

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДОЕМАХ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО РАДИОАКТИВНОГО СЛЕДА

**П.М. Стукалов, А.И. Смагин**

*Производственное объединение «Маяк», г.Озерск*



Приведены результаты моделирования динамики радиоактивного загрязнения водоемов, расположенных в головной части восточно-уральского радиоактивного следа. Показано удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных.

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время широкое применение приобрели камерные модели прогнозирования поведения радионуклидов в водоемах при аварийных и нормативных сбросах [1-3]. Среди них широкое использование получила наиболее отработанная на практике двухкамерная модель, описывающая водоемы как систему «вода - донные отложения» и положенная в основу «Методики прогнозирования состояния загрязнения водоемов при нарушении нормальной работы АЭС» Государственного комитета по гидрометеорологии [4].

Целью данной работы является изучение возможности использования стандартной методики для описания динамики радиоактивного загрязнения водоемов Южного Урала, расположенных в зоне влияния ПО «Маяк». В качестве объектов моделирования выбраны два озера (Урускуль и Бердениш), загрязненные в результате крупномасштабной радиационной аварии в 1957 г. на ПО «Маяк».

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Осенью 1957 г. на территории промышленной площадки химического комбината «Маяк» произошла одна из наиболее крупных радиационных аварий - химический взрыв емкости - хранилища радиоактивных отходов. Суммарный выброс радионуклидов в атмосферу составил около  $20 \times 10^6$  Ки. Из них 90% выпало в зоне промышленной площадки предприятия, а 10% было вынесено в виде радиоактивного следа, протянувшегося узкой полосой на значительной площади Челябинской, Курганской и Свердловской областей, образовав восточно-уральский радиоактивный след (ВУРС) [5].

На территории ВУРС расположены десятки крупных и мелких озер. Из них наибольшему загрязнению подверглись озера Урускуль и Бердениш, расположенные в головной части восточно-уральского следа. Оба озера относятся к группе эрозионно-тектонических водоемов, характерных для степных предгорных районов Южного Урала. Оз. Урускуль является бессточным, оз. Бердениш до 1956 г. также бессточное, а после со-

оружения каналов, соединяющих его с оз.Иртяш и системой реки Теча, слабопроточное. Водоемы имеют блюдцеобразную форму с низкими, большей частью пологими, слабо-изрезанными берегами. Дно водоемов ровное; глубина озер невелика (около 2 м), прибрежные мелководья покрыты обильной растительностью. Дно водоемов заилено, мощность илового слоя достигает местами 5-10 м. Месторасположение озер показано на рис.1.

Начальное количество радиоактивного вещества в каждом непроточном водоеме определялось интегральным значением плотности радиоактивных выпадений на его акваторию. Оценки начального запаса радионуклидов в некоторых озерах, находящихся в районе ВУРС (осень 1957 г.), приведены в табл. 1 [6]. Результирующие концентрации радионуклидов в воде озер определялись в первый момент, главным образом, соотношением начального количества выпавших радионуклидов и объема воды озер, однако начавшийся сразу после загрязнения физико-химический процесс перераспределения радионуклидов в системе «вода-донные отложения», обусловленный гравитационным оседанием крупных нерастворимых частиц выпадений и химическим воздействием ионных форм с водой и материалом донных отложений, привел к изменению ожидаемых расчетных концентраций, основанных только на соотношении запаса радионуклидов в водоеме и объема его воды. По состоянию на 10 октября 1957 г. удельная активность бета-излучающих радионуклидов в воде оз.Бердениш составляла  $5,3 \cdot 10^4$  Бк/л, в воде оз.Урускуль –  $1,0 \cdot 10^5$  Бк/л. В настоящее время уровни загрязнения воды по стронцию-90 составляют величину порядка 10-100 Бк/л.

Таблица 1

**Начальный запас радионуклидов в озерах ВУРС**

Озеро	Активность, $10^{12}$ Бк				
	Sr-90+ +Y-90	Ce-144+ +Pr-144	Ru-106+ +Rh-106	Cs-137	Суммарная активность
Бердениш	400	4800	600	3,7	5800
Урускуль	130	1600	200	1,2	1900

Поскольку все радионуклиды, поступавшие в водоемы, за исключением стронция-90 и цезия-137, являются относительно короткоживущими, то начиная с середины 1960-х гг. радиоактивное загрязнение озер ВУРС связано, главным образом, только со стронцием-90. Для динамики радиоактивного загрязнения характерны три основных этапа.

**1 этап** продолжался от нескольких дней после аварии до нескольких месяцев и характеризовался наиболее высокой удельной радиоактивностью воды и ее быстрым спадом. В этот период происходило распределение радионуклидов между водой и илом в результате интенсивной сорбции и установление динамического равновесия.

**2 этап** продолжался от 3 до 5 лет и характеризовался дальнейшим уменьшением удельной активности воды за счет распада короткоживущих радионуклидов во всех компонентах водоемов. В этот период наблюдается интенсивный смыв радионуклидов с территории водосборных бассейнов в озера и в то же время прочное закрепление радионуклидов в почве, донных отложениях, инкорпорация в живые организмы.

**3 этап** характеризуется тем, что к этому времени из всей смеси радионуклидов остались, в основном, стронций-90 и в незначительной степени цезий-137 - наиболее долгоживущие элементы. Поступление радионуклидов с поверхностным стоком существенно снижается. Достигнуто изотопное равновесие между компонентами водоемов. Спад активности достаточно медленный, продолжается проникновение радионуклидов в глубь донных отложений.

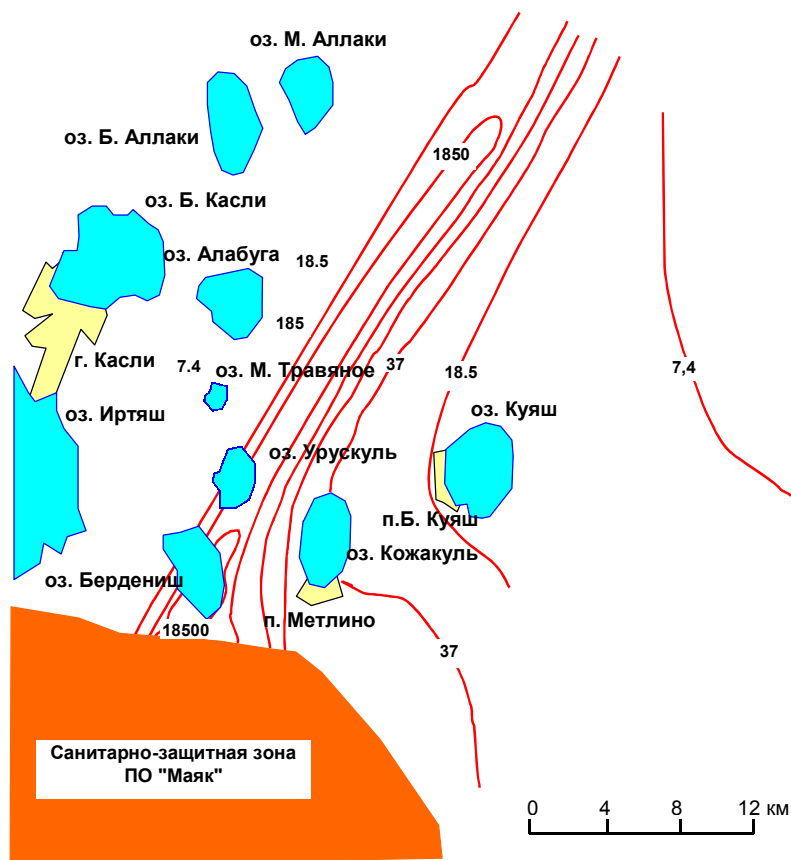


Рис.1. Схема головной части восточно-уральского радиоактивного следа. Изолинии соответствуют поверхностному загрязнению почвы стронцием-90, 1995 г.,  $\text{кБк/м}^2$  [5]

В послеварийный период стронций-90 поступал в водоемы с поверхностным стоком с загрязненной водосборной территории. Средние уровни начального загрязнения местности стронцием-90 в 1957 г. приведены в табл. 2 [6].

Таблица 2

**Средняя плотность загрязнения водосборной территории**

Озеро	Средняя плотность загрязнения водосборной территории, ( $\text{кБк Sr-90}$ ) / $\text{м}^2$
Бердениш	33000
Урускуль	26000

Оценки, выполненные специалистами ОНИС ПО «Маяк» [7], показали следующее. Для периода 1960-65 гг. средняя величина стока радиоактивного вещества составляет около 0,2 %/год при средней концентрации стронция-90 в воде стоков 0,035 Бк/л на 1  $\text{кБк Sr-90/м}^2$  (предельные значения 0,005-0,25) или 35 пКи/л на 1 К и  $\text{Sr-90/м}^2$ . За счет убыли стронция-90 из верхнего слоя почвы 0-2 см целинных задернованных участков, наблюдается снижение концентрации стронция-90 в воде стоков. Концентрация стронция в воде за 4-5 лет уменьшалась в 2 раза, что привело к дополнительному снижению стока радиоактивного вещества. Средний коэффициент стока радиоактивного вещества в 1982 г. был равен 0,05%/год, концентрация – 0,01 Бк/л на 1  $\text{кБк Sr-90/м}^2$ . Наблюдается

дальнейшее снижение коэффициента радиоактивного стока, среднее значение которого за период 1966-90 гг. для стронция-90 составило 0,015% в год. В районах с высоким уровнем поверхностного загрязнения поверхностный сток стронция-90 (водосборная площадь озер Бердениш и Урускуль) играл существенную роль.

Начиная с момента аварии и до настоящего времени для водоемов, расположенных в головной части восточно-уральского следа, осуществлялся радиационный и химический контроль. На ПО «Маяк» имеются многолетние ряды наблюдений за удельными активностями стронция-90 и других радионуклидов в воде, биоте и донных отложениях озер Урускуль и Бердениш.

## КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ДВУХКАМЕРНОЙ МОДЕЛИ

Для моделирования поведения стронция-90 в водоемах, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии 1957 г., была использована модель, описанная в методике [4]. При разработке данной методики использованы результаты анализа данных радиационного мониторинга территорий, загрязненных в результате Чернобыльской аварии.

Для прогноза поведения радионуклидов в водоемах используется двухкамерная модель, позволяющая создать простую расчетную схему для определения объемной концентрации радионуклидов в воде и донных отложениях. К основным процессам переноса радионуклидов в модели относятся гидрологический перенос активности проточными водами за пределы водоема, процессы осаждения загрязненных взвешенных частиц, взмучивания загрязненных донных отложений, диффузионного обмена радионуклидов между водой и дном водоема, а также осадкообразование (заиление).

При построении модели прогноза приняты следующие допущения:

- радиоактивные вещества, внесенные в водоем, распределяются по всему объему водной массы мгновенно и равномерно;
- механизмы переноса радионуклидов в водоем описываются уравнениями первого порядка с постоянными коэффициентами;
- миграция радионуклидов на взвеси полидисперсного гранулометрического состава описывается процессами, определяемыми монодисперсной взвесью характерного размера с эквивалентными сорбционными свойствами;
- процессы сорбции, десорбции радионуклидов взвесью и донными отложениями мгновенны, обратимы и описываются линейной изотермой;
- донные отложения, участвующие в процессах обмена, являются средой с одинаковыми сорбционными и водно-физическими свойствами. В процессах взаимодействия с водой главную роль играет эффективный слой донных отложений, мощность которого определяется экспериментально.

В основу модели вторичного загрязнения воды положены физические представления о существовании на дне водоема слоя подвижных частиц с концентрацией, равной мутности взмыва. Мутность взмыва зависит от физических свойств донных отложений и гидродинамического воздействия. При расчетах вторичного загрязнения воды учитывается только абиотическая взвесь.

Система дифференциальных уравнений, описывающая миграцию  $i$ -го радионуклида в водоеме, имеет вид

$$\frac{dC_1}{dt} = -\lambda_p C_1 - \frac{QC_1}{V} - \frac{\beta}{H} (\alpha_{p1} \cdot C_1 - \alpha_{p2} \cdot C_2) - \frac{U}{H} \alpha_{T1} C - \frac{W}{H} \alpha_{T2} C_2 + \frac{U}{H} \cdot \frac{S_1}{m} \alpha_{T2} C_2 - \\ - \frac{q_{\phi}}{V} \alpha_{p1} C_1 + \frac{A_0}{V} \delta_+(t) + \frac{R_0}{V} e^{-\mu t}$$

$$\frac{dC_2}{dt} = -\lambda_p C_2 - \frac{U}{h} \cdot \frac{S_1}{m} \alpha_{p2} C_2 + \frac{U}{h} \alpha_{p1} C_1 + \frac{\beta}{h} (\alpha_{p1} C_1 - \alpha_{p2} C_2),$$

где  $\delta_+(t)$  - односторонняя импульсная функция.

Начальные условия записываются в виде: при  $t=0$   $C_1=C_\phi$ ,  $C_2=C_q$ , где  $C_\phi$  и  $C_q$  - фоновые объемные концентрации радионуклида в воде и донных отложениях, соответственно. Обозначения параметров, используемых в расчетной схеме, приведены в табл.3.

Таблица 3

**Наименования, обозначения, единицы измерения величин**

Наименование величин	Обозначения	
	вода	донные отложения
Разовое аварийное поступление i-го радионуклида в водоем, Бк	$A_0$	
Первоначальное поступление i-го радионуклида при постоянном загрязнении водоема, Бк/год	$R_0$	
Коэффициент самоочищения территории загрязненного водосбора для i-го радионуклида, 1/год	$\mu$	
Объемная концентрация i-го радионуклида при средних гидрометеорологических условиях для расчетного отрезка времени, Бк/м <sup>3</sup>	$C_1$	$C_2$
Постоянная распада i-го радионуклида, 1/год	$\lambda_p$	$\lambda_p$
Объем водоема, м <sup>3</sup>	$V$	
Средняя глубина водоема, м	$H$	
Толщина эффективного слоя донных отложений, м		$h$
Расход проточных вод, м <sup>3</sup> /год	$Q$	
Расход воды на фильтрацию, м <sup>3</sup> /год	$q_\phi$	
Мутность воды в водоеме, кг/м <sup>3</sup>	$S_1$	
Объемная масса скелета донных отложений, кг/м <sup>3</sup>		$m$
Гидравлическая крупность наносов, м/с	$U$	
Средняя скорость осадконакопления, м/год		$W_c$
Коэффициент массообмена при диффузии i-го радионуклида из воды в донные отложения, м/год	$\beta$	$\beta$
Время, прошедшее с момента аварии, год	$t$	
Доля i-го радионуклида в растворе, год	$\alpha_{p1}$	$\alpha_{p2}$
Доля i-го радионуклида, сорбированного твердой фазой, год	$\alpha_{T1}$	$\alpha_{T2}$

Необходимым условием, определяющим возможность выполнения прогноза, является исходная количественная информация, характеризующая как водный объект, так и источник его загрязнения. Степень достоверности прогноза зависит от точности и полноты исходных данных. Методика позволяет прогнозировать уровни загрязнения водоемов как при разовом, так и при постоянном поступлении активности. Предполагается, что разовое поступление радионуклидов описывает аварийное загрязнение водоема, связанное с аэрозольными выпадениями радиоактивных веществ на его акваторию, а хроническое загрязнение водоема может быть вызвано, например, многолетним поступлением вод поверхностного стока с водосборной площади.

Система дифференциальных уравнений, описывающих модель, имеет аналитическое

решение. Изменение во времени удельных активностей в воде и донных отложениях описывается как сумма экспонент.

**РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ**

Значения параметров, использованных при моделировании поведения стронция-90 в водоемах Урускуль и Бердениш, представлены в табл. 4.

Экспериментальные значения объемной активности донных отложений определялись как средние для эффективного слоя толщиной 2-10 см (в этом слое депонировано более 90% всей активности стронция-90). При расчетах толщина эффективного слоя задавалась как функция времени, изменяющаяся для стронция от 1 до 10 см в соответствии с [4]. Удельная объемная активность определялась как удельная массовая активность, умноженная на объемную массу скелета донных отложений, принятую равной 200 кг/м³. Фильтрационные расходы и расходы проточных вод (для оз. Бердениш) не учитывались.

Результаты моделирования показаны на рис. 2 и 3. Видно удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей. Некоторое расхождение результатов моделирования с данными радиационного мониторинга для оз. Бердениш

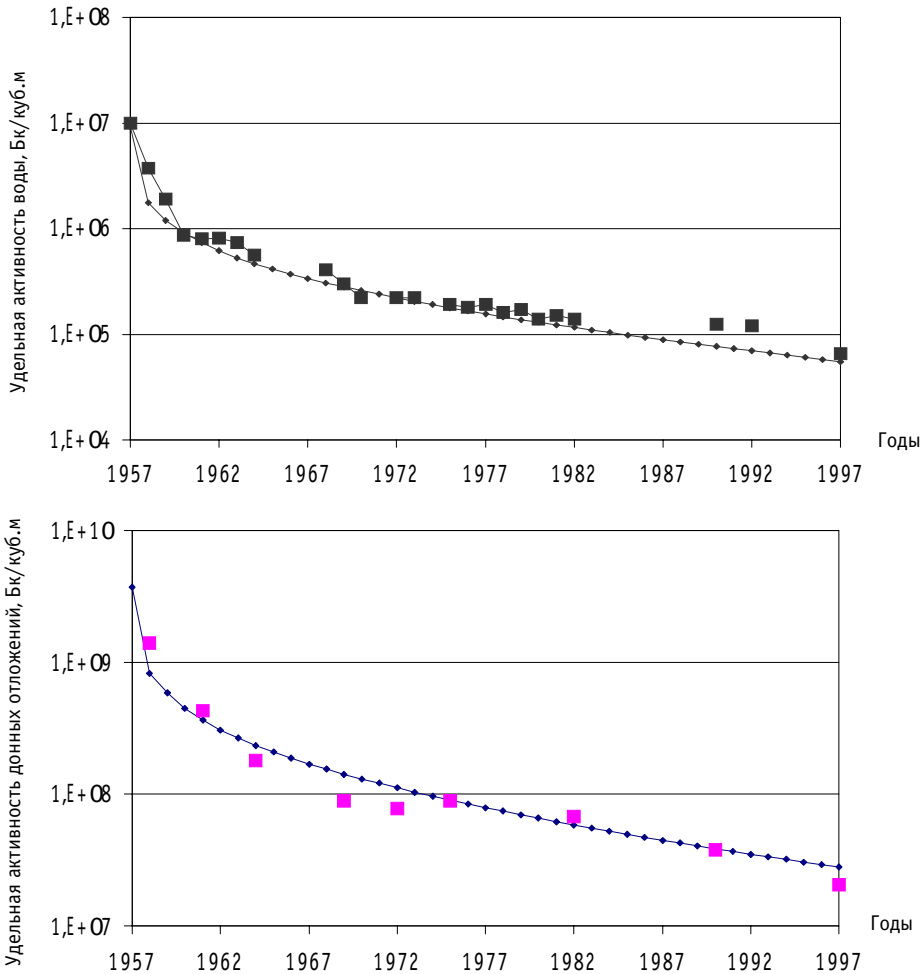


Рис.2. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений удельных активностей воды и донных отложений оз. Урускуль для периода 1957-1997 гг.: ♦ - расчет, ■ - эксперимент

Таблица 4

**Параметры водоемов, использованные при моделировании**

Параметр	оз. Урукуль	оз. Бердениш
Площадь поверхности водоема, км <sup>2</sup>	4.4	12.1
Средняя глубина	2	1.9
Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	10	17
Активность Sr-90, поступившего в водоем с выпадениями, 10 <sup>12</sup> Бк	67	200
Средняя плотность радиоактивного загрязнения местности Sr-90, кБк/м <sup>2</sup>	26000	33000
Среднегодовой коэффициент смыва, 1/год	0.002	0.002
Средняя скорость осадконакопления, м/год	0.0024	0.003
Гидравлическая крупность частиц, м/год	1100	1100
Мутность воды, мг/л	5	5

(экспериментальные зависимости проходят ниже расчетных) связано, по-видимому, с периодически в годы высокой водности проводящейся промывкой этого водоема чистой водой из оз. Иртяш через систему каналов.

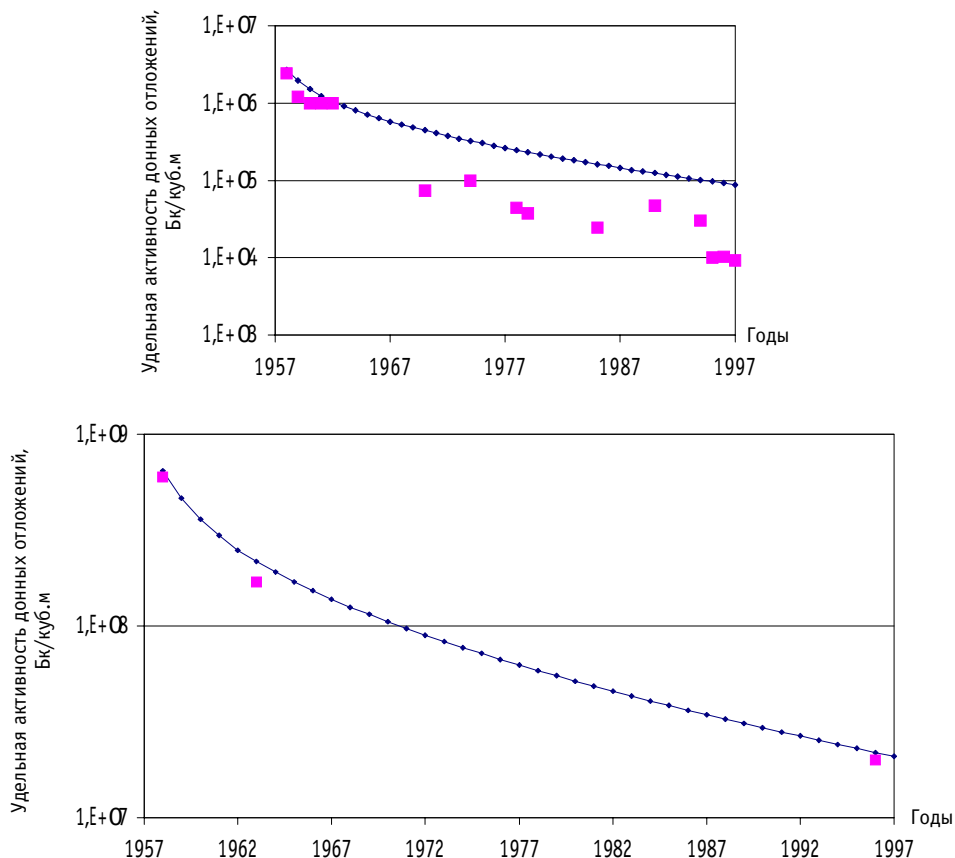


Рис.3. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений удельных активностей воды и донных отложений оз. Бердениш для периода 1957-1997 гг.: ♦ - расчет, ■ - эксперимент

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования показали, что простая двухкамерная модель, изложенная в [4] может быть использована для описания поведения стронция-90 в водоемах, загрязненных в результате производственной деятельности ПО «Маяк», с достаточной для практических целей степенью точности.

## Литература

1. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Математическое моделирование миграции радионуклидов в водных экосистемах - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 152 с.
2. Крышев А.И., Абраменков А.А., Аврамова Д.А. и др. Опыт валидации моделей радиоактивного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  экосистемы чернобыльского водоема-охладителя // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 1996. - №3 - С.16-20.
3. Воробьев В.А., Горбачев А.А., Носов А.В. и др. Компьютерные базовые модели прогнозирования и поведения радионуклидов в водоемах при аварийных и нормативных сбросах с учетом гидрометеорологической обстановки - М.: ИПБРАЭ РАН, 1994. - 43 с.
4. Методика прогнозирования состояния загрязнения водоемов при нарушении нормальной эксплуатации АЭС. РД 52.26 174-88 - М.: Госкомгидромет, 1988. - 48 с.
5. Kryshev I.I., Romanov G.N., Isaeva L.N., Kholina Yu.B. Radioecological State of Lakes in the Southern Ural Impacted by Radioactivity Release of the 1957 Radiation Accident // Journal of Environmental Radioactivity. - 1997. - Vol.34. - №3. - P. 223-235.
6. Ровинский Ф.Я. Распределение стронция-90 и других долгоживущих продуктов деления между компонентами непроточных водоемов // Загрязнение местности долгоживущими радиоактивными изотопами: Сб. тр. института прикладной геофизики ГУГМС. - Вып. 01 - Л.: Гидрометеиздат, 1968. - С.139.
7. Смагин А.И., Стукалов П.М. Радиоактивное загрязнение водоемов, расположенных на территории восточно-уральского государственного заповедника: В сб. «Проблемы отдаленных эколого-генетических последствий радиационных инцидентов» // Материалы межрегиональной научной конференции ИЭРиЖ УрО РАН. - Екатеринбург, 2000. - С.12-24.

Поступила в редакцию 17.04.2001



of fine - film multilayer structures (hundred thousands of layers) which consist of fissile and structural materials. The conversion efficiency is up to 30 %.

In the paper consideration is given to a cell - converter of uranium fission fragments energy into electric energy, based on which the EGE has been designed. Besides, one of the options of «cold» reactor - converter is described as well as some calculational and experimental studies are indicated. They are required for the further development of design and for perfection of methods for calculation of proposed reactor -converter parameters.

#### **УДК 504.064+504.423**

*Procedure of Sensitivity and Uncertainty Estimation for the box Model of Pollution Transport by Sea \ A.N. Ershov, D.A. Kamaev, O.V. Shershakov; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 7 pages, 6 illustrations.- References, 6 titles.*

The present work is devoted to elaboration of the procedure of sensitivity and uncertainty estimation for the box model of pollution transport by sea. For sensitivity estimation of the model relatively to small perturbations of input data and parameters, the transition to conjugated system of equations have been used. The problem of uncertainty estimation of modeling, caused by inexact knowledge of model parameters and input data. This problem removes to laborious problem of global optimization. In respect to the box model such approach is inapplicable, because of large dimension of parameters space. There is shown the procedure of finding conservative estimates of uncertainty in the work, based on interval mathematics. There are demonstrated the results of computations, illustrating the efficiency of suggested procedure of uncertainty estimation.

#### **УДК 504.4:621.039**

*The Modeling of the Radionuclide Transportation in Reservoirs Located in the Head Part of the East Ural Radioactive Trace \ P.M.Stukalov, A.I.Smagin; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 8 pages, 3 illustrations.- References, 7 titles.*

It is presented the results of modeling for the radioactive contamination dynamics of the reservoirs located in the East Ural trace head part. The satisfactory comparison of experimental data and calculated results is shown.

#### **УДК 621.039.73**

*Estimation of the research light water reactor release influence on the population exposure \ M. Moniri, V.E. Cherkashin; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 7 pages, 2 illustrations, 6 tables.- References, 8 titles.*

The preliminary results of the calculation of the population irradiation dose values are presented during the normal operation and the hypothetical design accident of the light water research reactor. The thermal reactor power was adopted equal to 10 MW. The stack height is equal to 100 m. The supposed reactor site is located near Isfahan city (Iran). The radionuclide composition of the reactor for the different situations are estimated. The collective dose values for the largest cities located near this reactor are in the range from  $2.17 \cdot 10^{-6}$  man\*Sv/yr (Falavarjan city) to  $1.45 \cdot 10^{-4}$  man\*Sv/yr (Isfahan city). The average annual individual dose value for this region is equal to  $1.0 \cdot 10^{-11}$  Sv/yr approximately and it is not higher than 0.0005% of the external irradiation dose connected with the natural radionuclides and with the "global" radioactive environment contamination. Annual  $^{137}\text{Cs}$  fallout is in the range of 0.02-0.2 mBq/m<sup>2</sup>, which is equal to  $10^{-7}$ -th fraction of the accumulated soil activity after the atmospheric nuclear tests.

#### **УДК 621.039.51**

*On Some Modifications of the Point Reactor Kinetics Equations \ B.D.Abramov; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher*