

$\sin^2 2\theta_{12} = 0,87$, $\delta = 0$, а также нормальная иерархия масс нейтрино. Пунктирной стрелкой показана конечная цель первой фазы эксперимента: $\sin^2 2\theta_{13} = 0,006$ (90 % CL) для 8×10^{21} POT, что соответствует пяти годам набора статистики при мощности протонного пучка 0,75 МВт, достижение которой ожидается в течение ближайших двух лет. За это же время будет достигнута точность $\delta(\Delta m_{23}^2) \approx 1 \times 10^{-4}$ и $\delta(\sin^2 2\theta_{23}) \approx 0,01$ в процессе $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ в результате измерения дефицита событий и искажения формы спектра [29].

Следует особо подчеркнуть исключительную важность эксперимента T2K для дальнейших исследований с ускорительными нейтрино, поскольку обнаружение осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ и отличная от нуля величина угла θ_{13} предоставляют уникальную возможность для поиска CP-нарушения в лептонном секторе в ускорительных экспериментах с длинной базой. Детально эти вопросы рассмотрены в работе [30].

В июне этого года коллаборация T2K опубликовала первый результат [31] анализа данных, накопленных во время проведения эксперимента с января 2010 г. до 11 марта 2011 г. (начала землетрясения в Японии). Было обнаружено шесть событий, являющихся кандидатами в электронные нейтрино. Ожидаемое число таких событий в предположении отсутствия осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ (для $\theta_{13} = 0$) составило $1,5 \pm 0,3$. Вероятность того, что шесть событий являются флуктуацией фоновых событий, а не результатом осцилляций, равняется 0,7%. Таким образом, с вероятностью 99,3% этот результат может быть интерпретирован как указание на осцилляции $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$. Центральная величина для $\sin^2 2\theta_{13}$ составляет 0,11 для нормальной иерархии масс нейтрино и 0,14 для инверсной иерархии в случае $\delta = 0$.

Работа поддержана Программой Президиума РАН "Нейтринная физика" и Программой поддержки научных школ (НШ-65038.2010.2).

Список литературы

- Maki Z, Nakagawa M, Sakata S *Prog. Theor. Phys.* **28** 870 (1962)
- Fukuda Y et al. (Super-Kamiokande Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **81** 1562 (1998)
- Fukuda Y et al. (Super-Kamiokande Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **77** 1683 (1996)
- Fukuda Y et al. (Super-Kamiokande Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **81** 1158 (1998)
- Abdurashitov J N et al. (SAGE Collab.) *Phys. Lett. B* **328** 234 (1994)
- Anselmann P et al. (GALLEX Collab.) *Phys. Lett. B* **285** 376 (1992)
- Ahmad Q R et al. (SNO Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **87** 071301 (2001)
- Ahmad Q R et al. (SNO Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **89** 011301 (2002)
- Eguchi K et al. (KamLAND Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **90** 021802 (2003)
- Ahn M H et al. (K2K Collab.) *Phys. Rev. D* **74** 072003 (2006)
- Adamson P et al. (MINOS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **101** 131802 (2008); arXiv:0806.2237
- Apollonio M et al. (CHOOZ Collab.) *Eur. Phys. J. C* **27** 331 (2003)
- Fogli G L et al. *Prog. Part. Nucl. Phys.* **57** 742 (2006); hep-ph/0506083
- Barger V, Marfatia D, Whisnant K *Phys. Rev. D* **65** 073023 (2002); hep-ph/0112119
- Itow Y et al., hep-ex/0106019
- 'T2K ND280 Conceptual Design Report', T2K Internal Document, Version 1.0 (2005)
- Karlen D (and the ND280 Group of the T2K Collab.) *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **159** 91 (2006)
- Kudenko Yu (and Representing the T2K Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **598** 289 (2009)
- Hayato Y (and the T2K Collab.) *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **143** 269 (2005)
- Yamada Y *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **155** 28 (2006)
- Yokoyama M et al., physics/0605241
- Gomi S et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **581** 427 (2007)
- Yokoyama M et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **610** 128 (2009); arXiv:0807.3145
- Vacheret A et al., arXiv:1101.1996
- Mineev O et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **577** 540 (2007)
- Izmaylov A et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **623** 382 (2010); arXiv:0904.4545
- Fukuda S et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **501** 418 (2003)
- Blondel A "Hadron production experiments", in *Neutrino 2010, June 14 – 19, 2010, Athens, Greece*
- The T2K experiment, <http://www.t2k.org>
- Куденко Ю Г *УФН* **181** 569 (2011) [Kudenko Yu G *Phys. Usp.* **54** (6) 2011]
- Abe K et al. (T2K Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **107** 041801 (2011); arXiv:1106.2822 [hep-ex]

PACS numbers: **28.60.+s**, **29.20.-c**, 87.56.B-
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201109k.1004

Производство изотопов в Институте ядерных исследований РАН: реальность и перспективы

Б.Л. Жуйков

1. Возможности получения радионуклидов на ускорителях средних энергий

Вероятно, с момента образования Института ядерных исследований АН СССР в 1970 г. и принятия решения о сооружении линейного ускорителя протонов средних энергий — мезонной фабрики — возникла идея о получении радионуклидов для научных и прикладных целей. С конца 1980-х годов проводились интенсивные исследования и проектные работы, направленные в первую очередь на создание комплекса по ускорению тяжёлых ионов радионуклидов на специально сооружённом для этого циклотроне [1]. Предполагалось получение радионуклидов на протонном пучке линейного ускорителя и их экспрессное выделение из облучённых мишеней. Этот проект был нацелен на проведение фундаментальных исследований физики ядра. Одновременно предполагалось осуществить производство изотопов для медицинских и технических целей. Подобная программа была утверждена, и сейчас она реализуется, например, в Национальной лаборатории Легнарро (Италия).

Вследствие резкого сокращения финансирования программа по тяжёлым ионам не была реализована, и сейчас основным направлением является получение радионуклидов преимущественно для медицинских целей. В 1991 – 1992 гг. на основе проведённых исследований и разработок в кратчайшие сроки с минимальными затратами была сооружена установка по производству радионуклидов на отводе пучка протонов линейного ускорителя с энергией 160 МэВ [2, 3], которая на тот момент оказалась самой мощной в мире по энергии, аккумулированной на получение изотопов. Эта установка, пройдя несколько стадий совершенствования, и сейчас является одной из крупнейших в мире и пока единственной из действующих в Европе и Азии. Сегодня существует лишь несколько подобных сооружений (табл. 1).

Формируя программу радиоизотопных исследований, мы руководствовались следующими принципами,

Б.Л. Жуйков. Институт ядерных исследований РАН, РФ
E-mail: bz@inr.ru

Таблица 1. Основные действующие установки для производства радионуклидов на пучке протонов средних энергий

Организация	Местоположение	Энергия протонов, используемая для производства радионуклидов, МэВ	Ток пучка, используемый для производства радионуклидов, мкА
Институт ядерных исследований РАН	Троицк, Московская обл., Россия	160	120
Лос-Аламосская национальная лаборатория	Нью-Мехико, США	100	200
Брукхейвенская национальная лаборатория	Аптон, Нью-Йорк, США	200	90
Канадская национальная лаборатория физики элементарных частиц и ядерной физики TRIUMF	Ванкувер, Канада	110	50
Национальная циклотронная лаборатория iThemba	Форе, ЮАР	66	180
ARRONAX (Accelerator for Research in Radiochemistry and Oncology at Nantes Atlantic)*	Нант, Франция	70	2 × 375

* Вводится в эксплуатацию.

которые являются достаточно очевидными в области фундаментальной науки, но пока редко реализуются в России в прикладных направлениях:

— развитие только тех направлений, в которых мы можем иметь неоспоримые преимущества над всеми другими аналогичными разработками в мире;

— максимальная оптимизация и постоянное улучшение параметров для достижения наивысшей производительности;

— соединение результатов собственных научных исследований с технологическими разработками с целью последующего широкого внедрения;

— тесное научное сотрудничество и производственно-техническая кооперация с ведущими мировыми центрами.

Ускоритель Института ядерных исследований РАН (ИЯИ) отличается тем, что он способен одновременно обеспечивать сравнительно высокую энергию протонов, 160–600 МэВ, и высокую интенсивность пучка — от 100 и до 500 мкА в будущем. В принципе, на нём можно получать не только самые разные нейтронно-дефицитные изотопы, но и нейтронно-избыточные. Однако лишь немногие из изотопов целесообразно производить на столь дорогой установке, если иметь в виду конкуренто-

способность с другими методами и объём потенциального потребления. В таблице 2 указаны радионуклиды, которые мы реально получаем или получали на ускорителе ИЯИ РАН. На установке производятся радионуклиды не только медицинского и технического назначения, но и для важных фундаментальных исследований: изучения высокоспиновых изомеров, поиска массы нейтрино и др. [4–7].

Большую роль в проведении разработок по получению радионуклидов сыграло тесное сотрудничество с канадскими коллегами (Национальная циклотронная лаборатория TRIUMF в Ванкувере) и американскими специалистами из Лос-Аламосской (ЛАНЛ) и Брукхейвенской (БНЛ) национальных лабораторий. Зарубежные коллеги принимали участие в формировании изотопной программы. США оказали существенную материальную поддержку для развития производства медицинских изотопов в России в рамках программы нераспространения оружия массового поражения "Initiatives for Proliferation Prevention" (IPP). С другой стороны, когда в конце 1990-х годов возник кризис производства стронция-82 для медицинских целей из-за прекращения эксплуатации изотопной установки на пучке протонов с энергией 800 МэВ в Лос-Аламосе и возникла угроза прекращения

Таблица 2. Радионуклиды, получаемые в ИЯИ РАН, и возможности их производства за один сеанс облучения при токе 120 мкА

Радионуклид	Период полураспада	Мишень	Диапазон энергии, МэВ	Период облучения, ч	Произведённая активность, Ки
Sr-82 *	25,5 сут	Rb	40—100	250	5
Na-22 **	2,6 лет	Mg, Al	35—150	250	2
Cd-109 **	453 сут	In	80—150	250	2
Pd-103 **	15 сут	Ag	50—150	250	50
Ge-68 **	288 сут	Ga, GaNi	15—50	250	0,5
Sn-117m **	14 сут	Sb, TiSb	40—150	250	3
Se-72 ***	8,5 сут	GaAs	45—60	250	3
Cu-67 ***	62 ч	Zn-68	70—150	100	10
Cu-64 ***	12,7 ч	Zn	40—150	15	15
Ac-225 ***	10 сут	Th	40—150	250	4
Ra-223 ***	11,4 сут	Th	40—150	250	13

* Регулярно производится.

** Разработана технология, пробные образцы поставлены заказчику.

*** Разработаны методы получения, технология находится в стадии разработки.

непрерывного производства этого важнейшего радионуклида, именно ИЯИ РАН сыграл решающую роль в разрешении данного кризиса [8–10]. Институт обеспечил поставки мишеней, облучённых на нашем ускорителе, для переработки в США по российской технологии. Кроме того, мы участвовали в разработке новой эффективной установки на отводе пучка с энергией 100 МэВ на ускорителе в Лос-Аламосе [11]. Сейчас мы проводим ряд совместных исследований, которые очень трудно или даже невозможно осуществить без нашего участия. Установка в Лос-Аламосе была создана за шесть-семь лет за счёт государственного финансирования. По оценкам, уже около 150 тыс. пациентов прошли диагностику с использованием только изотопов, полученных на ускорителе ИЯИ РАН и выделенных в США. Причём выделенный в Лос-Аламосе изотоп поставляется в Россию для проведения медицинских исследований на некоммерческой основе. Кроме того, американские партнёры поддерживают создание в России независимого производства выделенных радионуклидов, а также радиофармацевтических препаратов на их основе. Эта совместная деятельность, которая широко освещается в местной прессе, представлена в музее в Лос-Аламосе как пример плодотворного международного сотрудничества в мирных целях.

Немаловажно, что в результате этой работы регулярно эксплуатируется уникальный ускоритель ИЯИ РАН, который не может быть полностью загружен другими задачами.

В Канаде также используют методики, разработанные с участием российских учёных. Сейчас ИЯИ РАН участвует в создании нового мощного комплекса производства медицинских радионуклидов ARRONAX в г. Нанте (Франция). Этот комплекс сооружается за счёт государственного финансирования сразу из нескольких источников.

2. Мишенная установка на высокоинтенсивном пучке протонов с энергией 160 МэВ

Установка на пучке ускорителя ИЯИ РАН создавалась специально для производства радионуклидов с максимальной эффективностью [2, 3]. При её сооружении использовался ряд новых оригинальных разработок. Системы управления установкой и системы её безопасности являются надёжными и соответствуют высшему мировому уровню.

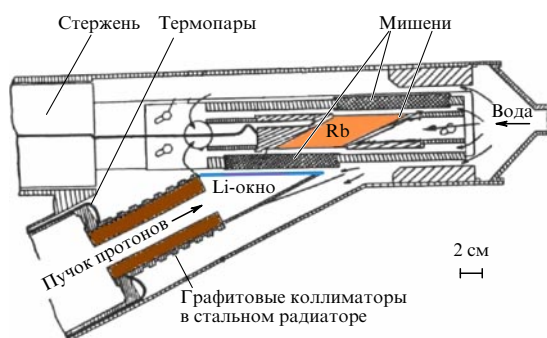


Рис. 1. Мишенное устройство на пучке протонов ускорителя ИЯИ РАН.

Лаборатория включает в себя пять помещений в зоне пучка и пультовую, находящуюся в смежном здании. Пучок протонов с энергией до 160 МэВ поступает в отдельное подземное помещение по ионопроводу, оснащённому системами диагностики пучка и вакуума. Мишени устанавливаются в пазах из сверхпрочного графита в конце горизонтального стержня (рис. 1), который вдвигают в защитный чугунный куб массой около 180 т. Мишени интенсивно охлаждаются водой по замкнутому контуру. Конструкция входного окна между вакуумом ускорителя и водой (металлический литий между двумя листами из нержавеющей стали) позволяет эксплуатировать окно в течение многих лет и заменять его при необходимости. Система охлаждаемых графитовых коллиматоров с термодарами позволяет точно контролировать размер и положение пучка высокой интенсивности непосредственно на мишени.

На установке можно одновременно облучать несколько мишеней с различной конструкцией в разном диапазоне энергий протонов. Технические особенности линейного ускорителя позволяют выводить пучок протонов с энергией не только 158 МэВ, но и 143, 127, 113, 100, 94 МэВ и таким образом минимизировать рассеяние пучка по энергии. Уже сейчас биологическая защита и система охлаждения мишеней позволяют облучать некоторые мишени с интенсивностью пучка до 120–140 мкА.

Весь период эксплуатации установки показал, что она удобна в обслуживании и все её системы работают надёжно, что вполне соответствует целям как фундаментальных исследований, так и регулярного производства важнейших радионуклидов для прикладного применения.

3. Производимые изотопы и методы их получения

3.1. Стронций-82

Среди изотопов медицинского назначения, которые можно производить, используя пучок протонов средних энергий, стронций-82 (период полураспада $T_{1/2} = 25,5$ сут) занимает, безусловно, первое место. Этот радионуклид является важнейшим продуктом всех аналогичных установок (см. табл. 1). Его используют для изготовления медицинского генератора рубидия-82, применяемого при кардиологической диагностике с помощью позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) (см. раздел 3.2). Основной метод производства ^{82}Sr в настоящее время — получение его посредством ядерных реакций $\text{Rb}(p, 4n)$ и $\text{Rb}(p, 6n)$ в диапазоне энергии протонов 40–100 МэВ с использованием мишеней из металлического рубидия или хлорида рубидия. Этот радионуклид не может быть произведён на небольших ускорителях протонов низких энергий или на реакторе.

Мы используем мишени из металлического рубидия, на которых получение ^{82}Sr наиболее эффективно. Мишени, облучённые на ускорителе ИЯИ РАН, отправляют в ЛАНЛ, где их перерабатывают по радиохимической технологии с растворением рубидия. Выделяемый чистый ^{82}Sr отправляют на зарядку генераторов рубидия-82, которые распространяют в основном в клиниках США (рис. 2).

Позднее нами был разработан новый метод, который позволяет выделять стронций без растворения рубидия

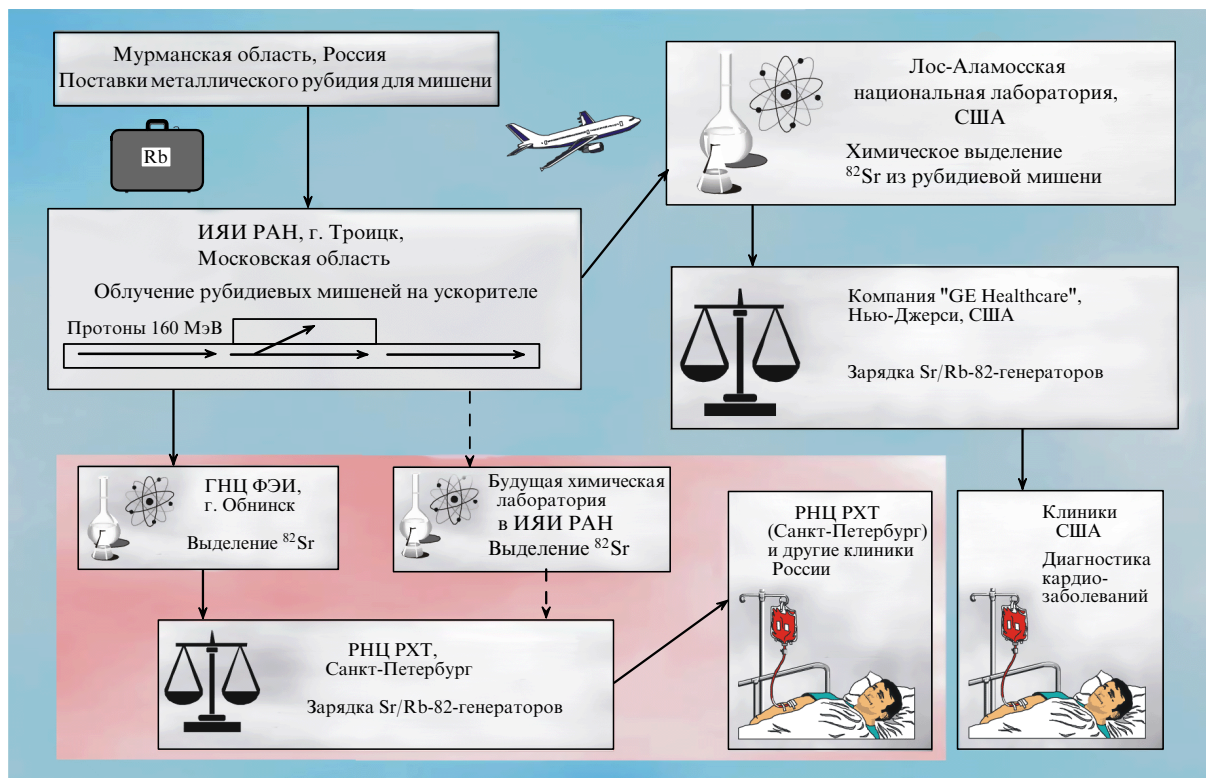


Рис. 2. Схема производства, транспортировки и применения стронция-82.

— посредством сорбции ^{82}Sr на различных поверхностях непосредственно из расплавленного рубидия [12]. Извлечение радионуклидов из жидких металлов — сложный и малоисследованный физико-химический процесс, связанный с образованием зольных частиц в расплавленном металле и химическими реакциями на поверхности. В результате наших исследований показаны эффективность такого подхода и возможность его применения для извлечения различных радионуклидов из других расплавов металлов, например серебра и свинца. Это делает метод перспективным для решения других задач, в частности связанных с извлечением радионуклидов из теплоносителя свинец–висмут при трансмутации ядерных отходов.

На основе проведённых исследований была разработана технология выделения ^{82}Sr из облучённых рубидиевых мишеней, которая действует в горячих камерах Государственного научного центра — Физико-энергетического института им. А.И. Лейпуновского (ГНЦ – ФЭИ) (г. Обнинск). В дальнейшем планируется создать новую установку с мишенью из циркулирующего рубидия с извлечением образовавшегося ^{82}Sr в онлайн-режиме, что резко повысит производительность. ИЯИ РАН имеет патенты на эту технологию [13].

Разработка новой технологии обеспечила получение собственного чистого ^{82}Sr и позволила начать изготовление генераторов стронций/рубидий-82 для нужд ядерной медицины в России и за рубежом (см. рис. 2).

3.2. Генератор стронций/рубидий-82

Схема работы генератора изображена на рис. 3. Стронций-82 осаждают на ионообменную колонку из гидратированного оксида олова. Этот радионуклид распадается с образованием короткоживущего ^{82}Rb ($T_{1/2} = 1,3$ мин).

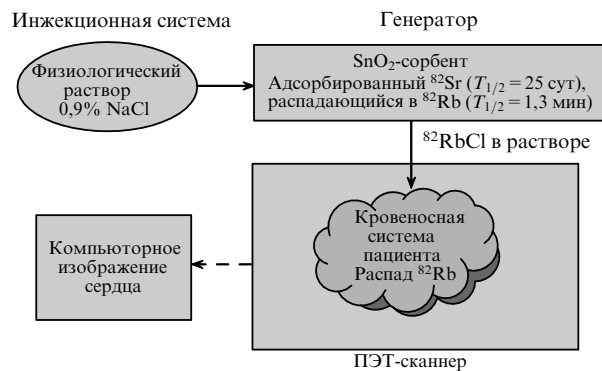


Рис. 3. Принцип работы генератора стронций/рубидий-82.

Физиологический раствор (0,9 % NaCl) прокачивают через колонку с сорбентом, способным удерживать ионы Sr^{+2} , а ионы Rb^{+} вымываются. Высокие ионообменные свойства обеспечиваются наличием на поверхности микрокристаллитов размером в несколько нанометров [14].

Вымываемый из колонки ^{82}Rb вводят в кровеносную систему человека для диагностики кровотока. Распад этого радионуклида сопровождается испусканием позитронов, которые аннигилируют с излучением двух противоположно направленных гамма-квантов с энергией 511 кэВ. С помощью ПЭТ-сканера определяется кровоснабжение различных органов, в первую очередь сердца. Это позволяет эффективно диагностировать ишемическую болезнь сердца и другие заболевания. Пока такой генератор ("Cardiogen"[®]) регулярно производится только в Северной Америке фирмами "GE Healthcare" и "Nordion". Наш генератор, разработанный совместно с канадскими учёными [15, 16], по характеристикам значи-

тельно лучше американского аналога. В настоящее время наш генератор успешно проходит клинические испытания в Российском научном центре радиологии и хирургических технологий (С.-Петербург) в лаборатории, оборудованной по классу GMP (Good Manufacturing Practice). Однако многочисленные бюрократические проблемы при транспортировке, таможенном оформлении и получении разного рода лицензий сильно тормозят процесс внедрения.

3.3. Олово-117m

Этот радионуклид является чрезвычайно перспективным для векторной иммунотерапии при лечении атеросклероза, терапии костных онкологических и других заболеваний [17]. Олово-117m испускает моноэнергетичные оже-электроны с энергией 127 и 152 кэВ с фиксированными пробегами в воде 0,22 и 0,29 мм соответственно. Это выгодно отличает ^{117m}Sn от радионуклидов, испускающих β -частицы. Наиболее эффективен продукт с высокой удельной активностью, который, в отличие от продукта с низкой удельной активностью, нельзя получить при облучении на реакторе.

^{117m}Sn с высокой удельной активностью образуется в ядерных реакциях сурьмы с протонами средних энергий: $^{121,123}\text{Sb}(p, 2p\text{ xn})^{117m}\text{Sn}$. ИЯИ РАН проводит работу в этом направлении совместно с БНЛ. Эта работа даёт пример использования фундаментальных исследований в прикладных разработках.

Прежде всего необходимо было рассчитать возможный выход ^{117m}Sn в ядерных реакциях, его удельную активность и уровень радиоактивных примесей. Существовавшие модели не позволяли корректно рассчитывать сечения изомерных состояний. Мы разработали новую систематику, которая в комбинации с известными моделями — ALICE-IPPE (разработанная в ГНЦ – ФЭИ версия) и каскадно-испарительной моделью CEF (Cascade, Evaporation, Fission) — позволяет оценивать изомерные отношения [5]

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_g} \approx a \exp[-b(J_m - J_t)],$$

где σ_m — сечение изомерного состояния ядра; σ_g — сечение основного состояния (может быть рассчитано по теоретическим моделям), J_m и J_t — значения спинов образовавшегося изомерного ядра и ядра мишени соответственно, $a \approx 1,05$ и $b \approx 0,47$ — корреляционные коэффициенты. Эксперименты по изучению особенностей получения высокоспиновых изомеров на различных мишенях при разных энергиях протонов, на основе которых создавалась новая систематика, проводили на ускорителе ИЯИ РАН, на ускорителе TRIUMF [4], а также на циклотроне Европейского центра и циклотроне Объединённого исследовательского центра в Испре в Италии совместно с учёными из Миланского университета.

Оценки сечений образования ^{117m}Sn , проведённые на основе разработанной систематики, хорошо соответствовали экспериментально измеренным сечениям [18] (рис. 4). Также были рассчитаны значения удельной активности в разных режимах облучения и содержание различных примесей.

Далее нами были разработаны технологии изготовления и облучения мишеней, содержащих сурьму, и радиохимического выделения ^{117m}Sn в горячих камерах.

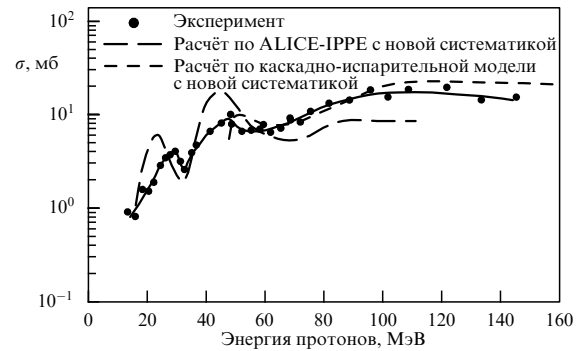


Рис. 4. Расчётные и экспериментальные сечения образования ^{117m}Sn при облучении сурьмы протонами.

Использовались мишени из металлической сурьмы в графитовых или ниобиевых оболочках [19], а также мишени из интерметаллида TiSb [20]. Последнее соединение, впервые полученное в больших количествах нами, отличается одновременно высокой устойчивостью и высокой теплопроводностью и, следовательно, является весьма перспективным мишенным материалом.

Методы получения ^{117m}Sn и его выделения из мишени защищены рядом российских и зарубежных патентов [19–22], и технология готова для массового производства. Клинические испытания проводятся США с участием БНЛ и американских коммерческих партнёров.

3.4. Актиний-225 и радий-223

Ещё более перспективными для радиоиммунной терапии являются α -активные радионуклиды [23]. Короткая длина пробега α -частиц (менее 0,1 мм) и высокая плотность локального энерговыделения делают α -излучатели весьма эффективным средством лечения онкологических заболеваний, при этом минимизируется доза облучения здоровых органов и тканей. Для доставки α -радионуклида к поражённым клеткам особенно перспективны наноструктуры, в том числе на основе моноклональных антител [24].

Актиний-225 ($T_{1/2} = 10$ сут) — один из многообещающих радионуклидов для терапии, который может применяться для разрушения раковых клеток как непосредственно, так и с использованием дочернего висмута-213 ($T_{1/2} = 46$ мин), получаемого с помощью $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ -генератора [25]. Также перспективным для ядерной медицины является ^{223}Ra , который уже применяют в виде препарата "Alpharadin"® для лечения костных онкологических заболеваний. Используемые ранее методы не могли обеспечить получение ^{225}Ac и ^{223}Ra в больших количествах.

Радионуклиды ^{225}Ac и ^{223}Ra могут быть получены при облучении тория-232 протонами средних энергий [26]. На рисунке 5 показаны выходы ^{225}Ac и ^{223}Ra в толстых мишенях из тория-232 (в зависимости от входной энергии протонов), определённые на основе экспериментально измеренных нами сечений. Такие высокие выходы позволяют получать эти радионуклиды в количестве нескольких кюри всего лишь за неделю облучения на ускорителе, что во много раз больше количеств, производимых другими методами. В то же время в мишени в результате ядерных реакций скалывания и деления образуется множество изотопов других элементов. В γ - и α -спектрах облучённых ториевых мишеней мы обнару-

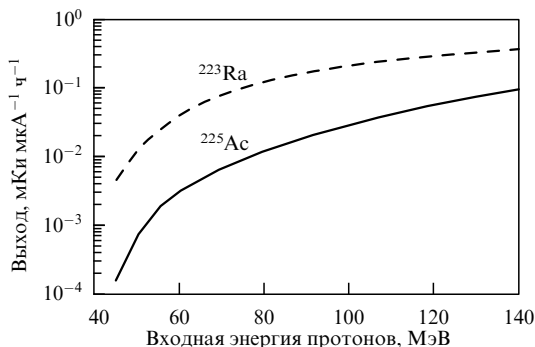


Рис. 5. Выход ^{225}Ac и ^{223}Ra в ядерных реакциях ^{232}Th в зависимости от входной энергии в толстой мишени (расчёт на 10 сут облучения, выдержка 10 сут для ^{225}Ac и 16 сут для ^{223}Ra).

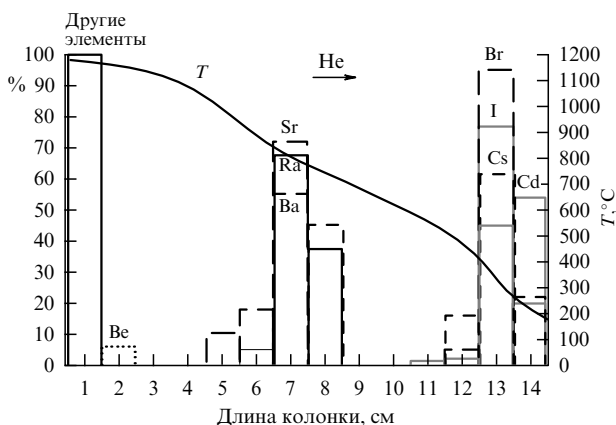


Рис. 6. Термохроматографическое отделение Ra с Sr и Ba от других элементов (Th, Ac, Pa, La, Pm, Ce, Nd, Cr, Zr, Mo, Nb, Tc, Te, Sn, Sb, Ag, Ru, Rb), возгоняемых из расплава тория и лантана, в колонке из металлического титана.

жили более 80 радионуклидов, от которых радиохимическими методами необходимо отделить актиний и радий. Метод выделения актиния разработан (совместно с МГУ им. М.В. Ломоносова и Институтом физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН) с использованием жидкостной экстракции и экстракционной хроматографии, а радия — с помощью возгонки из расплава тория с лантаном и термохроматографического разделения в колонках из металлического титана (рис. 6) с последующей доочисткой радия [27]. В результате открывается возможность получения больших количеств радиохимически чистых ^{225}Ac и ^{223}Ra для ядерной медицины.

3.5. Другие перспективные медицинские радионуклиды

Одним из преимуществ ускорителя ИЯИ РАН и установки на пучке протонов с энергией 160 МэВ является то, что можно облучать сразу несколько мишеней, расположенных последовательно по направлению пучка. Таким образом, разные мишени облучаются в различных диапазонах энергий протонов, выгодных для образования тех или иных изотопов (см. табл. 1).

Одновременно с рубидиевой мишенью, облучаемой в диапазоне энергий 40–100 МэВ, можно облучать при более высоких энергиях металлическое серебро, а при низких энергиях — мишень из галлия (см. табл. 1) для получения соответственно палладия-103 и германия-68.

Эти радионуклиды широко используют в медицине. ^{103}Pd применяют для терапии простаты в виде специальных источников ("seeds" фирмы "Theragenics"®). Ещё более перспективным является использование этого радионуклида (как и $^{117\text{m}}\text{Sn}$) в виде альбуминовых микросфер [28] для терапии различных заболеваний. ^{68}Ge применяют для калибровки позитронно-эмиссионных томографов и изготовления медицинских генераторов ^{68}Ga [29]. ^{103}Pd и ^{68}Ge проще получать на протонах с низкой энергией [30]. Однако на установке ИЯИ РАН их можно производить как побочные продукты.

Новый перспективный медицинский радионуклид, который нельзя получить на ускорителях с низкой энергией протонов, но можно производить на нашем ускорителе, — это селен-72 ($T_{1/2} = 8,5$ сут), который служит генератором мышьяка-72 ($T_{1/2} = 26$ ч), испускающим при распаде позитроны, и может применяться при диагностике с помощью ПЭТ. Высокие сечения ядерной реакции $^{75}\text{As}(p, 4n)^{72}\text{Se}$ (впервые измеренные нами) позволяют обеспечить большой выход ^{72}Se в мишенях, содержащих мышьяк. Согласно нашей разработке [31], в качестве мишени используют устойчивое соединение мышьяка GaAs, заключённое в ниобиевую оболочку. Предложена эффективная методика выделения ^{72}Se из облучённой GaAs-мишени с использованием возгонки и химических реакций при высокой температуре [3, 31]. К сожалению, эффективных радиофармацевтических препаратов с ^{72}As пока не разработано.

3.6. Изотопы для науки и техники

В ИЯИ РАН проводятся важнейшие эксперименты по поиску массы нейтрино на установке "Троицк-ню-масс" на основе анализа спектра β -распада трития [32]. Для исследования эффектов объёмного заряда в газообразном тритии важен криптон-83m, испускающий моноэнергетичные электроны с энергией, близкой к граничной энергии электронов при β -распаде трития. Криптон-83m образуется в результате распада ^{83}Rb ($T_{1/2} = 86,2$ сут), который таким образом служит генератором $^{83\text{m}}\text{Kr}$ ($T_{1/2} = 1,86$ ч).

Мы получали ^{83}Rb , облучая фторид стронция протонами с энергией 100–120 МэВ. Для выделения применялся газохимический метод: рубидий возгоняли из облучённой мишени при температуре 1200 °C в токе гелия в графитовой аппаратуре и осаждали тонким слоем на металлическую фольгу. В ходе физических экспериментов фольгу нагревали, при этом $^{83\text{m}}\text{Kr}$ испарялся из тонкого слоя [6]. Применение этого источника способствовало получению новых ограничений на массу нейтрино.

На ускорителе ИЯИ РАН можно получать также кадмий-109 из мишени индия, а из мишени алюминия — натрий-22 (см. табл. 1). Оба этих изотопа используются в научных и технических целях: кадмий-109 является важным радионуклидом, используемым, в частности, в рентгенофлуоресцентном анализе, а натрий-22 применяется в мёссбауэровской спектроскопии и при изучении физики позитрония. Экспериментальные кумулятивные сечения образования ^{109}Cd из индия в диапазоне энергий 140–80 МэВ оказались довольно большими. В результате выход кадмия-109 при облучении индия оказался во много раз выше, чем в ранее использовавшемся методе получения этого радионуклида на протонах с энергией 800 МэВ [33]. Как кадмий, так и натрий легко выделить из

облучённой мишени методами возгонки при высокой температуре [34] по методике, разработанной в ИЯИ РАН.

4. Новые возможности и перспективы дальнейшего развития производства изотопов

4.1. Модернизация линейного ускорителя ИЯИ РАН и установки по облучению мишеней

Линейный ускоритель ИЯИ РАН работает в импульсном режиме (частота 50 Гц, длительность импульса 200 мкс, ток в импульсе до 14 мА). Максимальный допустимый средний ток пучка определяется в большинстве случаев устойчивостью мишени. Переход от частоты 50 Гц к частоте до 100 Гц даст возможность увеличить средний ток на мишени на 20–30 %. Система быстрого вращения пучка (sweeping) позволит более равномерно распределить импульсные тепловые и радиационные нагрузки по мишени. Такие системы существуют на других ускорителях. В результате ток можно увеличить ещё примерно в два раза, причём расходы на эксплуатацию возрастут незначительно. Соответственно увеличится объём производства изотопов. Мишенная установка также требует модернизации для улучшения охлаждения облучаемых мишеней. Такую модернизацию можно было бы осуществить в сжатые сроки, за один-два года.

4.2. Разработка новых эффективных технологий и установок для переработки мишеней

ИЯИ РАН разработал ряд методик по радиохимическому выделению радионуклидов из различных мишеней. Установки на основе радиохимических технологий выделения ^{82}Sr и $^{117\text{m}}\text{Sn}$, разработанных ИЯИ РАН с участием ГНЦ–ФЭИ, работают в горячих камерах в г. Обнинске. Переработка мишеней, облучённых на ускорителе ИЯИ РАН, проводится в Обнинске и в других организациях (ЛАНЛ и БНЛ, Российский научный центр "Прикладная химия" в С.-Петербурге, Акционерное общество закрытого типа "Циклотрон" и Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова, Производственное объединение "Маяк" в г. Озёрске Челябинской обл.). Это связано с большими затратами и вызывает значительные трудности. Ещё сложнее организовать новое производство ^{225}Ac и ^{223}Ra , которое требует серьёзных технологических разработок.

В ИЯИ РАН закончен проект сооружения собственной радиохимической лаборатории с горячими камерами — пристройка к действующему зданию 17 с очистными сооружениями. Проект можно реализовать за четыре года, но для этого потребуются значительные средства.

4.3. Создание нового ускорителя с мишенными устройствами

Ускоритель ИЯИ РАН — эффективный инструмент для получения самых различных радионуклидов. Однако это сложная и дорогая установка, которая проектировалась в основном с другой целью — для исследования в области фундаментальной физики. Установки такого типа, кроме того, не могут эксплуатироваться круглогодично и не позволяют обеспечить достаточную регулярность поставок короткоживущих радиоизотопов.

Массовое производство радионуклидов целесообразно осуществлять на специальном ускорителе, вероят-

но, циклотронного типа. Недавно запущенный ускоритель ARRONAX во Франции (70 МэВ, 750 мкА), возможно, на какое-то время покроет потребности в ^{82}Sr , однако энергия частиц слишком низка для того, чтобы получать достаточно большие количества ^{225}Ac и ^{223}Ra (см. рис. 5). Для этого наиболее целесообразным является сооружение нового циклотрона Н⁺ с энергией частиц не менее 120 МэВ, специально ориентированного на производство изотопов. Предполагается, что такой циклотрон будет иметь несколько выводов пучка с общим током около 1 мА. Наиболее рационально установить его в уже существующем здании 25 экспериментального комплекса ИЯИ РАН.

На новом ускорителе можно реализовать новую технологию получения ^{82}Sr из циркулирующего рубидия с прямой сорбцией из жидкого металла. Многие технические устройства для систем с теплоносителем из жидкого натрия, применяемого в реакторах на быстрых нейтронах, уже разработаны в России. В результате можно было бы производить ^{82}Sr в количестве не менее 300 Ки в год, что выше сегодняшнего общего уровня мирового потребления ^{82}Sr . Стремительно увеличивающееся число ПЭТ-установок обеспечит растущий рынок для этого радионуклида. На других выводах пучка циклотрона можно организовать регулярное получение ^{225}Ac , $^{117\text{m}}\text{Sn}$ и других изотопов, а также использовать пучок для протонной терапии. При реализации этой перспективы Россия могла бы стать ведущим производителем многих важнейших радионуклидов, обеспечивающих диагностику и терапию многих сотен тысяч пациентов в год.

Данный проект, включающий в себя модернизацию ускорителя ИЯИ РАН, создание радиохимической лаборатории и производства генераторов, а также сооружение нового мощного циклотрона, успешно прошёл научно-техническую экспертизу в Государственной корпорации "Российская корпорация нанотехнологий" (РОСНАНО)¹, однако средства до сих пор не выделены и дата их получения пока не определена. Существующая система государственного регулирования всё усложняется и затрудняет развитие и внедрение новых технологий.

5. Заключение

На основе собственных научных исследований и технологических разработок в ИЯИ РАН создано производство радионуклидов, которое играет важную роль для ядерной медицины в России и в мире. Для дальнейшего существенного прогресса необходимы модернизация имеющихся и создание новых установок и сооружений, а также развитие новых технологий. Это принципиально увеличило бы возможности ядерной медицины и лечении онкологических заболеваний. Научные и технологические проблемы — вполне решаемые. В проектах такого рода во всём мире всегда большую роль играет государственное финансирование. Однако выделение значительных средств на нужды прогресса в данной области в России весьма проблематично.

¹ 21 марта 2011 г. государственная корпорация РОСНАНО преобразована в открытое акционерное общество РОСНАНО. (Примеч. ред.)

Список литературы

1. Вялов Г Н и др., Препринт № 761/92 (М.: ИЯИ РАН, 1992)
2. Жуйков Б Л и др. *Радиохимия* **36** 499 (1994) [Zhuikov B L et al. *Radiochemistry* **36** 554 (1995)]
3. Zhuikov B L et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **438** 173 (1999)
4. Zhuikov B L et al. *Phys. Rev. C* **68** 054611 (2003)
5. Жуйков Б Л, Ильинов А С *ЯФ* **69** 766 (2006) [Zhuikov B L, Pjijinov A S *Phys. At. Nucl.* **69** 739 (2006)]
6. Белесев А И и др. *ЯФ* **71** 449 (2008) [Belesev A I et al. *Phys. At. Nucl.* **71** 427 (2008)]
7. Барабанов И Р и др. *ЯФ* **73** 1144 (2010) [Barabanov I R et al. *Phys. At. Nucl.* **73** 1106 (2010)]
8. Wilson E *Chem. Eng. News* **76** (15) 13 (1998)
9. Phillips D R et al. *Radiochim. Acta* **88** 149 (2000)
10. Phillips D R, Zhuikov B L, Kolsky K L, in *4th Intern. Conf. on Isotopes, Cape Town, South Africa, 10–14 March, 2002* (Cape Town: NECSA, 2002) p. 32
11. Phillips D R et al., in *7th Intern. Conf. on Advanced Technology and Particle Physics, Villa Olmo, Como, Italy, 2001*, p. 76
12. Жуйков Б Л, Коханюк В М, Винсент Дж С *Радиохимия* **50** 162 (2008) [Zhuikov B L, Kokhanyuk V M, Vincent J S *Radiochemistry* **50** 191 (1995)]
13. Жуйков Б Л, Ермолаев С В, Коханюк В М, Патент РФ № 2356113 (2008); *Бюлл. изобрет.* (14) (2009); Zhuikov B L, Ermolaev S V, Kokhanyuk V M PCT Application RU 2009/000124 (2009)
14. Румянцева М Н и др. *Вест. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия* **42** 348 (2001)
15. Chudakov V M et al. in *5th Intern. Conf. on Isotopes, Brussels, Belgium, 25–29 April, 2005*, p. 9
16. Жуйков Б Л и др., в сб. *Фундаментальные науки — медицине* (М.: Слово, 2007) с. 105
17. Srivastava S C et al. *Clin. Cancer Res.* **4** 61 (1998)
18. Ermolaev S V et al. *J. Labeled Compounds Pharmaceut.* **50** 611 (2007)
19. Жуйков Б Л и др., Патент РФ № 2313838 (2006); *Бюлл. изобрет.* (36) (2007); Zhuikov B L et al., U.S. Patent, Application No. 11/962851 (2007)
20. Серопегин Ю Д, Жуйков Б Л, Сривастава С, Патент РФ № 2403639 (2008); *Бюлл. изобрет.* (31) (2010); Seropegin Yu D, Zhuikov B L, Srivastava S, U.S. Patent, Application No. 12/424944 (2010)
21. Жуйков Б Л и др., Патент РФ № 2393564 (2008); *Бюлл. изобрет.* (18) (2010); Zhuikov B L et al., U.S. Patent, Application No. 12/424992 (2010)
22. Ермолаев С В и др., Патент РФ № 2398296 (2008); *Бюлл. изобрет.* (24) (2010); Ermolaev S V et al., U.S. Patent Application No. 12/425038 (2010)
23. Mulford D A, Scheinberg D A, Jurcic J G *J. Nucl. Med.* **46** 199S (2005)
24. Соболев А С *Успехи биол. химии* **49** 389 (2009)
25. Дубинкин Д О и др., Препринт ФЭИ-2927 (Обнинск: ФЭИ, 2001)
26. Жуйков Б Л и др. *Радиохимия* **53** 66 (2011) [Zhuikov B L et al. *Radiochemistry* **53** 73 (2011)]
27. Жуйков Б Л, Патент РФ № 373589 (2008); *Бюлл. изобрет.* (32) (2009); Zhuikov B L, PCT Application RU 2009/000462 (2009)
28. Петриев В М и др., Патент РФ № 2359702 (2007); *Бюлл. изобрет.* (18) (2009)
29. Краснов Н Н и др., Патент РФ № 2331439 (2008)
30. *Радиоизотопная продукция* (Обнинск: ЗАО "Циклотрон", 2003)
31. Zhuikov B L, Kokhanyuk V M, USA, Patent No. 5987087 (1999)
32. Lobashev V M et al. *Phys. Lett. B* **460** 227 (1999)
33. Zhuikov B L et al. in *VII Int. Workshop on Target and Target Chemistry, Heidelberg, 1997*, p. 210
34. Zhuikov B L *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **263** 63 (2005)

PACS numbers: 32.80.Qk, 32.80.Wr, 42.55.f
DOI: 10.3367/UFNr.0181.2011091.1011

Мощные лазеры на парах щелочных металлов с диодной накачкой*

А.М. Шалагин

1. Введение

В последние годы наметился повышенный интерес к лазерам на парах щелочных металлов с диодной накачкой. Этот интерес, проявляемый со стороны не только научного сообщества, но и военных ведомств, связан с надеждами, которые возлагаются на лазеры такого типа. А именно, есть основания предполагать, что в недалёком будущем такие лазеры окажутся способными генерировать непрерывное оптическое излучение с очень высокой мощностью (порядка 100 кВт и выше) с к.п.д. не менее

* Статья отражает содержание одноимённого доклада А.М. Шалагина на научной сессии Общего собрания Отделения физических наук РАН (13 декабря 2010 г.), посвящённой 50-летию создания лазера, и относится к материалам указанной сессии, основная часть которых была опубликована ранее (см. *УФН* **181** (8) 867–903 (2011)). Задержка публикации статьи А.М. Шалагина связана с её поздним поступлением в редакцию *УФН*. (Примеч. редакции.)

А.М. Шалагин. Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Новосибирск, РФ
E-mail: shalagin@iae.nsk.ru

50 %, являясь при этом достаточно компактными, простыми по конструкции и несложными в эксплуатации.

Физический принцип действия лазеров на парах щелочных металлов очень прост (рис. 1). Излучение накачки резонансно поглощается на переходе из основного состояния атома щелочного металла $ns_{1/2}$ в состояние $nr_{3/2}$ (D_2 -линия); для лития, натрия, калия, рубидия, цезия $n = 2, 3, 4, 5, 6$ соответственно. Одно из принципиально необходимых условий работы лазера — достаточно высокое давление буферного газа. Столкновения с частицами буферного газа вызывают переходы между компонентами тонкой структуры $nr_{3/2}$ и $nr_{1/2}$. Энергетическое расстояние между этими компонентами не очень велико (меньше или примерно равно $k_B T$ — энергии теплового движения), поэтому указанные переходы происходят с достаточно высокой вероятностью. При высоком давлении буферного газа (порядка нескольких сотен миллиметров ртутного столба) между возбуждёнными состояниями $nr_{3/2}$ и $nr_{1/2}$ за время, меньшее времени жизни, успевает установиться равновесное больцмановское распределение. В соответствии с этим распределением заселённость $nr_{1/2}$ оказывается выше заселённости $nr_{3/2}$ на больцмановский фактор $\exp(-\Delta E/k_B T)$, где ΔE — энергетическое расстояние между $nr_{3/2}$ и $nr_{1/2}$. Следует отметить, что даже при высоких давлениях переход с возбуждённых уровней в основное состояние в результате столкновений пренебрежимо мал (во всяком случае, для целого ряда буферных газов, в частности инертных), так что речь здесь идёт о возможности установления больцмановского равновесия для отдельной группы близкорасположенных уровней.