улице доза облучения повышается (рис. 12).

Для оценки связи дозы облучения щитовидной железы с моментом эвакуации из тридцатикилометровой зоны отобраны населенные пункты,

Таблица 7. Средние дозы облучения щитовидной железы по населенным пунктам и секторам Зоны

Дата эвакуации	Населенный пункт (сектор)	Дети		Взрослые	
		Доза, Гр	> 2 Гр, %	Доза, Гр	> 2 Гр, %
27.04.86	Припять (8)	1,3	15,1	0,8	6,6
03.05.86	(1, 2, 3)	1,1	11,2	0,5	-
03.05.86	(6, 7, 8)	1,2	12,1	0,6	3,8
05.05.86	Чернобыль (2)	0,8	5,6	0,5	-
07.05.86	(1, 2)	1,9	27,7	0,8	8,3

121

относящиеся к различным секторам Зоны, из которых были эвакуированы жители в различные сроки. Средние дозы облучения для населенных пунктов и секторов приведены в табл. 7, из которой следует, что дата эвакуации практически не влияет на дозы облучения. Так, Припять, эвакуированная 27 апреля и относящаяся к сектору 8 Зоны, имеет даже несколько большую среднюю дозу по сравнению со средней дозой населенных пунктов, расположенных в секторах 6, 7 и 8 и эвакуированных 3 мая 1986 г. Только для населенных пунктов секторов 1 и 2, эвакуированных 7 мая, наблюдаются несколько большие значения доз у взрослых и почти вдвое большие - у детей.

Влияние на дозы облучения щитовидной железы защитных мероприятий. К числу защитных могут быть отнесены: блокада щитовидной железы стабильным йодом; герметизация помещений; ограничение времени пребывания на улице. Последнее мероприятие слабо влияет на величину дозы облучения. Не исключено, что это связано с открытием окон в домах и квартирах, поскольку в тот период стояла достаточно жаркая погода.

Таблица 8. Результаты опроса 854 жителей Припяти о проведении йодной профилактики

Рассмотрим влияние на дозы облучения йодной профилактики. Для этого использованы результаты анкетного опроса 854

Сведения	Жителей, эвакуированных из Припяти. Анкеты
Не принимали препараты йода	содержали вопрос о приеме препаратов йода, а
Принимали препараты йода	также, в какие дни и сколько раз эти препараты
Из них:	принимались.
Только 26 апреля	Общая характеристика особенностей
Только 27 апреля	йодной профилактики жителей Припяти
26 и 27 апреля	приведена в табл. 8.

Из табл. 8 видно, что 27% жителей не принимали препаратов йода в доэвакуационный период. А среди жителей, имевших представление об опасности изотопов йода и узнавших об аварии, основная часть принимала препараты йода только в первый день и только 13,5 % жителей принимали препараты их два дня подряд.

Как отразились особенности йодной профилактики или ее отсутствие на дозах облучения, видно из табл. 9. Наибольший защитный эффект достигался при приеме препаратов йода 26 и 27 апреля. Медиана доз облучения уменьшалась при этом в 2,3 раза. Прием препаратов йода только 26 или только 27 апреля давал примерно одинаковый эффект, равный 1,6-1,7.

Таблица 9. Средние значения стандартизованных доз облучения щитовидной железы жителей Припяти в зависимости от отношения к йодной профилактике

Параметр	Средняя стандартизованная доза, сГр			
	Не принимали препараты йода	Принимали препараты йода только 26 апреля	Принимали препараты йода только 27 апреля	Принимали препараты йода 26 и 27 апреля
Среднее арифметическое	60,5	47,4	40,3	31,2
Стандартная ошибка	7,0	6,4	6,3	6,8
Среднее геометрическое	30,8	18,3	19,4	13,1

122

Вклад короткоживущих изотопов йода в дозу облучения щитовидной железы. Значительная часть активности ^{131}I была выброшена вместе с короткоживущими радионуклидами (см. табл. 5). Однако к моменту измерений содержания радиойода в щитовидной железе короткоживущие изотопы распадались и приборы регистрировали лишь долгоживущий ^{131}I . Таким образом, возникает вопрос о вкладе в дозу облучения щитовидной железы короткоживущих изотопов йода или их предшественников. Из всего многообразия изотопов, представленных в табл. 5, дополнительную дозу облучения могли дать лишь ^{132}I , ^{133}I , ^{135}I , ^{132}Te . Последний (^{132}Te) в процессе радиоактивного распада превращался в ^{132}I и избирательно накапливался в щитовидной железе. Соотношение изотопов йода в выбросе изменялось по мере радиоактивного распада отдельных компонентов смеси, поэтому вклад в дозу облучения мог зависеть от времени, прошедшего от начала аварии до момента поступления в организм и от длительности. Для упрощения расчетов принято, что период облучения населения тридцатикилометровой зоны за счет радиоактивного йода длился от начала аварии до момента эвакуации. В основу расчета дозы облучения от изотопов йода положена экспоненциальная модель поступления, согласующаяся с периодом полураспада соответствующего радионуклида. Дозиметрическая модель ^{132}Te учитывала накопление дочернего ^{132}I и его радиоактивный распад во внешней среде и в организме человека. Дозы облучения щитовидной железы от отдельных радионуклидов выражались в относительных единицах к дозе облучения от ^{131}I , рассчитанной для той же длительности контакта. Результаты расчетов приведены в табл. 10, из которой следует, что наибольший вклад в дозу облучения давали ^{133}I и ^{132}Te . С увеличением длительности поступления вклад в дозу короткоживущих изотопов йода уменьшался. Например, при длительности поступления изотопов йода 1 ч, вклад в дозу облучения составлял 66 %, а за 10 дней - только 22 %.

Таблица 10. Относительный вклад отдельных короткоживущих радионуклидов в дозу облучения щитовидной железы: от ^{131}I в зависимости от длительности поступления

Изотоп	Длительность воздействия, ч						
	1	5	10	20	36	96	240
^{132}I	$8,7 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
^{133}I	$3,5 \cdot 10^{-1}$	$3,3 \cdot 10^{-1}$	$3,1 \cdot 10^{-1}$	$2,7 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$6,8 \cdot 10^{-2}$
^{135}I	$5,9 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$
^{132}Te	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$2,3 \cdot 10^{-1}$	$2,3 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$
Сумма	$6,6 \cdot 10^{-1}$	$6,2 \cdot 10^{-1}$	$5,8 \cdot 10^{-1}$	$5,2 \cdot 10^{-1}$	$4,5 \cdot 10^{-1}$	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$

Результаты расчета, приведенные в табл. 10, позволяют заключить, что жители Припяти и других населенных пунктов, эвакуированные 27 апреля 1986 г., получили дополнительную дозу облучения щитовидной железы за счет короткоживущих изотопов, составляющую 45 % от дозы 131 j

ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ОТ ИНГАЛИРОВАННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ

Выброс радиоактивности в окружающую среду из разрушенного блока реактора можно представить в виде облака аэрозолей, движущихся на некоторой высоте со скоростью перемещения воздушных масс. Основная часть активности радионуклидов, выпавших на территории

123

Зоны отчуждения, была выброшена из реактора в форме топливных и аэрозольных частиц, геометрические размеры которых и аэродинамические параметры находятся в диапазоне от долей микрона до десятков микрон. В процессе движения облака топливные частицы выпадали на почву, благодаря чему концентрация радионуклидов в воздухе и плотность их выпадений возрастали, формируя локальную радиационную обстановку. Возрастала и мощность экспозиционной дозы, а если в месте выпадения аэрозолей оказывался человек, то за счет вдыхания радиоактивных частиц формировалась доза внутреннего облучения на фоне внешнего облучения всего тела.

Расчет концентрации аэрозолей в воздухе. Исходной основой расчета дозы облучения за счет ингаляционного поступления радионуклидов является концентрация в воздухе. Предполагалось, что между плотностью выпадений радионуклидов, скоростью их осаждения и концентрацией в воздухе существовала связь с мощностью экспозиционной дозы. Отклонение в соотношениях возникало лишь в случаях сепарации радионуклидов за счет наиболее летучей фракции.

Полидисперсные аэрозоли, даже если они выброшены из реактора одновременно, приземляются на почву с различными скоростями. С увеличением времени от начала аварии наступило истощение крупнодисперсных аэрозолей, если не было их дополнительного притока в окружающую среду. Истощение других, более мелких фракций продолжалось до приземления всей массы аэрозолей.

Концентрация радионуклидов в воздухе определялась аэрозолями различной дисперсности и различным соотношением их размеров в некоторой точке пространства. Кроме того, переменным было и соотношение радионуклидов в зоне приземления аэрозолей, по мере распада короткоживущих радионуклидов. В связи с этим концентрация радионуклидов в воздухе сначала рассчитывалась в единицах массы и связанных с ней геометрических и аэродинамических размеров.

Динамика приземления аэрозолей из облака, находящегося на высотах 100 и 1000 м, показана на рис. 13.

Кривые на рис. 13, а рассчитаны при условии, что скорость приземления определяется только гравитационными и аэродинамическими свойствами аэрозолей и на них не действуют нисходящие и восходящие потоки воздушных масс. Тем не менее, для приземления ингалибельной фракции частиц, в диапазоне более 10 мкм, необходимо несколько часов, а для полного приземления - десятки и сотни

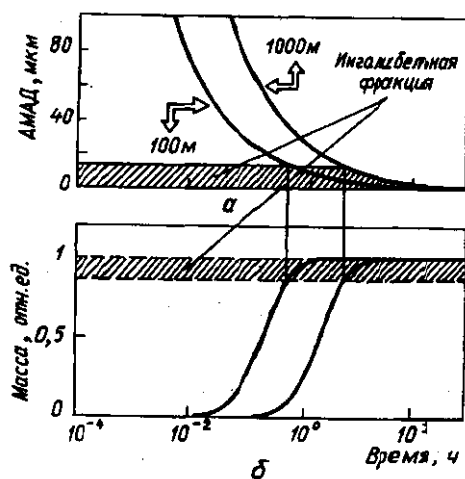


Рис. 13. Время, необходимое для приземления аэрозолей различного размера (а) и накопления массы за на поверхности почвы (б)

Для количественного описания процесса накопления аэрозолей заданного диаметра от момента их выброса момента приземления необходимо учитывать сразу только факторов: расстояние от места выброса до точки падения, скорость ветра, высоту выброса, динамику са и др. Использование при расчете некоторых допущений позволяет упростить задачу расчета массы аэрозолей.

124

Во-первых, наибольший интерес представляет не динамика изменения концентрации аэрозолей во времени, а интегральная концентрация за период от начала аварии до момента эвакуации. Это допущение не позволяет в полной мере учитывать пиковые значения концентраций, которые могли возникнуть в период пребывания некоторого субъекта на открытой местности, однако, выпадения ингалибельной фракции происходили достаточно медленно, чтобы некоторыми особенностями динамики можно было пренебречь.

Во-вторых, если предположить, что радиационная обстановка на момент эвакуации сформировалась благодаря полному спектру размеров аэрозолей, т.е. перенос аэрозолей в пространстве происходил без истощения крупнодисперсной фракции, то плотность выпадений

активности или массы топлива можно связать с потоком выпадений и потоком выброса линейной во времени моделью формирования радиационной обстановки.

В соответствии с этой моделью концентрация аэрозолей в воздухе, обусловленная частицами i -го размера и выраженная в единицах массы, будет

$$C_{mi} = \frac{P_m(d_i)}{t_{эв} V_i}, \quad (3)$$

где $t_{эв}$ - время от начала аварии до момента эвакуации; V_i - скорость осаждения аэрозолей i -й фракции; $P_m(d_i)$ - относительный парциальный вклад фракции частиц диаметром d_i , в суммарную массу топлива, выпавшего на единичную площадь.

Суммируя (3) по всему диапазону размеров аэрозолей, получаем величину суммарной концентрации аэрозолей в воздухе, выраженную в относительных единицах к массе топлива, выпавшего на единичной площади:

$$C_m = \sum_i C_{mi}. \quad (4)$$

Расчет концентрации аэрозолей в единицах массы. Воспользуемся теперь представленными соотношениями для оценки концентрации аэрозолей и параметров некоторых распределений после Чернобыльской аварии. Результаты расчетов концентрации, представленные далее, выполнены из предположения, что выброс и распространение

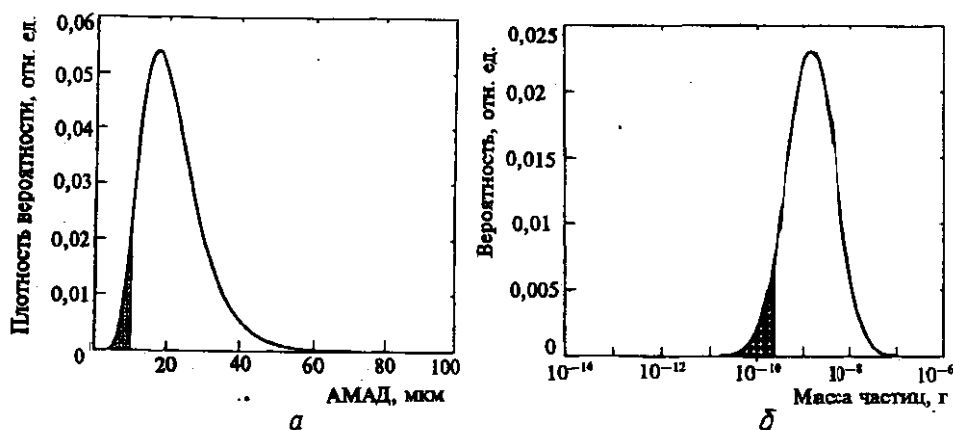


Рис. 14. Плотность вероятности распределения аэрозолей выброса по АМАД (а) и дифференциальное распределение аэрозолей по массе (б)

125

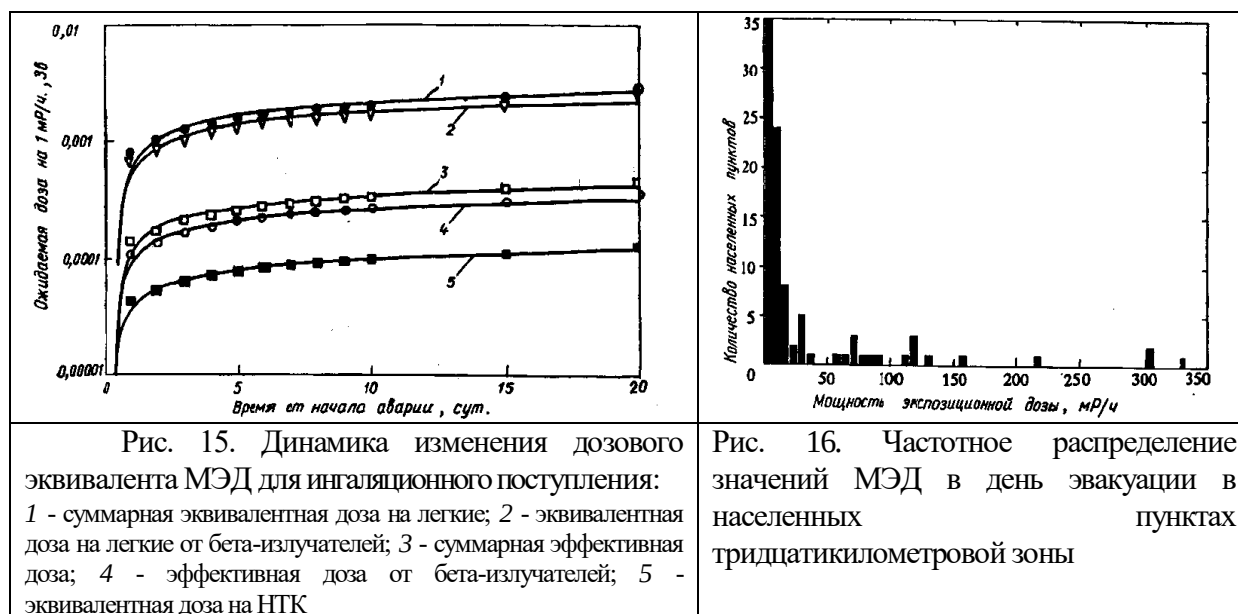


Рис. 15. Динамика изменения дозового эквивалента МЭД для ингаляционного поступления: 1 - суммарная эквивалентная доза на легкие; 2 - эквивалентная доза на легкие от бета-излучателей; 3 - суммарная эффективная доза; 4 - эффективная доза от бета-излучателей; 5 - эквивалентная доза на НТК

Рис. 16. Частотное распределение значений МЭД в день эвакуации в населенных пунктах тридцатикилометровой зоны

радиоактивности происходили исключительно за счет топливных частиц. Формирование следа, то есть плотности выпадений радионуклидов на почве происходило равномерно за счет всех

фракций и в течение всего времени от начала аварии до момента локализации выброса. Распределение аэрозолей по диаметру подчинялось логарифмически- нормальному закону с АМАД (аэродинамический медианный по активности диаметр) 20 мкм [5] и $S=0,4$. Плотность топлива принята равной 9 г/см^3 , что соответствует плотности отработанного топлива. В модели предполагается, что основная масса выпавшего топлива оседает достаточно быстро, чтобы считать, что в момент эвакуации населения

126

радиационная обстановка сложилась за счет радиоактивности, осевшей на почву, а не за счет аэрозолей, находящихся в воздухе. Последнее допущение позволяет выразить массу выпавшего топлива, с учетом известного распределения плотности вероятности аэрозолей по диаметру и по массе на потоки осаждения топлива по соответствующим фракциям.

Распределения аэрозолей по диаметру и массе, при условии полного приземления всех фракций выброса на почву, показаны на рис. 14.

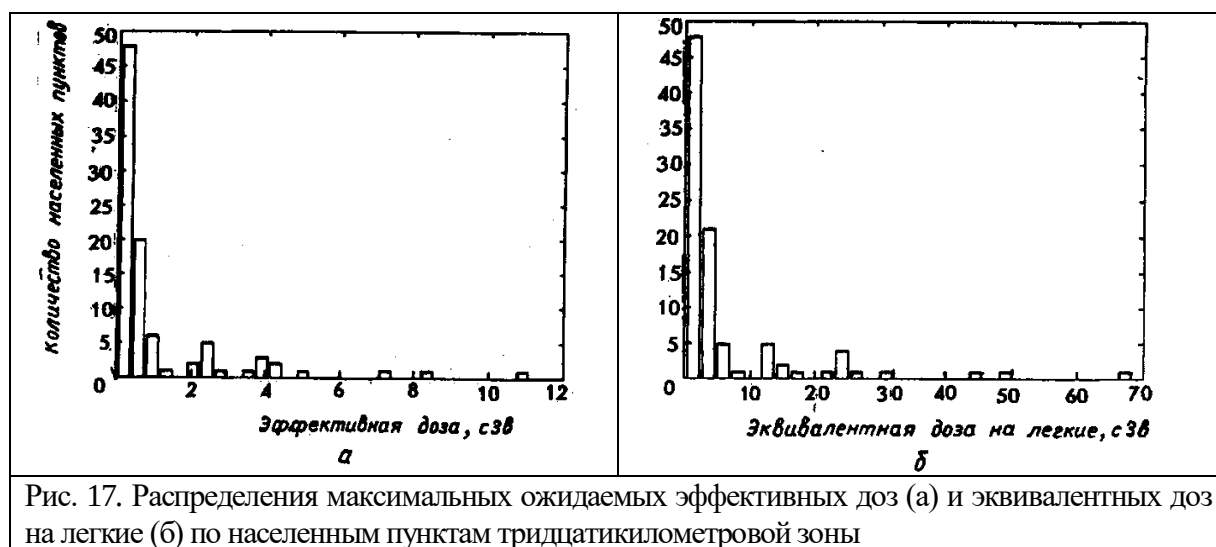


Рис. 17. Распределения максимальных ожидаемых эффективных доз (а) и эквивалентных доз на легкие (б) по населенным пунктам тридцатикилометровой зоны

Для полного приземления аэрозолей всех размеров необходимо несколько суток (рис. 13). Тем не менее принято допущение о том, что в любой рассматриваемый момент эвакуации все фракции аэрозолей, обуславливающие текущую радиационную обстановку, уже выпали на почву. Это предположение позволяет, с одной стороны, значительно упростить расчет, а с другой - исключить недооценку доз за счет наиболее ингалибельной фракции аэрозолей.

Из представленных распределений видно, что ингалибельная фракция аэрозолей (до 10 мкм) [6] составляет лишь достаточно узкую область полного распределения.

127

Из рис. 14, б также видно, что медиана распределения по массе равна $2,77 \cdot 10^{-9} \text{ г}$, а граничная масса ингалибельной фракции составляет $1,2 \cdot 10^{-10} \text{ г}$. Эти величины крайне важны для перехода от массовых единиц к единицам активности.

В соответствии с представленной ранее формулой (3), концентрация аэрозолей, соответствующая некоторой плотности выпадений топлива на почву, зависит от времени формирования следа, т. е. времени, прошедшему от начала аварии до момента эвакуации. Таким образом, усредненная во времени концентрация аэрозолей в воздухе конкретного населенного пункта, эвакуированного через $t_{эв}$ суток, будет

$$C_m(t_{эв}) = 1,4 \cdot 10^{-4} \frac{\sigma_m}{t_{эв}}, \quad (5)$$

где σ_m - поверхностная плотность выпадений топлива, сформировавшаяся к моменту эвакуации, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$; $1,4 \cdot 10^{-4}$ - коэффициент связи между полной концентрацией и плотностью выпадений (для ингалибельной фракции величина этого коэффициента равна $3,2 \cdot 10^{-5}$), $\text{сут} \cdot \text{м}^{-1}$.

Оценка доз ингаляционного поступления радионуклидов для произвольного населенного пункта. Поскольку величина мощности дозы является основой для расчета плотности выпадений топлива по массе и концентрации его в воздухе, то нетрудно рассчитать начальные значения этих концентраций для мощности дозы в 1 мР/ч на момент эвакуации, а затем перейти к

оценке уровней поступления и доз облучения. Зная "дозовый эквивалент" 1 мР/ч в каждый момент времени от начала аварии, можно легко рассчитать дозы облучения в населенный пунктах с учетом времени их эвакуации. Для этого достаточно умножить этот дозовый эквивалент на МЭД в день эвакуации.

Величину МЭД рассчитывали по справочным коэффициентам, которые связывают мощность экспозиционной дозы с плотностью выпадений отдельного радионуклида [7-10]. Зная активность радионуклида, заключенную в единице массы топлива, нетрудно рассчитать величину МЭД, умножая активность на эти коэффициенты.

Дозовый эквивалент (дозы облучения от ингалированных радионуклидов для МЭД в день эвакуации 1 мР/ч) рассчитан для периода эвакуации 1-20 сут (рис. 15). Полученные кривые хорошо аппроксимируются функциями вида $y = a \log(bx)$. Параметры этой функции для эффективных и эквивалентных доз облучения приведены в табл. 11.

Таблица 11. Параметры функций, описывающих значения дозового эквивалента МЭД

Вид дозовой зависимости	Параметр дозовой функции $DE = a \log(M)$	
	a	b
Суммарная эффективная доза на весь организм	0,000244	2,597
Эффективная доза на организм от бета-излучателей	0,00019	2,757
Суммарная эквивалентная доза на легкие	0,00161	2,107
Эквивалентная доза на легкие от бета-излучателей	0,00137	2,17
Эквивалентная доза на НТК	0,0000648	3,446

Максимальная ожидаемая эффективная доза может быть рассчитана по величине МЭД в день эвакуации следующим образом:

$$H_e = 2,44 \cdot 10^{-4} \text{МЭД}(t_{эв}) \log(2,6 t_{эв}) \quad (6)$$

где H_e - ожидаемая эффективная доза, Зв; $t_{эв}$ - число дней от начала аварии до момента эвакуации, сут.

128
Таблица 12. Расчет доз облучения жителей Припяти

Радионуклид	Период полураспада, ч	Поступление радионуклида в организм за период до эвакуации, Бк	Дозовый коэффициент для перехода к эффективной дозе, Зв/Бк	Эффективная доза, Зв	Эквивалентная доза облучения на легкие, Зв	Эквивалентная доза облучения на НТК, Зв
⁹⁰ Y	6,14·10 ¹	5,64·10 ³	2,80·10 ⁻⁹	1,58·10 ⁻⁵	5,25·10 ⁻⁵	7,33·10 ⁻⁵
⁹⁰ Sr	2,50·10 ⁵	3,45·10 ³	6,00·10 ⁻⁸	2,07·10 ⁻⁴	1,21·10 ⁻⁵	1,79·10 ⁻⁵
⁹¹ Y	1,40·10 ³	2,55·10 ⁴	1,40·10 ⁻⁸	3,58·10 ⁻⁴	2,53·10 ⁻³	3,58·10 ⁻⁴
⁹⁹ Sr	1,21·10 ³	3,41·10 ⁴	1,20·10 ⁻⁸	4,10·10 ⁻⁴	2,87·10 ⁻³	1,23·10 ⁻⁴
⁹⁵ Zr	1,54·10 ⁵	8,52·10 ⁴	6,30·10 ⁻⁹	5,37·10 ⁻⁴	3,41·10 ⁻³	3,58·10 ⁻⁴
⁹⁵ Nb	8,44·10 ²	8,46·10 ⁴	1,60·10 ⁻⁹	1,35·10 ⁻⁴	7,19·10 ⁻⁴	1,61·10 ⁻⁴
⁹⁹ Mo	6,55·10 ¹	7,14·10 ⁴	1,30·10 ⁻⁹	9,29·10 ⁻⁵	3,07·10 ⁻⁴	3,93·10 ⁻⁴
¹⁰³ Ru	9,44·10 ²	4,09·10 ⁵	2,50·10 ⁻⁹	1,02·10 ⁻³	6,55·10 ⁻³	1,31·10 ⁻³
¹⁰⁶ Ru	8,84·10 ³	1,66·10 ⁵	1,30·10 ⁻⁷	2,16·10 ⁻²	1,66·10 ⁻¹	6,15·10 ⁻³
^{110m} Ag	6,01·10 ³	8,57·10 ¹	2,10·10 ⁻⁸	1,80·10 ⁻⁸	1,03·10 ⁻⁵	—
¹³¹ I	1,93·10 ²	2,73·10 ⁵	1,30·10 ⁻⁸	3,54·10 ⁻³	1,83·10 ⁻⁴	6,54·10 ⁻⁶
¹³² T	7,82·10 ¹	3,20·10 ⁵	3,50·10 ⁻⁹	1,12·10 ⁻³	5,44·10 ⁻⁴	—
¹³² I	2,28	3,79·10 ⁴	1,30·10 ⁻¹⁰	4,93·10 ⁻⁶	1,02·10 ⁻⁴	9,09·10 ⁻⁷
¹³³ I	2,08·10 ¹	4,83·10 ⁵	2,30·10 ⁻⁹	1,11·10 ⁻³	—	—
¹³⁵ I	6,61	1,39·10 ⁵	4,60·10 ⁻¹⁰	6,42·10 ⁻⁵	6,14·10 ⁻⁵	—
¹³⁴ Cs	1,81·10 ⁴	1,12·10 ⁴	1,20·10 ⁻⁸	1,34·10 ⁻⁴	1,34·10 ⁻⁴	1,57·10 ⁻⁴
¹³⁶ Cs	3,12·10 ²	5,59·10 ³	1,90·10 ⁻⁹	1,06·10 ⁻⁵	1,28·10 ⁻⁵	1,17·10 ⁻⁵
¹³⁷ Cs	2,64·10 ⁵	2,28·10 ⁴	8,50·10 ⁻⁹	1,94·10 ⁻⁴	2,00·10 ⁻⁴	2,07·10 ⁻⁴
¹⁴⁰ Ba	3,07·10 ²	8,25·10 ⁴	1,10·10 ⁻⁹	9,07·10 ⁻⁵	—	3,63·10 ⁻⁴
¹⁴⁰ La	4,02·10 ¹	6,40·10 ⁴	1,50·10 ⁻⁹	9,60·10 ⁻⁵	2,69·10 ⁻⁴	3,52·10 ⁻⁴
¹⁴¹ Ce	7,80·10 ²	8,45·10 ⁴	2,60·10 ⁻⁹	2,20·10 ⁻⁴	1,44·10 ⁻³	3,47·10 ⁻⁴
¹⁴⁴ Ce	6,82·10 ³	6,01·10 ⁴	1,00·10 ⁻⁷	6,01·10 ⁻³	4,75·10 ⁻²	2,04·10 ⁻³
¹⁴⁴ Pr	2,88·10 ⁻¹	6,95·10 ²	1,20·10 ⁻¹¹	8,34·10 ⁻⁹	6,53·10 ⁻⁸	—
²³⁹ Np	5,64·10 ¹	6,94·10 ⁵	7,50·10 ⁻¹⁰	5,21·10 ⁻⁴	1,67·10 ⁻³	2,01·10 ⁻³
Суммарная доза за счет бета-излучателей				3,75·10 ⁻²	2,35·10 ⁻¹	1,44·10 ⁻²
²³⁸ Pu	7,68·10 ⁵	1,74·10 ¹	6,10·10 ⁻⁵	1,06·10 ⁻³	5,58·10 ⁻³	1,03·10 ⁻⁵
²³⁹ Pu	2,14·10 ⁶	1,56·10 ¹	6,40·10 ⁻⁵	1,00·10 ⁻³	5,00·10 ⁻³	1,00·10 ⁻⁵
²⁴⁰ Pu	5,73·10 ⁷	2,23·10 ¹	6,40·10 ⁻⁵	1,42·10 ⁻³	7,12·10 ⁻³	—
²⁴¹ Pu	1,33·10 ⁵	3,06·10 ³	9,30·10 ⁻⁷	2,85·10 ⁻³	9,81·10 ⁻³	3,37·10 ⁻⁵
²⁴¹ Am	3,80·10 ⁶	1,62·10 ¹	7,00·10 ⁻⁵	1,14·10 ⁻³	—	3,73·10 ⁻⁵
²⁴² Cm	3,91·10 ³	4,67·10 ²	3,50·10 ⁻⁶	1,63·10 ⁻³	7,01·10 ⁻³	—
²⁴⁴ Cm	1,57·10 ⁵	1,80·10 ⁰	4,00·10 ⁻⁵	7,21·10 ⁻⁵	—	—
Суммарная доза за счет альфа-излучателей				9,18·10 ⁻³	3,45·10 ⁻²	9,13·10 ⁻⁵
Суммарная доза за счет всех излучателей				4,67·10 ⁻²	2,69·10 ⁻¹	1,45·10 ⁻²

Аналогично можно рассчитать и другие дозы облучения, перечисленные в табл. 11.

Рассмотрим радиационную обстановку в тридцатикилометровой зоне на момент эвакуации и оценим дозы от ингалированных радионуклидов для некоторых населенных пунктов.

129

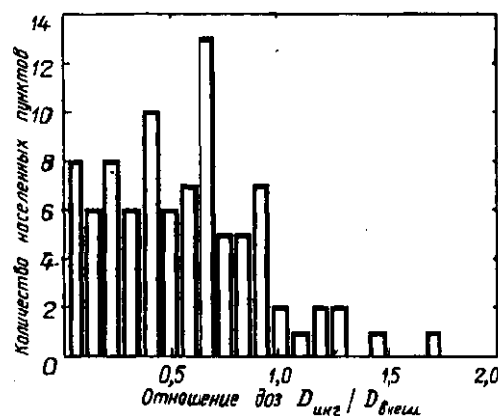
При выборе дозовых коэффициентов использовались данные работ [11-13], а при отсутствии данных - публикация [14], как наиболее исчерпывающий источник. При расхождении данных учитываем наибольшие значения коэффициентов.

Обобщенная информация о значениях МЭД в населенных пунктах Зоны в день эвакуации приведена на рис. 16, та которого следует, что для основной части населенных пунктов величина МЭД не превышала 100 мР/ч, а максимальные значения мощности дозы в день эвакуации, более 300 мР/ч, наблюдались в г. Припяти и в селах Буряковка и Городчан соответственно на 2, 5 и 9 сут. от начала аварии.

Результаты расчета доз от отдельных радионуклидов и суммарных доз по описанной схеме для жителей Припяти приведены в табл. 12.

Рис. 18. Распределение отношений доз, сформированных за счет ингаляционного и внешнего облучения по населенным пунктам Зоны

Зная информацию о МЭД в населенных пунктах Зоны в день эвакуации и число дней, прошедших от начала аварии до момента эвакуации, можно оценить максимальные ожидаемые дозы облучения жителей для всех населенных пунктов Зоны. Частотные распределения этих доз представлены на рис. 17, из которого следует, что максимальные значения эффективной дозы облучения за счет ингалированных радионуклидов достигали 12 сЗв, а эквивалентной дозы облучения



от ингаляционного поступления могли дать существенную прибавку к дозам внешнего облучения и дозам облучения щитовидной железы.

Частотное распределение отношений доз от ингаляционного и внешнего облучения по населенным пунктам Зоны показано на рис. 18. Медиана этого распределения равна 0,56, что позволяет отнести ингаляционную компоненту облучения к числу значимых.

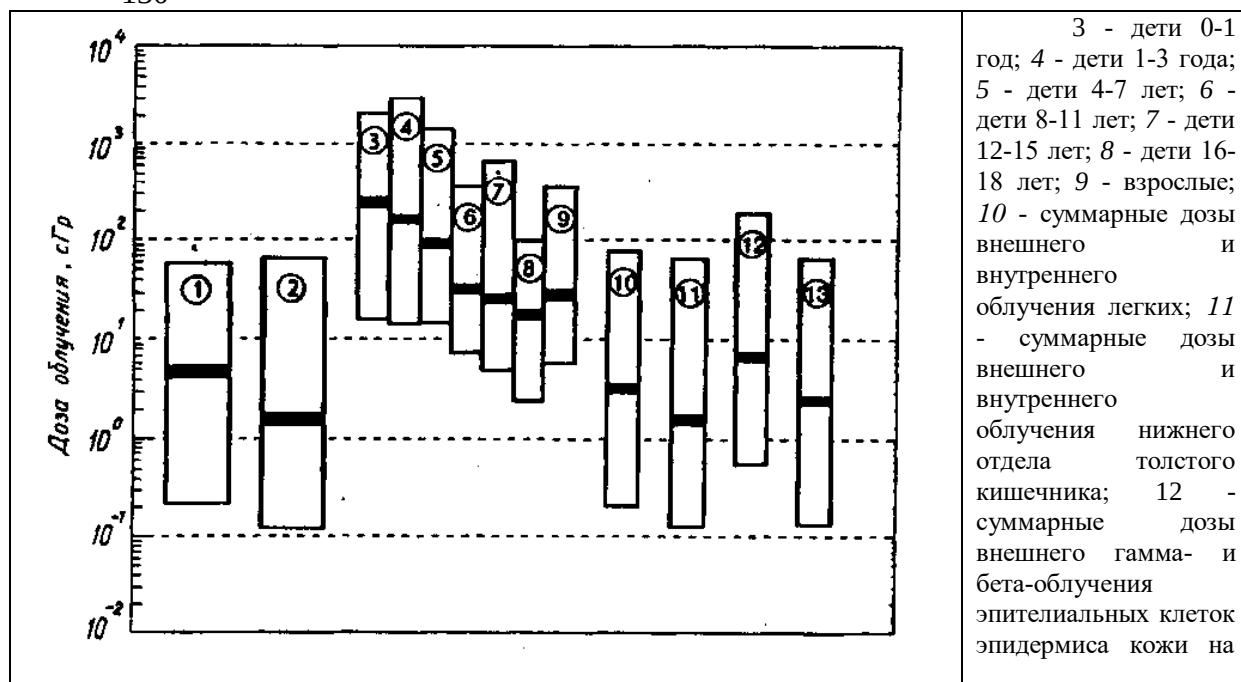
Вместе с тем фактические средние значения доз облучения от ингалированных радионуклидов могут быть несколько ниже, если учесть, что эти дозы рассчитывали из предположения о том, что половину времени суток жители проводили на улице, а половину — в домах с коэффициентом защиты здания 0,3, который принят в [15] для аэрозолей размером 1 мкм и меньше.

Из представленных результатов следует, что даже при непрерывном пребывании в доме доза облучения будет только в два раза ниже максимальной. Фактические значения коэффициентов защиты зданий от проникновения крупных аэрозолей, скорее всего, намного меньше. Для жителей тридцатикилометровой зоны они могут быть приняты в 10 раз меньше, о чем свидетельствуют результаты обследования загрязненности жилищ в Припяти и других населенных пунктах Зоны после эвакуации.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИСТОЧНИКОВ И ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ЖИТЕЛЕЙ ТРИДЦАТИКИЛОМЕТРОВОЙ ЗОНЫ

Подводя итог выполненного исследования можно свести полученные результаты в единую шкалу доз облучения, представленную на рис. 19.

130



3 - дети 0-1 год; 4 - дети 1-3 года; 5 - дети 4-7 лет; 6 - дети 8-11 лет; 7 - дети 12-15 лет; 8 - дети 16-18 лет; 9 - взрослые; 10 - суммарные дозы внешнего и внутреннего облучения легких; 11 - суммарные дозы внешнего и внутреннего облучения нижнего отдела толстого кишечника; 12 - суммарные дозы внешнего гамма- и бета-облучения эпителиальных клеток эпидермиса кожи на

Рис. 19. Обобщенная оценка медиан и диапазонов доз облучения тела и отдельных органов жителей тридцатикилометровой зоны после аварии на ЧАЭС за период до эвакуации: 1 - дозы внешнего гамма-облучения, накопленные в воздухе населенных пунктов до момента эвакуации; 2 - дозы внешнего гамма-облучения жителей населенных пунктов; 3-9 - дозы облучения щитовидной железы за счет ^{131}I;	высоте 0,5 м от поверхности почвы; 13 - суммарные дозы внешнего гамма- и бета-облучения хрусталика глаза на высоте 1 м
--	---

Кроме доз облучения от основных источников их формирования - внешнего гамма-облучения, облучения щитовидной железы и доз, обусловленных ингаляционным поступлением радионуклидов, учтены также дозы облучения за счет других дозообразующих источников: внешнего бета-облучения кожи и хрусталика глаза, а также дозы облучения нижнего отдела толстого кишечника.

Максимальные и минимальные значения доз облучения, выявленные или рассчитанные по каждому виду облучения, обозначены на рис. 19 прямоугольниками, а черной полосой выделены медианы доз облучения.

Сопоставляя между собой различные виды облучения или дозы облучения отдельных органов на фоне общего гамма-облучения тела (обозначенного номером 2), можно выделить, в первую очередь, дозы облучения щитовидной железы (3-9). Следующий наиболее облучаемый орган - кожа (12), затем легкие (10), нижний отдел толстого кишечника (11) и хрусталик глаза (13).

Диапазон суммарных экспозиционных доз, накопленных в населенных пунктах на открытой местности за время до эвакуации, приведен на рис. 19 (номер 1). Эта информация - удобный критерий отсчета, поскольку контроль уровней внешнего облучения является наиболее доступным видом контроля. Весьма интересен факт снижения медианы распределения реальных доз внешнего облучения на фоне размытия этого распределения как в сторону относительно больших, так и меньших значений доз облучения, что связано с особенностями миграции и эвакуации.

Сопоставляя дозы облучения щитовидной железы и дозы внешнего облучения с критериями эвакуации, можно отметить, что значительная часть жителей Зоны имеет дозы облучения щитовидной железы выше критерия эвакуации в 250 сГр.

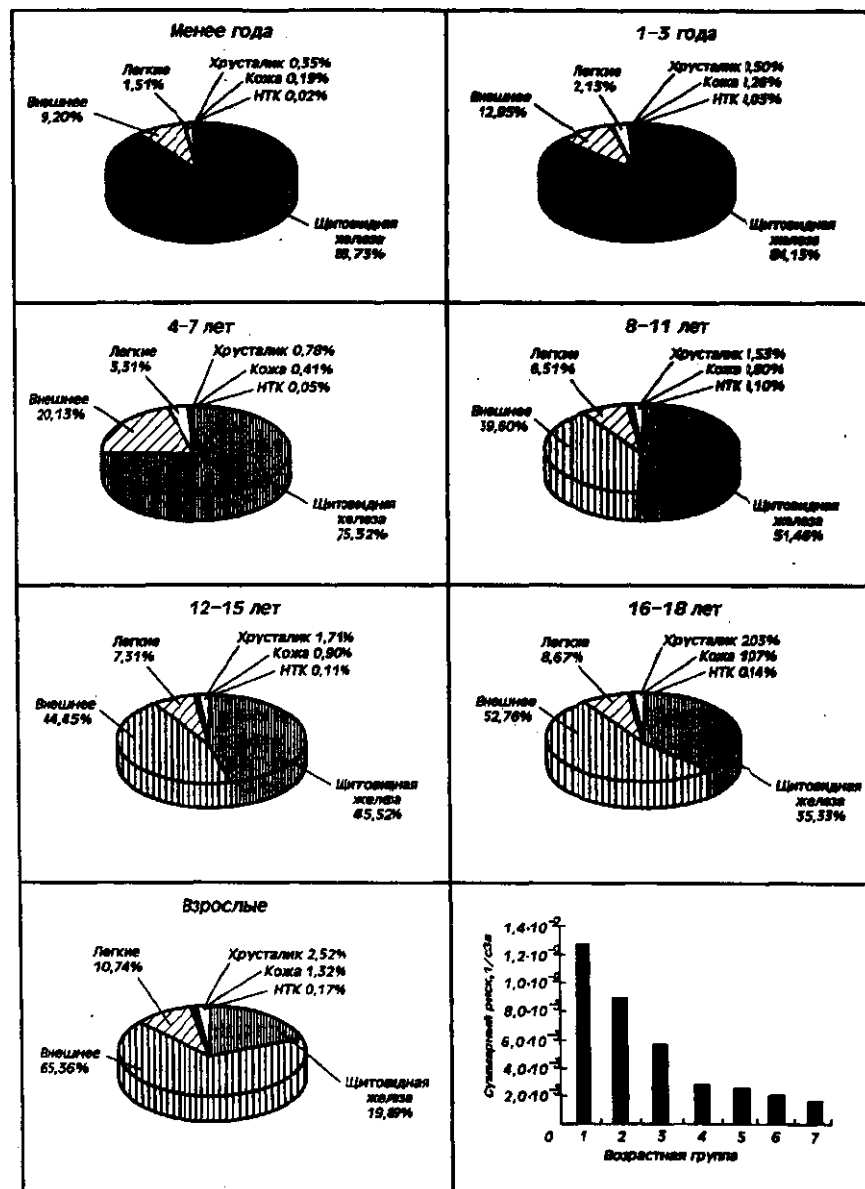


Рис. 20. Распределение суммарного риска по факторам облучения в зависимости от возраста жителей тридцатикилометровой зоны

Несмотря на существенные различия в дозах облучения отдельных органов и тканей, значение разных видов облучения или из уровней может быть определено по более строгим критериям, а именно в единицах риска. Пользуясь весовыми коэффициентами публикации МКРЗ-60, а по щитовидной железе - данным работы [2], можно выразить последствия облучения разных органов и систем в сопоставимых единицах.

Обобщенная информация о возрастном распределении величин суммарного риска (правый нижний рисунок) и структуре суммарного риска, определенного в виде процентного вклада в этот риск различных факторов и источников облучения, приведена на рис. 20.

132

Значения риска определены для медиан доз облучения жителей зоны. Величина риска включает вероятность возникновения всех форм радиационно-индуцированных раков и наследственных повреждений за период предстоящей жизни или за время нахождения под риском.

Наибольшие значения индивидуального риска были у детей до 7 лет. Начиная с 8 лет, значения риска мало отличаются по абсолютной величине, однако, структура риска связана с возрастом. У детей до 7 лет от 75 до 90 % суммарного риска связано с облучением щитовидной железы и от 9 до 20 % - обусловлено внешним облучением (рис. 20). Доля риска от ингаляционного поступления радионуклидов и за счет других факторов облучения составляет 14%. Роль внешнего облучения в формировании величины индивидуального риска становится доминирующей, начиная с 16 лет. В то же время несколько возрастает и доля риска, связанного с ингаляцией радионуклидов.

Относительно облучения кожи, нижнего отдела толстого кишечника и хрусталика глаза, то их значение в формировании величины суммарного риска не превышает 0,6-4%.

Зная медианы доз облучения, значения суммарного риска облучения и численность возрастных групп, можно оценить число радиационно-индуцированных ожидаемых случаев раков и наследственных повреждений (рис. 21). Подходы к оценке риска изложены в работах [16-20]. В данной работе мы воспользовались публикацией [2].

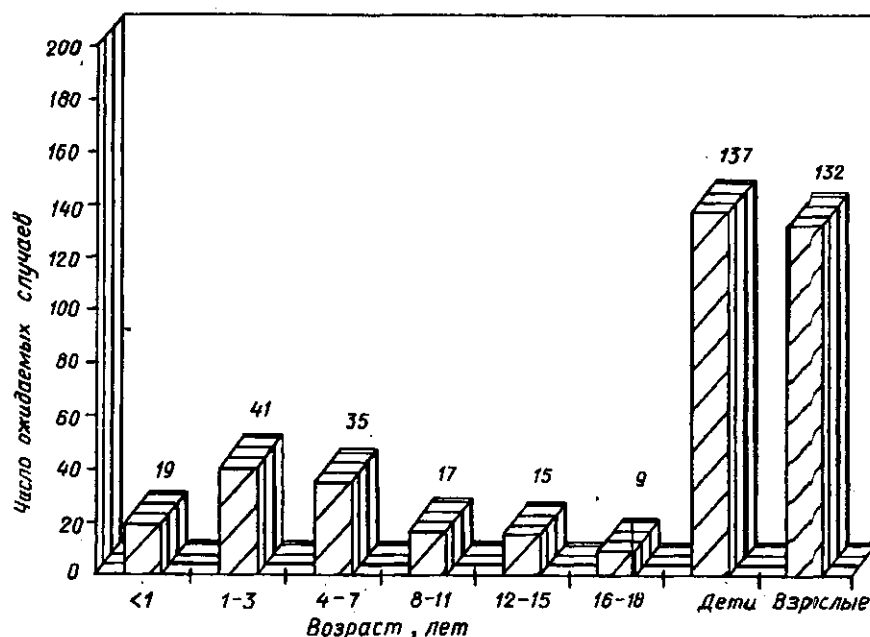


Рис. 21. Расчет числа ожидаемых случаев риска и наследственных повреждений среди жителей тридцатикилометровой зоны

Половина ожидаемых случаев (132) приходится на наиболее многочисленную категорию жителей - взрослых, хотя индивидуальные значения суммарного риска у взрослых меньше.

Распределение числа прогнозируемых случаев среди детей различного возраста характеризуется небольшими различиями. Вместе с тем,

133

общее число ожидаемых случаев для всех детей составляет половину (137) общего числа (269) при численности детского населения 25% от общей численности населения Зоны.

1. Jacob P., Meckbach R. Shielding Factors and External Dose Evaluation // Radiat. Prot. Dosim. - 1987. - 21, N 1-3. - P. 79-85

2. ICRP Publication 60. Recommendation of the International Commission on Radiological Protection // Annals of the ICRP. - 1990. - N 21(1). - 201 p.

3. Радиационная защита / Под ред. А.А. Моисеева, П.В. Рамзаева Пер. с англ. // Публикация 26 МКРЗ. - М.: Атомиздат, 1978. - 85 с.

4. ICRP Publication 56. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. - Oxford: Pergamon Press, 1990. - 122 p.

5. Асмолов В.Г., Боровой А.А., Демин В.Ф. и др. Авария на Чернобыльской АЭС: год спустя // Атом. энергия. -1988. - 64, вып.1. - С. 3-23.

6. Публикация 30. Часть 1. Пределы поступления радионуклидов для работающих с ионизирующим излучением: Пер. с англ. / Под ред. П.В. Рамзаева и А.А. Моисеева. - М.: Энергоиздат, 1982 - 133 с.

7. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 224 с.

8. Organ Doses from Radionuclides on the ground. Part 1. Simple Time Dependences / P.Jacob, H. Paretzke, H.Rosenbaum, M.Zankl // Health Phys. - 1988. - 54, N 6 - P.617-633.

9. Calculation of Organ Doses from Environmental Gamma Rays Using Human Phantoms and Monte Carlo Methods. Part 1: Monoenergetic Sources and Natural Radionuclides in the Ground / K.Saiko, N.Petoussi, M.Zankl et al // GSF-Bericht 2/90. - Munchen, 1990. - 102 p.

10. Calculation of Organ Doses from Environmental Gamma Rays Using Human Phantoms and Monte Carlo Methods. Part II: Radionuclides Distributed in the Air or Deposited on the Ground / P.Jacob, H.Rosenbaum, N.Petoussi, M.Zankl. // GSF-Bericht 12/90. - Munchen, 1990 - 76 p.

11. *Limits for Intakes of Radionuclides by Workers*: ICRP Publication 30. Supplement to pt.1 // *Annals of the ICRP*. - Oxford: Pergamon Press, 1979. - 3, N 1-4.
12. *Limits for Intakes of Radionuclides by Workers*: ICRP Publication 30. Supplement to pt.2 // *Ibid.* - 1981. - 5, N 1-6.
13. *Limits for Intakes of Radionuclides by Workers*: ICRP Publication 30. Supplement to pt.3 // *Ibid.* - 1982. - 7, N 1-3.
14. Phipps A. W., Kendall G.M., Staler J. W. et al. Committed Equivalent Organ Doses and Committed Effective Doses from Intakes of Radionuclides // NRPB-R245. - Chilton, 1991. - 93 p.
15. Per Hendemann Jensen, Atmospheric Dispersion and Environmental Consequences. Exposure from Radioactive Plume Pathways. RisØ-M-2849 (EN), Denmark, November, 1992. - 46 p.
16. Дозовые зависимости нестохастических эффектов, основные концепции и величины, используемые в МКРЗ / Пер. с англ. // Публикации 41 и 42 МКРЗ. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 88 с.
17. Количественное обоснование единого индекса вреда / Пер. с англ. // Публикация 45 МКРЗ. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 88 с.
18. *BEIR III: The Effects on Population of Exposure to low levels of ionizing Radiations* / Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation. - Washington, D.S: National Academy Press, 1980. - 524 p.
19. Шевченко В.А., Померанцева И.Д. Генетические последствия действия ионизирующих излучений. - М.: Наука, 1985. - 279 с.
20. *BEIR IV: Health Risks of Radon and other Internally Deposited Alpha - Emitters*. - Washington: National Academy Press, 1988. - 602 p.

Украинский научный центр радиационной медицины АМН Украины, Киев
Поступила 10.05.96

134
УДК 621.039

А. С. Вишнеvский, И. Б. Кузьмина, В. В. Токаревский
**ПРОЦЕССЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ДЕСТРУКЦИИ
ВТОРИЧНЫХ УРАНОВЫХ МИНЕРАЛОВ ОБЪЕКТА "УКРЫТИЕ"**

Получен состав вторичных урановых минералов объекта "Укрытие". Процесс выщелачивания радионуклидов из лавообразных ТСМ ОУ происходит одновременно с их механическим разрушением. Минералы кристаллизуются в результате испарительной концентрации щелочных вод карбонатно-сульфатно-хлоридного состава, являются кристаллогидратами, могут подвергаться дегидратации к деструкции с переходом мельчайших частиц в аспирационную дисперсную фазу аэрозолей. В условиях объекта "Укрытие" с течением времени происходит избирательное перераспределение радиоактивных элементов по различным видам вещества. **Ключевые слова:** объект "Укрытие", ядерное топливо, водные растворы, вторичные урановые минералы, уранилкарбонаты, радионуклидный состав.

Введение. Необходимость проведения комплексных исследований существующего состояния сооруженного над разрушенным 4-м энергоблоком ЧАЭС объекта "Укрытие" (ОУ) и разработки научно-обоснованных рекомендаций для преобразования объекта в экологически безопасную систему на сегодняшний день очевидна и общепризнана.

По оценкам, внутри ОУ находится около 180 т облученного ядерного топлива [1]. Облученное ядерное топливо и продукты его изменения находятся внутри объекта в виде: фрагментов активной зоны; мелкодиспергированного топлива - "горячих" топливных частиц; затвердевших лавообразных топливосодержащих масс (ТСМ); водных растворов и кристаллических новообразований [2]. К настоящему времени свойства и устойчивость выделенных типов ТСМ исследованы в различной степени. Выщелачивание радионуклидов из ТСМ в условиях ОУ может привести к перераспределению радиоактивных элементов и изменить состояние ядерной и радиационной опасности объекта.

Кристаллические новообразования (НО) являются особой формой нахождения в ОУ веществ, слагавших облученное ядерное топливо 4-го энергоблока ЧАЭС перед аварией. Специфичность НО заключается в том, что возникли они в результате сложных физико-химических процессов преобразования ядерного топлива и радионуклидов в окислительных условиях зоны гипергенеза [3].

Аппаратура и методы экспериментальных исследований. Высокая активность ТСМ накладывает существенные ограничения при выборе методов их исследования. Для получения препаратов, излучение которых не превышало бы безопасных уровней, необходимо уменьшать образцы буквально до микронных размеров., В связи с этим для

исследования состава ТСМ был применен микрорентгеноспектральный метод анализа с возбуждением рентгеновского излучения электронным зондом, который не приводит к разрушению исследуемого образца, требует для исследования малые объемы (единицы мкм^3) и массу вещества 10^{-12} - 10^{-14} г при относительной погрешности определена элементов 1 % и менее. Анализ образцов проведен на установке РЭМ BS-340 с помощью энергодисперсионной системы Link-860 по программе ZAF/4 [4]

Препараты для рентгенографических исследований НО были изготовлены из образцов, отобранных при изучении их под бинокулярным микроскопом при увеличении до $100\times$. Рентгенограммы получены на установке ДРОН-4. Расчеты межплоскостных расстояний d/n (Å) по зарегистрированным пикам дифракционного отражения проведены на ЭВМ по существующей программе.

© А. С. Вишнеvский, И. Б. Кузьмина, В. В. Токаревский, 1996

135

Для исследования содержания урана, трансурановых элементов и продуктов деления ядерного топлива были использованы традиционные для ядерного материаловедения радиохимические и спетроскопические методики.

1. Минеральная ассоциация кристаллических новообразований, механизмы кристаллизации и деструкции вторичных урановых минералов. В 1990 г. НО были обнаружены в виде желто-рыжих пятен и разводов на поверхностях лавообразных ТСМ в помещениях парораспределительного коридора (ПРК) ОУ. С течением времени количество кристаллических НО в ПРК увеличивается, а в 1995 г. они обнаружены также в помещениях, расположенных на высотной отметке (9 м) объекта на поверхностях стен.

Визуальные наблюдения за препаратами НО в течение некоторого времени показали, что в нормальных атмосферных условиях наблюдается деструкция НО. Так, несколько кристаллов размером до одного-двух миллиметров были завернуты в кальку, затем в полиэтилен и помещены в свинцовый контейнер. Упакованные таким образом кристаллы находились в защитном сейфе лаборатории около года. При извлечении образцов оказалось, что кристаллы разрушились и превратились в порошок, состоящий из невидимых невооруженным глазом "крупинок". Этот эксперимент позволил высказать гипотезу о том, что в нормальных условиях происходят деструкция минеральных НО и переход мельчайших частиц в аспирационную фазу аэрозоля.

Первые порошковые препараты, изготовленные для проведения рентгеноструктурных исследований, с целью уменьшения их активности, были сделаны с добавлением NaCl. Если препараты около месяца находятся при температуре порядка 40-50 °С, в капилляре появляются мельчайшие капли воды, образовавшиеся, скорее всего, за счет дегидратации исследуемых кристаллов НО.

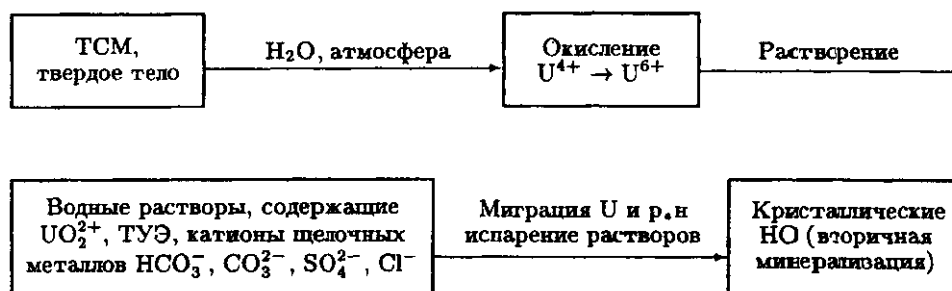
К достоверно установленным минералам мы относим те, которые идентифицированы по рентгеновским данным и подтверждены локальным электронно-зондовым анализом. Это - натрийуранилтрикарбонат и трона.

На основании расчетов по результатам локального электронно-зондового анализа определены: натрийуранилкарбонаты с различным отношением $\text{UO}_2^{2+}:\text{CO}_3^{2-}$ (водные и безводные), тенардит, Na-арканит, галит, сульфат-карбонаты уранила и натрия, а также сделано предположение об образовании в условиях ОУ до сих пор не описанного в литературе натрийуранилтетракарбоната, $\text{Na}_6(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_4$, который находится в ассоциации с другими карбонатами уранила. Морфология кристаллов натрийуранилтетракарбоната отличается от других карбонатов уранила, обнаруженных в новообразованиях ОУ. Это таблитчатые кристаллы гексагональной формы, размером менее 5 мкм , которые находятся в ассоциации с другими натриевыми карбонатами уранила, иногда нарастают на них.

Среди исследованных кристаллов обнаружены содержащие, кроме урана и натрия, также 25÷30 % мас., серы. Соотношения $\text{UO}_3:\text{Na}_2\text{O}:\text{SO}_3$ в этих кристаллах не соответствуют таковым для известных сульфатных соединений уранила как природных, так и синтетических.

Проведенные исследования показали, что состав вторичных урановых минералов и состав минерализованной воды из ОУ почти одинаковы, состав представлен ураном и легкими элементами: Na, K, Ca, Mg, Fe, S, Cl.

136



Электроннозондовый анализ индивидуализированных в водных осадках кристаллов позволяет с большой степенью уверенности утверждать, что они представляют собой минералы, характерные для осадочных процессов, а именно: кальцит – CaCO_3 , сильвин – KCl , Na - арканит – $(\text{K,Na})\text{SO}_4$. Наличие в осадке из минерализованной воды ОУ кальцита, а также воднорастворимых соединений серы и хлора свидетельствуют о том, что минералы новообразований кристаллизуются из растворов карбонатно-сульфатно-хлоридного состава.

В общем виде образование вторичных урановых минералов в ОУ можно представить схемой на рисунке.

2. Радионуклидный состав новообразований и инородных включений в их составе. Как отмечено выше, пробы представляли собой кристаллы преимущественно желтого, а также белого цвета, хорошо растворимые в воде. Визуально пробы НО отличались друг от друга влажностью, условно можно выделить образцы "сухие" (легко рассыпающиеся при прикосновении) и "мокрые" (более насыщенного цвета, с характерным влажным отливом, прилипающие к шпателью). При растворении проб в дистиллированной воде было обнаружено, что в них, кроме растворимых кристаллов, также содержатся мелкие включения двух типов.

Включения первого типа представляют собой частицы черного цвета неправильной или пластинчатой формы до 300 мкм в наибольшем измерении. Эти включения не концентрированной азотной перекисью водорода. характеризуются разнообразием содержащихся радионуклидов (табл. 1). включения первого типа Откуда следует, что частица топливосодержащим (ТСС), сходным по составу с Следовательно, процесс радионуклидов из ТСС одновременно с процессом их разрушения.

Нуклид	Энергия, кэВ	Активность
Am ²⁴¹	59,54	3,2
Ce ¹⁴⁴	133,54	2,0
Rh ¹⁰⁶	621,80	7,2
Cs ¹³⁷	661,65	2,0
Cs ¹³⁴	795,84	6,4
Eu ¹⁵⁵	105,31	3,0
Sb ¹²⁵	427,89	2,0
Eu ¹⁵⁴	1274,50	5,1
Co ⁶⁰	1332,50	1,9

Т а б л и ц а 1. Гамма-активность радионуклидов во включениях первого типа в НО и ОУ

Второй тип включений в НО представлен частицами сферической формы с характерным металлическим блеском, поверхность которых частично матовая, частично как бы покрыта "ржавчиной", диаметр их достигает нескольких миллиметров; плотность порядка 7,27 г/см³. По данным электронно-зондового анализа включения второго типа состоят преимущественно из

Т а б л и ц а 2. Химический состав включения первого типа (ТСС) из сростка НО ОУ

Элемент	Содержание элементов, % мас., в точках анализа						
U	2	3	4	5	6	7	8
Sr	4,6	3,9	4,1	3,7	4,5	4,4	0,7
Sr	1,7	0,9	1,5	1,1	1,1	1,6	0,8
Cs	0,0	0,3	0,0	0,2	0,0	0,1	0,1
Ce	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1
Zr	3,5	2,7	2,7	3,4	3,0	4,0	1,2
Na	2,3	1,6	1,7	1,9	1,9	2,2	0,6
Mg	2,2	1,8	1,8	2,2	1,9	2,2	18,0
Al	4,8	4,5	4,3	5,3	4,7	4,9	1,5
Si	28,8	25,0	26,1	29,5	28,2	29,7	30,7
K	1,1	1,2	1,2	1,4	1,2	1,4	0,2
Ca	7,7	7,4	7,5	8,2	8,0	8,8	2,3
Cr	0,2	0,2	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2
Mn			0,1	0,1	0,1	0,2	0,0
Fe	2,5	2,5	2,3	2,6	2,7	2,8	1,5

Включения также (как и включения первого типа) характеризуются значительным разнообразием содержащихся в них γ -излучающих радионуклидов (табл. 3). Во включении второго типа также обнаружен Co^{60} , что свидетельствует о присутствии в них элементов из конструкционных материалов РБМК-1000.

Отметим, что сферические частицы могли формироваться только при высокотемпературном распылении материалов, т. е. в активной стадии запроектной аварии на 4-й энергоблоке ЧАЭС.

Для исследований распределения радионуклидов по глубине сферических частиц (включения второго типа) проводили послойное стравливание поверхности частиц щавелевой кислотой, таким способом с каждой исследованной частицы было "снято" по пять слоев, масса снимаемого слоя составляла приблизительно 0,5-10 мг. Полученные препараты исследовали с помощью γ -спектрометрического комплекса с полупроводниковым Ge-Li детектором типа ДГДК. Содержание в каждом из слоев U, Sr^{90} и изотопов Pu определяли

Нуклид	Энергия, кэВ	Активность
Am^{241}	59,54	$1,29 \cdot 10^6$
Ce^{144}	133,54	$3,35 \cdot 10^6$
Rh^{106}	621,80	$7,24 \cdot 10^6$
Cs^{137}	661,65	$5,31 \cdot 10^6$
Cs^{134}	795,84	$1,39 \cdot 10^6$
Eu^{155}	105,31	$3,09 \cdot 10^6$
Sb^{125}	427,89	$4,80 \cdot 10^6$
Eu^{154}	1274,50	$1,47 \cdot 10^6$
Co^{60}	1332,50	$3,68 \cdot 10^6$

Т а б л и ц а 3. Гамма-активность радионуклидов во включениях второго типа в НО из ОУ

В табл. 4 представлены α -активности слоев по результатам обработки спектров, Бк/г слоя, а также результаты определения U, % мас. Из табл. 4 видно, что соотношение изотопов плутония устойчиво и соответствует таковому для ядерного топлива 4-го энергоблока ЧАЭС [1], однако соотношение "плутоний - уран" имеет существенный разброс.

Т а б л и ц а 4. Результаты определения α -активности и урана в слоях сферических частиц (включения второго типа в НО ОУ)

Номер слоя	Активность, Бк			Масса слоя, г	Удельная активность плутония, Бк/г слоя	Содержание U в слое, % мас.
	Pu ²³⁶ (метка)	Pu ²³⁸	Pu ²³⁹ +Pu ²⁴⁰			
1	6,8	86,0	172,0	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^5$	0,43
2	6,8	42,0	98,0	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^5$	7,20
3	6,8	21,0	44,0	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^4$	0,80
4	6,8	4,5	6,6	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^2$	4,00
5	6,8	4,3	6,3	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$9,7 \cdot 10^2$	3,80

Во всех пробах НО, из которых удалены инородные включения, в значительных количествах обнаружены изотопы только цезия. "Цезиевое" отношение в исследованных образцах составляет величину (на момент аварии) порядка 0,54-0,57, что соответствовало бы выгоранию ядерного топлива около 9,5-10 МВт-сут/кг U [1].

Содержание урана в НО составляет 5-7 % мас., что значительно меньше, чем требуется по стехиометрии для любого из известных воднорастворимых урановых минералов (сульфатов, карбонатов). Таким образом, в исследованных; пробах, кроме урановых, присутствовали в большом количестве неурановые, хорошо растворимые в воде минералы.

Данные по содержанию радионуклидов в НО, выраженному в единицах удельной активности, Бк/г образца, сведены в табл. 5. Для сравнения в табл. 5 также приведены соответствующие значения, полученные путем пересчета (Бк/г UO₂ → Бк/г образца) результатов исследований, выполненных в 1992 г.

Т а б л и ц а 5. Удельная активность радионуклида в НО из ОУ

Нуклид	Активность в образцах, Бк/г (образца)			
	N _{2/1} ("мокрый")	N _{2/2} ("сухой")	Образец 2 (1992)	Образец 3 (1992)
Pu ²³⁸	$2,5 \cdot 10^4$	$6,0 \cdot 10^4$	$5,7 \cdot 10^4$	$6,0 \cdot 10^3$
Am ²⁴¹	отсутствует	отсутствует	$4,9 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^3$
Pu ²³⁹ + Pu ²⁴⁰	$5,5 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^8$	$9,0 \cdot 10^4$	$9,3 \cdot 10^3$
Si ⁹⁰	$8,3 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^6$	$4,6 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^6$
Cs ¹³⁷	$4,0 \cdot 10^7$	$9,6 \cdot 10^7$	$7,2 \cdot 10^7$	$4,6 \cdot 10^7$
Cs ¹³⁴	$3,2 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^7$	$7,1 \cdot 10^6$

Данные о величинах активности радионуклидов, отнесенной к одному грамму урана, представлены в табл. 6 (при расчетах массовое содержание урана в НО принималось равным 5%). Для сравнения в табл. 6 также приведены соответствующие данные для среднего ядерного топлива (ЯТ) 4-го энергоблока ЧАЭС [1] в пересчете на момент измерения проб.

Анализируя данные, представленные в табл. 5 и 6, обращаем внимание на следующее.

1. "Плутониевое" соотношение в исследованиях НО приблизительно такое же, как у среднего ядерного топлива.

139

Т а б л и ц а 6. Активность радионуклидов в НО ОУ и среднего ядерного топлива 4-го энергоблока ЧАЭС на момент измерения проб

Нуклид	Активность в образцах, Бк/г U		
	N _{2/1} ("мокрый")	N _{2/2} ("сухой")	ЯТ [1]
Pu ²³⁸	5·10 ⁵	1,2·10 ⁶	6,8·10 ⁶
Am ²⁴¹	отсутствует	отсутствует	1,2·10 ⁷
Pu ²³⁹ +Pu ²⁴⁰	1,1·10 ⁶	2,6·10 ⁶	1,3·10 ⁷
Sr ⁹⁰	1,6·10 ⁷	4,0·10 ⁷	1,2·10 ⁹
Cs ¹³⁷	8,0·10 ⁸	1,9·10 ⁹	1,4·10 ⁹
Cs ¹³⁴	2,7·10 ⁷	6,3·10 ⁷	5,0·10 ⁷

2. Взаимные соотношения активностей определенных радионуклидов в образцах N_{2/1} и N_{2/2}), отобранных в одной точке, одинаковые, но при этом удельные активности (Бк/г образца) различаются приблизительно в 2,4 раза. Это можно было бы объяснить тем, что в пробах N_{2/1} и N_{2/2} была разная концентрация вторичных урановых минералов, в которых преимущественно содержатся радионуклиды. Однако, следует учитывать то обстоятельство, что визуально пробы имели различное строение (вещество "сухое" и "мокрое" на вид) и при этом "сухая" проба имеет большую активность. Это позволяет заключить, что некоторые урановые минералы НО являются кристаллогидратами, имеют различную степень гидратации и могут подвергаться частичной дегидратации в обычных условиях.

3. Изотопы цезия присутствуют в НО в таких же количествах, Бк/г U, как и в среднем ядерном топливе 4-го энергоблока ЧАЭС.

4. Во всех исследованных образцах НО в значительных количествах присутствуют изотопы плутония, при этом Am²⁴¹ не обнаружен. Если бы корреляция (такая же, как в среднем ядерном топливе) трансурановых элементов имела место, то количество Am²⁴¹ в НО на время выполнения настоящей работы должно было быть порядка общего количества Pu²³⁹ и Pu²⁴⁰ (см. табл. 6). Однако, Am²⁴¹ в значительных количествах присутствует только во включениях первого и второго типа, являющихся соответственно частицами ТСС и переплавленными фрагментами металлоконструкций РБМК-1000.

5. Вероятнее всего, что разделение плутония и америция и перераспределение этих трансурановых элементов по различным веществам связано с их разной миграционной способностью в водных растворах ОУ.

6. Отношение урана к плутонию в НО до 5 раз меньше, чем в среднем ядерном топливе 4-го энергоблока ЧАЭС. Заметим, что в 1992 г. [3], аналогичное соотношение составляло величину от 20 до 309, а в 1991 г. [1, 2] в НО плутоний вообще не был обнаружен. Если оценивать удельную активность плутония (Бк/г образца), то видно, что в НО, отобранных в 1995 г., и не содержащих инородных включений, удельная активность плутония выше примерно на порядок, чем в образцах, исследованных в 1992 г. Для подтверждения процесса увеличения удельной активности плутония в НО ОУ необходимо провести дополнительные исследования через некоторое время.

Заключение. Подводя итоги выполненных исследований минеральных новообразований ОУ можно сделать следующие выводы.

1. Выщелачивание урана из ГСМ ОУ происходит в результате воздействия щелочно-карбонатных растворов. Миграция урана в специфических условиях ОУ осуществляется в форме двойного щелочно-карбонатного комплекса Na₄[UO₂(CO₃)₃]. Минералы,

140

слагающие НО, кристаллизуются при испарении щелочных вод сульфатно-хлоридно-карбонатного состава. НО ОУ образуют минеральную ассоциацию, в которую входят карбонаты и сульфато-карбонаты уранила.

2. В НО, кроме урановых, присутствуют в большом количестве неурановые, хорошо растворимые в воде минералы. Содержание урана в НО составляет 5-7 % мас.

3. В сростках новообразований обнаружены фрагменты лабообразных ТСМ и сферические частицы, которые сформировались в активной стадии запроектной аварии на 4-м энергоблоке ЧАЭС. Взаимные соотношения между содержанием плутония и урана в

сферических частицах значительно отличаются от аналогичных значений для ядерного топлива 4-го энергоблока ЧАЭС.

4. Процесс выщелачивания радионуклидов из лавообразных ТСМ ОУ происходит одновременно с процессом их механического разрушения.

5. С течением времени происходит избирательное перераспределение радионуклидов, в том числе трансурановых элементов по различным веществам. Взаимные соотношения активностей изотопов Pu, Sr⁹⁰ и урана в НО различаются в несколько раз и даже на порядки от аналогичных соотношений для ядерного топлива 4-го энергоблока ЧАЭС. Можно предположить, что в НО ОУ с течением времени происходит увеличение концентрации плутония.

6. Минералы НО (или часть из них) являются кристаллогидратами, имеют различную степень гидратации и могут подвергаться дегидратации, возможно, в результате радиолиза воды. В нормальных атмосферных условиях происходит деструкция минеральных новообразований и переход мельчайших частиц в аспирационную, дисперсную фазу аэрозоля.

1. Бегичев С.Н., Боровой А.А., Бурлаков Е.В. и др. Топливо реактора 4-го энергоблока ЧАЭС. (Краткий справочник). - М., 1990 г., - 21 с. - (Препр./Ин-т атомной энергии; 5268/3).

2. Динамика поведения топливных масс в объекте "Укрытие"/ С.А. Богатов, А.А. Боровой, А.С. Евстратенко и др. - Киев, 1992. - 20 с. - (Препр./АН Украины. Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова; 92-29).

3. Вишневский А.С., Кузьмина И.Е., Ткач В.Н. Экспериментальные исследования радиоактивных новообразований объекта "Укрытие" // Проблемы Чернобыльской зоны відчуження. - Київ: Наук. думка, 1995. - Вип. 3. - 24 с.

4. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ // М.: Мир, 1984, - Т. 2.

Межотраслевой научно-технический центр "Укрытие" НАН Украины, Чернобыль
Поступила 10.07.96

УДК 621.039

И. Б. Кузьмина, В. В. Токаревский
ЧАСТИЦЫ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ АЭРОЗОЛЕЙ ОБЪЕКТА "УКРЫТИЕ"

Представлены результаты исследования состава аэрозолей объекта "Укрытие". Формирование частиц происходило в активной стадии аварии и продолжается в настоящее время. Ядерное топливо присутствует в аэрозолях в виде аксессуаров с размером менее 0,1 мкм на поверхности частиц. В последнее время из-за дегидратации минералов уранила начался процесс образования особо токсичных аэрозолей с высокой

© И. Б. Кузьмина, В. В. Токаревский, 1996

141

миграционной способностью. Установлена неоднородность макроструктуры лавообразных топливосодержащих масс, что в ближайшее время может привести к интенсификации процесса их разрушения.

1. Введение. Ядерное топливо находится внутри объекта "Укрытие" (ОУ) в пяти основных формах: фрагменты активной зоны (технологические каналы, фрагменты ТВС, ТВЭлы); мелкодиспергированное топливо - "горячие" топливные частицы; лавообразные топливосодержащие массы (ЛТСМ) (напр., [1]), кристаллические новообразования и водные растворы [2]. С точки зрения радиационно-экологической опасности объекта, наибольшего внимания заслуживают "горячие" топливные частицы. В настоящей статье представлены результаты исследований дисперсной фазы аэрозолей ОУ.

2. Фракционирование радионуклидов в дисперсной фазе аэрозолей объекта "Укрытие". Активность различных фракций дисперсной фазы аэрозолей ОУ исследована с использованием традиционных методик ядерного материаловедения: γ -, α -спектрометрии и радиохимии.

Отбор проб для проведения диализа аэрозолей частиц, присутствующих в воздухе ОУ, производился с помощью типовой воздухоудовки ППА-2 на тканевые фильтры Петрянова РСР-20 в течение приблизительно 30 мин. Для проведения анализа аэрозолей частиц, находящихся на поверхностях ОУ, отбирались мазки на синтетические тканевые фильтры типа ФПП-15-1,5; площадь поверхности отбора составляла порядка 100 см². Пробы отбирались на различных высотных отметках объекта ОУ, в помещениях NN 616, 801, 807, 503, 207, 0L2/5, 001/6, 018/1, 210/6 и др.

В дисперсной фазе аэрозолей обнаружены все долгоживущие продукты деления и трансурановые элементы ядерного топлива 4-го энергоблока (4ЭБ) ЧАЭС. Гамма-активность исследованных проб аспирационной и осажженной дисперсной фаз аэрозолей ОУ обусловлена ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{106}Ru , ^{144}Ce , ^{154}Eu , ^{125}Sb и ^{241}Am : в пробах осажженной дисперсной фазы присутствуют γ -излучатель ^{60}Co , который мог появиться в результате разрушения активированных нейтронами металлоконструкций в процессе развития аварии.

Рассчитанные по результатам γ -спектрометрического анализа "цезиевые отношения" (приведенные к моменту аварии отношения активности ^{134}Cs к активности ^{137}Cs) соответствовали бы глубине выгорания топлива порядка $10 \div 12$ МВт-сут/кг U [3].

Коэффициент фракционирования K заданного радионуклида по ^{144}Ce (который для отработанного ядерного топлива 4ЭБ ЧАЭС считается реперным) рассчитывался по формуле:

$$K^{\text{Cs}} = \left[\frac{A_{137\text{Cs}}^0}{A_{144\text{Ce}}^0} \right]_{\text{эксп}} / \left[\frac{A_{137\text{Cs}}^0}{A_{144\text{Ce}}^0} \right]_{\text{расч}},$$

где - $A_{137\text{Cs}}^0$ и $A_{144\text{Ce}}^0$ - значения активностей изотопов Cs и Ce, приведенные к моменту аварии, определенные соответственно экспериментально и [3] рассчитанные для усредненного ядерного топлива 4ЭБ. Аналогично рассчитывались коэффициенты фракционирования других радионуклидов.

В пробах осажженной дисперсной фазы аэрозолей, отобранных на ОУ в 1994-1995 гг. наблюдается: обеднение изотопами Am и Eu (двухкратное для Am и четырех-, пятикратное для Eu); некоторое (в $1,2 \div 1,4$ раза) обогащение Ru; коэффициенты фракционирования изотопов Sb и Cs близки к единице. Обнаруженное двухкратное обеднение изотопом

142

Am подтверждает сделанное ранее предположение [4], что в отличие от ЛТСМ [5], в аэрозольной форме топливосодержащих масс корреляционное соотношение между Am^{241} и Ce^{144} не соответствует таковому для "среднего" ядерного топлива 4ЭБ. Корреляция между изотопами Ru устойчива, однако корреляция между другими трансурановыми элементами не наблюдается.

Наблюдения за изменениями фракционирования радионуклидов в дисперсной фазе аэрозолей ОУ, проведенные в период 1990-1995 гг., показали, что коэффициенты фракционирования изотопов Cs имеют выраженную тенденцию к уменьшению как с увеличением высотных отметок точек отбора проб, так и с течением времени. На рисунке представлены графические зависимости коэффициентов фракционирования Cs по ^{144}Ce , K^{Cs} , от высотной отметки h , точек отбора проб в помещениях ОУ в 1990, 1993, 1994 гг. Графики построены путем интерполяции экспериментальных данных линейными функциями вида:

$$K^{\text{Cs}}(h, t) = -k_{t,h}^{\text{Cs}} h + k_{t^0,h^0}^{\text{Cs}},$$

где $k_{t,h}^{\text{Cs}}$, k_{t^0,h^0}^{Cs} - угловые коэффициенты.

На рисунке видно, что с течением времени значения $k_{t,h}^{\text{Cs}}$ и k_{t^0,h^0}^{Cs} уменьшаются, т.е. снижение коэффициента фракционирования Cs в дисперсной фазе аэрозолей наиболее интенсивно происходит на нижних отметках объекта.

Вряд ли феномен систематического уменьшения с течением времени фракционирования Cs в аэрозолях не только на нижних, но также на всех остальных отметках ОУ обусловлен преобладанием процесса выплывания из частиц легко растворимого Cs. Стекающая сверху вниз радиоактивная вода создавала бы противоположный эффект, т. е. с течением времени относительное содержание Cs на нижних отметках ОУ должно было бы увеличиваться.

Следовательно, на нижних отметках ОУ должен протекать какой-то иной процесс, который бы снижал в дисперсной фазе аэрозолей отношение Cs к Ce. Таким процессом может быть "разбавление" дисперсной фазы аэрозолей частицами, "обедненными" радионуклидами Cs. Например, известно, что частицы, образующиеся при механическом разрушении ЛТСМ, приблизительно в три раза были бы "обеднены" изотопами Cs [5]. Также крупнодисперсные частицы аспирационной дисперсной фазы аэрозоля ОУ как раз существенно "обеднены" Cs, при этом выраженного фракционирования других радионуклидов не отмечалось [4].

Зависимость коэффициента фракционирования цезия-137 по церию-144 ($K_{\text{Фр}}^{\text{Cs}}$) от высотной отметки точек отбора проб (h): 1 - 1990 г.; 2 - 1993 г.; 3 - 1994 г.

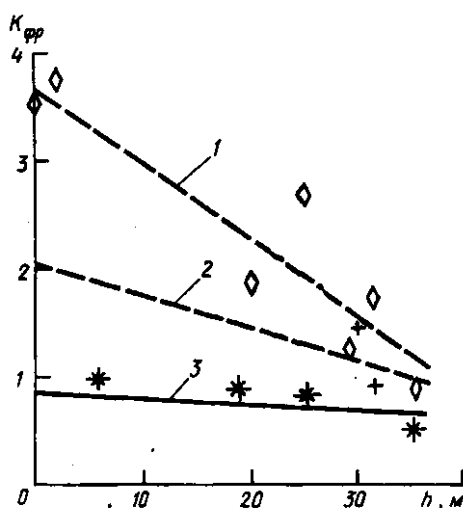
По данным работы [5], ЛТСМ "обеднены" не только изотопами Cs, но и радионуклидами Eu, а также (в значительно большей степени) - Ru и Sb. Например,

143

соотношение Ru-Ce в ЛТСМ в 20-30 раз ниже, чем в "среднем" ядерном топливе 4ЭБ. Поэтому при "разбавлении" дисперсной фазы аэрозолей частицами, образующимися при механическом разрушении ЛТСМ, одновременно с временным снижением соотношения Cs-Ce должно наблюдаться более выраженное снижение соотношения Ru-Ce. Данные об изменении в пробах осажденной дисперсной фазы аэрозоля коэффициентов фракционирования Ru с течением времени и по отметкам ОУ представлены в табл. 1. Из табл. 1 видно, что только на нижних отметках объекта для Ru наблюдается некоторое уменьшение коэффициентов фракционирования с течением времени.

Т а б л и ц а 1. Коэффициенты фракционирования рутения $K_{\text{Фр}}^{\text{Ru}}$ в пробах осажденной дисперсной фазы аэрозолей, отобранных в 1990-1994 гг., усредненные по высотным отметкам объекта "Укрытие", Н, м	
Н, м	$K_{\text{Фр}}^{\text{Ru}}$

Т а б л и ц а 2. Коэффициенты фракционирования европия $K_{\text{Фр}}^{\text{Eu}}$ в пробах осажденной дисперсной фазы аэрозолей, отобранных в 1990-1994 гг., усредненные по высотным отметкам точек отбора проб на объекте "Укрытие", Н, м	
Н, м	$K_{\text{Фр}}^{\text{Eu}}$



Н, м	1990 г.	1992 г.	1993 г.	1994 г.
0,0	2,45	2,26	1,98	1,71
6,0	1,27	1,13	0,92	0,79
9,0	-	1,13	-	-
19,5	0,92	0,95	-	1,11
24,0	1,13	1,10	1,65	1,29
31,5	0,98	1,15	1,74	1,27
35,5	1,37	1,05	1,39	1,28

Н, м	1990 г.	1993 г.	1994 г.
0,0	0,41	-	0,27
6,0	-	-	0,21
19,5	0,37	-	0,26
24,0	0,40	0,49	-
31,5	0,27	0,51	0,24
35,5	0,43	0,39	0,26

Данные об изменении в пробах осажденной дисперсной фазы аэрозолей коэффициентов фракционирования E_u с течением времени и по отметкам ОУ представлены в табл. 2. Снижение в осажденной дисперсной фазе аэрозолей коэффициента фракционирования E_u за период 1990-1994 гг. приблизительно от 0,4 до 0,2, свидетельствует против гипотезы "разбавления" дисперсной фазы аэрозолей частицами, образующимися при механическом разрушении ЛТСМ. Поскольку для ЛТСМ $K^{Eu} \sim 0,5$ [5], данный коэффициент в дисперсной фазе аэрозолей при разбавлении ее частицами разрастающихся ЛТСМ мог бы только незначительно увеличиваться.

Против гипотезы "разбавления" дисперсной фазы аэрозолей частицами разрушающихся ЛТСМ также свидетельствует то обстоятельство, что временного снижения коэффициента фракционирования Sb , K^{Sb} , не наблюдается, данные приведены в табл. 3.

Таким образом, ощутимого перехода ЛТСМ в дисперсную фазу аэрозолей в настоящее время не наблюдается. Необходимо подчеркнуть, что этим заключением не отрицаются процессы механического разрушения ЛТСМ ОУ, которые обсуждаются ниже.

Рассмотрим возможность процесса механического разрушения металлоконструкций 4ЭБ ЧАЭС с переходом в дисперсную фазу аэрозолей. В табл. 4 представлены приведенные к моменту аварии отношения активности ^{60}Co к активности ^{144}Ce в дисперсной фазе аэрозолей ОУ в различные годы. Из табл. 4 видно, что отмечается снижение (за исключением отметки 24,0) во времени отношение активности ^{60}Co к активности ^{144}Ce . Анализы мазков, отобранных в 1995 г. на девятой высотной отметке, дали аналогичное отношение Co к Ce ,

144

на порядок ниже приведенного в табл. 4. Отсюда можно заключить, что ощутимого перехода вследствие механического разрушения в дисперсную фазу известных конструкционных материалов (например, легированных сталей) в настоящее время не наблюдается.

Из приведенного анализа следует, что явление выраженного снижения коэффициентов фракционирования изотопов Cs с течением времени в дисперсной фазе аэрозолей скорее всего обусловлено постепенным осаждением на поверхности крупнодисперсных частиц аспирационной дисперсной фазы аэрозолей ОУ.

3. Морфология и элементный состав дисперсной фазы аэрозолей объекта "Укрытие". Морфология частиц дисперсной фазы аэрозолей ОУ исследована на растровом электронном микроскопе Tesla BS-340, укомплектованном системой визуализации и обработки изображения, элементный состав - с помощью локального электронно-зондового анализа [6].

Морфологическими исследованиями установлено, что фактор формы большей части исследованных частиц аспирационной дисперсной фазы аэрозолей не ниже 0,85; 80-90% частиц дисперсной фазы аэрозолей имеют форму, близкую к сферической. Около 70% частиц сосредоточено в интервале размеров 1-3 мкм. Область 1- 3 мкм считается по данным ряда работ опасной с радиационно-биологической точки зрения, так как частицы такого размера обладают достаточно высоким коэффициентом отложения в органах дыхания (более 40 %). Отметим, что сферические частицы могли образоваться только в активной стадии запроектной аварии при высокотемпературном распылении материалов. Как было установлено ранее, средняя плотность аспирационных частиц порядка 8 г/см^3 , т. е. в три раза превосходит плотность кварцевых и глинистых частиц обычной пыли [4].

Т а б л и ц а 3. Коэффициенты фракционирования сурьмы $K_{\Phi P}^{Sb}$ в пробах осажденной дисперсной фазы аэрозолей, отобранных в 1990-1994 гг, усредненные по высотным отметкам точек отбора проб на объекте "Укрытие", Н, м				Т а б л и ц а 4. Отношения активности ^{60}Co к активности $A_{^{60}Co}^0/A_{^{144}Ce}^0 \cdot 10^3$ в пробах осажденной дисперсной фазы аэрозолей, отобранных в 1990- 1994 гг. (на момент аварии), усредненные по высотным отметкам точек отбора проб на ОУ (Н)			
Н, м		$K_{\Phi P}^{Sb}$		Н, м		$A_{^{60}Co}^0/A_{^{144}Ce}^0 \cdot 10^3$	
	1990 г.	1993 г.	1994 г.		1990 г.	1993 г.	1994 г.
0,0	1,54	-	1,5	0,0	2,97	-	1,25
6,0	-	-	0,62	6,0	-	-	0,42

19,5	0,94	-	0,88	19,5	1,00	-	0,60
24,0	0,95	1,08	0,89	24,0	0,46	0,46	1,39
31,5	1,17	0,95	0,82	31,5	1,02	0,42	0,61
35,5	0,84	0,91	0,74	35,5	0,40	0,42	0,46

То обстоятельство, что большинство аспирационных частиц имеет размеры 1-3 мкм, на первый взгляд, представляется несколько неожиданным. Наибольшую долю, как в свободной атмосфере, так и в выбросах АЭС, при условии динамического равновесия осажденной и аспирационной дисперсных фаз, обычно составляют частицы размером 0,1-0,2 мкм [8]. Более крупные частицы осаждаются под действием силы тяжести, мелкие

145

частицы в результате частых столкновений слипаются (коагулируют), т. е. укрупняются, и также выпадают из воздушной среды. Например, скорость седиментации частиц размером 1-3 мкм при плотности порядка 8 г/см³ в воздухе при обычных условиях порядка 0,1-2 см/с. За 10 лет, прошедших после аварии, и более пяти лет - после окончания на объекте интенсивных буровых работ, частицы с размерами 1-3 мкм должны были бы осесть на внутренних поверхностях объекта.

Смещение максимума распределения по размерам аспирационной дисперсной фазы аэрозолей в область среднedisперсных частиц может быть обусловлено тем, что в специфических условиях объекта возникает униполярно (положительно) заряженная аэрозольная система. Это явление всегда возникает в результате эмиссии электронов радиоактивными аэрозольными частицами. В результате потери электронов и обратной диффузии аэроионов аэрозольные частицы приобретают стационарный положительный заряд, который в случае бета-излучения может достигать нескольких сот элементарных единиц [9].

Униполярность электрических зарядов на аэрозольных частицах препятствует коагуляции частиц вследствие их отталкивания друг от друга. Поскольку поверхности объекта по той же причине положительно заряжены, действие силы тяжести уравнивается электростатической силой отталкивания частиц от поверхностей, одновременно замедляется процесс седиментации частиц. С течением времени электростатические заряды на частицах из-за естественного радиоактивного распада радионуклидов уменьшаются, и наиболее крупные из них постепенно переходят в осажденную дисперсную фазу, что еще раз подтверждает высказанное выше предположение о доминирующем процессе, в настоящее время обуславливающим характер фракционирования изотопов Cs в дисперсной фазе аэрозолей.

Основными элементами, образующими частицы аспирационной дисперсной фазы аэрозолей являются Si (определен примерно в 60% частиц), Fe (примерно 50%), Al (45%), Ca (40%), Na (35%), S (30%), K (30%), также обнаружены Mg (20 %) и Mn (15 %). Около 20 % частиц состоят только из графита.

Уран определен только в составе аксессуаров ("наездников"), находящихся на поверхности приблизительно 10 % общего количества исследованных частиц, размер таких аксессуаров менее 0,1 мкм. Содержание урана превышает погрешность определения этого элемента, преимущественно для частиц из фильтров, отобранных на нижних высотных отметках ОУ.

Соотношение Fe и Mn (входящих в состав легированных сталей) для различных частиц не является постоянным; это свидетельствует о том, что образование аэрозолей происходило при температурах, меняющихся в широком диапазоне значений.

Элементный состав частиц является специфичным для каждого из проанализированных образцов, что свидетельствует о различиях в механизмах образования и формирования аэрозолей в разных помещениях ОУ. Например, для помещений парораспределительного коридора характерным является наличие большого числа графитовых частиц, среди которых встречаются очень крупные, с нехарактерными для аспирационной дисперсной фазы размерами (до 15 мкм), а также сферические частицы, в состав которых входит Fe и Mn и (или) набор элементов Na, Al, Si, Mg, Ca. Характерным для

частиц дисперсной фазы на фильтре из помещения 269, находящемся на той же шестой высотной отметке ОУ, является наличие частиц со сравнительно большим (до 10 % мас.) содержанием S.

Среди осевших частиц выделяются нитевидные, сферические и конгломераты неопределенного габитуса. Максимум счетного распределения размера частиц, осевших из аэрозолей, находится в области 15-20 мкм, средний фактор их формы близок к 0,6.

146

О существовании нитевидных частиц в своих работах упоминает академик И.В. Петрянов. При коагуляции частиц с твердой, жидкой или газообразной дисперсной фазой иногда образуются агрегаты, линейные (нитеобразные) по форме (например, [8]). Визуально приповерхностный слой нитевидных частиц отличается от их центральной части по контрасту. Элементный состав внутренней и приповерхностной областей нитевидных частиц также различный, например, Al на поверхности частиц меньше, а Fe больше, чем в их центральной части. Отсюда можно предположить, что нитеобразные частицы образовывались из газовой фазы в первые моменты запроектной аварии.

Наиболее существенной отличительной особенностью элементного состава частиц-конгломератов является наличие на их поверхности акцессориев с аномально высоким содержанием стронция, имеются локальные участки, в которых содержание стронция более 10 % (мас.).

В табл. 5 и 6 приведен элементный состав нитевидных частиц и частиц-конгломератов.

Частицы, содержащие уран, в осажденной дисперсной фазе аэрозолей ОУ встречаются **исключительно редко**. Так же, как и в аспирационных аэрозолях, U находится в виде микрозерен ядерного топлива и [2] кристаллов натрийуранилкарбоната (возможно, других минералов уранила) в виде акцессориев на поверхности частиц дисперсной фазы, размер акцессориев также не превышает 0,1 мкм.

Не только U, но и Sr, Cs, Se обнаружены в самостоятельных индивидуализированных фазах на поверхностях частиц осажденной дисперсной фазы. Отметим, что массовое содержание Sr на поверхности частиц на порядок больше остальных элементов.

Из представленных данных по минеральному составу частиц следует, что аэрозоли можно разделить на три группы: существенно кремнеземные, алюмосиликатные и карбонатные.

Говоря о радиоактивных частицах, присутствующих на поверхностях ОУ, необходимо упомянуть не относящиеся к аэрозолям кристаллы минеральных новообразований.

Например, в 1995 г. на поверхностях стен в помещении 303/3 зафиксированы налеты новообразований, представляющих собой бесцветные прозрачные, белые и желтые кристаллы размером от нескольких до десятков и даже сотен микрометров.

Т а б л и ц а 5. Элементный состав нитевидных частиц дисперсной фазы аэрозолей объекта "Укрытие"

Элемент	Содержание элементов, % мас.									
	Поверхность частицы		Инородная фаза			Поверхность частицы		Инородная фаза		
Na	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,3	0,5	0,0	0,7
Mg	0,5	1,1	0,7	0,8	0,7	2,3	2,2	2,1	0,9	1,7
Al	3,9	5,2	4,8	3,5	3,6	6,4	5,6	16,9	2,7	5,2
Si	15,2	17,4	16,9	14,1	13,7	18,1	16,9	2,7	8,7	15,7
S	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	0,0
K	3,9	3,7	3,6	3,7	4,0	2,8	2,9	2,7	1,3	2,3
Ca	29,1	26,3	26,4	29,5	29,9	21,0	19,9	18,2	16,4	15,2
Fe	4,8	3,9	4,2	5,2	5,7	3,0	2,7	2,9	1,7	2,3
Mn	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1
Ti	0,7	0,2	0,3	0,7	0,7	0,2	0,4	0,3	0,1	0,2
U	0,0	0,0	0,4	0,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
Sr	2,9	2,2	3,8	4,1	3,8	1,2	1,3	1,0	0,8	1,7
Cs	0,6	0,1	0,0	0,5	0,3	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
Ce	0,0	0,0	0,2	0,6	0,1	0,0	0,0	0,3	0,1	0,0

147

Т а б л и ц а 6. Элементный состав частиц-конгломератов дисперсной фазы аэрозолей объекта "Укрытие"

Элемент	Содержание элементов в образцах, % мас.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na	1,6	1,2	0,4	1,1	0,7	0,0	0,0	0,4	0,3	0,0
Mg	1,8	1,2	19,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,3	0,3	0,0
Al	4,1	4,2	0,5	1,5	2,1	2,8	2,1	1,5	1,7	0,2
Si	11,9	27,1	24,6	24,9	8,2	11,7	9,5	37,7	38,8	34,8
S	4,5	1,7	0,0	0,0	0,1	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0
K	1,2	1,3	0,1	0,4	4,7	4,1	4,0	0,4	0,5	0,2
Ca	8,9	77	0,5	23,3	36,7	34,3	33,4	2,7	2,6	0,2
Fe	2,7	10,7	9,1	0,9	8,6	5,3	5,7	1,1	2,8	0,2
Mn	0,3	0,3	0,0	0,1	0,5	0,2	0,1	0,0	0,2	0,0
Ti	0,4	0,7	0,1	0,0	0,6	0,1	0,5	0,1	0,1	0,0
U	Не обнаружен									
Sr	0,0	0,5	0,9	5,7	1,8	5,8	12,9	7,7	3,8	2,2
Cs	0,1	-	-	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	-	0,1

Детальное описание новообразований выходит за рамки настоящей статьи и представлено в работе [10]. Радиоактивные новообразования являются кристаллогидратами, при определенных условиях происходит дегидратация минералов уранила, их переход в дисперсную фазу и образование новых форм аэрозолей [10]. Новые модификация радиоактивных аэрозолей относятся к тонкодисперсным (размеры частиц менее 0,1 мкм), поэтому обладают высокой миграционной способностью и могут распространяться за пределы объекта. Содержание в значительных количествах продуктов деления ядерного топлива в растворимой форме обуславливает высокую радиобиологическую опасность таких аэрозолей.

4. Исследование микроструктуры лаваобразных топливосодержащих масс. Как отмечалось выше, ощутимого перехода ЛТСМ в дисперсную фазу аэрозолей через 10 лет после аварии не наблюдается. В то же время, визуальные наблюдения за ЛТСМ показывают, что с течением времени существенно нарушается целостность их поверхностных слоев. Выделено три группы частиц, находящихся на поверхности ЛТСМ: частицы темного цвета с

неровными краями, глобулы с металлическим блеском и зерна кварца. Первая группа представлена, частицами 1-15 мкм (среднее 3,7 мкм) вторая и третья - 10-200 мкм (среднее ~ 60 мкм), при этом большинство частиц первой группы находится на поверхности более крупных; более 90 % активности содержится в отдельных частицах также первой группы [1].

Приведем некоторые результаты, полученные нами при исследовании микроструктуры ЛТСМ, находящихся в парораспределительном коридоре объекта.

Исследованные фрагменты ЛТСМ представляли собой обломки стекловидного вещества. Все образцы имели неровный, полураковистый излом. Визуальное исследование микроструктуры образцов с помощью микроскопа позволило выделить в них участки трех типов: темные непрозрачные, светлые полупрозрачные и прозрачные.

Элементный состав трех разновидностей ЛТСМ, выполненный с использованием метода локального электронно-зондового анализа, приведен в табл. 7.

Анализ результатов, представленных в табл. 7, позволяет сделать вывод о том, что по химическому составу затвердевшая топливная лава весьма неоднородна, соотношения элементов в темных непрозрачных, светлых полупрозрачных и прозрачных участках существенно различаются. Основная масса ЛТСМ представлена затвердевшим расплавом кремнезема (SiO_2).

148

Т а б л и ц а 7. Химический состав лаваобразной топливосодержащей массы

Элемент	Концентрация определяемых элементов в различных участках образцов, % мас.								
	Темный непрозрачный			Светлый полупрозрачный			Прозрачный		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
U	4,26	5,02	3,74	2,71	3,07	1,34	0,75	0,00	0,10
Na	2,39	1,90	1,83	1,64	1,06	0,03	0,76	0,08	0,38
K	1,69	1,50	2,21	2,25	1,46	0,78	0,06	0,00	0,00
Mg	2,36	2,36	1,51	1,09	0,94	0,34	0,76	0,08	0,38
Ca	6,12	6,89	6,28	4,30	5,27	3,24	0,08	0,00	0,16
Mn	0,06	0,00	0,00	0,30	0,00	0,35	0,00	0,00	0,00
Ce	0,24	0,00	0,00	0,00	0,06	0,17	0,39	0,29	0,08
Al	5,59	5,61	4,23	3,90	2,53	1,16	0,44	0,24	0,00
Fe	3,46	4,17	4,00	2,48	3,66	2,93	0,03	0,36	0,02
Si	29,18	30,85	24,00	27,81	16,59	7,50	50,13	48,70	50,06
S	0,09	0,10	0,01	0,16	0,00	0,02	0,09	0,67	0,16
Cl	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,05	0,00	0,04	0,00
C+O	44,57	41,61	52,20	53,35	65,36	82,09	47,19	48,35	48,68

Содержание урана наиболее высокое (4-5 мас. долей) в темных участках ЛТСМ. В темных участках лавы, наряду с ураном, в значительных концентрациях присутствуют Ca, Al, Fe, Mg, Na. Светлые прозрачные участки являются кварцевым стеклом с небольшим содержанием (до 2-3 мас. долей) примесей, среди которых преобладают Na, Mg, Al; концентрация урана не более 0,7 мас. долей. В светлых полупрозрачных участках содержится уран в промежуточном количестве между темными и светлыми разновидностями, а также Ca, Al, Fe, Mg, Na.

Необходимо отметить, что до сих пор считалось, что в пределах различных участков одной пробы ЛТСМ явных признаков изменчивости состава нет [5].

Неоднородность ЛТСМ должна создавать внутренние напряжения, релаксация которых вызывает образование микротрещин и с течением времени приводит к разрушению лав. Процесс разрешения, по-видимому, усугубляется электростатическим отталкиванием

друг от друга различных фаз (микроучастков лавы) и различающихся между собой коэффициентами теплового расширения разных фаз.

Частицы, находящиеся на поверхности ЛТСМ, являются их диспергированными фрагментами. Так, проведенный нами анализ аэрозольного фильтра, отобранного в 1995 г. в непосредственной близости от скоплений ЛТСМ (в помещении 305 объекта), показал наряду с хорошим совпадением среднего размера, фактора формы и элементного состава частиц с описанным выше (см. п. 3) присутствие на фильтре отдельных частиц неправильной формы, размером до 50 мкм. Состав таких частиц близок к составу светлых прозрачных и полупрозрачных участков ЛТСМ (см. табл. 7). Частицы, близкие по составу к темным (содержащим уран) участкам ЛТСМ не зарегистрированы, что очевидно связано с их относительно крупными размерами (как отмечено выше, такие частицы находятся на поверхности очень крупных). Следовательно, частицы, образующиеся при разрушении ЛТСМ, пока еще недостаточно мелкие, для того, чтобы мигрировать на значительные расстояния от скопления ЛТСМ.

Заключение. В результате проведенных исследований можно сформулировать такие выводы:

1. Большинство частиц аспирационной дисперсной фазы аэрозолей ОУ имеет сферическую форму. Размеры большинства частиц аспирационной дисперсной фазы

аэрозолей через 10 лет после запроектной аварии находятся в нехарактерной для воздушной среды области 1-3 мкм, что связано с тем, что частицы обладают электростатическим зарядом. Именно эта область считается опасной с радиационно-биологической точки зрения из-за достаточно высокого коэффициента отложения в органах дыхания (более 40 %).

2. Впервые установлена существенная неоднородность микроструктуры ЛТСМ, что является причиной, которая может приводить к постепенному разрушению лав с течением времени. Фрагменты, образующиеся при деструкции поверхности ЛТСМ, через 10 лет после аварии еще достаточно крупные для того, чтобы мигрировать на значительное расстояние от скоплений ЛТСМ. Ощутимого перехода разрушающихся ЛТСМ и конструкционных материалов в дисперсную фазу аэрозолей в настоящее время не наблюдается, но в ближайшее время следует ожидать интенсификации этого процесса.

3. Образование большинства частиц дисперсной фазы аэрозолей происходило в активной стадии запроектной аварии на 4ЭБ ЧАЭС при крайне неоднородных температурных условиях. Эти частицы не являются, как это было принято до сих пор считать, мелкодиспергированным ядерным топливом. Ядерное топливо присутствует в отдельных частицах в виде аксессуариев на их поверхности, при этом размер аксессуариев менее 0,1 мкм. По минеральному составу частицы аэрозолей объекта "Укрытие" можно разделить на три группы: существенно кремнеземные, алюмосиликатные и карбонатные.

4. В настоящее время из-за дегидратации вторичных урановых минералов начался процесс формирования новых форм радиотоксичных аэрозолей. Новые модификация радиоактивных аэрозолей относятся к тонкодисперсным (размеры частиц менее 0,1 мкм), характеризуются высокой миграционной способностью и могут распространяться за пределы объекта. Содержание в значительных количествах продуктов деления ядерного топлива в растворимой форме обуславливает высокую радиобиологическую опасность таких аэрозолей.

1. *Динамика поведения топливных масс в объекте "Укрытие"* / С.А. Богатов, А.А. Боровой, А.С. Евстратенко и др. - Киев, 1992. - 20 с. - (Препр./АН Украины. Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова; 92-29).

2. *Вишневский А.С., Кузьмина И.Е., Ткач В.Н., Токаревский В.В.* Экспериментальные исследования радиоактивных новообразований объекта "Укрытие" // Проблемы Чернобыльской зоны відчуження. - Київ: Наук. думка. - 1995. - Вып. 3. - С. 215-224.

3. *Бегичев С.Н., Боровой А.А., Бурлаков Е.В. и др.* Топливо реактора 4-го энергоблока ЧАЭС. (Краткий справочник). - М., 1990. - 21 с. - (Препр./Ин-т атомной энергии; 5268/3).

4. *Кузьмина И.Е.* Экспериментальные исследования дисперсного состава аэрозоля объекта "Укрытие" // Проблемы Чернобыльской зоны відчуження. - Київ: Наук. думка. - 1994. - Вып. 1. - С. 124-128.

5. *Боровой А.А., Евстратенко А.О., Пазухин Э.М. и др.* Лаваобразные топливосодержащие массы объекта "Укрытие" 1992. - 14 с. - (Препр./АН Украины. Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова).

6. *Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ* / Под ред. В.И. Петрова. - М: Мир, 1984. - Том 2.

7. *Басманов П.И., Петрянов В.И.* Легкие респираторы. - М.: Мир, 1974. - 213 с.

8. *Иванов В.Д., Кириченко В.Н.* Самопроизвольная униполярная зарядка β -активных "горячих" аэрозольных частиц // - Докл. АН СССР. - 1969. -188, № 2. - С. 65-68.

9. *Вишневский А.С., Кузьмина И.Е., Токаревский В.В.* Экспериментальные исследования новообразований объекта "Укрытие". - Тез. докл. пятой международной научной конференции "Чернобыль-96". - Киев. - 1996. - С. 178.

Межотраслевой научно-технический центр "Укрытие" НАН Украины, Чернобыль

Поступила 10.07.96

150

Л.С. БАЛАШОВ, Л.І. ФРАНЦЕВИЧ, Н.І. ШЕРСТЮК

СТАН ОБ'ЄКТІВ ПРИРОДНО-ЗАКАЗНИКОВОГО ФОНДУ В ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ

Дана загальна характеристика ландшафту, флори та фауни Чорнобильської Зони відчуження. Описані заказникові об'єкти, втрати при пожежах та невилітливості людини. Наведено короткі дані про радіаційний стан на об'єктах природно-заказникового фонду, намічено критерії відбору перспективних для заповідання об'єктів Зони відчуження.

L.S. BALASHOV, L.I. FRANTSEVICH, N.I. SHERSTYUK

THE STATE OF NATURE-RESERVE OBJECTS IN THE EXCLUSION ZONE

Landscape, flora and fauna of the Chernobyl NPP Exclusion zone are characterized. Reserve objects, losses after fires and those caused by anthropogenic activity are described. Information about radiation situation at nature-reserve objects is presented. Criteria for choice of species promising for reserve objects of the Exclusion zone are outlined.

М.Ю. АЛЕСІНА, М.П. АРХІПОВ, Л.С. ЛОГІНОВА, О.М. БЕСКРОВНИЙ

ВПЛИВ БІОЛОГІЧНО АКТИВНИХ МЕТАЛООРГАНІЧНИХ СПОЛУК НА ПЕРЕХІД І РОЗПОДІЛ РАДІОНУКЛІДІВ В СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ РОСЛИНАХ

Вивчена можливість роздільного і сумісного використання фітобіорегуляторів як чинників, що діють на процеси нагромадження ^{137}Cs в сільськогосподарських рослинах в умовах Зони відчуження. Використовували біологічно активні металоорганічні сполуки - біомоси, синтезовані на основі рослинної сировини: біомос-Ч, отриманий з дубильного екстракту, з вираженими комплексотворюючими якостями, і біомос-Т, отриманий з бадилля томатів, антистресорні якості якого доведені на багатьох сільськогосподарських культурах. У результаті проведеного дослідження вибрано найбільш оптимальний варіант сумісного використання обох препаратів, що дозволяє отримати вірогідне зниження переходу ^{137}Cs в кукурудзу зі збереженням задовільних фенологічних показників.

M.YU. ALESINA, N.P. ARKHIPOV, L.S. LOGINOVA, A.M. BESKROVNY

THE INFLUENCE OF THE BIOLOGICALLY ACTIVE METALLORGANIC COMPOUNDS ON THE TRANSFER AND DISTRIBUTION OF RADIONUCLIDES IN AGRICULTURAL CROPS

The possibility of the separate and combined use of phytobioregulators as the means influencing ^{137}Cs accumulation in agricultural crops in the 30-km zone was studied. The biologically active metallorganic compounds (biomoses) synthesized on the basis of vegetable raw materials were used: biomos-Ch obtained from the tanning extract and possessing expressed complex forming properties and biomos-T, obtained from the tomato leafy tops which antishock properties are proved on the basis of many -vegetable crops. As a result of the study carried out the most optimal variant of complex application of both preparations has been found. This permits obtaining a reliable decrease of ^{137}Cs transfer to corn keeping to satisfactory phenological indices.

В.І. НОВІКОВ

АКУМУЛЯЦІЯ РАДІОАКТИВНИХ ЦЕРІЮ ТА ЦЕЗІЮ В ВЕРХНІЙ ЧАСТИНІ КИЇВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА (1986-1990 рр.)

Приведено результати досліджень акумуляції церію-144, цезію-137 та цезію-134 у мулах старорічищ-меандр рік Прип'яті та Дніпра, що затоплені Київським водосховищем і які розташовані біля східної межі Зони відчуження. Установлено, що такі донні утворення є концентраторами радіоактивного забруднення і можуть бути використані для індикації його надходження з водним стоком через східну межу Зони відчуження. Показана хронологія акумуляції на дні меандр церію-144, цезію-137 та цезію-134 за період 1986-1990 рр.

151

V.I. NOVIKOV

ACCUMULATION OF RADIOACTIVE CERIUM AND CAESIUM IN THE UPPER PART OF THE KIEV RESERVOIR (1988-1990)

The paper is devoted to results obtained from the study of ^{144}Ce , ^{137}Cs and ^{134}Cs accumulation in silts of former river-beds and meanders of river Pripyat and Dniپر flooded by the Kiev Reservoir and located near the eastern boundary of the estrangement zone. It has been stated that such bottom sediments are concentrators of radioactive

pollutants and may be used to identify location of the pollutants via a water flow through the eastern part of the estrangement zone. Accumulation of ^{144}Ce , ^{137}Cs and ^{134}Cs in the bottom of meanders in 1986-1990 is shown in the chronological order.

В.В. СОРОЧИНСЬКИЙ

БІОДОЗИМЕТРІЯ РАДІОНУКЛІДНИХ ЗАБРУДНЕНЬ ВОДОЙМИЩ НА ОСНОВІ ПОРУШЕНЬ В МОРФОЛОГІЧНИХ ОЗНАКАХ РЯСКИ БАГАТОКОРЕНЕВОЇ

Запропоновано метод реєстрації радіонуклідних забруднень у водоймищах, який ґрунтується на вивченні морфогенезу в популяції ряски багатокореневої (*Spirodela polyrrhiza*). На прикладі популяції ряски, яка знаходиться в водоймищах 10-кілометрової зони ЧАЕС, показана можливість використання цього метода для експрес-оцінки значень поглинальної дози для біологічних об'єктів, які знаходяться у цих водоймищах.

V.V. SOROCHINSKY

BIOMONITORING OF RADIONUCLIDE CONTAMINATION OF WATER BASINS BASED ON DISTURBANCES IN MORPHOLOGICAL ATTRIBUTES OF SPIRODELA POLYRRHIZA

A method for estimation of radionuclide contamination in water basins supported by the study of morphogenesis in *Spirodela polyrrhiza* population is suggested. *S. polyrrhiza* populations from water basins of the 10-km zone of the Chernobyl NPP have been used as examples to show potentialities of this method for proximate estimation of the absorbed dose values for biological objects inhabiting these basins.

Т.С. ГЕРАСИМОВА, В.А. МАРЧЕНКО, І.Я. СИМАНОВСЬКА

ДО СЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ХІМІЧНОЇ ПРИРОДИ КИСЛОТ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СУХОЇ ПОЛІМЕРНОЇ ДЕЗАКТИВАЦІЇ В УМОВАХ ЧАЕС

Досліджено залежність між дезактивуючою спроможністю певної полімерної композиції та типом кислоти, включеної до її складу. Встановлено, що ефективність дезактивації залежить не тільки від кислотності композиції (pH), але також і від комплексоутворюючих властивостей кислоти.

T.S. GERASIMOVA, V.A. MARCHENKO, I.Y. SIMANOVSKAYA

STUDY OF THE EFFECT EXERTED BY THE CHEMICAL NATURE OF ACIDS ON DRY POLYMERIC DECONTAMINATION EFFICIENCY UNDER CONDITIONS OF THE CHERNOBYL NPP

The relationship between decontamination ability of a certain polymeric composition and the type of acid included to it has been studied. It is found that decontaminational efficiency depends not only on the composition acidity (pH) but also on the complex forming properties of the acid.

Г.І. РЕЙХТМАН

ХАРАКТЕРИСТИКА СТАНУ ОБ'ЄКТУ "УКРИТТЯ" ТА ШЛЯХИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЙОГО В ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНУ СИСТЕМУ

Дослідження стану 4-го енергоблоку, проведені різними організаціями в 1986-1993 рр., а також виконані в цей період технічні міроприємства дали змогу вивчити стан будівельних конструкцій і визначити характеристики паливовміщуючих мас в доступних місцях. Виходячи з даних цих досліджень, прийшли

152

до висновку, що вирішувати проблему перетворення об'єкту "Укриття" в екологічно безпечну систему потрібно в два етапи. Розроблено концепцію, що дає можливість вирішувати основне завдання першого етапу - відвернути вихід радіонуклідів в навколишнє середовище і стабілізувати стан об'єкту "Укриття".

G.I. REIKHTMAN

DESCRIPTION OF OBJECT "SHELTER" CONDITION AND WAYS OF ITS TRANSFORMATION INTO THE ECOLOGICAL SAFETY SYSTEM

Conditions of the fourth unit at the Chernobyl NPP were studied by different organizations from 1993 to 1994. Technical measures fulfilled during this period made it possible to determine the condition of building constructions and parameters of the fuel-containing masses in the accessible places. Proceeding from these researches we came to the conclusion that it is necessary to solve the problem of transformation of object "Shelter" in two stages. A conception is developed which permits fulfilling a fundamental task of the first stage: to prevent the release of radionuclides to the environment and to stabilize the condition of object "Shelter".

Е.Л. БЕЛОУСОВ, М.І. СИДОРЕНКО

СТРАТЕГІЯ ПОЕТАПНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБ'ЄКТУ "УКРИТТЯ"

Дано оцінки стану об'єкту "Укриття", виходячи з яких зроблено висновок про необхідність здійснення його поетапної стабілізації. Стабілізація повинна здійснюватись шляхом безперервного перетворення - переходу від попередньої стадії існування до нової на основі прогнозування майбутніх проектів перетворення. Приведено результати використання методу ретроспективного аналізу перевантажень. В зв'язку з цим розроблено ряд пропозицій як для короткострокової так і для довгострокової стабілізації об'єкту. За думкою спеціалістів, використання цих робіт дасть змогу експлуатувати об'єкт 50-80 років. За цей час буде можливість вирішити технологічну проблему переробки радіоактивних відходів, або, в противному разі, повернутися до проблеми будівництва "Укриття-2" в більш сприятливих економічних умовах.

E.L. BELOUSOV, M.I. SIDORENKO

THE STRATEGY OF STEP-BY-STEP STABILIZATION OF OBJECT "SHELTER"

An estimate is given to object "Shelter" proceeding from which a conclusion is made on the necessity to fulfil its step-by-step stabilization. The process of stabilization must be continuous transformation-transition from the previous stage of existence to new one on the basis of prediction of future projects of reorganization. The results of using the method of retrospective analysis of overloading are presented. They have promoted development of a number of propositions both for short-term and for long-term stabilization of the object. The experts think these works will make it possible to use object for 50-80 years. During this period there will be enough time to solve technological problems concerning radioactive waste treatment, or otherwise to return to the problem of "Shelter-2" construction in more advantageous economic situation.

M.I. ПАВЛЮЧЕНКО, І.П. ХОРЕНКО

ОГЛЯД РОБІТ ПО ВИВЧЕННЮ ТЕХНОГЕОЛОГІЧНОГО РОЗРІЗУ І ЗАБРУДНЕННЯ РАДІОНУКЛІДАМИ ҐРУНТОВИХ ВОД ПРОММАЙДАНЧИКА ОБ'ЄКТУ "УКРИТТЯ".

Подано короткий огляд робіт по програмі "Ареал". Програма спрямована на вивчення процесів міграції радіонуклідів в ґрунтові води з проммайданчику об'єкту "Укриття", визначення кількості ядерного палива і продуктів поділу на проммайданчику. Вперше приведено дані по глибині, товщині і потужності експозиційної дози забрудненого шару доаварійної поверхні.

153

M.I. PAVLYUCHENKO, I.P. KHORENKO

REVIEW OF WORKS ON THE STUDY OF THE TECHNOLOGICAL SECTION AND RADIONUCLIDE CONTAMINATION OF SOIL WATER IN CONSTRUCTION SITE OF OBJECT "SHELTER"

It is a brief review of works on program "Areal". The program is aimed to study migration of radionuclides from construction site of object "Shelter" to soil waters, to estimate the amount of the nuclear fuel and fission products at the construction site. Data on the depth, thickness and intensity of the exposure dose of the contaminated layer of the pre-accidental surface are presented for the first time.

V.I. ЧЕРНЮК, M.I. ЗАХАРЧЕНКО, A.B. НОСОВСЬКИЙ, В.Б. ЛАСТОВЧЕНКО, A.A. ПЕТРИЧЕНКО, V.I. ПАНЧЕНКО, В.В. ЛИПОВИЙ, A.B. ПУГАЧ

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛУ ЧАЕС ПРИ 8- ТА 12-ГОДИННОМУ ГРАФІКУ РОБОТИ

Проведено дослідження функціонального стану операторів блочних і центрального щитів керуванні ЧАЕС в денних і нічних 8-ми - 12-ти годинних робочих змінах. На основі змінної динаміки показників суб'єктивного стану, рівня активації центральної нервової системи, артеріального тиску, частоти пульсу та "температури тіла встановлено, що денні зміни характеризуються високою функціональною напругою, нічні - вираженою втомлюваністю. Праця згідно 8-ми годинного графіку змін в порівнянні з 12-ти годинним виявилась менш сприятливою для функціонального стану операторів, так як вела до розвитку стану надмірної збудливості центральної нервової системи і характеризувалась наростанням втоми впродовж змінного циклу.

V.I. CHERNYAK, M.I. ZAKHARENKO, A.V. NOSOVSKY, V.B. LASTOVCHENKO, A.A. PETRICHENKO, V.I. PANCHENKO, V.V. LIPOVOJ, A.B. PUGACH

RESULTS OF INVESTIGATION OF THE FUNCTIONAL STATE OF OPERATORS INVOLVED IN 8- AND 12-HOUR SHIFT ROTATIONS

The functional state of operators of block and central control panels of the Chernobyl NPP involved in 8- and 12-hour shift rotations was studied. Basing on the results of changes in indices of the subjective state, activation of the central nervous system, arterial pressure, heart rate, body temperature it was established that day shifts were characterized by higher functional tension whereas night shifts by more expressed fatigue. The work with the 8-hour rotation schedule in comparison with 12-hour one appeared to be less favourable for the functional state of operators because it resulted in overexcitation of the central nervous system and was characterized by more expressed fatigue in night shifts.

V.I. МАКСИН, О.З. СТАНДРИТЧУК

ВІДОБРАЖЕННЯ ЗАГАЛЬНИХ ЕВОЛЮЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИРОДИ У РАДІОНУКЛІДНИХ РЯДАХ

Виявлено детермінізм при заповненні радіонуклідами часової шкали відповідно до їх періодів напіврозпаду ($T_{1/2}$). Цей детермінізм підпорядковується таким же хвилястим функціям, що й еволюційні процеси природи. Запропоновано новий класифікаційний поділ радіонуклідів за величиною їх $T_{1/2}$.

V.I. MAXIN, O.Z. STANDRYTCHUK

REFLECTION OF GENERAL EVOLUTIONARY PROCESSES OF NATURE IN RADIO-NUCLIDE SERIES

Determinism in filling in the time scale with radionuclides according to the periods of their half-decay ($T_{1/2}$ -periods) was revealed. This determinism is subjected to the same undulatory functions that evolutionary processes are. A new classification division of radionuclides as to the value of their $T_{1/2}$ -periods is suggested.

154

О.Л. КЕДРОВСЬКИЙ, В.М. МЕЛЬНИЧЕНКО

ЛОКАЛІЗАЦІЯ НИЗЬКО- ТА СЕРЕДНЬОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ У ГЛИНИСТИХ ПОКЛАДАХ

Захоронення (зберігання) радіоактивних відходів є однією із актуальних проблем України. Пропонується один із способів спорудження та благоустрою могильників РАВ середньої і низької активності, розташованих у глиняних покладах. Могильник являє собою шахтний ствол або свердловину великого діаметру, пройдені бурінням і заповнені після завантаження спеціальним герметизуючим розчином.

O.L. KEDROVSKY, V.M. MELNICHENKO

LOCALIZATION OF THE LOW AND INTERMEDIATE LEVEL RADIOACTIVE WASTE IN CLAY DEPOSITS

The interim and ultimate storage of radioactive waste is one of the urgent problems for Ukraine. A method of construction and equipping the repository for low and intermediate level radioactive waste in clay deposits is proposed. The repository is a shaft or large diameter bore-hole constructed by drilling and loaded with waste. After loading the repository is filled up with special liquid hermetic.

В.О. КОЖАНОВ, Н.І. ПРОСКУРА, Ю.В. ШУЛЕПОВ, В.В. МАЛЯРЕНКО

ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИЛУГОВУВАННЯ РАДІОНУКЛІДІВ З ГАРЯЧИХ ЧАСТИНОК ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Запропоновано метод вимірювання коефіцієнта внутрішньої дифузії радіонуклідів за результатами експериментів з кінетики їх вилуговування з індивідуальних гарячих частинок. Ця методика може бути застосована для відрізків часу (50-380 діб) на початку спостереження видужування з зразків гарячих часток в різних ґрунтах.

Порядок визначення коефіцієнтів внутрішньої дифузії ^{137}Cs $\text{н}\cdot 10^{-20}$ - $\text{н}\cdot 10^{-21}$ $\text{см}^2/\text{с}$, ^{90}Sr $\text{н}\cdot 10^{-19}$ $\text{см}^2/\text{с}$.

V.A. KOZHANOV, N.I. PROSKURA, YU.V. SHULEPOV, V.V. MALYARENKO

DETERMINATION OF KINETIC PARAMETERS FOR RADIONUCLIDE LEACHING FROM HOT PARTICLES BY EXPERIMENTAL DATA

The method for determination of the radionuclide diffusion coefficient has been suggested as based on experimental data on kinetics of individual particle leaching. This method may be applied at short time periods (50-380 days) when observing leaching from different soil samples. Diffusion coefficient values are as follows: $\text{н}\cdot 10^{-20}$ - $\text{н}\cdot 10^{-21}$ $\text{см}^2/\text{с}$ for ^{137}Cs and $\text{н}\cdot 10^{-19}$ $\text{см}^2/\text{с}$ for ^{90}Sr .

В.О. КОЖАНОВ, Ю.В. ШУЛЕПОВ, Н.І. ПРОСКУРА

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ВИЛУГОВУВАННЯ РАДІОНУКЛІДІВ В ШАРІ ҐРУНТУ

Сформульовано задачу кінетики видужування радіонуклідів з частинок на засадах аналогії між процесами вилуговування і адсорбції та іонного обміну з розчину на поруватих гранулах іонообмінника. Розглянуто варіант задачі кінетики сорбції (вилуговування) частинкою у припущенні лінійності ізотерми адсорбції молекул (іонів) з об'ємного розчину. Визначено характер функції завершення процесу дифузії у регулярному та нерегулярному режимах у змішаної дифузійній кінетиці процесу. Обговорюються результати порівняння теоретично та експериментально визначеної кількості вилужених з частинок радіонуклідів.

V.A. KOZHANOV, YU.V. SHULEPOV, N.I. PROSKURA.

MATHEMATICAL MODELS SHOWING RADIONUCLIDE LEACHING IN A SOIL LAYER

The kinetic problem for radionuclide leaching from particles has been formulated on the basis of analogy between the processes of leaching, adsorption or ion exchange from solution by porous or ion exchange particles. Having assumed a nonlinear isotherm of adsorbed molecules (ions) a general problem

155

on kinetic of radionuclide sorption (leaching) by a particle is put forward. The expression for function of the diffusion process completeness in regular and irregular regimes in the mixed diffusion kinetic of the process is given. The ways for comparison of theoretically and experimentally measured values of leached radionuclides are discussed.

М.Г. БУЗИННИЙ

АВАРІЙНИЙ ВИКИД РАДІОВУГЛЕЦЮ У РЕЗУЛЬТАТІ АВАРІЇ НА ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АЕС ТА ПОВ'ЯЗАНІ З НИМ ПРОБЛЕМИ

Узагальнено результати радіовуглецевих досліджень наслідків аварії на Чорнобильській АЕС. Розглянуто питання інформативності та практичної значимості досліджень, а також можливість використання радіовуглецевого методу для ретроспективних досліджень, пов'язаних з аварійними газовими викидами ЧАЕС.

M.G. BUZINNY

EMERGENCY EJECTION OF RADIOCARBON AS A RESULT OF THE CHERNOBYL NPP DISASTER AND PROBLEMS PERTAINED TO IT

All available information on radiocarbon investigations conducted in frames of the study of the Chernobyl NPP accident aftereffects is summarized. The aspects of the practical importance and efficiency of implementation of the radiocarbon method for the retrospective studies aimed at restoration of accidental gas releases at the Chernobyl NPP are analyzed.

А.В. МАТОШКО

ТИПІЗАЦІЯ ТА РАЙОНУВАННЯ ОСАДОВОГО ЧОХЛА ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ ДЛЯ ГІДРОГЕОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Виконано узагальнення та аналіз геологічних матеріалів, отриманих на території Зони відчуження в до- та післяаварійний період. На основі генетичного та стратиграфічного розчленування перерізів свердловин та відслонень виділено типові седименто-генетичні та седименто-стратиграфічні комплекси осадового чохла, встановлено особливості їх будови та межі розповсюдження. З кожним з них можуть бути пов'язані певні закономірності міграції радіонуклідів з підземними водами. Останнє необхідно враховувати при розміщенні пунктів гідрогеологічного моніторингу та аналізу його результатів.

A.V. MATOSHKO

TYPIFICATION AND REGIONALIZATION OF THE CHERNOBYL EXCLUSION ZONE SEDIMENTARY COVER FOR HYDROGEOLOGICAL MONITORING

Geological findings obtained within the Chernobyl zone territory before and after the accident have been generalized and analyzed. Genetic and stratigraphic division of boreholes and outcrops has permitted identifying typical sedimentary genetic and sedimentary stratigraphic complexes of the cover. Peculiarities of their structure and boundaries of their spreading are determined. It is shown that each of them may be associated with definite regularities of radionuclide migration to the ground water. The latter is necessarily to be taken into account for arrangement of hydrogeological monitoring points and analysis of the monitoring results.

В.С. РЕПІН

РЕТРОСПЕКТИВНА РЕКОНСТРУКЦІЯ ДОЗ І ОЦІНКА РОЛІ ОКРЕМИХ ФАКТОРІВ В ОПРОМІНЕННІ ЖИТЕЛІВ, ЕВАКУЙОВАНИХ ІЗ ТРИДЦЯТИКІЛОМЕТРОВОЇ ЗОНИ ПІСЛЯ АВАРІЇ НА ЧАЕС

Запропоновано результати реконструкції доз опромінення жителів, евакуйованих із тридцятикілометрової зони ЧАЕС. Реконструкцію виконано для основних дозоутворюючих джерел: зовнішнього гама-опромінення, ізотопів йоду, доз від інгальованих радіонуклідів, доз зовнішнього бета-опромінення. Порівняльну характеристику факторів опромінення подано у термінах ризику.

156

V.S. REPIN

RETROSPECTIVE RECONSTRUCTION OF DOSES AND ESTIMATION OF SIGNIFICANCE OF CERTAIN FACTORS FOR IRRADIATION OF THE RESIDENTS EVACUATED FROM THE 30-KM ZONE AFTER THE CHERNOBYL DISASTER

Results of dose reconstruction for the people evacuated from the 30-km zone after the Chernobyl disaster are described. The reconstructed doses account for main dose formation sources: external gamma irradiation, iodine isotopes, inhalation, external beta irradiation. The comparison of these factors is given in terms of risks.

А.С. ВИШНЕВСЬКИЙ, І.С. КУЗЬМІНА, В.В. ТОКАРЕВСЬКИЙ

ПРОЦЕСИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ТА ДЕКТРУКЦІЇ ВТОРИННИХ УРАНОВИХ МІНЕРАЛІВ ОБ'ЄКТУ «УКРИТТЯ»

Одержано склад вторинних уранових мінералів об'єкту "Укриття". Процес вилугування радіонуклідів з лапоподібних паливовміщуючих мас відбувається одночасно з їх механічним руйнуванням. Мінерали кристалізуються в результаті випарувальної концентрації лужних вод карбонатно-сульфатно-хлоридного спаду, є кристалогідратами, можуть зазнавати дегідратації та деструкції з переходом найдрібніших частинок в аспіраційну дисперсну фазу аерозолі. В умовах об'єкту "Укриття" з плином часу відбувається вибіркового перерозподіл радіоактивних елементів по різних видах речовини. **Ключові слова:** об'єкт "Укриття", ядерне паливо, водні розчини, вторинні уранові мінерали, уранілкарбонати, радіонуклідний склад.

A.S. VICHNEVSKY; I.E. KUZ'MINA, V.V. TOKAREVSKY

THE CRYSTALLIZATION AND DESTRUCTION PROCESS OF THE SECONDARY URANIUM MINERALS OF "SHELTER" ENCASEMENT

The composition of the secondary uranium minerals from the "Shelter" encasement is obtained. It was shown that the leaching of radioactive nuclides from LFCM take place simultaneously with their mechanical destruction. The crystallization of the minerals caused by evaporation concentration of the alkali waters with the carbonate-sulfate-chloride composition. The minerals are crystalline hydrates and may be exposed to the dehydration and destruction with the transition of the small particles to the aspirational aerosol disperse phase. The selective redistribution of the radioactive elements on the different kinds of matter take place in time under conditions of "Shelter" encasement.

І.С. КУЗЬМІНА, В.В. ТОКАРЕВСЬКИЙ

ЧАСТИНКИ ДИСПЕРСНОЇ ФАЗИ АЕРОЗОЛІВ ОБ'ЄКТУ «УКРИТТЯ»

Подані результати досліджень складу аерозолів об'єкту "Укриття". Формування частинок проходило в активній стадії аварії і продовжуються до цього часу. Ядерне паливо знаходиться в аерозолях у вигляді аксесоріїв, розмір яких менше 0,1 мкм, на поверхні частинок. В останній час внаслідок дегідратації мінералів уранілу почався процес утворення особливо токсичних аерозолів з високою міграційною властивістю. Встановлено неоднорідність мікроструктури лавоподібних паливовміщуючих мас, що найближчим часом може привести до інтенсифікації процесу їх руйнування.

I.E. KUZ'MINA, V.V. TOKAREVSKY

THE AEROSOL DISPERSE PHASE PARTICLES OF "SHELTER" ENCASEMENT

The results of the aerosol compound investigation from the "Shelter" encasement are presented. It is estimated that the formation of aerosol particles took place during the active stage of the accident and continues up to now. The nuclear fuel fraction is present in aerosol particles as accessories on their surfaces and the sizes of accessories do not exceed 0,1 mkm. Recently the formation of aerosols with specific topological properties and high migrate capability is beginning. The micro-structure dissimilarity of lava-liked fuel containing masses is established so their intensive destruction is to be expected next future.

157

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ ДЛЯ АВТОРІВ ЗВІРНИКА «ПРОБЛЕМИ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ»

Де збірника приймаються не опубліковані раніше і не призначені для одночасного опублікування в інших виданнях праці, присвячені проблемам радіоекології Чорнобильської Зони відчуження, поводження з радіоактивними відходами в Зоні, перетворення об'єкту «Укриття» в екологічно безпечну систему, експлуатації підприємств, розташованих в зоні, медико-біологічних аспектів та ін.

Обсяг статті не повинен перевищувати 24 стор. машинопису. Авторський рукопис (основний текст з таблицями, ілюстраціями, анотаціями (українською, англійською мовами та мовою, якою написана стаття) на окремій сторінці) подається у редколегію у трьох примірниках разом з необхідною супровідною документацією (скерування установи, акт експертизи, рецензія внутрішня та зовнішня). Вимоги до технічного оформленні рукопису.

1. Текст рукопису має бути надрукований на друкарській машинці (принтері) на папері (формату А4 через чорну стрічку доброї якості або набраний на дискеті у редакторах.

Абзацний відступ повинен дорівнювати п'яти знакам. У рядку повинно бути 60 ± 2 знаки, на сторінці суцільного тексту - 29 ± 1 рядки лише через два інтервали. Надрукований текст повинен мати такі поля: верхнє - 20 мм, праве - 10 мм, ліве і нижнє - не менше 20 мм.

Заголовки відділяються від тексту зверху і знизу трьома інтервалами.

2. Перед текстом статті має бути вказаний цифровий номер УДК (з лівого боку), ініціали і прізвища авторів, а потім назва статті. Після назви на окремій сторінці та водиться текст анотації (до 0,5 стор.) мовою оригіналу.

В кінці тексту на першій сторінці статті повинно бути надрукована ініціали та прізвища авторів (наприклад, Е. В. Собонович, В. В. Долін, 1995).

3. Після основного тексту статті на окремій сторінці без заголовку оформляється список літератури в порядку посилань. Праці, на які нема посилань у тексті статті, у список не включаються. Після списку літератури повинна йти розгорнута назва організації, де виконана робота, і підпис автора (авторів) статті. Сторінки статті слід пронумерувати.

4. На окремій сторінці друкується анотація статті українською та англійською мовами. Анотація повинна включати ініціали та прізвища авторів, назву статті і короткий (до 0,5 стор.) текст, що відображає основний зміст етапів.

5. Математичні, хімічні формули і символи повинні бути віддруковані на принтері або чітко вписані від руки чорним чорнилом (пастою, тушшю), знаки, цифри, букви мають бути правильно розміщені відповідно до змісту формули. Між рядками формули і дробовими рисками зберігаються інтервали, що допускають вільну їх розмітку.

6. Формули у перших двох примірниках рукопису повинні бути розмічені згідно з такими вимогами:

латинські букви, що набираються курсивом, слід підкреслити хвилястою лінією фіолетовою (синьою) пастою;

однакові за написанням букви (Bb, Cc, Kk, Oo, Pp, Ss і т. ін.) треба помітити двома рисками: великі - знизу (C), малі - зверху (w);

букви, що набираються прямим шрифтом (тригонометричні функції, exp, log, lim і т. ін. цифра 0) підкреслити фіолетовою (синьою) пастою знаком $\cup$;

букви, що набираються напівжирним шрифтом, мають бути підкреслені прямою жирною лінією чорною пастою;

показники степені, верхні індекси та інші порядкові знаки мають бути відзначені дужкою U, а порядкові знаки (нижні індекси) - дужкою $\cap$ фіолетовою (синьою) пастою;

грецькі букви мають бути підкреслені червоним олівцем (пастою);

рукописні букви слід підкреслити жовтим олівцем;

готичні букви слід підкреслити синім олівцем, а на лівому полі сторінки звичайним олівцем написати ці букви і пояснити їх;

математичні символи слід пояснити звичайним олівцем по лівому полі сторінки.

Ілюстрації і таблиці додаються на окремих аркушах. Кожна таблиця повинна мати тематичний заголовок. Всі графі таблиць повинні мати назву, яка точно відповідає даним, наведених в них. До кожної статті бажано добавити не більш трьох ілюстрацій. Всі слова в таблиці слід писати без скорочень (крім розмірностей). Ілюстрації можуть бути виконані на білому папері або каліці тушшю або роздруковані на принтері через стрічку хорошої якості з позначенням і розміткою на кожному примірнику. На звороті кожної ілюстрації і таблиці треба вказати її порядковий номер, прізвища авторів і назву статті, а при необхідності - відмітити «верх», «низ», потрібний також підпис автора (авторів) на звороті. На окремій сторінці слід надрукувати підписи до ілюстрації. У тексті рукопису на полях простим олівцем проставити номери ілюстрацій чи таблиць проти тих місць, де вони повинні бути встановлені.

198

ЗРАЗКИ ОФОРМЛЕННЯ БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. *Александровский Ю. А.* Экологические катастрофы и психическое здоровье // Сов. медицина. - 1991 - № 12. - С. 7-10.
2. *Булгаков Л. А., Гусев Д. И., Гусев Н. Г. и др.* Радиационная безопасность в атомной: энергетике / Под ред. А. И. Бурназяна. - М.: Атомиздат, 1981. - 129 с.
3. *Клебанова В. А.* Гигиеническая оценка загрязнения воздушной среды жилых и общественных зданий и придомовых территорий: Автореф. дис. ... канд. мед наук. - М., 1979. - 25 с.
4. *Соботович Э. В., Ольховик Ю. А., Коромысленко Т. И., Соколик Г. А.* Сравнительная характеристика миграционной способности радионуклидов в данных отложениях водоемов ближней зоны Чернобыльской АЭС / Докл. АН УССР. Сер. А. - 1990. - № 8 - С. 12-16.
5. *Бегичев С. Н., Боровой А. А., Булаков Б. В. и др.* Топливо реактора 4-го блока ЧАЭС: Краткий справочник. - М., 1990. - 21 с. - (Препр. / АН СССР, ИАЭ-5208/3).
6. *Суханова А. И.* Морфологические различия растительноядных рыб на ранних периодах развития и поведение их эмбрионов и личинок // Новые исследования по экологии и разведение растительноядных рыб. - Наука, 1968. - С. 194-290.
7. *Руководство по биотехнике разведения и выращивания растительноядных рыб* / Под ред. В. К. Виноградова. - М.: ВНИИПРХ, 1975. - 100 с.
8. *Воронина Э. А., Шеханова И. А.* Влияние инкорпорированного цезия-137 и стронция-90 на ооциты на стадии протоплазматического роста у тилляпии // Роль факторов внешней среды в онтогенезе: Тез. докл. на симп. (Москва, 30 окт. - 1 нояб, 1974 г.). - М., 1974. - С. 9-10.
9. *Julius N. N., Simpson E., Herrenberg L. A.* A rapid method for isolation of functional thymus derived murine lymphocytes // Eur. J. Immunol. - 1973. - N 13. - P. 645-646.

199

МІНІСТЕРСТВО УКРАЇНИ У СПРАВАХ ЗАХИСТУ НАСЕЛЕННЯ ВІД НАСЛІДКІВ АВАРІЇ НА
ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АЕС
АДМІНІСТРАЦІЯ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ

ПРОБЛЕМИ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ

Науково-технічний збірник

Засновано у 1994 р.

Випуск 4

Київ, видавництво "Наукова думка"
(російською та українською мовами)

Художній редактор *І. М. Галушка*
Технічний редактор *С. Г. Максимова*
Коректор *С. Ю. Ноткіна*

Підп. до друку 03.10.96. Формат 70 х 108/16. Папір офс. № 1. Офс. друк. Гарн.
"Computer Modern". Ум.-друк. арк. 14,00. Ум. фарб.-від. 14,71. Обл.-вид. арк. 14,00. Тираж
2000 прим. Зам. 3912

Р.с. 05417561 від 16.03.95

Видавництво "Наукова думка"

252601 Київ 4, вул. Терещенківська, 3.

Віддруковано у ВАТ "Патент", м. Ужгород, вул. Гагаріна, 101.

Замовлення 3912. Тираж 2000.

