

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВА И РАСПРОСТРАНЕНИЯ КРИПТОНА-85 ОТ ИНДИЙСКИХ И ПАКИСТАНСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

З. Миан, А.Х. Найяр

Переработка отработанного топлива из ядерных реакторов для получения плутония сопровождается выделением криптона-85 (^{85}Kr) – продукта деления. Слежение за ^{85}Kr может составить часть режима верификации предлагаемого договора по прекращению производства делящихся материалов и, в частности, моратория на переработку ядерного топлива для получения оружейного гражданского плутония. Проведены оценки образования плутония и ^{85}Kr в отработанном топливе индийских промышленных реакторов «Сайрус» и «Друва» и пакистанского реактора в Хушабе, а также выделения ^{85}Kr при последующей переработке на индийском заводе в Тромбее и пакистанском предприятии в Нилоре. Кроме того, изучалась переработка отработанного ядерного топлива на индийских предприятиях в Тарапуре и Калпаккаме, поскольку Индия, как сообщалось, провела испытание ядерного оружия в мае 1998 г. с использованием плутония, не имевшего оружейного качества.

Распространение криптона при перерабатывающей деятельности в Южной Азии моделировалось как на основе простой гауссовой модели облака, так и при помощи более сложной программы, доступной для загрузки и работы по Интернету. Речь идет о программе HYSPLIT-4 (рассматривающей уравнения движения единичной частицы), разработанной в лаборатории воздушных масс NOAA (США) и в австралийском Бюро метеорологии.

Предварительные результаты дают основание считать, что окажется трудным обнаружить выделение криптона в результате перерабатывающей деятельности в Индии и Пакистане, относящейся к ядерному оружию, на расстояниях, превышающих сотню километров, если рассматривать типичные атмосферные условия. Окажется затрудненной также взаимная и независимая верификация моратория на переработку гражданского и оружейного плутония.

Возможное продвижение вперед связано с утверждениями, что США могли следить за выделением криптона-85 от пакистанской перерабатывающей установки в Нилоре. Представленные в статье результаты, как кажется, поддерживают возможность, того, что можно было бы использовать американское посольство в качестве станции по сбору образцов воздуха в рамках давно существующей американской программой «Синий нос» для слежения за выделением криптона, связанного с операциями по переработке. Аналогичный подход можно было бы применить к индийско-пакистанскому мораторию. Для этого Индия должна получить разрешение на использование своего посольства в Исламабаде в качестве станции слежения и разрешить Пакистану открыть консульство в Мамбае (которое будет иметь возможность обнаруживать выделения газов от переработки в Тромбее и Тарапуре), а также консульство в Мадрасе для обнаружения возможной деятельности по переработке в Калпаккаме.

Статья получена редакцией 30 января 2002 г. и принята к публикации 30 апреля 2002 г.

З. Миан работает по программе «Наука и всеобщая безопасность» в Школе по общественным и международным проблемам имени Вудро Вилсона. Почтовый адрес: 221 Nassau St., Princeton University, Princeton, NJ 08562, USA. Электронный адрес: zia@princeton.edu.

А.Х. Найяр работает в Отделении физики университета Квайд-и-Азам в Исламабаде. Сейчас он гостит в Школе по общественным и международным проблемам имени Вудро Вилсона по программе «Наука и всеобщая безопасность». Электронный адрес: nayyar@princeton.edu.

ВВЕДЕНИЕ

Рассчитанное на длительный срок предложение о ядерном разоружении заключалось в постоянном запрете производства плутония (в качестве составной части более широкого соглашения о прекращении производства делящихся материалов).¹ Создав большие запасы для своих ядерных арсеналов, основные державы, владеющие ядерным оружием (США, Россия, Китай, Франция и Великобритания), прекратили или отложили производство высокообогащенного урана и плутония для ядерного оружия. Но Израиль, Индия и Пакистан продолжают наращивать свои относительно небольшие запасы делящихся материалов. В частности, похоже, что Индия и Пакистан намерены расширять свои возможности для производства делящихся материалов. Соглашение между Индией и Пакистаном о запрещении дальнейшего производства делящихся материалов будет означать значительный вклад в возможности этих стран ограничить гонку ядерных вооружений и окажется важным шагом к ядерному разоружению.

Верификации такого запрета может помочь мониторинг атмосферного ⁸⁵Kr. Это радиоактивный благородный газ, образованный в качестве продукта деления в ядерных реакторах и выделившийся в виде отходов при переработке отработанного ядерного топлива для получения плутония.² Важность обнаружения деятельности по переработке была признана в секретной американской программе «Операция Синий нос», которую начали в конце 40-х гг., чтобы попытаться проследить за производством плутония в других странах на основе наблюдения за выделившимися газообразными продуктами деления и особенно за ⁸⁵Kr. Для этого использовались заборы образцов воздуха самолетами по всему миру, а также глобальная наземная сеть датчиков, куда входили и американские посольства, оборудованные приборами для регистрации ⁸⁵Kr.³ Скорее всего, результаты использовались для создания детальных еженедельных карт глобального распределения ⁸⁵Kr.

Индия поддерживает обширную программу переработки ядерного топлива на соответствующих заводах в Тромбее и Тарапуре и на новом крупном предприятии в Калпаккаме. Отработанное топливо от двух индийских промышленных реакторов для производства плутония («Сайрус» и «Друва») используется для получения ядерного оружия (намечается создание третьего промышленного реактора), а отработанное топливо от 14 энергетических реакторов, как считается, направляется на программу реактора-размножителя на быстрых нейтронах. (В качестве топлива в нем используется смесь урана и плутония. Конечная задача заключается в воспроизводстве большего количества плутония по сравнению с потребленным. Более удаленная задача этой программы связана с помещением в подобные реакторы

¹ Идея была предложена на рассмотрение Фрэнком фон Хиппелем и мы благодарны ему и Мартину Калиновскому за помощь в данной работе. Ядерное оружие использует в качестве делящихся материалов либо высокообогащенный уран, либо плутоний. Критическая масса плутония примерно в пять раз меньше по сравнению с высокообогащенным ураном, что делает его более предпочтительным для небольших и легких боеголовок, какие гораздо легче подогнать к баллистическим ракетам. Запрет на производство плутония и высокообогащенного урана ограничит потенциальный размер ядерных арсеналов.

² F.von Hippel, D.Albright, B.G.Levi, *Quantities of Fissile Materials in U.S. and Soviet Nuclear Weapon Arsenals* Report No.168 (Princeton, N.J: Princeton University Center for Energy and Environmental Studies, July 1986); F.von Hippel, D.A.Albright, B.G.Levi, "Stopping the Production of Fissile Materials for Weapons," *Scientific American* (September 1985), 40-47; B.G.Levi, F.von Hippel, "Controlling Nuclear Weapons at the Source: Verification of a Cutoff in the Production of Plutonium and High-Enriched Uranium for Nuclear Weapons", *Verification of Arms Control: The Technologies that Make it Possible*, eds. K.Tsipis, D.A.Hafmeister, P.Janeway (Washington: Pergamon-Brassey's, 1986), 338-388; Martin Kalinowski, "Measurements and Modelling of Atmospheric Krypton-85 as Indicator for Plutonium Separation," eds. C.Foggi, G.Genoni, *Proceedings of the Workshop on the Status of Measurement Techniques for the Identification of Nuclear Signatures* (Geel, Belgium EUR 17312 EN, 25-27 February, 1997), 67-72; <http://www.ianus.tudarmstadt.de/ianus/Publikationen/Kalinowski/Kr-geel/kr-geel.tud>.

³ Environmental Defense Institute, *INEEL NEWS*, vol.8, no.5 (August 1997); Chuck Broschius, Executive Director, EDI, August 2000, частное сообщение.

ториевых blankets для воспроизводства урана-233, чтобы в конечном итоге перейти на топливный цикл со смесью тория-232 и урана-233 в тепловых реакторах.)⁴ Существует выделение ⁸⁵Kr, связанное с деятельностью по переработке.

Пакистан традиционно полагается на обогащение урана, чтобы производить материал для своего ядерного оружия.⁵ Но 16 марта 2000 г. агентство CBS News сообщило следующее: «Проверка полученных недавно образцов воздуха показала, что Пакистан начал переработку топливных стержней.... в плутоний оружейного качества. Образцы воздуха, взятые секретно в Пакистане, содержат следы газа, называемого криптон-85, что для ученых служит несомненным доказательством переработки плутония.»⁶ Утверждение, что Пакистан начал переработку отработанного топлива на своем предприятии «Новая лаборатория» для выделения плутония совпадает с сообщениями о запуске в 1998 г. промышленного реактора для производства плутония в Хушабе. Это предоставляет для Пакистана неконтролируемый источник отработанного топлива. (Другой пакистанский реактор – энергетический ядерный центр в Карачи, находится под гарантиями МАГАТЭ, а его отработанное топливо контролируется.) Первая партия свежего отработанного топлива из Хушаба могла проходить охлаждение в течение 1999 г. и затем поступить на переработку в 2000 г.

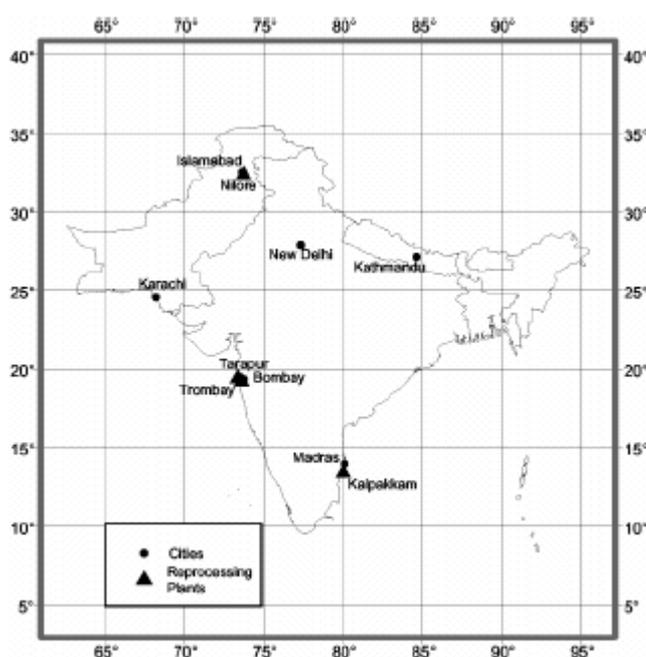


Рис.1: Контурная карта Индии и Пакистана с указанием положения заводов по переработке. Кружками отмечены города, а треугольниками – перерабатывающие заводы.

Запрет на производство делящихся материалов в Южной Азии должен будет содержать прекращение обогащения урана и переработки отработанного топлива для получения плутония наряду с соответствующими процедурами верификации. В данной статье приведено краткое описание производства плутония и даны оценки производства и выделения ⁸⁵Kr в ходе перерабатывающей деятельности в Индии и Пакистане. (На рис.1 показано расположение связанных с ними предприятий.) Затем для оценки распространения и возможности обнаружения выделившегося криптона от предприятий по переработке в двух этих странах мы применяем как модель гауссова облака так и программу NOAA HYSPLIT-4. Но в статье не обсуждается важный вопрос, как отслеживать прекращение обогащения урана.

⁴ R.Chidambaram, C.Ganguly, "Plutonium and Thorium in the Indian Nuclear Programme," *Current Science*, vol.70, no.1 (January 10, 1996), 21-35.

⁵ Пакистанская программа обогащения описана в работе David Albright, Frans Berkhout, William Walker, *Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996* (Oxford: Oxford University Press, 1997), 271-279.

⁶ "Pakistan is Reprocessing Fuel Rods to Create Plutonium Nuclear Weapons," CBS News Transcripts (6:30 PM ET), March 16, 2000.

ПРОИЗВОДСТВО И ВЫДЕЛЕНИЕ КРИПТОНА-85

Содержание криптона в атмосфере составляет 1.14 миллионных долей (по объему). Естественный криптон состоит из смеси шести устойчивых изотопов: криптон-84 (57%), криптон-86 (17.3%), криптон-82 (11.6%), криптон-83 (11.5%), криптон-80 (2.25%) и криптон-78 (0.35%). Атмосферный криптон содержит также радиоактивный ^{85}Kr , который в основном связан с перерабатывающей деятельностью в США и бывшем СССР за последние примерно 60 лет.⁷ После завершения переработки его содержание будет уменьшаться со временем, поскольку период полураспада равен 10.76 годам (распад сопровождается испусканием бета-частиц и гамма-квантов). Небольшая часть ^{85}Kr в атмосфере образуется при захвате нейтронов ядрами криптона-84; кроме того, распад урана и тория в породах также сопровождается выделением ^{85}Kr . Несколько более значительное содержание криптона-85 является отражением проведенных ядерных испытаний, а выделение из ядерных реакторов дает только около 1% общего содержания.

^{85}Kr – это радиоактивный благородный газ, образующийся в качестве продукта деления в ядерных реакторах.⁸ Такой ^{85}Kr в основном удерживается внутри стержней с отработанным топливом наряду с другими продуктами деления. До начала переработки отработанное топливо охлаждается в бассейнах, чтобы понизить активность от коротко живущих продуктов деления. Минимальные сроки охлаждения на американском перерабатывающем заводе в Хэнфорде (штат Вашингтон), который проработал с 1945 г. по 1989 г. и был окончательно закрыт в 1992 г., составляли 200 дней для топлива на естественном уране с максимальным уровнем выгорания 1500 МВт-день на тонну тяжелого металла. В то же время, образцы топлива, с самого начала обогащенного ураном-235 и прошедшего переработку на других предприятиях, с гораздо более высокими уровнями выгорания имели более короткие сроки охлаждения – порядка 120-160 дней.⁹ На французских перерабатывающих заводах в Маркуле и Ла Хаге и на английском заводе в Селлафилде минимальные сроки охлаждения для топлива из естественного урана составляли 120-140 дней.¹⁰ Поскольку период полураспада ^{85}Kr равен 10.76 лет, за такие сроки охлаждения распадется только небольшая часть этого изотопа.

Переработка – это комплексный и опасный процесс (как с механической, так и с химической точек зрения) выделения плутония из отработанного ядерного топлива. Проблемы связаны с высоким уровнем радиоактивности оставшихся коротко живущих продуктов деления в отработанном топливе (даже после охлаждения в течение года) и с применением азотной кислоты в процессе PUREX, который теперь является стандартным для извлечения плутония (и урана) из решетки топлива. В ходе процесса образуются большие количества жидких отходов, обладающих высоким уровнем радиоактивности.¹¹ Эта радиоактивность и коррозия материалов, включенных в процесс переработки, приводят к серьезным требованиям на техническое обслуживание завода. В результате, типичный перерабатывающий завод может

⁷ von Hippel et.al., *Quantities of Fissile Materials* - смотрите [2].

⁸ L.Koch, H.Braun, A.Cricchio, "Some Correlations Between Isotopes of Xe, Kr, U, Pu, and Burnup Parameters for Various Thermal and Fast Reactors," *Proceedings of the Symposium on Progress in Safeguards Techniques*, Karlsruhe, West Germany (Vienna, International Atomic Energy Agency, IAEA-SM-133/25, 1970), 539; N.Larsen, H.Egsgaard, M.Mogsensen, "Mass Spectrometric Measurements of Fission Gas from Nuclear Fuel," *International Journal of Mass Spectroscopy and Ion Physics* 48 (1983), 385-388; M.Ohkubo, "Gaseous Isotope Correlation Technique for Safeguard at Reprocessing Facilities," IAEA-STR-240 (Vienna, International Atomic Energy Agency, 1988); G.B.Hudson, "Noble Gas Isotope Measurements for Spent Nuclear Fuel Reprocessing: IAEA Task 90/0A211 Interim Report," UCRL-ID-118658, Lawrence Livermore National Laboratory, 1993.

⁹ Manson Benedict, Thomas H.Pigford, Hans Wolfgang Levi, *Nuclear Chemical Engineering* (New York: McGraw-Hill, 1981), 469.

¹⁰ Там же, стр.472.

¹¹ Смотрите там же (стр.457-564) подробности о переработке и о процессе PUREX.

фактически работать только 150-200 дней в году.¹²

В первых американских реакторах по производству плутония применялось топливо из металлического урана, помещенного в алюминиевую оболочку. Как полагают, то же самое используется на реакторах «Сайрус» и «Друва» и на реакторе в Хушабе. Чтобы выделить уран для переработки, топливный стержень разрезался на куски длиной несколько см и помещался затем для растворения алюминия в горячий водный раствор едкого натрия (который не действует на металлический уран).¹³ На некоторых заводах по переработке применяется механическое удаление алюминиевого слоя до начала растворения (процесс занимает около 45 минут).¹⁴

В процессе химического или механического удаления алюминиевой оболочки освобождаются около 10% радиоактивного криптона, а также некоторые летучие продукты деления.¹⁵ Основная часть ⁸⁵Kr (90%) выделяется при последующем растворении небольших кусков очищенных топливных стержней в горячей азотной кислоте.¹⁶ Растворение должно происходить в баках малого диаметра, сделанных из материала, который устойчив к коррозии, и содержащих поглотители нейтронов (например, бор или гадолиний), чтобы избежать критичности.¹⁷ Полное время нахождения в растворителе может быть порядка четырех часов.¹⁸ Сообщается, что при производительности 0.17 тонны тяжелого металла в день (то есть, массы урана, плутония и продуктов реакции в переработанном за день отработанном топливе) на пробном коммерческом перерабатывающем заводе в Карлсруэ (Германия) обработка кислотой обычно продолжается 5-8 часов, а криптон выделяется выбросами продолжительностью около 5.5 часов.¹⁹ Впрочем, время растворения зависит от природы топлива и степени его выгорания, причем металлический уран обычно требует меньших сроков, нежели топливо в виде оксида, которое обычно применяется в энергетических реакторах. В любом случае, разумно предположить, что практически весь оставшийся криптон выделится на этом этапе. Поскольку криптон – это благородный газ, его трудно захватить, и большая часть ⁸⁵Kr выделится в виде продуктов выброса через вытяжные трубы заводского комплекса.²⁰

¹² Смотрите стр.156 в работе Albright et al., *Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996*, [5].

¹³ Смотрите стр.471 в работе [9].

¹⁴ Martin Kalinowski, Harmut Sartorius, Stefan Uhl, Wolfgang Weiss, "Drawing Conclusions on Separation of Plutonium by Evaluating Measurements of Atmospheric Krypton-85 in Weekly samples at Various Distances from the Karlsruhe Reprocessing Plant," неопубликованная работа, 1998 г.

¹⁵ Смотрите стр.466 в работе [9].

¹⁶ На французском коммерческом перерабатывающем заводе в Ла Хаге топливные стержни нарезаются на куски длиной 35 мм и опускаются во вращающиеся отсеки, заполненные азотной кислотой; процесс нарезки длится 10 минут и еще 20 минут нужны для измерения критичности отсека. Растворение в отсеке продолжается два часа – за время нарезки выделяется меньше 30% криптона, а остальной криптон выделяется в течение нескольких первых минут растворения. Roger Zwaenepoel, Pierre Van den Winkel, Guy De Backer, Gilbert Eggermont, "The Emission of Krypton-85 During Reprocessing Of Nuclear Fuel," *⁸⁵Krypton-Proceedings of a Workshop in SCK-CEN Brussels, October 19, 1998*, 67-78.

¹⁷ Эти баки обычно могут содержать, по крайней мере, 2% бора в стенках и иметь максимальный диаметр 17.5 см при цилиндрической форме и максимальную ширину 7.5 см для плоского бака. Office of Export Control and International Safeguards, U.S. Department of Energy, *Spent Nuclear Fuel Reprocessing and Preparation of Plutonium Metal* (Washington D.C.: U.S. GPO, K/NSP-153, October 1993), 57. Американское ядерное общество определило национальный стандарт для плутония-239 в виде предела подкритичности водного раствора плутония (0.51 кг). Детали приведены на стр.549 работы [9].

¹⁸ Смотрите стр.43 предыдущей работы *Spent Nuclear Fuel Reprocessing* [17].

¹⁹ Смотрите работу [14].

²⁰ Можно удерживать криптон из газов, выделяемых при переработке. Были проведены пробные опыты, где помимо других методик применялись криогенная дистилляция и адсорбция в растворах, содержащих галогены. Смотрите стр.481-484 работы [9], а также W.Hebel, G.Cottone, eds., *Methods of Krypton Management* (Harwood: Taylor & Francis, 1983). Но пока что, как утверждают операторы перерабатывающих заводов, нет доказанных круп-

ОБНАРУЖЕНИЕ КРИПТОНА

Существует несколько методик, применяемых для измерения содержания ^{85}Kr в воздухе. Обычно в них используются собранные образцы воздуха объемом в несколько кубометров. Криптон изолируется при помощи криогеники и поглощается хроматографическими колонками, где бета-активность ^{85}Kr в очищенном криптоновом газе измеряется сцинтилляционными счетчиками.²¹ Было показано, что можно собрать и хранить криптон после его отделения с эффективностью около 80%, если пропускать газ через охлажденную металлическую сетку, на которую наносится молекулярное сито, служащее барьером для молекул воздуха. Это позволяет собирать образцы воздуха, отделять и хранить криптон, а затем рассылать образцы криптона в другие места для анализа.

Следствием разнообразия методик по сбору и измерению криптона оказывается некий диапазон погрешностей. Они связаны главным образом с неопределенностями измерений массы выделенного криптона (она находится, например, по измерению его температуры и давления в заданном объеме) и скорости счета распадов ^{85}Kr , которые обычно не превышают 10%.²² Неопределенность становится меньше при увеличении массы образца и более высокой скорости счета.

Тем не менее, фон криптона и его избыток сейчас могут быть определены с хорошей точностью во многих местах. Например, в недавнем исследовании по надежности мониторинга ^{85}Kr сравнивались измерения атмосферного ^{85}Kr с данными по фактическому его выделению на перерабатывающем заводе в Карлсруэ (Германия). Было обнаружено, что фон ^{85}Kr составляет 1.1 Бк.м^{-3} (30 пКи.м^{-3}) при ошибке измерения порядка 3%, то есть примерно 1 пКи.м^{-3} .²³ Это соответствует $7.46 \cdot 10^8$ атомам криптона-85 в кубическом метре. Измерения ^{85}Kr с 1979 г. по 1998 г. в Генте (Бельгия), который часто оказывается под воздействием ветров от французских и английских коммерческих перерабатывающих заводов, показали пик наличия ^{85}Kr (39 Бк.м^{-3}) в 1998 г., а значения фона (в октябре 1998 г.) оказались равными 1.34 Бк.м^{-3} при точности измерений 2-3%.²⁴

Современное значение фона ^{85}Kr наиболее значительно изменяется в зависимости от близости к перерабатывающим предприятиям, широты и долготы, высоты и глобальных атмосферных процессов перемешивания. Оказалось возможным создать хорошие тропосферные модели подобия.²⁵ Но в первом приближении разумно предположить, что фон ^{85}Kr постоянен над большей частью Северного полушария и его временные изменения малы (по крайней мере, в районах, далеко удаленных от очень крупных перерабатывающих предприятий).²⁶ Считается, что концентрация ^{85}Kr в облаке от перерабатывающего завода, примерно в два раза превышающая ошибку измерений криптонового фона (то есть, выше 2 пКи.м^{-3}),

номасштабных методов удаления благородных газов: P.I.Hudson, C.P.Buckley, W.W.Miller, "The Development And Design Of The Off-Gas Treatment System For The Thermal Oxide Reprocessing Plant (Thorp) at Sellafield," 23rd DOE/NRC Nuclear Air Cleaning And Treatment Conference, New York, 1994. Случай с THORP особенно показателен, так как в 1977 г. по решению о создании этого предприятия компании British Nuclear Fuels (BNFL) было предписано захватывать весь криптон-85, выходящий с предприятия. Компании было предложено искать методы захватывания криптона и ежегодно сообщать об успехах. До начала 2001 г. не было ни одного сообщения об успехе. Смотрите статью Paul Brown, "BNFL defies Krypton Ruling," *The Guardian*, January 22, 2001.

²¹ W.Weiss, H.Sartorius, H.Stockburger, in *Isotopes of Noble Gases as Tracers in Environmental Studies* (Vienna: International Atomic Energy Agency, 1992).

²² В работе [21] сообщается, что при измерениях обычно достигается точность 1 %.

²³ Смотрите работу [14].

²⁴ Jozef Buysse, Gilbert Eggermont, "Atmospheric Krypton-85 Concentration Measurements at the University of Gent". Смотрите стр.19-30 материалов конференции [16].

²⁵ P.H.Zimmerman, J.Feitcher, H.K.Rath, P.J.Crutzen, W.Weiss, "A Global Three-Dimensional Source Receptor Model Investigation Using Kr," *Atmospheric Environment*, vol.23, no.1 (1989), 23-35.

²⁶ "Global Distribution of Atmospheric ^{85}Kr : A Database for the Verification of Transport and Mixing Models". Смотрите стр.29-62 работы [21].

будет надежно обнаружена и послужит допустимым индикатором перерабатывающей деятельности.

Криптон – это не единственный выделяемый в атмосферу при переработке продукт деления, который обнаруживается на больших расстояниях. Следы йода-129, выделенного перерабатывающими заводами в Ла Хаге и Селлафилде в основном в виде йодистого метила, были обнаружены в дождевой воде (обычно порядка 10^7 атомов I^{129} на литр), а также во мху и лишайниках на территории США.²⁷ Йод обнаружили также в осадках (дождь и снег) на уровне в 10-20 раз выше в Швеции.²⁸ Хотя гораздо больше зависит от атмосферных условий, йод-129 может оказаться независимой проверкой заключений о наличии и источниках перерабатывающей деятельности.

Стабильные газообразные изотопы криптона и ксенона также выделяются из топливных блоков на перерабатывающих заводах. Было предложено измерять соотношение стабильных изотопов в образцах, взятых прямо в топливном блоке, причем точность кажется достаточной, чтобы отождествить степень выгорания и тип топлива, подвергающегося переработке. Иными словами, можно отличить топливо энергетического реактора, прошедшего значительное выгорание, от топлива плутониевого реактора, испытавшего более низкое выгорание.²⁹ Такой очень интрузивный режим взятия образцов, возможно, окажется частью строгих проверок, сопровождающих международное соглашение, которое запрещает только переработку для получения плутония оружейного качества. Но останется проблема мер предосторожности, направленных против возможного применения плутония, который не имеет оружейного качества, для создания ядерного оружия.

ПРОИЗВОДСТВО ПЛУТОНИЯ И ^{85}KR В ИНДИИ

Индия обладает крупным атомно-энергетическим комплексом и меньшим по размеру комплексом, связанным с предыдущим и посвященным ядерному оружию. В настоящее время работают 14 энергетических реакторов с общей номинальной электрической мощностью около 2.7 ГВт, хотя количество реакторов, работающих на предельной мощности, уменьшается.³⁰ У Индии имеются два промышленных плутониевых реактора «Сайрус» и «Друва» и четыре совсем небольших энергетических исследовательских реактора: «Апсара», «Зерлина», «Пурнима-1» и «Пурнима-2». Индия владеет также испытательным реактором-размножителем с тепловой мощностью 40 МВт, топливом для которого служит смесь карбидов плутония и урана. Плутониевое топливо для этого реактора и для планируемого прототипа реактора-размножителя с электрической мощностью 500 МВт создается при переработке отработанного топлива от энергетических реакторов. Плутоний для индийского ядерного арсенала берется от двух промышленных реакторов.

«Сайрус». Реактор «Сайрус», который поначалу назывался канадско-индийским реактором (CIR), расположен в атомном исследовательском центре имени Баба в Тромбее – пригороде Мамбая (бывшего Бомбея). Он спроектирован и изготовлен в Канаде (является аналогом канадского реактора NRX), имеет тепловую мощность 40 МВт и предназначен для получения плутония. Хотя «Сайрус» запустили в 1960 г., мощность достигла проектного значе-

²⁷ Jean E.Moran, S.Oktay, Peter H.Santshi, David R.Shink, "Atmospheric Dispersal of ^{129}I from Nuclear Fuel Reprocessing Facilities," *Environmental Science and Technology*, vol.33, no.15 (1999). 2536-2542.

²⁸ Nadia Buraglio, Ada Aldahan, Goran Possnert, Ingemar Vinterved, " ^{129}I from Nuclear Reprocessing Facilities Traced in Precipitation and Runoff in Northern Europe," *Environmental Science and Technology*, vol.35, no.8 (2001), 1579-1586.

²⁹ Чарльз У. Наклех, Уильям Д.Стэндрбо, Луис Н.Хэнд, Р.Т.Перри, Уильям Б.Уилсон, Брайан Л.Фири, «Мониторинг инертных газов в атмосфере для международных гарантий на предприятиях по переработке», *Наука и всеобщая безопасность*, т.6, вып.3 (август 1997 г.).

³⁰ В Тарапуре (штат Махараштра) находятся два реактора на кипящей воде. Остальные двенадцать – это реакторы типа КАНДУ на тяжелой воде под давлением. Четыре из них находятся в Раватбхате (Раджастхан) и по два в Калпаккаме (Тамилнад), Нароре (Уттар-Прадеш), Какрапаре (Гуджарат) и Кайге (Карнатака). Планируется построить еще два реактора в Тарапуре. Индия ведет переговоры о закупке двух российских реакторов типа ВВЭР по 1000 МВт (электр.) у каждого.

ния в 1963 г. Топливом служит естественный металлический уран, а замедление производится тяжелой водой (но охлаждение ведется легкой водой).³¹ Произведенный на реакторе «Сайрус» плутоний оружейного качества был использован для первого индийского ядерного взрыва в мае 1974 г. Для последующих оценок сделаем разумные предположения, что скважность работы предприятия составляет примерно 70%, а уровень выгорания соответствует оптимуму для получения плутония оружейного качества (то есть, плутония-239), равному около 1000 МВт-день/гТМ. Тогда стандартный выход плутония составит 0.9 г на МВт(тепл)-день, то есть «Сайрус» может произвести около 9 кг плутония оружейного качества в год.

«Друва». Второе индийское предприятие, где производится плутоний для ядерного оружия, - это реактор «Друва» с тепловой мощностью 100 МВт, который также расположен в Центре Баба и использует в качестве топлива естественный металлический уран, помещенный в алюминиевые оболочки, причем как охлаждение, так и замедление производится тяжелой водой.³² Он работает с августа 1985 г.³³ Вскоре после пуска реактор был закрыт на год из-за проблем с вибрациями, связанными с конструкцией топлива, и возобновил операции на низкой мощности в октябре 1986 г.³⁴ Почти немедленно реактор снова был остановлен до декабря 1986 г. для дальнейших изменений в конструкции топлива. Появились сообщения о других препятствиях для работы реактора на проектной мощности.³⁵ Только после января 1988 г. реактор «Друва» смог, судя по сообщениям, работать на полной мощности.³⁶ При 70%-ной скважности реактор будет производить около 21 кг оружейного плутония в год.³⁷

Общее производство плутония на предприятиях Центра Баба в Тромбее может составить около 30 кг в год, если предположить разумные значения скважности промышленных реакторов. Этого может оказаться достаточным, чтобы ежегодно увеличить арсенал индийского ядерного оружия на несколько единиц (использующих плутоний оружейного качества).³⁸ Были объявлены планы создания нового реактора типа «Друва» (скорее всего также в Центре Баба) к 2010 г.³⁹ Это почти удвоит индийские мощности по производству оружейного плутония.

Переработка в Индии. В Индии работают три перерабатывающих завода в Тромбее, Тарапуре и Калпаккаме. Перерабатывающий завод в Тромбее, построенный в 60-х гг., явно предназначен для отработанного топлива от двух плутониевых промышленных реакторов, находящихся на этой же площадке, то есть он применяется для выделения плутония оружейного качества. Его начальная проектная мощность составляет 0.1-0.5 тонн тяжелого металла в день, или около 30 тонн тяжелого металла в год (это сравнимо по величине с заводом в Карлсруэ, Германия).⁴⁰ Завод был закрыт с 1974 г. по 1983-84 гг. для очистки и перестройки, так что теперь он обладает производительностью 50 тонн тяжелого металла в год, а это значительно выше того, что нужно для двух промышленных реакторов, находящихся

³¹ Детали смотрите на интернетовской странице Центра Баба по атомным исследованиям, <http://www.barc.ernet.in>.

³² Там же.

³³ Vyvyan Tenorio, "India's Plutonium Production Ability to Soar with Unsafeguarded Reactor," *Nucleonics Week*, vol.26, no.22 (August 15, 1985), 1.

³⁴ Vyvyan Tenorio, "Fueling Snafu Keeps MAPS-2 Off-line But Dhruva Reported Running," *Nucleonics Week*, vol.27, no.45 (November 6, 1986), 7.

³⁵ Brahma Chellaney, "Indians Scientists Exploring U Enrichment, Advanced Technologies," *Nucleonics Week*, vol.28, no.10 (March 5, 1987), 9.

³⁶ Sheila Tefft, "Dhruva Reaches Full Power, But High Costs and Delays are Criticised," *Nucleonics Week*, vol.29, no.19 (May 12, 1988), 13.

³⁷ При скважности 50-80% на реакторе «Друва» можно получать ежегодно 16-26 кг плутония оружейного качества. Смотрите также стр. 266 работы [5].

³⁸ Обычно считается, что простое ядерное оружие первого поколения содержит около 5 кг плутония.

³⁹ "BARC Planning New Dhruva Type Reactor," *The Hindustan Times*, April 28, 1999.

⁴⁰ Сообщение Федерации американских ученых (ФАУ): <http://www.fas.org/nuke/guide/india/facility/trombay.htm>.

на этой же площадке.⁴¹ Эта избыточная производительность может быть использована, чтобы соответствовать отработанному топливу от предполагаемого промышленного реактора «Друва-2», упомянутого ранее.

Перерабатывающий завод для энергетических реакторов в Тарапуре (примерно в 200 км выше по побережью от Мамбая) был завершён в 1975 г. и начал работу в 1982 г.⁴² Его проектная производительность составила 150 тонн тяжелого металла в год, а каждая перерабатывающая кампания продолжается «от 6-8 месяцев до примерно года».⁴³ Завод использовался для переработки отработанного топлива от реакторов типа КАНДУ «Раджастан-1,2» и «Мадрас-1,2» (в Тамил Наду).⁴⁴

Третий и самый крупный индийский завод по переработке – это новый завод в Калпаккаме, находящийся примерно в 80 км к югу от Ченная (бывшего Мадраса). Утверждается, что на нем расположены две производственные линии, причем производительность каждой составляет 100 тонн тяжелого металла в год, но ее можно увеличить до 125 тонн тяжелого металла в год. Две эти линии не будут работать параллельно: предполагается, что первая проработает 7-8 лет, а затем будет выведена из эксплуатации, после чего в действие вступит вторая линия.⁴⁵ Завод начал работу в 1998 г. и, если судить по отчетам, «работал удовлетворительно» в 1999 г. и 2000 г.⁴⁶ Предполагается, что на нем перерабатывается топливо энергетических реакторов для отделения плутония, который пойдет на программу индийского реактора-размножителя на быстрых нейтронах. Поскольку считается, что заводы в Тарапуре и Калпаккаме применяются для переработки топлива от энергетических реакторов, связанное с этими заводами выделение ⁸⁵Kr будет рассмотрено отдельно от завода в Тромбее.

Имеется еще одно предприятие для переработки – лаборатория в Калпаккаме, занятая получением урана-233 из ториевого топлива.⁴⁷ В дальнейшем оно не рассматривается.

Выделение криптона на заводе в Тромбее. Запасы ⁸⁵Kr в свежем отработанном топливе от реакторов «Сайрус» и «Друва» можно оценить при помощи двух простых эмпирических соотношений:⁴⁸

1. При делении одного грамма урана-235 образуется 0.405 Ки ⁸⁵Kr; при делении одного грамма плутония-239 – 0.177 Ки ⁸⁵Kr.
2. В промышленном плутониевом реакторе на каждый грамм оружейного плутония в отработанном топливе делятся 1.09 г урана-235 и 0.12 г плутония-239.

Производство оружейного плутония в реакторах типа КАНДУ может на несколько процентов превышать соответствующие показатели американских промышленных плутониевых реакторов в Хэнфорде (графитовый замедлитель, водяное охлаждение) и Саванна Ривер (замедлитель – тяжелая вода). Второе из приведенных выше соотношений взято из данных по реакторам в Саванна Ривер.⁴⁹ Тем не менее, указанные правила приводят к консервативной (заниженной) оценке наличия ⁸⁵Kr в отработанном топливе индийских промышленных плутониевых реакторов: 0.46 Ки на грамм оружейного плутония.

Если принять совместное производство плутония оружейного качества на реакторах «Сайрус» и «Друва» равным 30 кг в год, то это приводит к 13800 Ки ⁸⁵Kr в ежегодном выбросе свежего отработанного топлива. Если топливо охлаждается в течение года перед переработкой (это консервативное предположение), то около 6% этого криптона распадется (на

⁴¹ Смотрите стр.267 в работе [5].

⁴² Сообщение ФАУ: <http://www.fas.org/nuke/guide/india/facility/tarapur.htm>.

⁴³ Mark Hibbs, "Prefre Plant Used Sparingly, Barc Reprocessing Director Says," *Nuclear Fuel*, vol.17, no.7 (March 30, 1992), 8.

⁴⁴ То же самое.

⁴⁵ Mark Hibbs, "First Separation Line at Kalpakkam Stated to Begin Operations Ne[t Year]," *Nuclear Fuel*, vol.22, no.24 (December 1, 1997), 8.

⁴⁶ Ежегодные отчеты управления по атомной энергии правительства Индии за 1999-2000 гг (<http://www.dae.gov.in/areport/ar9900.htm>.) и за 2000-2001 гг. (<http://www.dae.gov.in/ar2001/bark.htm>).

⁴⁷ Mark Hibbs, "Indian Reprocessing Program Grows, Increasing Stock of Unsafeguarded Pu," *Nuclear Fuel*, vol.15, no.21 (October 15, 1990), 5.

⁴⁸ von Hippel et al., *Quantities of Fissile Materials* [2], Table 5-1, p.V-12.

⁴⁹ Там же, p.III.1

поминаем, что период полураспада ^{85}Kr составляет 10.76 лет).

При допущении, что завод в Тромбее работает 200 дней в году, а выделение криптона происходит в течение пяти часов каждого из этих дней, получим скорость выделения ^{85}Kr от перерабатывающего завода в Тромбее, равную 13 Ки в час, или 3.6 мКи/с.

ПРОИЗВОДСТВО ПЛУТОНИЯ И ^{85}KR В ПАКИСТАНЕ

Пакистан владеет значительно меньшим ядерным комплексом по сравнению с Индией. У него два энергетических реактора: первый сконструирован в Канаде 30 лет тому назад и построен на заводе ядерной энергетики в Карачи (это реактор на тяжелой воде под давлением при электрической мощности 125 МВт), а второй сконструирован в Канаде и сооружен недавно на заводе ядерной энергетики в Чашме (реактор на обычной воде под давлением при электрической мощности 300 МВт). Оба эти реактора находятся под гарантиями МАГАТЭ. У Пакистана имеются также два исследовательских энергетических реактора PARR-I и PARR-II, которые также контролируются со стороны МАГАТЭ. Наконец, в Пакистане работает без гарантий МАГАТЭ один промышленный реактор по получению плутония.

«Хушаб». У Пакистана имеется единственный промышленный реактор, направленный на производство плутония и размещенный в Хушабе (провинция Панджаб)⁵⁰. Как сообщается, это реактор на тяжелой воде с тепловой мощностью 40-50 МВт и с топливом из естественного урана.⁵¹ Говорят, что он достиг критичности в 1998 г.⁵²

Допустим снова, что уровень выгорания равен 1000 МВт-д/т и на каждый МВт-день теплового выхода образуется 0.9 г плутония оружейного качества. Тогда при скважности работы 60-80% на реакторе в Хушабе можно получить около 10 кг плутония в год.

Переработка в Пакистане. Считается, что Пакистан создал перерабатывающий потенциал на предприятии «Новая лаборатория», расположенном рядом с пакистанским институтом ядерной физики и технологии в Нилоре (непосредственно за пределами Равалпинди и Исламабада), с проектной мощностью 10-20 тонн тяжелого металла в год.⁵³ Но, как сообщают, «из-за технических проблем предприятие работает с меньшей производительностью по сравнению с проектными гарантиями, но эффективное уменьшение не столь велико, чтобы помешать обработке всего запаса отработанного топлива, выделяемого из реактора «Хушаб» и создавать какие-либо помехи».⁵⁴

Если в Хушабе ежегодно производится 10 кг плутония, этому сопутствуют 4600 Ки ^{85}Kr . Сделав такое же предположение, что и для Индии (топливо охлаждается один год перед переработкой), получим, что в «Новую лабораторию» поступает отработанное топливо, содержащее 4313 Ки криптона. Снова допускаем, что перерабатывающий завод работает 200 дней в год, а выделение ^{85}Kr по этим дням происходит в течение пяти часов. Тогда оценки скорости выделения криптона составляют 1.2 мКи/с.

Поскольку реактор «Хушаб» достиг критичности, вероятно, только в начале 1998 г., а полная загрузка топлива (около 9 тонн) облучалась в течение года, после чего потребовался еще год для охлаждения, к переработке в «Новой лаборатории» можно было всего лишь приступить не ранее начала 2000 г. Это совпадает с утверждениями, сделанными в марте 2000 г. о том, что США обнаружили ^{85}Kr в Пакистане. Возможным местом обнаружения выделений ^{85}Kr служит американское посольство в Исламабаде (расположенное в 10-20 км от перерабатывающих установок). Как упоминалось выше, использование американских посольств в других странах для мониторинга деятельности по переработке путем обнаружения ^{85}Kr явно имеет долгую историю. Расчеты распространения криптона, проведенные в сле-

⁵⁰ Свежая спутниковая фотография реактора «Хушаб» и некоторая историческая информация приведены в сообщении ФАУ: <http://www.fas.org/nuke/guide/pakistan/facility/khushab.htm>.

⁵¹ Mark Hibbs, "U.S. Intelligence Now Believes Pakistan Made Khushab Heavy Water," *Nuclear Fuel*, vol.24, no.10 (Vay17, 1999), 1.

⁵² Mark Hibbs, "U.S. Now Believes Pakistan to Use Khushab Plutonium in Bomb Program," *Nucleonics Week*, vol.39, no.29 (July 16, 1998), 2.

⁵³ Milton R. Benjamin, "Pakistan Building Secret Nuclear Plant," *The Washington Post*, September 23, 1980, A1.

⁵⁴ Mark Hibbs, "Pakistani Separation Plant Now Producing 8-10 kg Plutonium/Year," *Nuclear Fuel*, vol.25, no.12 (June 12, 2000), 1.

дующем разделе, позволят оценить жизнеспособность подобного обнаружения для Пакистана.

В табл.1 подведены итоги оценок усредненного ежегодного производства плутония на реакторах в Индии и Пакистане, а также темпов выделения ^{85}Kr , связанного с переработкой на индийском и пакистанском предприятиях.

Табл.1: Оцененное производство плутония и выделение ^{85}Kr в результате деятельности по созданию ядерного оружия в Индии и Пакистане.

| | Плутоний (кг/год) | | Кг-85 (кюри/час) |
|----------|-------------------|--------|------------------|
| | Сайрус | Дхрува | Тромбей |
| Индия | 9 | 21 | 13 |
| Пакистан | Хушаб | | Нов. Лаб. |
| | 10 | | 4,3 |

МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Мы рассмотрели две модели переноса в атмосфере – простую модель гауссова облака (это первое приближение) и гораздо более сложную, но удобную для пользователей программу HYSPLIT-4, разработанную в лаборатории воздушных масс NOAA и в австралийском Бюро метеорологии. Каждая из моделей вкратце описывается ниже и затем применяется к перерабатывающим предприятиям в Индии и Пакистане. Более подробное описание и результаты этих моделей приведены в Приложениях 1 и 2, соответственно.

Гауссово облако часто используется для получения оценок первого порядка относительно концентрации атмосферных составляющих, порожденных точечными источниками.⁵⁵ Для модели необходимы в качестве начальных данных только ограниченные местные метеорологические данные (скорость ветра и интенсивность солнечного освещения), значение скорости выделения воздушных составляющих и высота их выброса. Все эти величины в модели считаются постоянными. Сравнение предсказаний модели гауссова облака с измерениями выделения ^{85}Kr от завода Саванна Ривер (Южная Каролина, США) на расстояниях около 10 км показали, что модель совпадает с наблюдениями с точностью до множителя порядка двойки, причем предсказания систематически превышают наблюдательные данные.⁵⁶ Эта модель позволяет получить полезные представления о распространении криптона от перерабатывающих предприятий, где получается плутоний оружейного качества, в Южной Азии на расстояниях в десятки км.

Распространение от Тромбея и Нилора. Ежемесячные усредненные данные о ветрах для Мамбея (Тромбей – его северо-восточная окраина) взяты из статистической базы данных глобальной сетки верхней атмосферы, куда включены измерения за период 1980 г. – 1995 г. для описания состояния атмосферы в любом месяце каждого года с пространственным разрешением около 100 км на средних широтах. Как следует из этих сведений, среднемесячная скорость ветра у поверхности вблизи Мамбея составляет 3.6-6.2 м/с. Другие предположения об атмосферных условиях приведены в Приложении 1. Результаты на рис.А1.1 (Приложение 1) наводят на мысль, что выделение ^{85}Kr от перерабатывающей деятельности в Тромбее (при темпах выделения 13 Ки/час, или 3.6 мКи/с) может быть обнаружено на расстояниях 50-150 км.

Принятые здесь атмосферные условия (включая эффекты отражения от атмосферного перемешивающего слоя) увеличат предсказываемую концентрацию вблизи почвы на расстояниях свыше 10-20 км от завода (на таком расстоянии вершина облака доходит до перемешивающего слоя, высота которого принята равной одному км, и отражается к почве). Более высокий источник криптона также уменьшает предсказываемую концентрацию вблизи почвы рядом с источником, но не на больших расстояниях. Наконец, при излучении в ночное время концентрации на больших расстояниях в направлении ветра также окажутся выше, чем предсказывается.

⁵⁵ Gilbert Masters, *Introduction to Environmental Engineering and Science* (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1991).

⁵⁶ Цитата взята из доклада Калиновского на конференции в Бельгии (смотрите ссылку [2]).

Но даже при не столь консервативных предположениях, какие были сделаны относительно темпов производства плутония и связанного с ним ^{85}Kr на реакторах «Сайрус» и «Друва», достаточно длительного охлаждающего времени (один год) для отработанного топлива, небольшой высоты вытяжной башни или толщины пластин отработанного топлива, а также дневного периода выделения криптона, кажется очень маловероятным, чтобы какие-либо полезные наблюдения можно было произвести на станции наблюдения, расположенной в Пакистане (ближайшая точка находится на расстоянии около 700 км).

Аналогичные подсчеты для ^{85}Kr , выделившегося при переработке на пакистанском предприятии «Новая лаборатория», дают основания полагать, что его очевидно можно будет обнаружить на расстояниях порядка 100 км, что превышает расстояние от Нилора до индийской границы. И в этом случае влияние учета отражения от перемешивающего слоя увеличит предсказываемую концентрацию на уровне почвы. С учетом сделанных консервативных допущений для Индии может оказаться подходящим вести наблюдение за выделением этого ^{85}Kr со своей территории, когда ветер дует в нужном направлении.

Итак, расчеты на основе гауссова облака приводят к значительной асимметрии между Индией и Пакистаном с точки зрения возможности использовать свою национальную территорию для полезного отслеживания переработки, связанной с выделением плутония для программы ядерного оружия соседа. Индия может проводить такой мониторинг, а Пакистан не может.

Операция «Синий нос» в Южной Азии. Интересное приложение гауссовой модели следует из упоминавшегося обнаружения ^{85}Kr американцами в 2000 г. и из американской программы по скрытному мониторингу перерабатывающей деятельности в других странах, включающей применение детекторов, которые расположены в посольствах США. Было использовано уравнение гауссова облака для расчета ожидаемой концентрации ^{85}Kr на уровне почвы в 10-15 км от завода «Новая лаборатория» (это расстояние сопоставимо с удалением от завода посольства США в Исламабаде). Из результатов следует, что избыточная концентрация ^{85}Kr на таком удалении составит 15-30 пКи.м⁻³. Эта величина заметно превышает фон и ее можно легко обнаружить при помощи воздухоборника, установленного на крыше здания. Это указывает на то, что посольство США в Исламабаде могло обнаружить выделение ^{85}Kr на конечных этапах переработки в «Новой лаборатории».

Использование посольства в качестве станции для мониторинга криптона предлагает решение асимметрии, указанной ранее для возможностей Индии и Пакистана следить за выделением криптона другой стороной. При соответствующей экипировке индийское посольство в Исламабаде могло бы вести мониторинг «Новой лаборатории» в Нилоре в рамках двустороннего индийско-пакистанского соглашения о прекращении переработки. В качестве части такого соглашения Индия могла бы позволить Пакистану открыть заново свое консульство в Мамбае (закрытое с марта 1994 г.), которое надежно зафиксирует окончание деятельности по переработке на заводе в Тромбее (северно-восточный пригород Мамбая). Впрочем, существуют некоторые сложности, относящиеся к работе индийского перерабатывающего завода в Тарапуре, которые обсуждаются в дальнейшем.

Программа HYSPLIT-4. HYSPLIT-4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory, или совмещенная проинтегрированная траектория Лагранжа для одиночной частицы) – это последняя из серии программ, разработанных в Лаборатории воздушных масс NOAA и в австралийском Бюро метеорологии, для расчета траекторий, рассеяний и выпадений воздушных примесей. Она предлагает гораздо более усложненное средство для отслеживания за рассеянием ^{85}Kr , нежели простое гауссово облако. HYSPLIT-4 работает в диалоговом режиме и имеет детальное руководство для пользователей, ею можно управлять по Интернету со страницы NOAA или при помощи исполнительной программы, а метеоданные могут быть сброшены на персональный компьютер.⁵⁷

HYSPLIT-4 и раньше применялась для моделирования рассеяния ^{85}Kr . Сравнение измерений ^{85}Kr , проведенных в Генте (Бельгия), с предсказаниями HYSPLIT-4, которые относились к перерабатывающей деятельности в Ла Хаге (Франция) и основывались на почасовых

⁵⁷ HYSPLIT-4 можно найти в Интернете по адресу <http://www.arl.noaa.gov/hysplit.html>. Приводим сведения о справочнике пользователя: Ronald R. Draxler, *Hysplit-4 User's Guide*, NOAA Technical Memorandum ERL ARL-230, Air Resources Laboratory, Silver Spring, June 1999; электронный адрес <http://www.arl.noaa.gov/data/models/hysplit4/win95/user-man.pdf>.

сведениях об испускании газа заводом, показали, что модель систематически преуменьшает наблюдения в 2-4 раза.⁵⁸ Это предостережение следует помнить при оценке важности последующих результатов применения HYSPLIT-4 для выделений ⁸⁵Kr в Южной Азии и предположений, какие можно сделать относительно производства и выделения ⁸⁵Kr.

Программа HYSPLIT-4 была запущена в предположении, что излучение криптона из Тромбея длится пять часов, а затем изучалось его рассеяние в течение 48 часов, начиная с 6-ти часов утра 26 марта 2001 г. Соответствующие результаты (рис. A2.1) говорят о том, что облако ⁸⁵Kr дрейфует к востоку (удаляется от Пакистана) при доминирующих погодных условиях. Через 12 часов границы области с концентрацией криптона 1 пКи.м⁻³ простирались на расстояние около 170 км от источника. В промежутке времени 12-24 часов после испускания концентрация ⁸⁵Kr в облаке от Тромбея упала ниже ошибок измерений криптонового фона и практически перестала быть обнаруживаемой.

Это можно сравнить с результатами модели гауссова облака. Они указывают, что контур с концентрацией 1 пКи.м⁻³ достигает максимального расширения на расстояние около 190 км по направлению ветра. Но модели значительно расходятся в направлениях, перпендикулярных скорости ветра. Гауссова модель демонстрирует максимальное поперечное расширение около 30 км при удалении от источника на 100 км по направлению ветра, а ширина контура для HYSPLIT-4 превышает эту величину примерно вдвое.

Программа HYSPLIT-4 запускалась для Нилора для аналогичного периода года и таких же сроков. Результаты (рис. A2.2) указывают, что картина рассеяния имеет более симметричную форму и не так быстро перемещается, как в индийском варианте. Концентрация ⁸⁵Kr падает ниже порога обнаружения примерно через 12 часов.

Расчеты для Нилора были повторены в другой период года (июль), но общая картина рассеяния не изменилась, несмотря на другие направления ветра. Может оказаться, что более низкие средние скорости ветров и часто встречающаяся в районе Равалпинди температурная инверсия сочетаются таким образом, чтобы вызвать меньшую адвекцию и более слабое облако, которые приводят к более симметричной картине рассеяния (с доминированием диффузии), обнаруженной при расчетах. Это наводит на мысль, что хотя облако от Нилора может временами дрейфовать над Индией, его нельзя будет надежно обнаружить.

Тарапур и Калпаккам. До сих пор обсуждение относилось к выделению и последующему рассеиванию криптона от перерабатывающих предприятий комплексов ядерного оружия в Индии и Пакистане. В то время, как Пакистан обладает только одним перерабатывающим заводом и одним источником не находящегося под гарантиями отработанного топлива, у Индии имеются два перерабатывающих завода для отработанного топлива от энергетических реакторов (практически все они не имеют гарантий) в Тарапуре и Калпаккаме. Эти предприятия гораздо больше завода в Тромбее и их можно будет использовать для переработки плутония оружейного качества, если Индия захочет этого.

Указанные предприятия важны и потому, что Индия могла бы стремиться к применению плутония не оружейного качества (возможно даже, реакторного качества) для создания оружия, учитывая четкое замечание эксперта по ядерному оружию, что при создании ядерного оружия из плутония реакторного качества трудности «не так уже становятся больше» по сравнению с оружием из оружейного плутония.⁵⁹ Это особенно важно, поскольку 11 мая 1998 г. в рамках серии ядерных испытаний Индия произвела взрыв с использованием плутония, не имевшего оружейного качества. Говорилось о возможности применения плутония реакторного качества или смеси плутония оружейного и реакторного качества.⁶⁰ Предположим,

⁵⁸ Andre Poffin, Paul Van Liederkerke, Jozef Buysse, Walter Goossens, Gilbert Eggermont, "On the Use of Krypton-85 as Atmospheric Tracer," *⁸⁵Krypton – Proceedings of a Workshop in SCK-CEN Brussels, October 19, 1998*, 12-18.

⁵⁹ Дж. Карсон Марк, «Взрывные свойства реакторного плутония», *Наука и всеобщая безопасность*, т.4, вып.1 (январь 1984 г.).

⁶⁰ George Perkovich, *India's Nuclear Bomb* (Berkeley: University of California Press, 1999), 428-430, and a footnote 142, p.577.

что в ходе обычных операций заводы в Тарапуре и Калпаккаме перерабатывают отработанное топливо двенадцати индийских энергетических реакторов на тяжелой воде. В этом случае можно оценить соответствующее выделение ^{85}Kr . Реакторным топливом служит естественный уран, содержащий 0.72% урана-235 (то есть 7.2 кг урана-235 на тонну топлива), а типичный уровень выгорания составляет 7000 МВт-день на тонну тяжелого металла. При таком выгорании в тонне отработанного топлива остается около 2.3 кг урана-235. Наряду с 4.9 кг урана-235, которые делятся, делится также около 3 кг образованного плутония (считается, что это плутоний-239). Поскольку на один грамм разделившегося урана-235 образуется 0.405 Ки криптона-85, а на грамм разделившегося плутония-239 – 0.177 Ки, в каждой тонне отработанного топлива от энергетических реакторов на тяжелой воде образуется около 2500 Ки криптона-85.

За время охлаждения (один год) содержание криптона-85 упадет на 6% и составит в итоге около 2350 Ки в тонне отработанного топлива, попадающего на перерабатывающий завод. Проектная мощность Тарапура (150 тонн тяжелого металла в год), разнесенная на 200 дней, приводит к ежедневному потреблению 0.75 тонн тяжелого металла. Если допустить, что ^{85}Kr выделяется в течение пяти часов каждый рабочий день, скорость его выделения составит 350 Ки/час. В Калпаккаме с мощностью переработки 0.5 тонны тяжелого металла в день скорость выделения ^{85}Kr составит 235 Ки/час, что более, чем в 20 раз, выше темпов выделения от предприятия в Тромбее. В табл.2 подытожены мощности переработки и оцениваемые темпы выделения ^{85}Kr для трех индийских заводов.

Табл.2: Перерабатывающие заводы в Индии и оценки выделения криптона-85.

| | Тромбей | Тарапур | Калпаккам |
|------------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| Проектная мощность (тТМ/год) | 50 (оружейного качества) | 150 (топливо АЭС) | 150 (топливо АЭС) |
| Выброс Кг-85 (Ки/час) | 13 | 350 | 250 |

Программа HYSPLIT была задействована на 48 часов в марте 2001 г. для оценки излучения от Тарапура (рис.А2.3 показывает рассеяние через 12 часов). Как показывают результаты, область с концентрацией 10 пКи.м⁻³ простирается на расстояния свыше 150 км от площадки. Поэтому может произойти перемешивание криптоновых облаков от Тромбея и Тарапура в течение примерно 12 часов. Концентрации от Тарапура, конечно, гораздо выше. Аналогичный результат можно увидеть на рис.А2.4, где показано рассеяние от всех трех индийских перерабатывающих заводов одновременно за 12-часовой период в августе 2000 г.

Перемешивание облаков может затруднить четкое разделение сигнала ^{85}Kr от Тарапура и ожидаемого излучения от Тромбея. Это приводит к проблеме при верификации любого запрета на переработку, ограничивающего только современные операции, которые направлены на выделение плутония оружейного качества (то есть, в Тромбее, Индия и в «Новой лаборатории», Пакистан). Было бы легче проверять более полный запрет, куда четко входят выделение плутония оружейного качества и гражданская переработка отработанного топлива энергетических реакторов (поскольку плутоний реакторного качества тоже можно использовать для создания ядерного оружия).

Результаты показывают, что предложенная станция мониторинга в Мамбае может быть использована, вероятно, для обнаружения ^{85}Kr как от Тромбея, так и от Тарапура. Хотя порог обнаружения, похоже, может быть достигнут на расстояниях, сравнимых с расстоянием между Мамбаем и Тарапуром, это не следует считать очень сильным ограничением. Были сделаны консервативные допущения о темпах образования и выделения криптона, а предыдущее применение HYSPLIT-4 для отслеживания рассеяния криптона и сравнения предсказаний, основанных на реальной информации о выделении, с полевыми измерениями обнаружило, что при этом, как правило, в 2-4 раза преуменьшаются концентрации криптона. С учетом всего сказанного кажется разумным использовать станцию для мониторинга в Мамбае, чтобы обнаруживать перерабатывающую деятельность как в Тромбее, так и в Тарапуре, когда ветер дует в сторону Мамбая.

Выделение от Калпаккама представляет более серьезную проблему. Этот самый крупный источник криптона сильнее всего удален от Пакистана. Как показано на рисунках, ветер

обычно уносит облако еще дальше на восток от Пакистана в Индийский океан. Но даже если бы ветер дул в направлении Пакистана, не видно разумных средств для обнаружения подобного выделения криптона на станциях, находящихся на пакистанской территории, или на станции мониторинга в Мамбае. Альтернативой могло бы стать размещение другой локальной станции рядом с городом Мадрас или использование платформы морского базирования.

ВЫВОДЫ

Индия и Пакистан вместе с Израилем продолжают получать делящиеся материалы для своих ядерных вооружений, закладывая тем самым основу для еще больших арсеналов. В Индии давно уже действует программа по переработке отработанного топлива от своих специализированных промышленных плутониевых реакторов. Она, возможно, взорвала ядерное оружие на основе плутония, не имевшего оружейного качества, при испытаниях 11 мая 1998 г.

Пакистан недавно запустил производство плутония на реакторе «Хушаб» и начал выделение плутония на основе переработки на предприятии «Новая лаборатория». Это все происходит на фоне гораздо более крупной программы обогащения урана, которую Пакистан создал за несколько последних десятилетий для получения урана оружейного качества для своего ядерного арсенала.

Простая модель гауссова облака была применена к отслеживанию рассеивания выделений ^{85}Kr от перерабатывающих предприятий в Индии и Пакистане. Как показывают результаты, существует четкая асимметрия между Индией и Пакистаном в связи с возможностью мониторинга со своей территории испускания ^{85}Kr другой стороной. При некоторых атмосферных условиях газы, выделившиеся от единственного пакистанского перерабатывающего завода, могут зайти на индийскую территорию. Впрочем, маловероятно, чтобы Пакистан смог обнаружить достаточные концентрации от основного индийского перерабатывающего завода, связанного с оружием. Это создает проблему для любого предложения о двустороннем моратории в Южной Азии на производство делящихся материалов или для соглашения о глобальном прекращении производства ядерных материалов, которое основано только на национальных средствах верификации.

Как сообщается, США смогли заметить возникновение перерабатывающей деятельности в Пакистане в 2000 г. Результаты по гауссову облаку показывают, что излучение от пакистанской «Новой лаборатории» может быть обнаружено в Исламабаде. Этот результат в сочетании с сообщениями, что США с начала 40-х гг. пытались (операция «Синий нос») скрытно следить за деятельностью по переработке в других странах, включая мониторинг криптона в посольствах США, наводит на мысль о принципиальной возможности использования американского посольства в Исламабаде в качестве станции для мониторинга.

Если Индия последует этому примеру, она могла бы в принципе использовать свое посольство в Исламабаде для обнаружения излучения ^{85}Kr при переработке в Пакистане и позволить Пакистану открыть заново бывшее консульство в Мамбае для слежения за излучениями от близлежащего перерабатывающего завода в Тромбее. Технология хранения образцов криптона на металлической фольге позволяет собирать образцы воздуха в конкретном месте, хранить их и отсылать для анализа в другое место (в данном случае, находящееся в Пакистане). Это может обеспечить подходящий первый шаг для независимой взаимной верификации моратория на переработку отработанного топлива для получения плутония в двух странах.

Переработка плутония от энергетических реакторов на индийских заводах в Тарапуре и Калпаккаме, не имеющих гарантий МАГАТЭ, накладывает ряд новых проблем. Плутоний реакторного качества может быть использован для создания ядерного оружия и эти предприятия придется включать в мораторий на производство делящихся материалов (или в соответствующий договор). Кроме того, перерабатывающий завод в Тарапуре находится в 200 км от Мамбая, а моделирование на основе HYSPLIT-4 подсказывает, что при некоторых условиях облако ^{85}Kr от Тарапура может перемешаться с соответствующим облаком от Тромбея, что затруднит контроль над специализированным предприятием по производству плутония оружейного качества в этом месте. Прекращение переработки в Тарапуре, может быть, вероятно, проверено станцией, предназначенной для мониторинга деятельности в Тромбее, хотя это лежит на пределе возможности обнаружения, о чем свидетельствует мо-

делирование.

Наконец, предприятие в Калпаккаме, которое пока что является крупнейшим перерабатывающим заводом в Индии, находится далеко от Пакистана. Нет перспектив для мониторинга его деятельности с любой станции, находящейся на территории Пакистана. Более того, приведенные результаты показывают, что временами ветры могут относить выделения этого завода на восток, еще дальше от Пакистана. Но Калпаккам лежит рядом с Мадрасом. Если пойти по пути, предложенному для Тромбея, консульство Пакистана в Мадрасе смогло бы вероятно получить возможность для мониторинга завода в Калпаккаме. Для этого потребуются поставить воздухозаборники на крыше консульства и либо обрабатывать образцы воздуха на содержание $^{85}\text{Kг}$ на месте, либо выделять криптон, хранить его и затем направлять образцы в Пакистан для дальнейшего анализа.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 МОДЕЛЬ ГАУССОВА ОБЛАКА

Самые простые гауссовы дисперсионные соотношения для концентрации Q (м^{-3}) в точке с координатами (x,y) , лежащей на горизонтальной плоскости, можно записать следующим образом:

$$Q(x, y) = \frac{Q_0}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left\{-\frac{h^2}{2\sigma_z^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right\}$$

где Q_0 – темпы выделения примесей из источника, h – эффективная высота трубы (м), скорость ветра u (м/с) принимается направленной по оси X . Расширение в поперечных направлениях (y,z) дается выражениями:

$$\sigma_y = ax^{0.894} \quad \text{и} \quad \sigma_z = cx^d + f$$

где a , c , d , f – эмпирические коэффициенты, определяемые условиями стабильности атмосферы, которые в свою очередь зависят от значений скорости ветра вблизи поверхности и экспозиции солнечного излучения (инсоляции). Расстояния по оси X (по направлению ветра) надо выражать в км, чтобы гауссовы дисперсионные коэффициенты выражались в метрах. В этом Приложении содержатся таблица, показывающая классификацию стабильности в зависимости от скоростей ветра и инсоляции, а также таблица для соответствующих коэффициентов a , c , d и f . В модели пренебрегается отражением от атмосферного перемешивающего слоя – учет этого эффекта повысит предсказываемую концентрацию на больших расстояниях.

В табл. А1.1 и А1.2 приведены классификация стабильности и значения коэффициентов, использованных при расчетах гауссова облака. Эти таблицы заимствованы из работы [55] (стр.320).

Тромбей. Для анализа принято, что условия атмосферной стабильности меняются между типами В и С. Это означает, что приповерхностные скорости ветра, измеренные на высоте 10 м от грунта, лежат в пределах 3-6 м/с, а инсоляция меняется от сильной до умеренной, что характерно для солнечного дня. Среднее ежемесячное количество солнечных часов для Тромбея находится в пределах 168-288 за исключением двух дождливых месяцев, когда оно составляет только 70-80.⁶¹ Соответствующие параметры гауссова облака можно найти в приведенных таблицах. Для целей нашего анализа принимается, что высота штабеля топлива равна 30 м.

Как отмечалось ранее, при нынешней точности измерения $^{85}\text{Kг}$ порядка 1 пКи.м⁻³ применение гауссовой модели к выделению $^{85}\text{Kг}$ от завода в Саванна Ривер (Южная Каролина, США) показало, что модель заслуживает доверия (с точностью до множителя порядка двойки), но обычно она дает более высокие значения по сравнению с измерениями при удалении

⁶¹ Средние периоды солнечного освещения взяты по электронному адресу <http://www.stadtlima.de/webklima/cities/asia/in/Mumbai/Mumbai.htm>.

от источника около 10 км. Таким образом, предсказываемые моделью значения 1 пКи.м^{-3} не могут быть надежно измерены при таких (и более высоких) расстояниях. Поэтому представляется разумным рассматривать в нашем случае концентрации по гауссовой модели в пределах $2-3 \text{ пКи.м}^{-3}$ в качестве индикатора уровней, которые могут быть надежно обнаружены. Соответствующие контуры для завода в Тромбее представлены на рис.А1.1 при атмосферной стабильности типа В и типа С.

Табл.А1.1: Типы атмосферной стабильности для разных значений приповерхностной скорости ветра и солнечной инсоляции. (Скорость ветра измеряется на высоте 10 м от грунта)

| Скорость ветра на поверхности (м/сек) | Дневная солнечная освещенность | | |
|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------|---------------------|
| | Высокая ¹ | Средняя ² | Слабая ³ |
| < 2 | А | А – В | В |
| 2 – 3 | А – В | В | С |
| 3 – 5 | В | В – С | С |
| 5 – 6 | С | С – D | D |
| > 6 | С | D | D |

Примечания:

1. Это соответствует ясному летнему дню, когда высота солнца над горизонтом превышает 60° .
2. Это соответствует летнему дню с умеренной облачностью или при высоте солнца над горизонтом в пределах $35-60^{\circ}$.
3. Это соответствует облачному летнему дню, или осеннему вечеру, или высоте солнца над горизонтом в пределах $15-35^{\circ}$.

Нилор. Мы использовали тот же самый источник информации, что и в предыдущем случае с Тромбеем, чтобы определить среднюю скорость ветра в дневное время (3-4 м/с) в районе Равалпинди и Исламабада – двух крупных городов, близких к пакистанскому перерабатывающему заводу «Новая лаборатория». Уровень инсоляции принят таким же, что и для Тромбея. То же касается высоты топливного штабеля. Скорость выделения $^{85}\text{Кг}$ от этого завода была определена ранее и составила около 1.2 мКи/с в течение каждого пятичасового периода переработки.

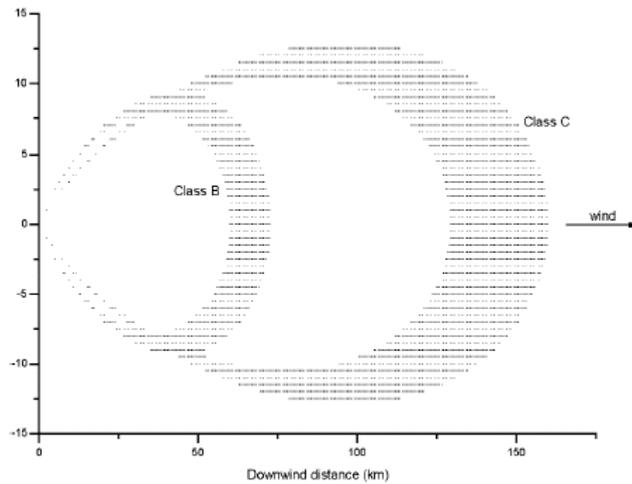


Рис.А1.1: Расчеты методом гауссова облака концентраций ^{85}Kr на уровне почвы от перерабатывающего завода в Тромбее для типов В и С атмосферной стабильности. Контуры показывают превышение концентраций над общим фоном ^{85}Kr . Заштрихованные области соответствуют концентрациям в диапазоне 2-3 пКи.м⁻³. Стрелка указывает направление ветра. Расстояние от источника в этом направлении (км) отложено по оси X. На оси Y приведено поперечное расширение облака (км).

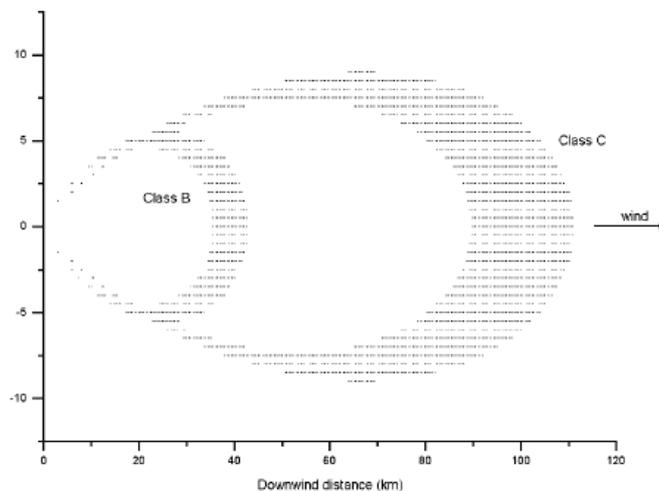


Рис.А1.2: Гауссовы контуры распространения ^{85}Kr от «Новой лаборатории» в Нилоре. Внутренний контур для каждого из типов устойчивости (В и С) соответствует концентрации ^{85}Kr , равной 3 пКи.м⁻³, а внешний соответствует концентрации 2 пКи.м⁻³. Остальные особенности таковы же, как и на предыдущем рисунке.

Табл.А1.2: Значения гауссовых коэффициентов для разных условий устойчивости при расстояниях рассеивания от источника более 1 км.

| Устойчивость | a | c | d | F |
|--------------|-----|-------|-------|------|
| A | 213 | 459,7 | 2,094 | -9,6 |
| B | 156 | 108,2 | 1,098 | 2,0 |
| C | 104 | 61,0 | 0,911 | 0 |
| D | 68 | 44,5 | 0,516 | -13 |

МОДЕЛЬ HYSPLIT-4

HYSPLIT-4 – это самая последняя из серии моделей, разработанных в Лаборатории воздушных масс NOAA и в австралийском Бюро метеорологии для вычисления распространения атмосферных примесей. Набор для пользователей содержит библиотеку с программами для каждого конкретного применения. Существует необходимость иметь через определенные промежутки времени сетку метеоданных в одной из нескольких географических проекций. Эти данные в виде архивных материалов или результатов моделей по предсказанию погоды имеются в Интернете в виде, уже сформатированном для ввода в HYSPLIT. Кроме того, имеются программы преобразования выходной информации NOAA, Национального центра по атмосферным исследованиям (NCAR) или европейского центра по среднесрочному прогнозу погоды (ECMWF) в формат, пригодный для модели HYSPLIT-4.

Детали математического формализма, лежащего в основе разных частей моделирования рассеивания в HYSPLIT-4, здесь не рассматриваются, но мы приводим краткое качественное описание.⁶² Модель позволяет рассматривать одновременно несколько типов примесей, испущенных из различных источников. Рассеивание каждого вида примеси, испущенного в виде отдельных частиц или «струи», вычисляется в предположении либо гауссова облака, либо «прямоугольного» (постоянное значение внутри и нуль снаружи) горизонтального распределения внутри струи. Можно рассматривать и рассеивание конечного числа частиц. Для вертикального направления распределение в «струе» всегда принимается в виде «прямоугольника». Единичная испущенная струя будет расширяться до тех пор, пока ее размер не превысит расстояние между ячейками метеорологической решетки, а затем она разбивается на несколько струй, каждая из которых несет некоторую часть начальной массы примеси. Струя с прямоугольным распределением разбивается по горизонтали на четыре равные части, а гауссова струя – на пять струй, из которых центральная (самая крупная) часть сохраняет 60% начальной массы, а остальные 40% распределяются поровну между четырьмя меньшими струями. Проблема растущего числа небольших струй решается путем сшивания струй, которые достаточно близко приближаются друг к другу, причем дисперсионные коэффициенты новой струи устанавливаются в виде взвешенной по массе суммы коэффициентов отдельных струй. Струи кроме того периодически проходят сортировку, а те, масса которых становится меньше 10% полной начальной массы, разбиваются по положению и, если это уместно, сшиваются.

Концентрации примесей в воздухе вычисляются в точках пересечения координат сетки (по широте и долготе) для струй, а для отдельных частиц – в виде усредненной по ячейке концентрации. В модели содержатся наземная координатная сетка, размеры неровностей и сведения о местности с разрешением 1° в Северном полушарии. Модель позволяет рассматривать сухое и влажное осаждение примесей, радиоактивный распад и возобновление суспензионного состояния.

Основные исходные параметры для моделирования таковы:

- Начальное время (год, месяц, день, час);
- Положение (начальные значения широты, долготы и высоты);
- Начальное время и продолжительность рассеивания (то есть, длительность прогона);
- Характеристики примеси (число типов, скорости и длительность испускания);
- Размер расчетной сетки (включая высоту перемешивания и высоту каждого вертикального уровня на сетке концентраций);
- Свойства частиц (диаметр, плотность и форма, скорость осаждения, молекулярный вес, коэффициент химического взаимодействия с поверхностью, скорость диффузии, период полураспада, скорость перехода в суспензионное состояние и т.п.), разрешение по выходу и время взятия проб.

⁶² Физические и математические основы программы HYSPLIT-4 изложены в работе Ronald R. Draxler, G. D. Hess, "Description Of The HYSPLIT-4 Modeling System," (Silver Spring: Air resources Laboratory, NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224, December 1997-Revised: August 1998); смотрите также <http://www.arl.noaa.gov/data/models/hysplit4/win95/arl-224.pdf>.

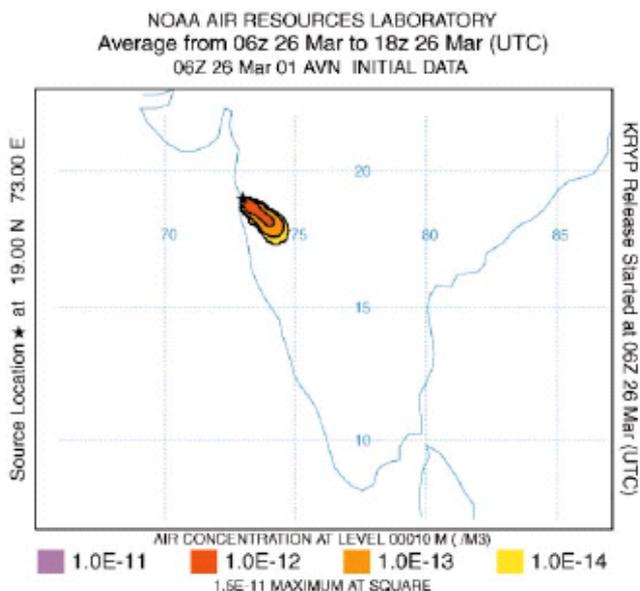


Рис.А2.1: Границы рассеивания ^{85}Kr , испущенного от перерабатывающего завода в Тромбее. Это средние значения на период 06-18 часов 26 марта 2001 г. Испускание криптона началось в 06-00. Концентрации криптона соответствуют высоте 10 м и приведены в расчете на кубометр. Координаты источника – 19.00 градусов северной широты и 73.00 градусов восточной долготы.

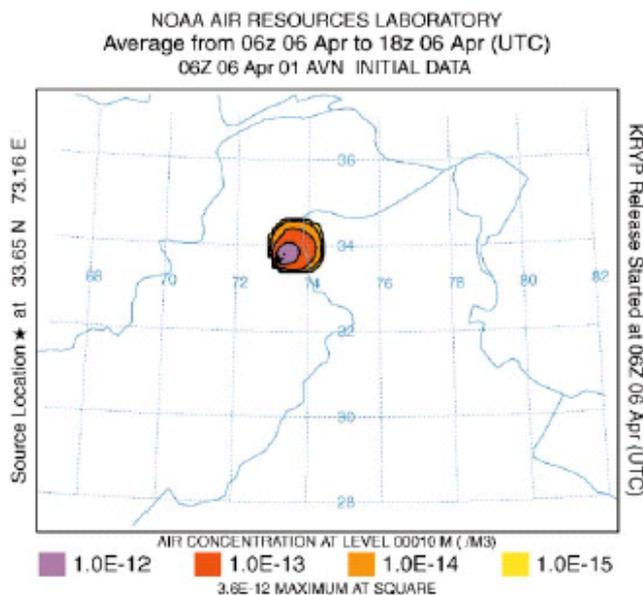


Рис.А2.2: Границы рассеивания ^{85}Kr , испущенного от перерабатывающего завода «Новая лаборатория». Это средние значения на период 06-18 часов 6 апреля 2001 г. Испускание криптона началось в 06-00. Концентрации криптона соответствуют высоте 10 м и приведены в расчете на кубометр. Координаты источника – 33.65 градусов северной широты и 73.16 градусов восточной долготы.

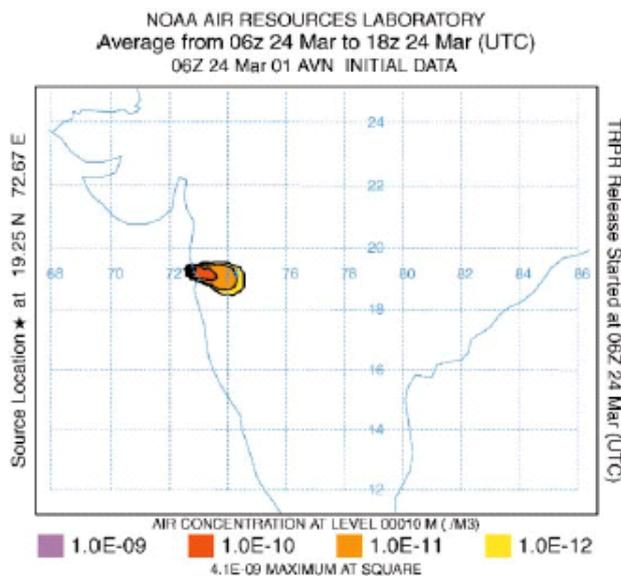


Рис.А2.3: Границы рассеивания ^{85}Kr , испущенного от перерабатывающего завода в Тарапуре. Это средние значения на период 06-18 часов 24 марта 2001 г. Испускание криптона началось в 06-00. Концентрации криптона соответствует высоте 10 м и приведены в расчете на кубометр. Координаты Тарапура – 19.25 градусов северной широты и 72.67 градусов восточной долготы.

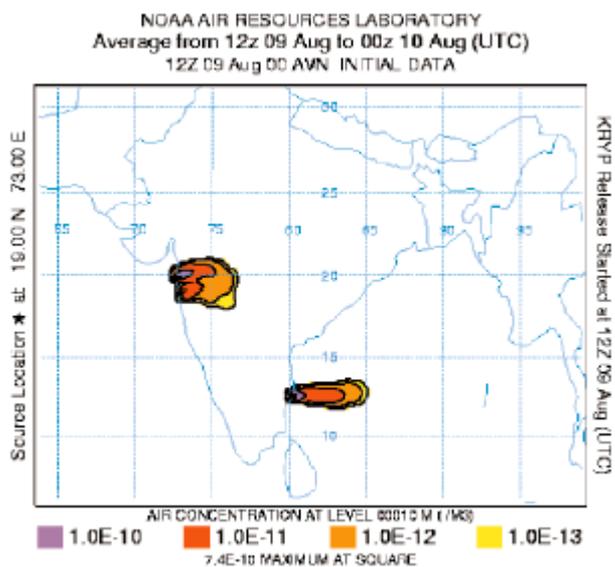


Рис.А2.4: Границы рассеивания ^{85}Kr , испущенного от перерабатывающих заводов в Тромбее, Тарапуре и Калпаккаме. Это средние значения на период 12-24 часов 10 августа 2001 г. Испускание криптона началось в 12-00. Концентрации криптона соответствуют высоте 10 м и приведены в расчете на кубометр.

Тромбей и Нилор. Программа HYSPLIT-4 запускалась для случая пятичасового испускания криптона от перерабатывающего предприятия в Тромбее. Карта рассеивания снималась каждые 12 часов за период 48 часов, начиная с 6-00, 26 марта 2001 г. В качестве метеоданных был использован прогноз погоды на этот период. Результат показан на рис. А2.1

для первых 12 часов. В качестве сетки использованы широта и долгота. Внешний контур соответствует концентрации 1 пКи/м^{-3} (то есть, современной ошибке измерений). Это отражает тот факт, что приложение данной модели к выделению криптона в других местах демонстрирует, как представляется, систематическое преуменьшение наблюдений в 2-4 раза. Поэтому предсказываемый моделью уровень 1 пКи/м^{-3} в действительности окажется наблюдаемым.

Программа запускалась на 48 часов после выделения криптона в Нилоре в апреле 2001 г. Результаты приведены на рис. A2.2 как состояние через 12 часов.

Тарапур. Программа HYSPLIT-4 запускалась на 48 часов в марте 2001 для изучения испускания криптона от Тарапура. На рис.A2.3 показано рассеяние через 12 часов.

Выделение криптона при военной и гражданской переработке. Программа HYSPLIT-4 запускалась на 48 часов в апреле 2001 г. для изучения возможного перемешивания криптона, испущенного из военного перерабатывающего предприятия в Тромбее, с криптоном от более крупных гражданских перерабатывающих предприятий в Тарапуре и Калпаккаме (см. рис.A2.4).