

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ РАДИОНУКЛИДАМИ ^{90}Sr С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Р.А. Паркин*, М.Ф. Каневский*, Е.А. Савельева*, И.А.Пичугина,
Б.И. Яцало****

**Институт проблем безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ) РАН*

***Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск*



Работа посвящена *совместному пространственному анализу* плотности поверхностного загрязнения территории Брянской области радионуклидами ^{90}Sr и ^{137}Cs . Выпадения данных радионуклидов после Чернобыльской аварии сильно коррелированы между собой, что дает возможность исследовать их совместную пространственную структуру и за счет этого улучшить качество пространственной интерполяции. В работе описано применение искусственной нейронной сети – многослойного персептрона – для оценки плотности поверхностного загрязнения территории радионуклидами ^{90}Sr . В результате использования данного подхода созданы детализированные карты загрязнения Брянской области радионуклидами ^{90}Sr и ^{137}Cs , что дает возможность тщательного анализа широкого круга сценариев оценки последствий загрязнения и анализа мер реабилитации на основе применения геоинформационных систем поддержки принятия решений.

ВВЕДЕНИЕ

При анализе и картировании загрязнения территорий качество модельных оценок может быть улучшено за счет использования дополнительной информации, заключенной в коррелированных переменных. Примером решения актуальной задачи такого плана является оценка плотности загрязнения территории радионуклидами ^{90}Sr и ^{137}Cs после Чернобыльской аварии.

Основными отличительными чертами Чернобыльских выпадений являются пятнистость, высокая пространственная вариабельность, анизотропность и нестационарность, что затрудняет применение простых методов интерполяции для получения значений загрязнения в 'недостающих точках'. Для западных областей России, в т.ч. и для Брянской области как наиболее загрязненной после Чернобыльской аварии, количество данных мониторинга по ^{137}Cs существенно (на порядки) превосходит соответствующие данные по ^{90}Sr . Это вызвано, прежде всего, более высоким относительным уровнем загрязнения территорий радионуклидами ^{137}Cs и соответственно значительно большей его радиологической значимостью.

В статье проводится анализ совместного распределения данных мониторинга по плотности поверхностного загрязнения территории Брянской области радионуклидами ^{137}Cs и ^{90}Sr с целью получения модельных оценок загрязнения ^{90}Sr во всех интересующих нас точках с использованием при этом соответствующих значений загрязнения по ^{137}Cs . Данная работа является продолжением серии исследований по применению геостатистических подходов к чернобыльским выпадениям [1-5,8].

Классическим подходом к анализу нескольких переменных является геостатистика и модели ко-кригинга - совместное оценивание нескольких переменных. Однако в этом случае только линейные корреляции между переменными могут быть корректно учтены.

В настоящей работе для пространственного анализа загрязнения территории радионуклидами ^{137}Cs и ^{90}Sr использовалась искусственная нейронная сеть (ИНС) – многослойный персептрон (МСП). ИНС представляют собой адаптивные математические модели, способные анализировать и обобщать информацию. Для многих классов задач модели, построенные на основе ИНС, обладают рядом преимуществ перед детерминистическими моделями, т.к. такие модели строятся с учетом всех данных набора, и они менее чувствительны к выбросам, чем детерминистические. ИНС проявляют себя как достаточно мощный инструмент анализа экспериментально полученной информации [6, 7].

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ МНОГОСЛОЙНОГО ПЕРСЕПТРОНА

МСП является одним из типов искусственной нейронной сети со специфической структурой и процедурой тренировки сети, которые кратко описаны ниже [6,7].

Основной компонентой МСП является *формальный нейрон* (рис. 1а), который суммирует входы и выполняет преобразование с помощью *функции активации*. В качестве функции активации обычно используется экспоненциальный сигмоид или гиперболический тангенс. МСП можно представить как нелинейный преобразователь из пространства весов МСП (вектор такого пространства имеет координаты, численно равные подстраиваемым весам) в пространство значений целевой функции. В качестве целевой функции наиболее часто используется среднеквадратичное отклонение

желаемого значения от выдаваемого МСП: $E = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (t_n - o_n)^2$, где E – среднеквадратичное отклонение, N – число обучающих примеров, o – желаемое значение и t – выход сети.

В стандартном многослойном персептроне нейроны расположены во входном, скрытом и выходном слоях (рис. 1б).

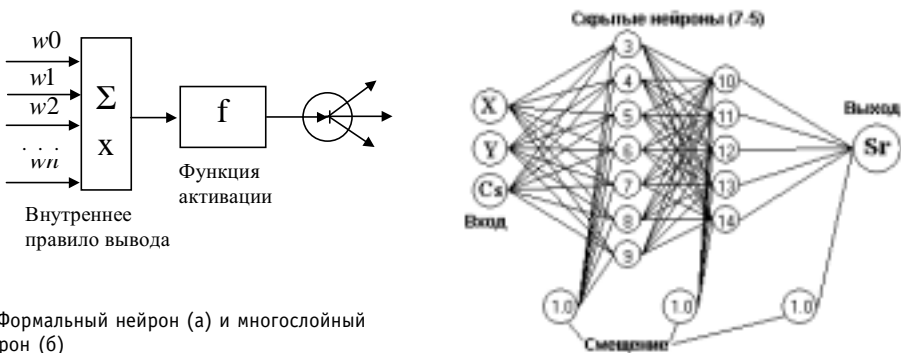


Рис. 1. Формальный нейрон (а) и многослойный персептрон (б)

Число нейронов в скрытых слоях можно варьировать, и задача пользователя заключается в том, чтобы выбрать оптимальную конфигурацию. Выбор слишком большого числа скрытых нейронов может привести к овер-фитингу (или переобучению), когда МСП утрачивает свою способность к обобщению информации из проб. С другой стороны, использование слишком малого числа скрытых нейронов не обеспечивает достоверного охвата закономерностей. Также сложность МСП должна быть согласована с количеством информации для тренировки – должно быть достаточно данных, чтобы подобрать каждую связь. Вывод о том, сколько выбрать скрытых нейронов, был сделан на основании вариограммного анализа оценок МСП и остаточных невязок в используемых для обучения точках.

СОВМЕСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ^{90}Sr И ^{137}Cs ЧЕРНОБЫЛЬСКИХ ВЫПАДЕНИЙ

В исследовании были использованы данные мониторинга по загрязнению ^{90}Sr и ^{137}Cs пяти районов западной части Брянской области – наиболее загрязненной части России. Анализируемые данные состоят из 373 точек измерений ^{90}Sr (как правило, в населенных пунктах) и 4995 точек измерений ^{137}Cs (в тех же населенных пунктах и по сельхозугодьям) [10]. Значения ^{90}Sr и ^{137}Cs связаны между собой, и коэффициент корреляции между ними более 70%. Для моделирования данных с помощью искусственных нейронных сетей исходный набор данных разбит на тестовый и обучающий/тренировочный наборы. Обучающий набор используется для настройки (обучения) нейронной сети, поэтому он обычно содержит большую часть данных (в нашем случае около 70%), в то время как применение тестового набора позволяет оценить способность нейронной сети к обобщению.

Для получения тестового набора использовалась *декластеризация* выборочного типа для данных по ^{90}Sr . В результате были получены обучающий (257 точек) и тестовый (116 точек) наборы. Суммарная статистика (см. табл.1) показывает достаточную похожесть статистических моментов разбиения с исходным набором данных. Даже для тестового набора данных отклонение статистики от статистики всего набора данных не превышает 10%.

Однако схожесть пространственных структур для полученных наборов с исходными данными даже более важна, чем статистические факторы. Было проведено сравне-

Таблица 1

Статистика для измерений ^{137}Cs и ^{90}Sr

	Все данные		Тестовый набор		Обучающий набор	
	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr
Минимум	0.27	0.005	0.27	0.005	2.67	0.035
Нижняя квартиль (25%)	7.13	0.148	6.27	0.134	7.27	0.149
Медиана	10.81	0.219	10.37	0.226	11.05	0.216
Верхняя квартиль (75%)	16.98	0.366	15.59	0.385	18.47	0.362
Максимум	94.27	1.381	60.55	1.204	94.27	1.381
Среднее	14.06	0.29	12.92	0.284	14.58	0.292
Вариация	127.5	0.049	100.1	0.049	139.5	0.050
Стандартное отклонение	11.29	0.222	10.0	0.221	11.81	0.223
Коэффициент симметрии	2.97	1.94	2.27	1.74	3.13	2.03
Эксцесс	12.89	4.69	7.3	3.78	13.8	5.18

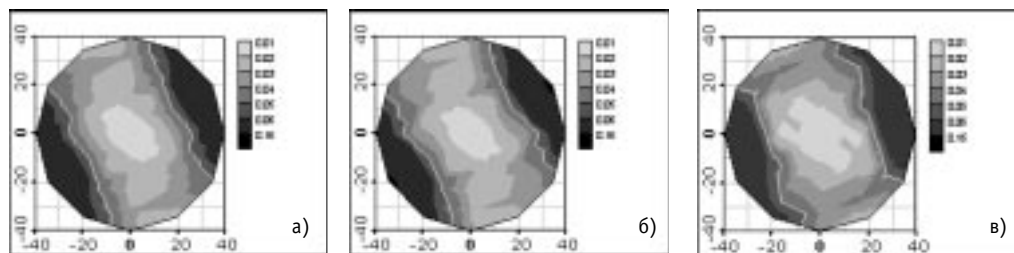


Рис. 2. Экспериментальные изолинии значений вариограмм для данных по ^{90}Sr : а) - исходный набор, б) - обучающий набор и в) - тестовый набор

ние пространственных структур с помощью вариограммных роз. Роза имеет вид лепестков, представляющих собой вариограммы (мера пространственной структуры данных, характеризующая степень различия данных в зависимости от расстояния между ними) по направлениям. Изолинии вариограмм хорошо визуализируют анизотропную корреляционную структуру. На рис.2 представлены изолинии значений вариограмм для исходного, тестового и тренировочного наборов данных по ^{90}Sr .

Многослойный перцептрон используется для оценки загрязнения ^{90}Sr территории Брянской области. Был проведен анализ МСП с различной архитектурой сети. Разница заключалась в числе скрытых слоев и нейронов в них, в числе входных нейронов. Выходной нейрон имеет значение величины загрязнения ^{90}Sr в данной точке. В анализе использовались МСП со следующей архитектурой скрытых слоев: один слой с 2 скрытыми нейронами и более (до 10 скрытых нейронов); два скрытых слоя с 5 и 3 нейронами, 7 и 5 нейронами, 10 и 10 нейронами. Подобные структуры были использованы как с двумя (X и Y – пространственные координаты), так и с тремя (X, Y и ^{137}Cs) входными нейронами.

Для обучения/тренировки МСП использовались различные методы: Левенберга-Маркара второго порядка, сопряженных градиентов, наискорейшего спуска, “упругого распространения” и обратного распространения ошибки. Сравнительный анализ результатов, полученных после использования всех методов тренировки, проводился на основании тренировочных и тестовых ошибок. Многослойный перцептрон, который обеспечивал минимальные ошибки, считался самым наилучшим для соответствующей архитектуры сети. Также были получены “переобученные” сети – малая ‘тренировочная’ ошибка и довольно большая ‘тестовая’ ошибка. Было также замечено, что метод Левенберга-Маркара второго порядка обеспечивает самую лучшую тренировку для искусственной нейронной сети с более сложной архитектурой. Но не во всех случаях этот метод мог работать, т.к. тогда использовались градиентные методы.

На рис.3 представлены зависимости оценок МСП от истинных значений измерений как для тренировочного, так и для тестового наборов, т.е. по оси X откладываются истинные значения измерений ^{90}Sr , а по оси Y – оценки ^{90}Sr , полученные с помощью моделей МСП. Видно, что МСП занижает значения в максимумах и завышает значения в минимумах. Особенно хорошо это видно на тестовых данных.

Из полученных результатов (см. табл.2) видно, что ‘оптимально-сложные’ МСП обеспечивают лучшие результаты для всех типов моделей (с двумя и тремя входами), и такие МСП могут быть использованы для непосредственной оценки ^{90}Sr .

Для сравнения полученных результатов рассматривались вариограммы по всем направлениям для различных моделей МСП. На основании оценок МСП для точек из тестового набора были построены вариограммы. Они представлены на рис.4а вместе с вариограммой, вычисленной для исходных данных тестового набора.

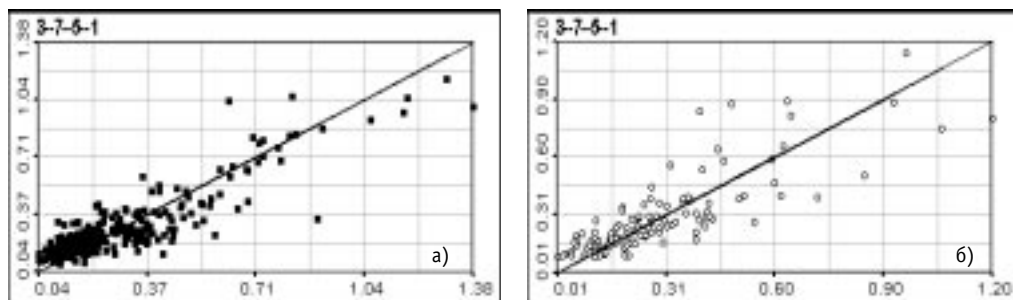


Рис. 3. Зависимость оценок ^{90}Sr (тренировочного (а) и тестового (б) наборов) от истинных значений для нейронной сети с конфигурацией 3-7-5-1

На рис. 4б можно увидеть, что невязки почти для всех нейронных сетей МСП (кроме сети с архитектурой 3-7-5-1) имеют корреляционную структуру. Эта структура имеет меньшие значения плато и радиуса корреляции по сравнению с основной структурой для тестового набора, поэтому можно сказать, что МСП выделил крупномасштабный тренд (60 км), оставив только мелкомасштабную структуру (25 км). В связи с этим в дальнейшем невязки можно проанализировать с помощью методов геостатистики.

На рис.5 представлена карта плотности поверхностного загрязнения пяти районов Брянской области радионуклидами ^{90}Sr , включающая в себя как данные мониторинга, так и полученные модельные оценки. Данная карта построена на базе векторной карты землепользования [9, 10] (т.е. загрязнение ^{90}Sr указано для всех основных полигонов карты землепользования: населенных пунктов, пахотных и естественных угодий, лесных массивов, а также ряда других элементов землепользования).

Таблица 2

Сравнение статистических параметров, среднеквадратичная ошибка и коэффициент корреляции прогнозируемых тренировочных и тестовых наборов данных для различных моделей

Конфигурация сети	Среднее	Стандартное отклонение	Вариация	Среднеквадратичная ошибка		Коэффициент корреляции	
				Тест.	Тренир.	Тест.	Тренир.
2-2-1	0.300	0.168	0.028	0.02233	0.02703	0.739	0.675
2-5-1	0.308	0.171	0.029	0.02153	0.02480	0.754	0.707
2-10-1	0.289	0.198	0.039	0.01716	0.01955	0.809	0.785
2-5-3-1	0.278	0.175	0.031	0.01760	0.02351	0.799	0.756
2-7-5-1	0.284	0.211	0.045	0.01771	0.01916	0.810	0.785
2-10-10-1	0.293	0.201	0.040	0.02021	0.01591	0.776	0.824
3-2-1	0.288	0.182	0.033	0.01905	0.01873	0.781	0.790
3-5-1	0.285	0.181	0.033	0.01723	0.01635	0.803	0.821
3-10-1	0.290	0.172	0.030	0.01789	0.01959	0.795	0.780
3-5-3-1	0.288	0.201	0.040	0.01744	0.01432	0.807	0.843
3-7-5-1	0.289	0.208	0.043	0.01620	0.01105	0.824	0.882
3-10-10-1	0.295	0.191	0.036	0.01703	0.01685	0.808	0.813
Исходный тестовый набор данных	0.284	0.221	0.049				
Все исходные данные	0.29	0.222	0.049				

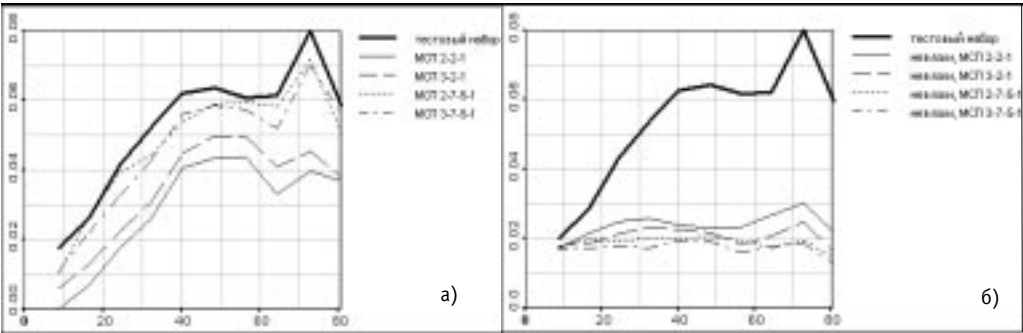


Рис. 4. Вариограммы по всем направлениям для оценок (а) и невязок (б) МСП различной конфигурации в тестовых точках

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что при недостаточном количестве данных мониторинга по ^{90}Sr структура его пространственного распределения может быть оценена с помощью имеющихся данных по ^{137}Cs . При этом показано, что ИНС и МСП в частности являются эффективным инструментом для решения задач такого класса.

Архитектура МСП (число скрытых слоев и нейронов в них) должна быть выбрана в соответствии с числом и структурой данных, чтобы получить оптимальные результаты. Использование информации по ^{137}Cs в качестве третьего дополнительного входа вносит существенный положительный эффект. Эти данные позволяют лучше обучить МСП (на значения ^{90}Sr) и обеспечивают хорошие результаты для всех уровней сложности нейронных сетей. Для рассматриваемых данных лучшим оказался МСП с 7-5 архитектурой.

С использованием данных мониторинга и модельных оценок построены *полные полигональные карты* загрязнения территории Брянской области радионуклидами ^{90}Sr

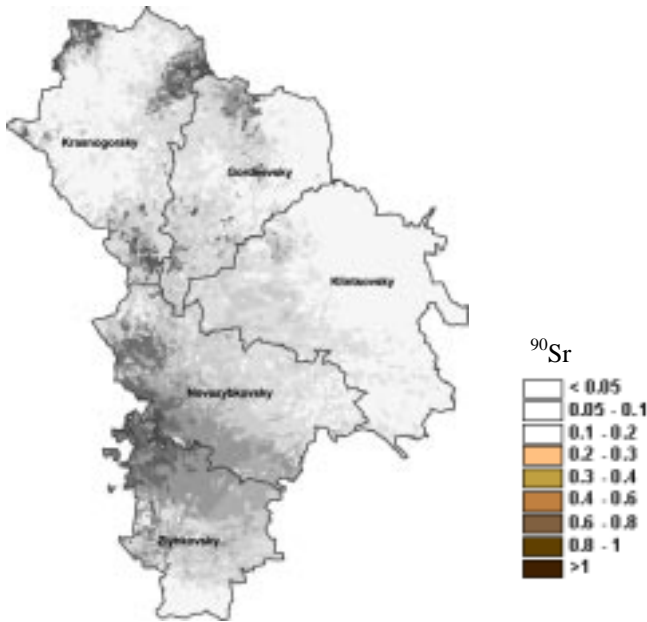


Рис.5. Карта плотности загрязнения ^{90}Sr (1999 г.) для пяти юго-западных районов Брянской области (по полигонам векторной электронной карты землепользования)

(а также ^{137}Cs с применением методов кригинга для оценки значений в точках, в которых данные мониторинга отсутствуют). Соответствующие БД и векторные электронные карты применяются для исследования последствий радиоактивного загрязнения и анализа мер реабилитации в разрабатываемой прикладной геоинформационной системе поддержки принятия решений PRANA [9, 10].

Литература

1. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Демьянов В.В., Каневская Е.В., Каневский М.Ф., Киселев В.П., Линге И.И., Шершаков В.М. Методика Гео-EAS анализа пространственно распределенных данных. Пример исследования: Чернобыльские выпадения: Препринт NSI-24-94. – М., 1994.
2. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Демьянов В.В., Каневский М.Ф., Киселев В.П., Линге И.И. Пример геостатистического анализа чернобыльских выпадений: Препринт NSI-25-94. – М., 1994.
3. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Васильев С.К., Гедеонов А.Д., Евдокимов И.В., Петров Б.Ф., Плескачевский Л.А. Пространственные закономерности распределения радиоактивного загрязнения, обусловленного аварией на Чернобыльской АЭС//Атомная энергия. – 1993. - Т. 75. - Вып. 6. - С. 453-457.
4. Каневский М.Ф., Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Демьянов В.В., Савельева Е.А., Хаас Т. Геостатистический подход к анализу чернобыльских выпадений//Известия Академии наук. Энергетика. – 1995. - № 3. - С. 34-46, 1995.
5. Каневский М.Ф., Демьянов В.В., Чернов С.Ю. Совместный пространственный анализ ^{137}Cs и ^{90}Sr чернобыльских выпадений: Препринт ИБРАЭ, IBRAE-96-04. – М., 1996.
6. Bishop C.M. 1995. Neural Networks for Pattern Recognition. Oxford: Clarendon Press.
7. Haykin S. 1999. Neural Networks. A Comprehensive Foundation. Second Edition. Prentice Hall Inc., New Jersey, NJ.
8. Kanevsky M., Arutyunyan R., Bolshov L., Demyanov V., Savel'eva E., Haas T. C. Environmental Spatial Data Analysis. Case Study: Chernobyl Fallout: 10th Intern. Conf. on Mathematical and Computer Modelling and Scientific Computing (July, 1995, Boston, USA). Books of Abstracts. - P. 179.
9. Yatsalo B., Mirzeabassov O., Okhrimenko I., Pichugina I., Kulagin B. PRANA - Decision Support System for Assessment of Countermeasure Strategy in the Long-term Period of Liquidation of the Consequences of a Nuclear Accident (Agrosphere)//Radiat. Prot. Dosim. – 1997. - V.73. - Nos 1-4. - P. 291-294.
10. Яцало Б.И., Пичугина И.А., Козьмин Г.В., Мирзеабасов О.А., Охрименко И.В., Каневский М.Ф., Савельева Е.А. Геоинформационная система радиоактивно загрязненных территорий//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2001. - № 3. - С. 57-61.

Поступила в редакцию 22.04.2002

reactor core. Background for developing a correspondent methodology related with occurred bowing and deformation of fuel assemblies (FA) under operation, jamming of the rod cluster control assemblies (RCCA), and generation of enhanced inter-FA gaps impacting on local energy release in fuel, is under consideration. Schematization of WWER-1000 FA and reactor core design is outlined and implemented for developing the procedure for calculation of thermomechanical behaviour of the FA integrated into WWER-1000 reactor core. The description presents computational models, which are implemented for validation of thermomechanical behaviour of the WWER-1000 reactor cores and development of recommendations for the design improvement.

УДК 621.039.54

Calculation Method on the Longitudinal and Transversal Bowing of WWER-1000 Core Subassemblies under Operation \V.M. Troyanov, Y.U. Likhachev, V.I. Folomeev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 10 pages, 4 illustrations. - References, 2 titles.

The paper reviews calculation method on the longitudinal and transversal bowing of WWER-1000 core subassemblies under operation. The method is based on the beam-pivot modelling of the sub-assembly (FA) bowing. FA is simulated by the multi-tied pivot system. Calculation method of non-linear FA bowing takes into account irradiation effects for structure materials, friction and slipping of fuel rods within spacer grids, external forces, weight acting, hydraulic forces etc. The solution of non-linear equation system is realized by the computer code "TEREMOK".

УДК 629.76:629.78

Application of Nuclear Photon Engines for Deep-space Exploration \A.V. Gulevich, A.V. Zrodnikov, Eu.A. Ivanov, O.F. Kukharchuk, D.V. Evtodiev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 9 pages, 1 table, 3 illustrations. - References, 11 titles.

Conception of using the nuclear photon rocket engines for deep space exploration is proposed. Some analytical estimations have been made to illustrate the possibility to travel to 100 – 10000 AU using a small thrust photon engine. Concepts of high temperature nuclear reactors for the nuclear photon engines are also discussed.

УДК 502.3 (470.333)

Implementation of Neural Networks for Assessment of Surface Density Contamination with ^{90}Sr (For Territory of Bryansk Region as an Example) \R. Parkin, M. Kanevsky, E. Saveleva, I. Pichugina, B. Yatsalo; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 7 pages, 2 tables, 5 illustrations. - References, 10 titles.

The joint spatial analysis of surface density contamination of Bryansk region with radionuclides ^{90}Sr and ^{137}Cs is considered. Fallouts of these radionuclides as a result of the Chernobyl accident are correlated, that allows investigating their joint spatial structure and improving quality of spatial interpolation. The application of artificial neural network (Multilayer Perceptron) for an estimation of surface density contamination with ^{90}Sr is described. As a result of implementation of this approach the detailed maps of contamination with ^{90}Sr and ^{137}Cs for Bryansk region were created that is used in geoinformation decision support system for rehabilitation of radioactive contaminated territories.

УДК 574.4:502.3

Ecological Risk. 1. The Origin of Risk in Agrosphere and Natural Ecosystems under Pollution of the Environment \E.S. Fesenko, B.I. Synzynys; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 11 pages. - References, 21 titles.

The most fundamental problems for contaminated land risk assessment relate to bioavailability of contaminants relative to the study of bioavailability and toxicity criteria. Approach to risk assessment normally consist of three general components. Monitoring of biomarkers, bioconcentration, indicator species, changes in community structure. These indicators are seldom used in current risk