

## ДИНАМИКА ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ПО ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДАМ АНАЛИЗА НА ПУЧКАХ ИОНОВ

*В.В. Левенец, А.Г. Шепелев, Т.А. Пономаренко, О.В. Немашкало, А.А. Щур*

*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",  
г. Харьков, Украина*

Изучена динамика информационных потоков по ядерно-физическим методам анализа материалов на пучках ионов. Проанализированы распространенность этих методов по странам мира, а также распределение публикаций по различным методам (PIXE, RBS, NRA (PIGE)) во времени и областям применений. Рассмотрены наиболее перспективные направления развития методов в контексте динамики публикаций.

В настоящее время в мире эксплуатируется 15000 ускорителей, и этот парк увеличивается на 700 штук ежегодно [1]. С помощью ускорителей производятся физические эксперименты и реализуются различные современные технологии, в том числе и исследования вещества. Более двух сотен ускорителей используются сейчас для проведения радиоаналитической характеристики материалов; некоторые малые ускорительные системы создаются для обнаружения взрывчатых веществ и наркотиков. Интенсивный рост количества ускорителей создает новые области их применения. Это создание новых материалов, обнаружение и изучение источников загрязнения окружающей среды, биомедицинские исследования, изучение предметов археологии и искусства. Ускорительная масс-спектрометрия является одной из самых чувствительных технологий анализа и может быть применена в океанографии, палеоклиматологических исследованиях, геогеологии и т.д.

Широко используется в аналитических исследованиях метод элементного анализа, основанный на регистрации характеристического рентгеновского излучения, возбуждаемого пучком заряженных частиц – PIXE (Particle Induced X-ray Emission). К сожалению, в русскоязычной научной литературе нет общепринятого термина для этой технологии. Наиболее часто используется вариант – метод ХРИ (характеристическое рентгеновское излучение, возбуждаемое частицами). Первая работа по методу PIXE была выполнена в Швеции группой ученых Johansson T.B., Akselsson G., Johansson S.A.E в 1970 г. [2], в бывшем СССР первая работа опубликована сотрудниками ННЦ ХФТИ в 1974 г. [3]. В последующие годы метод PIXE интенсивно развивался. Непосредственно по PIXE проводятся регулярные международные конференции начиная с 1976 г. (и далее через каждые три года); в 2004 г. в Любляне (Словения) происходила юбилейная 10 конференция. Кроме этого, проводятся конференции, посвященные применению PIXE в некоторых областях, например, биологии (BioPIXE). Секции с подобной тематикой включаются во все конференции по анализу на пучках ионов, использованию ускорителей, синхротронного излучения и т.д. И, если на первых конференциях доминировали вопро-

сы, посвященные техническим аспектам – экспериментальное и аппаратное обеспечение, программы обработки спектрометрической информации, вопросы пробоподготовки, выяснялись возможности метода, то уже большинство материалов последующих конференций было посвящено вопросам конкретного применения метода, обсуждению полученных аналитических результатов.

Не достигая рекордных пределов обнаружения, метод PIXE тем не менее обладает параметрами (П.О.  $\sim 10^{-4} \dots 10^{-5} \%$ ), достаточными для решения большинства аналитических задач в различных областях биологии, медицины, сельского хозяйства, геологии, экологии, производстве материалов и т.д. Он в отличие от других ядерно-физических методов (НАА или МИЯР (мгновенного излучения из ядерных реакций)) обладает практически одинаковой чувствительностью для большого диапазона анализируемых элементов. При многоэлементности метода это позволяет проводить анализ с хорошими пределами обнаружения для 15...20 элементов одновременно.

Метод PIXE характеризуется достаточно высокой экспрессностью. В зависимости от объекта анализа время одного измерения может составлять от десятков секунд до десятков минут. Необходимый для любого аналитического исследования процесс пробоподготовки во многих случаях можно либо сильно упростить, либо не проводить совсем. Тем более, что для проведения анализа требуется проба весом всего 100 мкг. Процесс проведения анализа носит неструктурный характер.

Достаточно развитое теоретическое описание процесса взаимодействия ионов с энергией несколько мегаэлектронвольт с веществом позволяет выполнять абсолютный анализ, а наличие соответствующего экспериментального оборудования и программного обеспечения дает возможность автоматизировать проведение анализа и в перспективе позволяет оперативное управление технологическими процессами.

Органическим дополнением метода PIXE являются методы NRA (PIGE) (мгновенного излучения из ядерных реакций) и RBS (обратного резерфордского рассеяния), что при комплексном их использовании позволяет проводить элементный

анализ практически на все элементы и изучать распределение элементов по поверхности и в глубь образца.

PIXE продолжает развиваться. Появились и совершенствуются несколько его модификаций, среди которых можно отметить анализ на выведенном в атмосферу пучке и на вторичном рентгеновском излучении, микропучок и сканирование поверхности, проведение 3D-анализа (пространственное распределение), использование широкополосного рентгеновского фильтра и некоторые другие.

## 1. ОБЩИЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ

Было проведено исследование динамики публикаций в области анализа материалов ядерно-физическими методами на пучках ионов PIXE, NRA (PIGE), RBS – общее название – IBA (Ion Beam Analysis) по двум Базам Данных (БД): «International Nuclear Information System» (INIS) в период 1970 – 2004 гг. и «Materials Science Citation Index» (MSCI) в период 1991-2004 гг. Такие БД выбраны потому, что отражают применение аналитических технологий на пучках ионов в наиболее значимых областях использования этих технологий анализа. При этом необходимо отметить, что в БД INIS содержатся рефераты отчетов, публикаций, трудов конференций и других информационных документов, введенные 103 государствами-членами МАГАТЭ и 19 международными организациями, а в БД MSCI содержатся только рефераты статей, книг и трудов конференций. Временной интервал охватывает период от 1970 г., т.е. времени выхода в печать первой работы по применению метода PIXE, до настоящего времени.

В первые несколько лет после опубликования работы [2] количество публикаций по PIXE удваивалось каждые полтора года, в настоящее время суще-

ствует тенденция к замедлению роста. Это обстоятельство указывает на то, что метод PIXE прошел начальную стадию развития, является сложившимся аналитическим методом. И сейчас в конкуренции с другими современными аналитическими технологиями определены области, где его применение наиболее оптимально.

На рис. 1,а показан кумулятивный рост количества публикаций по годам для всех трех методов по данным БД INIS, на рис. 1,б то же для БД MSCI.

В первой БД преобладают работы, посвященные PIXE, во второй – RBS, что выглядит естественным. Несколько меньшее количество работ по технологии, связанной с ядерными реакциями, вызвано, вероятно, неоднозначностью в названии метода и связанной с этим трудностью в автоматизированном поиске в БД таких работ.

По данным обеих БД наблюдается постоянный рост количества работ, но он довольно неравномерен по годам и определенно коррелирует с трехгодичным циклом проведения конференций по PIXE – International Conference on Particle-induced X-ray Emission and its Analytical Applications (в 2004 г. была проведена 10-я конференция). Более того, возрастает различие в количестве публикаций в годы между конференциями и в годы конференций. Например, в 1981, 1993, 1999 гг. оно было почти в два раза больше, чем в предыдущий и последующий годы. Необходимо также отметить роль первой конференции в 1976 г., способствовавшей значительному повышению интереса к методу PIXE. Конференции 1981 и 1993 гг. представляются наиболее значимыми для развития метода. В 1999 г. всплеск публикаций связан, вероятно, с завершением века и проведением конференции в Швеции – стране первой работы по PIXE. Публикации 100-150 работ в год представляются довольно характерными для метода PIXE.

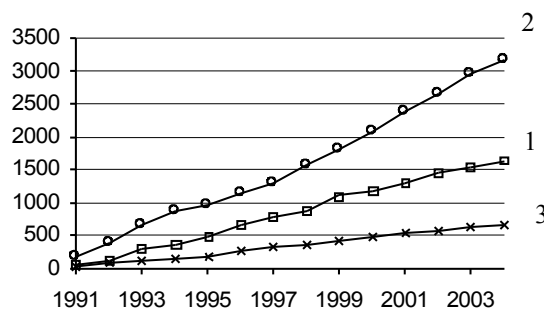
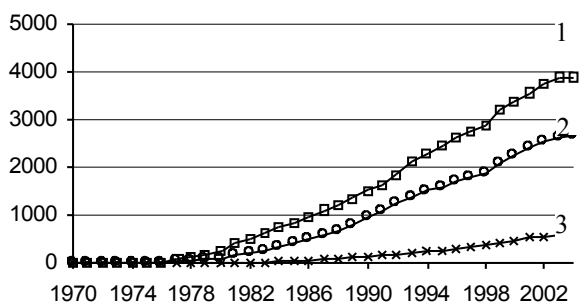


Рис. 1. Кумулятивный рост количества публикаций по IBA по годам: а - БД INIS, б - БД MSCI; 1 - метод PIXE; 2 - метод RBS; 3 - метод NRA (PIGE)

## 2. РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ МЕТОДОВ

Ядерно-физические методы анализа на пучках ионов относятся к технически сложным методикам разработки, поскольку для их осуществления требуется ускоритель ионов с энергией в несколько мегаэлектронвольт. Однако они обладают высоким ана-

литическим потенциалом и универсальностью. Поэтому многие страны при создании и развитии своей аналитической базы обращают внимание именно на эти технологии. Этому способствовало и то, что непосредственно под них были разработаны малогабаритные ускорительные системы [4,5], экс-

периментальное оборудование [5,6,7] и программные продукты [8]. Ниже приведены технические характеристики типичного аналитического комплекса, созданного в ННЦ ХФТИ.

**Технические характеристики АЯФК «Сокол»[4]**

Диапазон энергий ускоренных ионов, МэВ .....	0,2...2,0
Плавность регулировки энергии, кэВ .....	0,1
Максимальный ионный ток на прямом выходе магнитного анализатора, мкА .....	30
Ток пучка в эксперим. камере, мкА .....	0,001...10
Наибольший диаметр пучка ионов на мишени, мм .....	5
Наименьший диаметр пучка ионов на мишени, мкм .....	3
Моноэнергетичность и стабильность энергии, % .....	0,1
Регистрируемые излучения .....	$\gamma$ , $x$ , зар. част.
Используемые методы анализа .....	PIXE, RBS, NRA и др.
Диапазон анализируемых элементов .....	H-U
Одновременно анализируется элементов .....	$\geq 30$
Диапазон концентраций, % .....	$10^{-5} \dots 100$
Погрешность анализа, % .....	1... 20
Агрегатное состояние объектов .....	тв., жидк., газообр.
Разрешение при локальном анализе, мкм .....	$\geq 3$
Диапазон анализируемых толщин, мкм .....	$\leq 30$
Разрешение по толщине (зависит от используемого метода), Å .....	5... 500

Такой аналитический комплекс позволяет решать уникальные аналитические задачи, а при использовании в рутинном инструментальном анализе по стоимостным характеристикам не уступает ведущим аналитическим методам. Поиск по указанным БД показал, что PIXE, RBS, NRA (PIGE) использу-

ются примерно в 60 странах. По данным БД MSCI в публикациях по PIXE количество стран меньше на 10 по сравнению с БД INIS. Это, возможно, указывает на то, что в INIS шире представлено применение этого метода для решения экологических, медико-биологических и др. подобных задач, характерных для менее развитых стран. На рис. 2 и 3 приведены диаграммы относительного распределения количества публикаций стран. Видно, что для RBS и NRA (PIGE) характерно высокое концентрирование в высокоразвитых странах. Так, около 50 % всех опубликованных работ по RBS (MSCI, INIS) выполнено в 6-7 странах: Германия, США, Япония, Франция, Англия, Италия, Австралия. В работах по NRA (PIGE) участвует и Канада. По данным обеих БД примерно половина работ по PIXE опубликована специалистами Германии, США, Японии, Франции, Англии, Австралии, Швеции, Канады.

Материалы по ядерно-физическим методам анализа вещества печатаются в различных физических и химико-аналитических журналах (например, Nuclear Inst. Methods, X-ray spectrometry, Anal. Chem.) или тематических – экология, материалы, медико-биологического направления. В Японии издается международный журнал непосредственно по PIXE – International Journal of PIXE [9], и на диаграммах из рис.2 видно, что, вероятно, вследствие этого Япония опережает остальные страны по количеству публикаций именно по этому методу.

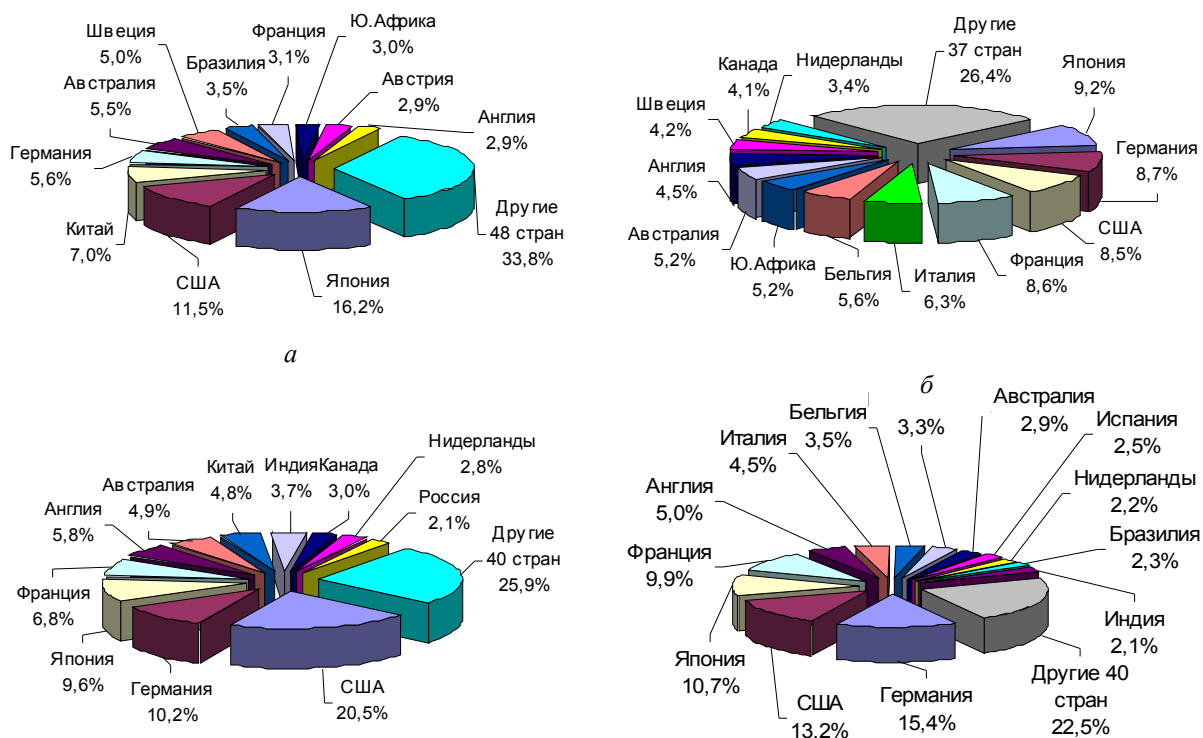


Рис. 2. Относительное распределение публикаций по странам в зависимости от метода и БД: а – INIS, б – MSCI. Сверху вниз – PIXE, RBS

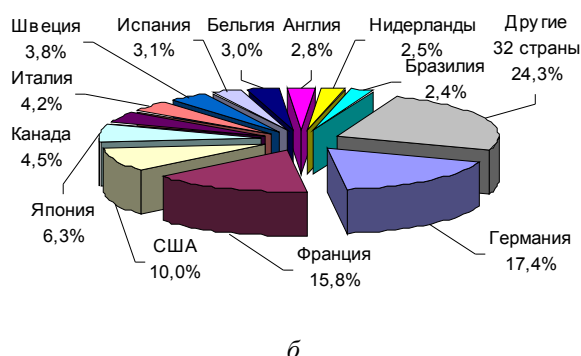


Рис. 3. Относительное распределение публикаций по странам в зависимости от метода и БД: а – INIS, б – MSCI - NRA(PIGE)

В табл.1, 2, 3 приведено количество публикаций по PIXE ведущих организаций США, Германии и Японии соответственно по обоим БД за весь период. Заметим, что по 1–2 работам опубликовано: 69 организациями США; 40 организациями Германии; 49 организациями Японии.

Таблица 1

**Количество работ, опубликованных в США по методу PIXE (по данным БД INIS и MSCI)**

Институт	INIS	MSCI
Univ. of California	60	17
Florida State Univ.	44	-
Univ. of Florida	41	2
Sandia National Labs.	18	19
Lawrence Livermore Natl. Lab.	16	20
State Univ. of New York	12	9
Univ. of Kentucky	12	4
Brigham Young Univ	10	6
Brookhaven National Lab.	9	2
CTR Accelerator Mass Spectrom.	-	6
City Univ. of New York	7	-
Univ. Louisiana	-	7
Univ. of Chicago	5	-
Brooklyn Coll.	5	-
Delaware Univ.	5	22
Oak Ridge National Lab.	4	-
Los Alamos National Lab.	4	7
State Univ. of New Jersey	4	-
E.Carolina Univ.	-	4
CTR Surface Warfare	-	4
OAK Ridge Natl. Lab.	-	4
Winterthur Museum	-	4
Texas A and M Univ.	3	-
Massachusetts Inst. of Tech.	3	-
Maryland Univ.	3	-
Duke Univ.	3	-
Pennsylvania Univ.	3	-
Temple Univ.	-	3
Univ. Arizona	-	3
Univ. Oregon	1	3
US Geol. Survey	-	3

Интересно отметить, что для всех ИВА-технологий характерно концентрирование в аналитические центры. Интенсивность работы такого центра зависит от его статуса (бюджетное финансирование, коммерческая деятельность), структуры, в которой он находится (университет, научный центр, отдельная лаборатория). Очевидно, что работы выполняются преимущественно в отдельных, основных научных центрах, в коллаборации с которыми работают другие организации. В Украине работы по ИВА ведутся в основном в ННЦ ХФТИ (г. Харьков), традиционно ведущем центре в этой области в СНГ, и в ИПФ (г. Сумы).

Таблица 2

**Количество работ, опубликованных в Германии по методу PIXE (по данным БД INIS и MSCI)**

Институт	INIS	MSCI
Frankfurt Univ.	30	4
Marburg Univ.	17	1
Heidelberg-Univ.	16	11
Leipzig Univ.	16	30
Bochum Univ.	15	15
Max-Planck-Institut Kernphysik	13	-
Research Center Rossendorf	11	-
Univ. Freiburg	-	10
Tech. Univ. Darmstadt	-	9
Univ. Hamburg	-	8
Inst. Ecol. Chem	-	7
Hanh Meitner Inst. Berlin	-	7
Univ. Gottingen	-	6
Bonn Univ.	7	3
Association Euratom-Max-Planck-Institut fuer Plasmaphysik	7	27
Humboldt-Universitaet	5	1
Forschungszentrum Juelich	4	3
Akad. Fine Arts	-	4
Akademie Wissenschaften DDR	3	-
Giessen Univ.	3	-
Karl-Marx-Universitaet	3	-
Univ. Munster	-	3
Univ. Jena	-	3
Tech. Univ. Dresden	-	3

Таблица 3  
Количество работ, опубликованных в Японии по методу PIXE (по данным БД INIS и MSCI)

Институт	INIS	MSCI
Tohoku Univ.	79	14
Kyoto Univ.	71	27
Tokyo Univ.	57	12
Iwate Medical Univ.	49	15
Tokyo Inst. Of Tech.	33	-
Hosei Univ.	30	7
Natl. Inst. of Radiological Sciences	23	3
Japan Atomic Energy Res. Inst.	17	23
Institute of Physical and Chemical Research, RIKEN	16	10
Japan Radioisotope Association	16	7
Nagoya Univ.	15	7
Nishina Memorial Cyclotron Ctr.	13	1
Waseda Univ.	12	23
Hokkaido Univ.	10	1
Hiroshima Univ.	10	5
Osaka Univ.	8	
Osaka Natl.Res.Inst		14
Kobe Univ. of Mercantile Marine	8	1
Government Industrial Research Inst.	8	7
Kyoto Prefectural Univ.	7	-
Electrotechnical Lab.	7	4
Tsukuba Univ.	7	6
Tokyo Metropolitan Isotope Research Center	7	-
Himeji Inst. of Tech.	5	12
Kyoto Inst. Of Tech.	5	-
Chiba Univ.	5	-

Senshu University of Ishinomaki	5	1
Osaka National Research Institute	5	14
National Lab. for High Energy Physics	4	-
Shimadzu Corp.	4	2
Kobe Steel Ltd.	4	1
Akita Univ.	4	1
Geol. Survey	-	6
Ritsumeikan Univ.	-	5
Ion Acceler. Corp.	-	4

### 3. СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ

Начиная с первых работ метод PIXE главным образом применяется для определения состава примесей в объектах биологии, медицины, сельского хозяйства, экологии и т.д., т.е. объектов с матрицами, состоящими из легких элементов. В настоящее время область использования метода PIXE значительно расширилась. Выполнены работы по анализу геологических объектов, технологических и конструкционных материалов, предметов искусства, археологии и т.д. В анализируемых БД за весь период было определено количество публикаций по отдельным областям применения метода PIXE, а также RBS и NRA (PIGE). Рассматривались следующие направления: медико-биологические исследования; экологические (в том числе аэрозоли); геология; отходы (загрязнения); материалы и сплавы, ядерные материалы. В табл.4 приведены результаты проведенного поиска работ, в которых применялся один метод анализа, в табл.5 – два метода анализа, в табл.6 – три метода анализа (по конкретным областям применений количество публикаций выражено в процентах).

Таблица 4

Количество публикаций при использовании одного метода

Область применения	INIS (1970-2004 гг.)			MSCI (1991-2004 гг.)		
	PIXE (2316)*	NRA (PIGE) (494)	RBS (1442)	PIXE (402)	NRA (PIGE) (168)	RBS (732)
Медико-биологическая	14.8	6.9	0.6	13.6	1.2	0.1
Экологическая (в том числе аэрозоли)	18.3	0.3	1.2	20.6	3.0	0.4
Геология	3.7	1.4	0.6	5.9	4.2	0.1
Отходы (загрязнения)	8.4	12.3	6.0	4.6	3.6	3.6
Материалы и сплавы	53.5	61.7	85.4	58.6	88.1	95.8
Ядерные материалы	1.5	14.8	6.3	-	-	-

\* Количество обнаруженных публикаций (по всем таблицам)

Таблица 5

Количество публикаций при использовании двух методов

Область применения	INIS (1970-2004 гг.)		МСCI (1991-2004 гг.)	
	PIXE+NRA (PIGE) (150)	PIXE +RBS (237)	PIXE+NRA (PIGE) (43)	PIXE+RBS (65)
Медико-биологическая	15.3	1.3	-	1.5
Экологическая (в том числе аэрозоли)	7.3	6.8	11.6	3.1
Геология	3.3	0.8	16.3	1.5
Отходы (загрязнения)	10.0	8.4	4.7	10.8
Материалы и сплавы	60.7	75.5	67.4	83.1
Ядерные материалы	4.0	7.2	-	-

Таблица 6

**Количество публикаций при использовании трех методов**

Область применения	INIS (1970-2004 гг.)	МСCI (1991-2004 гг.)
	PIXE+NRA (PIGE)+RBS (68)	PIXE+NRA (PIGE)+RBS (16)
Медико-биологическая	11.8	-
Экологическая (в том числе аэрозоли)	4.4	-
Геология	1.5	-
Отходы (загрязнения)	4.4	12.5
Материалы и сплавы	72.1	87.5
Ядерные материалы	5.9	-

В отношении применения двух и более методов можно отметить следующее. Видно, что предпочтение отдается сочетанию PIXE + RBS, затем следует PIXE + NRA (PIGE) и практически не встречается вариант NRA (PIGE) +RBS. Таким образом, основой для объединения методов служит PIXE. При этом рассматриваются задачи расширения диапазона анализируемых элементов (PIXE + NRA (PIGE)), а также анализ состава по толщине или анализ профиля распределения элементов в поверхностных слоях или пленках (PIXE + RBS). Одновременное использование трех методов анализа технически не затруднено, однако сложности методического характера делают такой симбиоз проблематичным. Поэтому в тех случаях, когда необходимо применять три метода, какой-то из них выполняется последовательно и при этом часто используется внешний пучок и микрозонд.

#### 4. МОДИФИКАЦИИ ИВА

##### 4.1. Выведенный в атмосферу пучок ионов

Обладая бесспорными достоинствами, ИВА имеет и некоторые ограничения, в частности, связанные с необходимостью помещения анализируемого объекта в вакуум. Начиная с 1974 г. развивается направ-

ление, использующее при облучении мишени пучок ионов, выведенный в атмосферу [10]. Значительное число действующих установок с выведенным пучком является установками с выведенным в атмосферу микропучком.

Вывод пучка из вакуумной системы ускорителя осуществляется через фольгу или через маленькое отверстие. Для изготовления фольг широко используются органические пленки из каптона с толщинами в диапазоне от 7,5 до 25 мкм, а также фольги из алюминия, бериллия и некоторых других материалов. Характерные толщины фольг из этих материалов находятся в пределах от одного до нескольких микрометров. Радиационные повреждения, образующиеся в фольгах под воздействием пучка приводят к ограниченному сроку их службы. Каптон толщиной 25 мкм выдерживает протонный пучок с энергией 2,5 МэВ и током 150 нА в течение 20...30 ч.

Прохождение пучка через фольгу приводит к двум основным недостаткам: увеличению фона, связанного с возбуждением рентгеновского и гамма-излучения в фольге, и необходимостью частой ее замены.

При анализе на выведенном пучке облучение анализируемого объекта производится или непо-

средственно в воздухе, или в замкнутом объеме, заполняемом азотом или гелием. Лучшие характеристики анализа достигаются при использовании гелия. Сравнение вакуумного варианта ИВА (PIXE) с методикой с выведенным пучком ионов показывает, что для многих аналитических задач их возможности равнозначны.

Применение метода с выведенным пучком не ограничивается объектами, характерными для вакуумного варианта ИВА, а охватывает и некоторые специфические объекты: жидкости, живые объекты, предметы искусства, промышленные изделия и т.д.

Очевидно, что в большинстве работ на выведенном пучке используется комбинация двух или даже

трех методов: PIXE, NRA, RBS. Количество публикаций с такой технологией анализа в процентном отношении к общему числу работ, и к настоящему времени сложилась ситуация, отраженная на рис.4.

Для иллюстрации сказанного можно представить работу [11], выполненную в Saclay. Она направлена на изучение явлений, протекающих на поверхностях раздела различных материалов и сред при захоронении радиоактивных отходов с возможным прогнозированием их долговременного хранения. При этом используется наиболее подходящий инструментарий - выпущенный в атмосферу микропучок и комплекс методов: PIXE, RBS, NRA.

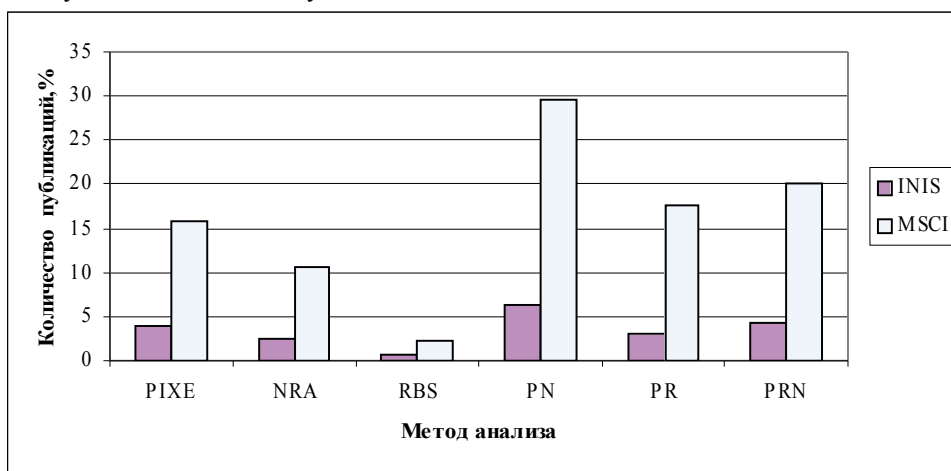


Рис. 4. Количество работ по ИВА, выполненных на выведенном пучке (PN — PIXE+NRA; PR — PIXE+RBS; PRN — PIXE+RBS+NRA)

#### 4.2. Вторичное рентгеновское излучение (метод РХХ)

Ускоритель протонов с энергией в несколько мегаэлектронвольт позволяет проведение рентгенофлуоресцентного анализа с первичным квазимоноэнергетическим излучением, генерируемым ускоренными протонами - метод РХХ. Метод РХХ используется в двух вариантах: вакуумный - когда конвертор и анализируемый объект расположены в вакууме [12], и невакуумный - когда анализируемый объект расположен в атмосфере, а пучок квазимоноэнергетического рентгеновского излучения выводится через фольгу [13]. Во втором варианте возможно усовершенствование, связанное с поляризацией и фокусировкой первичного излучения. Однако эта модификация пока не получила широкого распространения, и за весь анализируемый период только около ~0,4% опубликованных работ посвящено исследованиям возможностей и применению этого метода во втором варианте.

#### 4.3. Ядерный микрозонд

В настоящее время существует более 60 лабораторий, оснащенных ядерным микрозондом, тем не менее продолжается процесс развития и совершенствования оборудования микрозондов, отработки

новых методов исследования. Достигнуто пространственное разрешение в десятки нанометров.

В дополнение к уже используемым на ядерных микрозондах методам, связанным с регистрацией вторичных электронов, упругорассеянных частиц и продуктов ядерных реакций, развиты методы, основанные на эффектах каналирования ионов, детектировании вторичных ионов при просвечивании пучком исследуемого образца. Тем не менее метод с регистрацией характеристического рентгеновского излучения, возбуждаемого пучком протонов, дейтронов или альфа-частиц, является наиболее широко используемым. При этом в значительной части работ по исследованию элементного состава метод PIXE применяется в комбинации с другими ядерно-физическими методами.

Большинство работ с использованием микрозонда посвящено изучению одно- и двумерного распределения элементов в исследуемом объекте. Однако начиная с работы Доула и Винга [14] можно говорить о направлении, связанном с анализом объемного распределения элементов в объектах.

Если учесть неразрушающий характер ИВА, то представляется возможным использовать эти аналитические технологии для исследования уникальных объектов. Это могут быть картины, украшения, музейные экспонаты. Так при Лувре (Франция) специ-

ально создана лаборатория, оснащенная ядерно-физическими методами, для проведения подобных работ. Значительный вклад в развитие этого направления сделала группа LARN (Бельгия) [15].

Состояние интенсивного развития этой области хорошо отражается в количестве публикаций за анализируемый период (рис.5). В обеих БД можно отметить устойчивый рост.

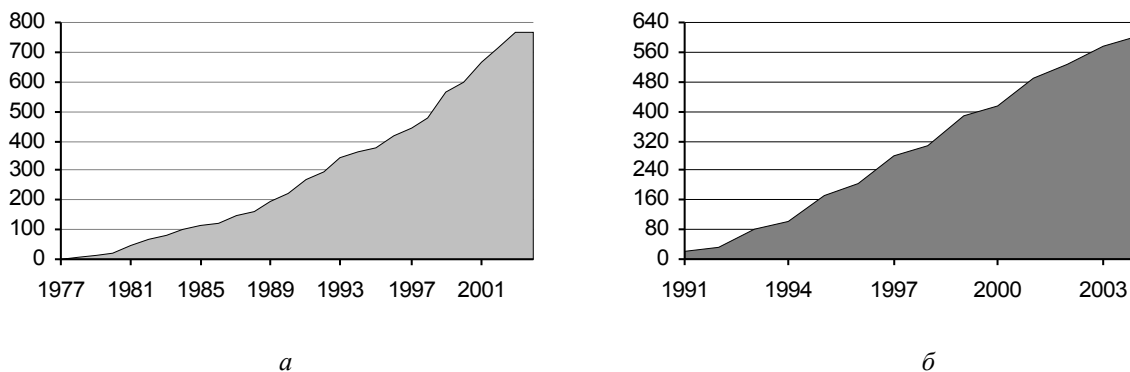


Рис. 5. Кумулятивный рост количества публикаций, посвященных применению микронзонда: а - INIS, б - MSCI

Около 40 стран участвуют в проведении исследований с использованием ядерного микронзонда. Данные о распределении публикаций по странам приведены на рис.6. Около половины из них имеют от

1 до 10 % публикаций, что указывает на более равномерное распределение усилий в этом направлении исследований.

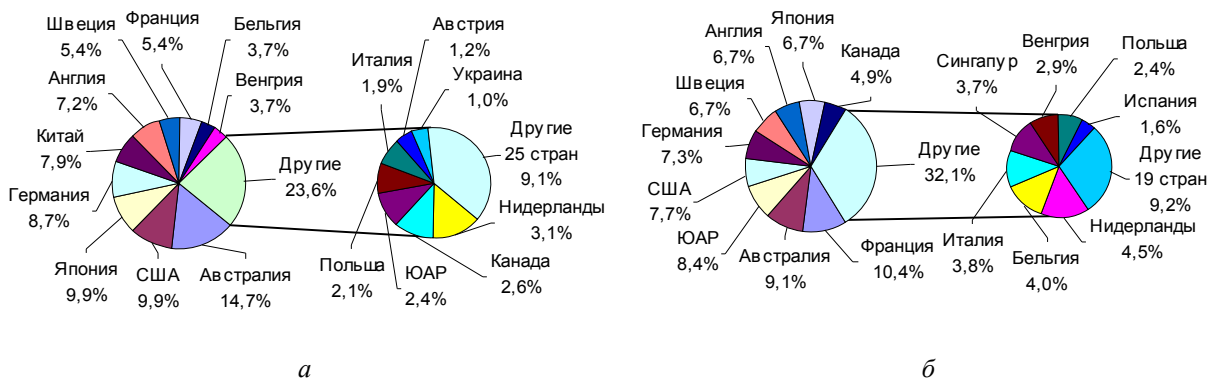


Рис. 6. Распределение публикаций по применению микронзонда по странам: а - БД INIS; б - БД MSCI



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современное развитие технологий и возможностей вычислительной техники обеспечило значительный прогресс в аналитике. В первую очередь это относится к масс-спектрометрии, методам с использованием лазерной техники, индуктивно связанной плазмы, рентгеновским методам. Однако в реестре современных аналитических технологий ядерно-физические методы на пучках ионов также имеют свои, уже достаточно отработанные сферы применения. Это обстоятельство и будущее в полной мере отражается в динамике информационных потоков в этой части аналитики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. I.U. Amaldi // *Nuclear Technology Reviv.* 2002, 2000, v. 31, № 6.
2. T.V. Johansson, G. Akselsson, S.A.E. Johansson // *Nucl.Inst.Meth.* 1970, v. 84, p. 141-145.
3. А.Г. Страшинский, Г.К. Хомяков, Н.А. Скакун, Н.В. Серых, А.П. Ключарев // *Атомная энергия.* 1974, т. 36, с. 461-463.
4. В.Н. Бондаренко, Л.С. Глазунов, А.В. Гончаров, А.В. Зац, В.Я. Колот, В.В. Кузьменко, В.В. Левенец, А.П. Омельник, В.М. Пистряк, В.И. Сухоставец, А.А. Щур // *Материалы V Межд. конф. «Взаимодействие излучения с твердым телом»*, ВИТТ-2003, 6-9.09.2003. Беларусь: Минск, с.329 – 331.
5. <http://www.highvolteng.com>.
6. <http://www.peleton.com>.
7. <http://www.microbeams.co.uk>.
8. J.A. Maxwell, J.L. Campbell, W.J. Teesdale // *Nucl.Inst.Meth.* 1989, v. 43, p. 218-232.
9. <http://www.worldscinet.com/ijpaxe/ijpaxe.shtml>
10. G. Deconinck, F. Bodard // *Nucl. Inst. Meth.* 1978, v. 149, p. 609-704.
11. P. Trocellier, V. Badillo, N. Barre, L. Bois, C. Cauchoir, JP. Gallien, S. Guilbert, F. Mercier, C. Tiffreau // *Nucl.Inst.Meth.* 1999, v. B158, Is.1-4, p. 511-516.
12. И.П. Максимов, И.Я. Барит, Л.Е. Кузьмин и др. Ядерно-физические методы анализа в контроле окружающей среды // *Труды I Всесоюзного совещания*. Л.: «Гидрометеиздат», 1980, с.207.
13. Н.А. Авраменко, О.И. Ехичев, В.В. Левенец, Н.Ф. Северин, А.И. Чумаченко, А.А. Щур // *ВАНТ. Серия «Общая и ядерная физика»*. 1985, в. 2 (31), с. 86 -90.
14. B.L. Dole, N.D. Wirg // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1983, NS-30, p. 1214-1219.
15. G. Demortier. Laboratoire d'Analyses par Reactions Nucleaires (LARN), Facultes Universitaires Notre-Dame de la Paix, 61 rue de Bruxelles, 5000, Namur, Belgium.

## ДИНАМІКА ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ ПО ЯДЕРНО-ФІЗИЧНИМ МЕТОДАМ АНАЛІЗУ НА ПУЧКАХ ІОНІВ

*В.В. Левенець, А.Г. Шепелев, Т.А. Пономаренко, О.В. Немашкало, А.А. Щур*

Вивчено динаміку інформаційних потоків по ядерно-фізичним методам аналізу матеріалів на пучках іонів. Проаналізовано поширеність цих методів серед країн світу, а також розподіл публікацій по різним методам (PIXE, RBS, NRA (PIGE)) в часі і областях використання. Розглянуто найбільш перспективні напрямки розвитку методів в контексті динаміки публікацій.

## DYNAMICS OF INFORMATION FLOWS ON NUCLEAR-PHYSICAL ANALYSIS TECHNIQUES WITH ION BEAMS

*V.V. Levenets, A.G. Shepelev, T.A. Ponomarenko, O.V. Nemashkalo, A.A. Shcur*

An investigation is made into the dynamics of information flows on nuclear-physical techniques of material analysis with ion beams. The popularity of the techniques among the countries of the world has been analysed. The distributions of publications on various method (PIXE, RBS, NRA(PIGE)) in time and areas of applications have been studied. Consideration has been given to the most promising trends in the development of methods in the context of publication dynamics

