

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОММЕРЧЕСКИХ ФОТОСПУТНИКОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ РАБОТЫ РЕАКТОРОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЛУТОНИЯ И ГАЗОДИФФУЗИОННЫХ ЗАВОДОВ

Ху Цзянь и Фрэнк фон Хиппель

Деятельность реакторов, предназначенных для производства плутония, и крупных газодиффузионных заводов по обогащению урана (ГДЗ) может быть обнаружена дистанционно при помощи фотоснимков от коммерческих спутников. Рассекреченные фотографии со спутников "Корона" использованы для демонстрации того, что новое поколение коммерческих фотоспутников с метровым пространственным разрешением сможет обнаружить клубы пара над крупными работающими градирнями или с подветренной стороны от них. На изображениях в тепловом инфракрасном диапазоне, полученных с низким разрешением на "Ландсат-5", как было показано другими авторами, можно обнаружить выбросы горячей воды от реакторов в озера, реки и т.д. Здесь показано, что такие же системы способны обнаруживать температуры высоких крыш крупных работающих ГДЗ. Наблюдения с коммерческих спутников могут играть поэтому важную роль в увеличении доверия к заявлениям о прекращении работы реакторов для производства плутония и ГДЗ в соответствии с мораторием или с Договором о прекращении производства делящихся материалов.

Ху Цзянь – научный сотрудник Бельферского центра по науке и международным событиям в правительственной школе имени Кеннеди при Гарвардском университете.

Фрэнк фон Хиппель – профессор общественных и международных событий Принстонского университета.

Более детальные подробности можно найти в работах авторов по электронному адресу <http://www.princeton.edu/~cees/arms/>

ВВЕДЕНИЕ

Договор о запрещении производства делящихся материалов (ДЗДМ), который позволил бы проверять на местах запрещение производства плутония и высокообогащенного урана (ВОУ) для оружия, по-видимому, не вступит в силу в течение нескольких лет. Но четыре из ядерных держав (США, Россия, Англия и Франция) заявили, что они прекратили производство плутония и ВОУ для оружия, а Китай сообщил частным образом, что он не производит эти материалы для оружия примерно с 1991 г. На другие страны (Израиль, Индия и Пакистан), которые не присоединились к Договору о нераспространении в качестве неядерных государств, оказывается давление присоединиться к мораторию на производство подобных материалов.¹

Желательно увеличить доверие к таким заявляемым мораториям на производство. Во многих случаях это может быть сделано при помощи дистанционного подтверждения того факта, что бывшие производственные предприятия не действуют. В представленной статье изучается, до какой степени закрытие реакторов по производству плутония и заводов по обогащению урана может быть подтверждено при использовании фотографий с коммерческих спутников.

РЕАКТОРЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЛУТОНИЯ

Хотя можно использовать любой реактор для получения плутония, фактически весь плутоний для оружия, как представляется, производится на специальных промышленных реакторах (см. табл.1). В некоторых случаях это реакторы двойного назначения, производящие кроме плутония еще и электроэнергию. Иногда они использовались, чтобы получать другие изотопы для военных и гражданских целей. Но в большинстве случаев реакторы для производства плутония были закрыты, когда страны прекратили такое производство.

В частности, большинство реакторов для производства плутония в США, России и Франции были закрыты. Три реактора такого типа в России еще работают для обеспечения теплом местного населения. США и Россия заключили соглашение, еще не выполненное до конца, по которому эти реакторы должны быть закрыты или переведены на такое топливо, которое не придется перерабатывать. В рамках этого соглашения стороны также договорились на взаимный контроль за статусом своих закрытых реакторов и подтвердили, что новый плутоний, произведенный на трех еще работающих российских промышленных плутониевых реакторах, не направляется на использование в оружии. В Англии еще работают восемь небольших реакторов по производству плутония для выработки электроэнергии и трития, а во Франции продолжает действовать демонстрационный реактор "Феникс" на быстрых нейтронах, который мог в прошлом производить плутоний для оружия. Впрочем, вся деятельность по выделению плутония в Англии и Франции находится под гарантиями Евроатома.

Китай не объявлял конкретно, что он закрыл свои промышленные плутониевые реакторы, но, как сообщают, закрыл, по крайней мере, один реактор в 1984 г. до того, как он полностью прекратил производство плутония для оружия в 1991 г.²

Цель данной статьи в том, чтобы объяснить, как часто можно увеличить уверенность в закрытии промышленных плутониевых реакторов или ГДЗ путем использования наблюдений с коммерческих спутников, то есть, без навязчивых инспекций на местах.

Табл.1: Реакторы по производству плутония во всем мире и их системы охлаждения [В колонке "тип" применяются следующие сокращения: ЛВГР – реактор с графитовым замедлителем и водяным охлаждением, ТВР – реактор на тяжелой воде, ГГР – реактор с графитовым замедлителем и газовым охлаждением, РБН – реактор-размножитель на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением; в колонке "мощность" приводятся пиковые значения в ГВт; в последней колонке использованы следующие сокращения для характеристик градирни: ГФ – имеющая форму гиперboloида, ЕВ – естественная вентиляция и ПТ – принудительная тяга.]

Табл.1: Реакторы по производству плутония во всем мире и их системы охлаждения [В колонке "тип" применяются следующие сокращения: ЛВГР – реактор с графитовым замедлителем и водяным охлаждением, ТВР – реактор на тяжелой воде, ГГР – реактор с графитовым замедлителем и газовым охлаждением, РБН – реактор-размножитель на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением; в колонке "мощность" приводятся пиковые значения в ГВт; в последней колонке использованы следующие сокращения для характеристик градирни: ГФ – имеющая форму гиперboloида, ЕВ – естественная вентиляция и ПТ – принудительная тяга.]

Соединенные Штаты				
Реакторы	Тип	Статус	Мощность	Система охлаждения
Резервация в Ханфорде (8 реакторов)				
D,D,F,DR,H,C	ЛВГР	Постоянно закрыты и частично демонтированы	2.5	Проточная вода со сбросом в реку Колумбия
KW,KE	ЛВГР		4.4	
N-реактор	ЛВГР	Двойное назначение, пущен 31.12.63, в резерве с 1987 г., началась дезактивация.	4.0	
Площадка в Саванна Ривер				
K-реактор	ТВР	Пущен в октябре 1951 г., с 1988 г. в резерве, планов на будущее нет.	2.71	Градирня (ГФ, ЕВ)
P-реактор	ТВР	Постоянно закрыты	2.68	Сброс горячей воды в охлаждающий бассейн
R-реактор	ТВР	Постоянно закрыты	2.26	
S-реактор	ТВР	Постоянно закрыты	2.915	Проточная вода со сбросом в реку Саванна
L-реактор	ТВР	Постоянно закрыты	2.7	
Сроки работ реакторов в Ханфорде: В (сент.44-12.02.68), D(дек.44-26.6.67), F(фев.45-25.6.65), DR(окт.50-30.12.64),H(окт.49-апр.65), C(нояб.52-25.4.69); KW(янь.55-01.02.70), KE(апр.55-28.01.71). Сроки работы реакторов в Саванна Ривер: P(фев.54-1989), R(дек.53-15.6.64); C(мар.55-1989), L(июл.54-18.02.68)				

Россия				
Реакторы	Тип	Статус	Мощность	Система охлаждения
Озерск (Челябинск-65), 5 реакторов				
A	ЛВГР	Постоянно закрыты		Все на проточной воде со сбросом в озеро Кизилтящ
IR	ЛВГР		0.5	
AV-1, AV-2	ЛВГР		0.065	
AV-3	ЛВГР		2.09	
Северск (Томск-7), 5 реакторов				
I-1, EI-2	ЛВГР	Постоянно закрыты	1.2	Реактор I-1 на проточной воде со сбросом в р. Томь; у остальных градирни (ЕВ)
ADE-3	ЛВГР	Постоянно закрыты	1.9	
ADE-4, ADE-5	ЛВГР	Работают с 1965 и 1968 гг. Производят тепло и электроэнергию для Томска и Северска	1.9	Градирни (ЕВ)
Железногорск (Красноярск-26)				
AD, ADE-1	ЛВГР	Постоянно закрыты		Проточная вода со сбросом в р. Енисей
AD-2	ЛВГР	Работает с 1964г. и производит тепло и электроэнергию для Железногорска		В Енисей сбрасывается проточная вода из торичного контура охлаждения
Сроки работы реакторов в Озерске: A(22.6.48-1987), IR(22.12.51-24.5.87), AV-1(15.7.50-12.8.89), AV-2(06.4.51-1990), AV-3(15.9.52-01.11.90) Сроки работы реакторов в Северске: I-1(20.11.55-21.8.90), EI-2(сен.58-28.12.90), ADE-3(14.7.61-14.8.92) Сроки работы реакторов в Железногорске: AD(25.9.58-30.6.92), ADE-1(20.7.61-29.9.92)				

Англия				
Реакторы	Тип	Статус	Мощность	Система охлаждения
Площадка Селлафилд				
Два котла в Уиндскейле		Разбираются, работали в 1951-57 гг.		
4 реактора в Калдер Холле	ГГР	Работают с двойным назначением (электроэнергия)	0.24	Градирни (ГФ, ЕВ)
Площадка Чепелкросс				
4 реактора	ГГР	Работают с двойным назначением (электроэнергия)	0.24	Градирня (ГФ, ЕВ)
Реакторы в Калдер Холле вступили в строй в октябре 1956, феврале 1957, мае 1958 и феврале 1959 гг. Реакторы в Чепелкроссе вступили в строй в феврале, сентябре и ноябре 1959, а также в марте 1960 гг.				

Китай				
Реакторы	Тип	Статус	Мощность	Система охлаждения
Комплекс Джукван				
Джукван	ЛВГР	Закрыт, работал в 66-84?	<0.5	Градирни (ГФ, ЕВ)
Комплекс Гуанджиян				
Гуанджиян	?	Закрыт, работал в 73-91?	<1	?

Израиль				
Реакторы	Тип	Статус	Мощность	Система охлаждения
Комплекс Димона				
Димона	ТВР	Работает с декабря 1963 г.	<0.07?	Градирня (ПТ)

Франция				
Реакторы	Тип	Статус	Мощность	Система охлаждения
Комплекс Маркуль				
G1	ГРР	G1 и G2 введены из строя; G3 постоянно закрыт.	0.40	
G2	ГРР		0.25	
G3	ГРР		0.25	
Целестина-1,2	ТВР	Характер операций меняется – с 1991 г. производят только третий; работают с 1967-68 г.	0.19	
Шиньон				
A1	ГРР	Постоянно закрыты	0.30	
A2	ГРР		0.80	
A3	ГРР		1.56	
Буджи				
1	ГРР	Постоянно закрыт, работал с 1972 по 1994 г.	1.85	
Сан-Лорен				
A1	ГРР	Постоянно закрыты, работали в 69-90 и 71-92 г.	1.65	
A2	ГРР		1.77	
Феникс	РБН	Работает с 1974 г.	0.567	
Сроки работы реакторов в Маркуле: G1(56-68), G2(59-80), G3(59-84)				
Сроки работы реакторов в Шиньоне: A1(62-73), A2(65-85), A3(67-90)				

Индия				
Реакторы	Тип	Статус	Мощность	Система охлаждения
Атомный исследовательский центр Баба				
Цирус	ТВР	Работает с 1960 г.	0.04	Сброс воды в залив
Друва	ТВР	Работает с 8.8.85	0.1	
Реактор Друва имеет нейтронные пучки и производит изотопы для исследований и медицинских целей.				

Пакистан				
Реакторы	Тип	Статус	Мощность	Система охлаждения
Хушаб	ТВР	Работает с 1998 г.	0.04 – 0.07?	Градирня (ПТ)

Тепловой инфракрасный (ТИК) диапазон

Объекты с температурой ниже 100⁰С излучают главным образом на длинах волн выше 8 мкм. ТИК изображения со спутников получают поэтому через атмосферное "окно" пропускания в диапазоне 8-14 мкм. Эти длины волн в двадцать раз длиннее видимых, которые расположены вокруг 0.5 мкм. В системе, ограниченной дифракцией, поэтому потребуется апертура в 20 раз больше, чтобы получить аналогичное разрешение. Для получения такого же разрешения с данной высоты требуется апертура в 20 раз больше.

Точные измерения абсолютной температуры в ТИК диапазоне потребует поправок на прохождение через атмосферу. Впрочем, наиболее полезная информация для целей верификации заключается в отличии температуры представляющего интерес объекта от температуры его окружения. Поэтому мы будем говорить о "температурной чувствительности" ТИК изображения как о его возможности разрешить разницу температур. Спутники "Ландсат-5 и 7" обладали пространственным ТИК разрешением 120 м и 60м, соответственно и имели температурные чувствительности около 0.5-1 К. В декабре 1999 г. был запущен спутник АСТЕР с пространственным ТИК разрешением 90 м и с температурной чувствительностью 0.2 К при 300 К (см. табл.4).

Проверка операционного статуса реакторов и ГДЗ в видимом спектральном диапазоне

Во время работы реактора и некоторое время после его закрытия существенным фактором является удаление тепла из его активной зоны для предотвращения плавления топлива. Использовалось много систем охлаждения для рассеивания избыточного тепла в окружающую среду, включая градирни, бассейны, проточную воду из рек или из моря⁷. В табл.1 указаны системы охлаждения для промышленных плутониевых реакторов в той степени, в которой нам удалось узнать о них.

ГДЗ производит столько много избыточного тепла, что и них должны быть подобные системы охлаждения. Производство 25 кг урана оружейного качества с 90% урана-235 (МАГАТЭ определяет это количество как значительное) в год потребовало бы примерно 1.5 МВт электроэнергии⁸. Более 90% этой энергии преобразуется в тепло, которое рассеивается заводскими градирнями или спускается в соседние водные пространства путем охлаждения проточной воды (см. рис.1).

Градирни

Градирни классифицируются по методам переноса тепла в воздух и по методам создания потока воздуха через башню⁹. Большинство градирен являются "влажными", а это означает, что их основной механизм снятия тепла заключается в испарении воды на теплообменных поверхностях. В сухих башнях тепло передается в воздух без добавления водяных паров. Но при данной мощности охлаждения потребуются башня гораздо больших размеров¹⁰.

Табл.2: Основные установки в мире, использованные при получении ВОУ для оружия. [В столбце "площадь" в скобках даны размеры главного корпуса (в метрах), а сама площадь приводится в гектарах; в столбце "статус" в скобках приведены сроки работы; в столбце "мощность" приведено количество миллионов единиц работы по разделению (кг) в год, а в скобках указывается число разделительных секций; наконец, в последнем столбце использованы следующие сокращения характеристик градирни: ОС – орошаемые стенки, ПТ- принудительная тяга, ЕВ- естественная вентиляция.]

Соединенные Штаты				
Площ адка	Площ адь	Статус	Мощ ность	Система охлаждения
Окридж		Закрыт в 1985 г.	7.7	Градирни (ОС, ПТ)
К-25	16.2	ВОУ (45-64)	(2996)	
К-27	3.5	ВОУ (46-64)	(540)	
К-29	2.7	НОУ(51-85)	(300)	
К-31	6.9	НОУ(51-85)	(600)	
К-33	13.1	НОУ(54-85)	(640)	
Падука		Работает (НОУ до 2%)	11.3	Градирни (ОС, ПТ)
С-310	0.5	(1953 -)	(60)	
С-331	4.7	(1953 -)	(400)	
С-333	4.7	(1954 -)	(400)	
С-335	10.0	(1953 -)	(480)	
С-337	10.0	(1954 -)	(472)	
Портсмут		Работает (без ВОУ с 1993 г.)	8.3	Градирни (ОС, ПТ)
Х-326	11.0 (670x167)	(56-93; 93 – частично)	(2340)	
Х-330	11.0 (670x167)	(1955 -)	(1100)	
Х-333	11.0 (670x167)	(1955 -)	(640)	

Россия				
Площадка	Площадь	Статус	Мощность	Система охлаждения
Свердловск-44				
ГДЗ	(1100 x 70)	Работал с 1949 г. до конца 50-х гг.; заменен на ЦОЗ		Проточная вода со сбросом в два больших искусственных озера
ЦОЗ		Работает	9.8	
Красноярск-45				
ГДЗ	(1000 x 50)	Работал в 50-х гг.; заменен на ЦОЗ		Проточная вода со сбросом в р. Кан
ЦОЗ		Работает	5.8	
Ангарск				
ГДЗ	(1200 x 70)	Работал в 50-х гг.; заменен на ЦОЗ		Проточная вода со сбросом в р. Ангара
ЦОЗ		Работает	1.6	
Томск-7				
ГДЗ	(750 x 70)	Работал в 50-х гг.; заменен на ЦОЗ		Проточная вода со сбросом в р. Томь
ЦОЗ		Работает	2.8	

Англия				
Площадка	Площадь	Статус	Мощность	Система охлаждения
Кейпнхурст				
ГДЗ	?	Закрыт (с 1982 г. демонтаж и очистка)	0.1 – 0.15	Градирни (ЕВ)
ЦОЗ АЗ		Работает с 1977 г.; с 1993 г. под гарантиями МАГАТЭ и Евратома – только НОУ	0.2	
Уренко		Все время (с 1980 г.) под гарантиями МАГАТЭ и Евратома; производит только НОУ	0.75	

Пакистан				
Площадка	Площадь	Статус	Мощность	Система охлаждения
Кахута				
ЦОЗ	0.1	Работает с середины 80-х гг.	0.009 – 0.015	

Франция				
Площадка	Площадь	Статус	Мощность	Система охлаждения
Пьеррелат				
ГДЗ	Имел 4 здания для разных степеней обогащения	Официально закрыт 30.6.96; работал с 1967 г.	0.4 – 0.6	?
Трикастин				
ГДЗ Жорж Бессе, в ладе-лец Евродиф		Работает с 1979 г. и выпускает НОУ (обогащение менее 5%)	10.8	Градирни (ЕВ)

Китай				
Площадка	Площадь	Статус	Мощность	Система охлаждения
Ланжу				
ГДЗ	(600 x 60)	Закрит (работал с 1963 г. и производил ВОУ по 1987 г.)	0.3	Градирни (ОС, ПТ)
Хепин				
ГДЗ		Закрит (работал с 1974 г. и производил ВОУ по 1987 г.)	0.15-0.59	?

Табл.3: Существующие и планируемые коммерческие спутники с высоким разрешением в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра

[Столбец А – спутниковая система; Б – страна-владелец; В – дата запуска; Г – разрешение в метрах (оно определяется как поле зрения одного пиксела), через дробь приведены данные для панхроматического (черно-белого, или охватывающего большой спектральный диапазон) датчика и многоспектрального датчика (наблюдающего объект в узких спектральных полосах, предусмотренных заранее); Д – время (в днях), через которое данный объект наблюдается в следующий раз; Е – полоса снимка (км); Ж – максимальный угол зрения (градусы); З – высота орбиты (км).]

А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З
КВР-1000	Рос.	1987	5	14	-	-	200
Ирис-1С,Д	Инд.	1997	5.8	5	70	26	817
Спин-2	Рос.	90-е	2	-	40	-	220
Иконос	США	1999	1/4	1-4	11	26	681
Квикберд	США	2000	1/4	1-5	27	30	600
Орбвью	США	2000	2/4	3	8	45	460
Эрос-А	Изра.	2000	2	3	14	45	480
Эрос-Б	Изра.	2001	1	1	20	45	600

Табл.4: Спутники с ТИК датчиками (8-14 мкм)

[Столбец А – спутник; Б – страна; В – дата запуска; Г – ТИК разрешение (м); Д – температурная чувствительность (К); Е – высота (км); Ж – ширина полосы снимка (км); З – время (в днях), через которое объект наблюдается в следующий раз.]

А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З
Лэндсат-5	США	1984	120	0.5	705	185	16
Лэндсат-7	США	1999	60	0.5	705	185	16
АСТЕР	США	1999	90	0.2	705	185	26

В обоих случаях циркуляция воздуха внутри башни происходит (по крайней мере, частично) благодаря подъемной силе нагретого воздуха, создающей эффект камин. Градирни, целиком основанные на этом эффекте подъемной силы называются градирнями с естественной вентиляцией. Если применяются большие вентиляторы для увеличения потока воздуха сквозь башню, то говорят о градирне с принудительной тягой. Из табл.1 видно, что у большинства промышленных плутониевых реакторов имеются градирни гиперболической формы с орошаемыми поверхностями и естественной вентиляцией¹¹.

Группа подобных градирен с естественной вентиляцией, относящихся к четырем английским промышленным реакторам, имевшим ранее двойное назначение, видна на рис.2. Заметно, что они очень велики: несколько десятков метров по высоте и более десяти метров в диаметре (на вершине башни). Легко отождествить такие крупные структуры на спутниковых снимках с метровым разрешением.



Рис.1: Вид с воздуха на английский комплекс по обогащению урана в Кейпнхурсте, где работает ГДЗ (длинное здание, простирающееся через центр рисунка). Видны его 11 градирен с естественной вентиляцией. В квадратном плоском здании справа находится первый модуль ЦОЗ.

При работе градирни облако пара обычно видно исходящим из верхней ее части. Воздух практически полностью насыщается водой при прохождении через увлажненные прокладки в основании градирни, а затем при подъеме через башню он охлаждается. Поэтому на выходе из башни он слегка перенасыщен. Поскольку диаметр верхней части башни порядка десяти метров, легко можно будет обнаружить даже небольшое облачко на спутниковом снимке с разрешением в один метр. С подветренной стороны от градирни воздух смешивается с более холодным окружающим воздухом и образует еще более перенасыщенную смесь. На каком расстоянии с подветренной стороны воздушная смесь остается перенасыщенной, зависит от относительной влажности окружающего воздуха (см. Приложение А).

На рис.3 (это изображение, полученное на спутнике "Корона" 15 сентября 1971 г.¹²) видны градирни, относящиеся к двум из пяти плутониевых промышленных реакторов, работавших в то время на Сибирском химкомбинате в Северске (Томске-7). Шесть башен в верхнем левом углу и восемь в нижнем правом относятся, судя по всему, к реакторам ЕН-2 (1200 МВт) и АДЕ-3 (1900 МВт), соответственно, и поэтому обладают охлаждающей мощностью 200-250 МВт каждая¹³. Диаметр верхней части градирни составляет около 30 метров¹⁴. Наземное разрешение этого панхроматического изображения составляет примерно 1.8 метра¹⁵. Отчетливо видны физические детали градирен и облака пара над некоторыми из них. По четкости снимок с коммерческого спутника, имеющего метровое разрешение, будет сравнимым с этим снимком (см. рис.12Б). Отсюда следует, что коммерческий спутник с метровым разрешением снимка сможет обнаружить облака пара над работающими градирнями¹⁶.

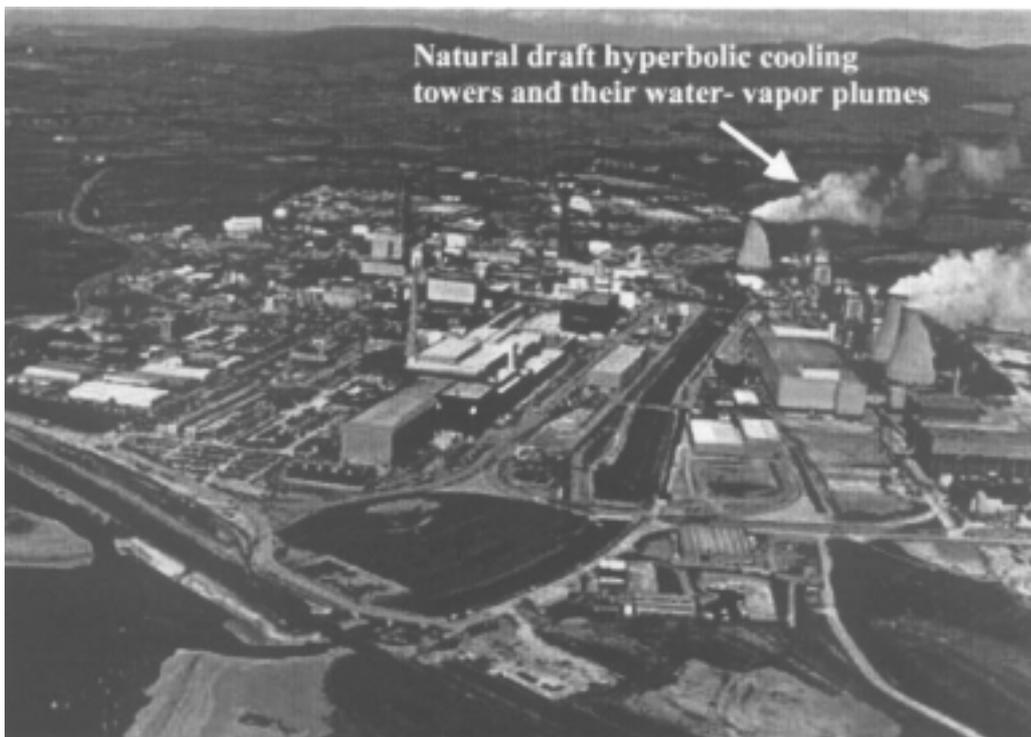


Рис.2: Четыре реактора Магнокс в Калдер Холле (на площадке Селлафилд, Англия) мощностью по 50 МВт(э). Обратите внимание на четыре крупных градирни гиперболической формы с естественной вентиляцией и на облака пара над ними. Реакторы раньше производили электроэнергию наряду с плутонием и тритием для оружия, а теперь плутоний на них не производится.

Поскольку потребуется, по крайней мере, несколько недель облучения для создания практически разумной концентрации плутония в реакторном топливе, существующие сейчас у коммерческих спутников сроки повторного наблюдения в несколько дней должны оказаться адекватными для обнаружения работы завода. Конечно, можно иметь более короткие сроки повторного наблюдения при существовании системы подобных спутников. Это могло бы позволить следить за частотой отключения энергетических реакторов, снабженных градирнями. Поскольку топливо в энергетических реакторах облучается до более высокого уровня выгорания, чем в промышленных, производящих плутоний оружейного качества, частые отключения вызовут подозрение¹⁷.

Из табл.2 можно увидеть, что у большинства ГДЗ, работающих не в России, применяются градирни с орошаемыми стенками. В американских ГДЗ градирни имеют принудительную тягу, но выбрасываемый воздух обычно также насыщен водой, что приводит к видимым облакам пара с подветренной стороны.

Отдельные окошки в верхней части градирен с принудительной тягой обычно меньше окон на вершине градирен с естественной вентиляцией. Но в помещении градирни большой мощности с принудительной тягой есть много ячеек. При этом полная площадь всех окошек и площадь образуемого ими облака пара окажутся достаточно большими. На рис.4б представлен снимок "Ландсата-5" в видимом диапазоне, где виден американский ГДЗ в Портсмуте. Хотя пространственное разрешение составляет всего 30 метров, отчетливо видны облака пара от градирен. Облака будут гораздо более четкими на спутниковом снимке с метровым разрешением.

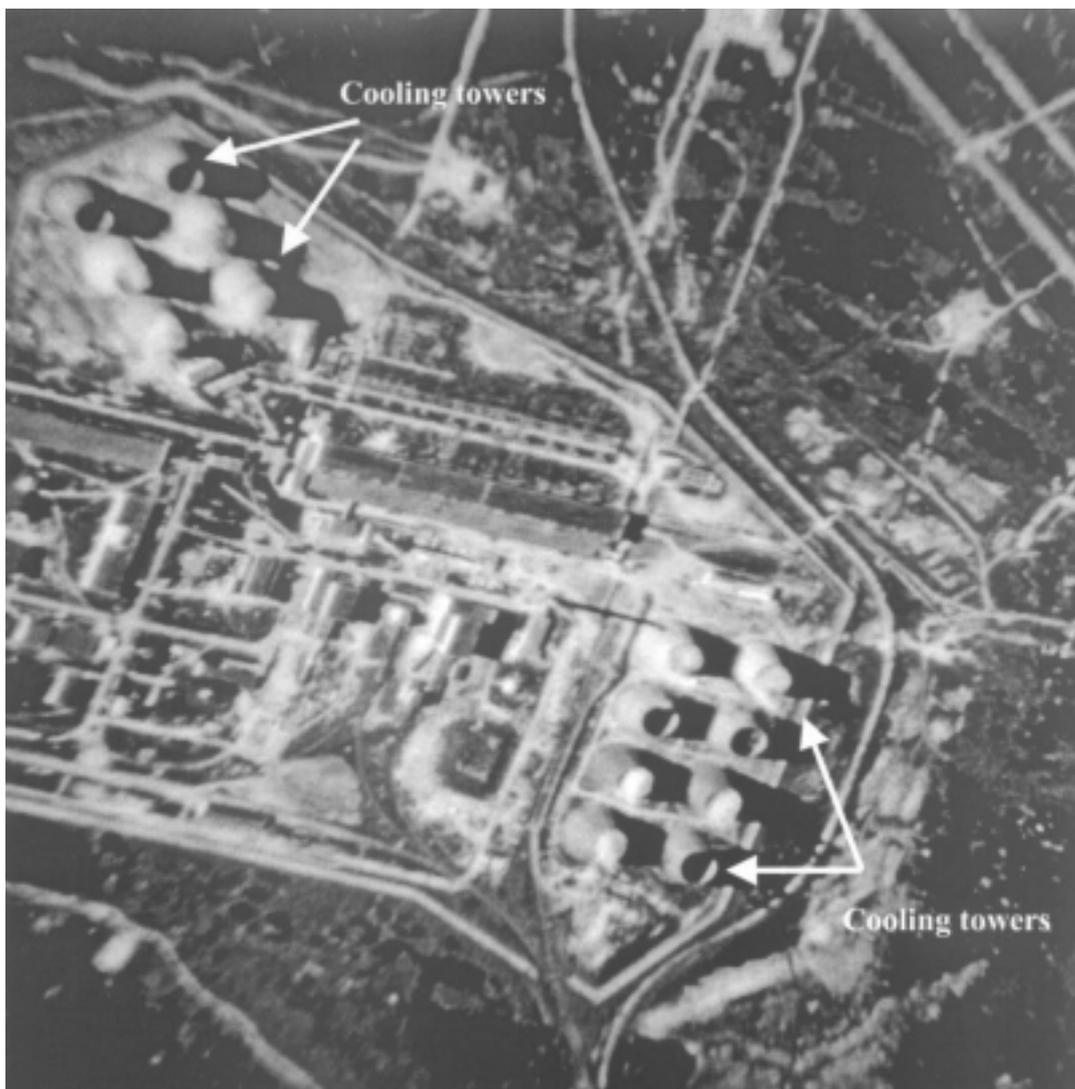


Рис.3: Рассекреченный снимок с американского спутника, где стрелками указаны градирни, относящиеся к двум российским реакторам для производства плутония в Северске (Томске-7). Обратите внимание, что над работающими градирнями видны облака пара, частично закрывающие сами башни. Снимок произведен 15 сентября 1971 г. по программе "Корона" 1115-1 спутником КН-4В с разрешением 1.8 м в надире.



Рис.4а: ГДЗ в Портсмуте (США), видны производственные здания X-326, X-330 и X-333. Обратите внимание на установленные на крыше вентиляторы для рассеивания горячего воздуха.

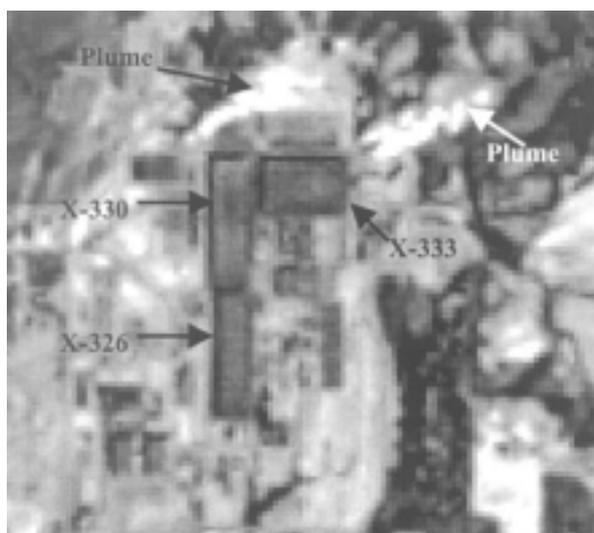


Рис.4б: Снимок "Ландсата-5" в видимом диапазоне, полученный 16 февраля 1991 г. Четко видны облака пара от градирен с принудительной тягой у северо-восточного и северо-западного углов производственных зданий.

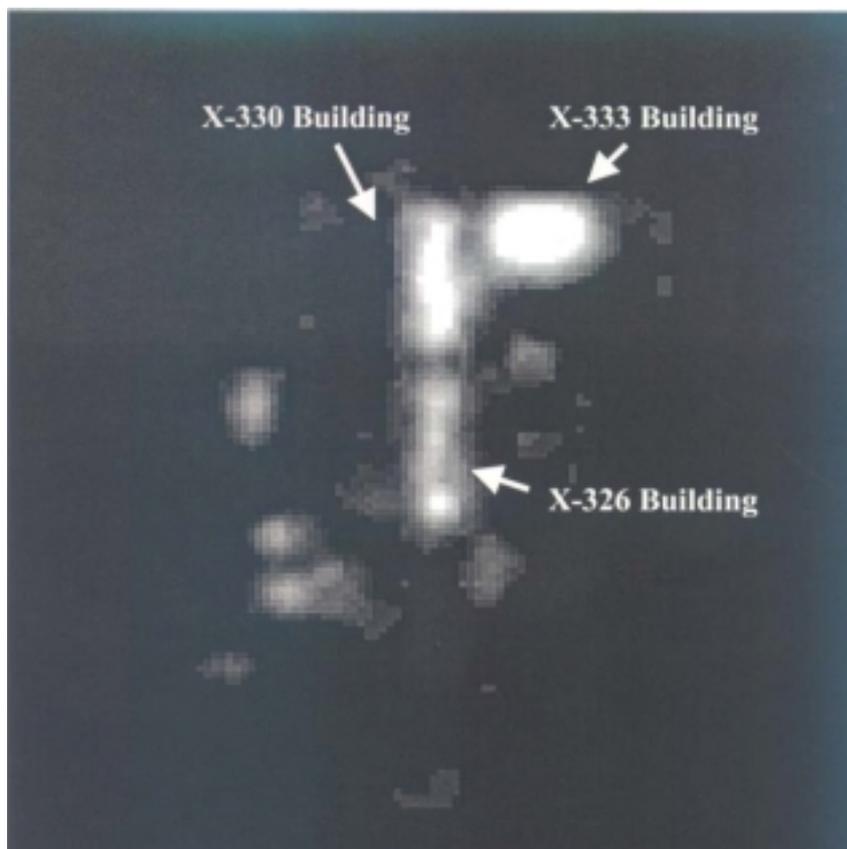


Рис.4в: ТИК снимок "Ландсата-5", полученный 12 марта 1994 г. Явно видны теплые крыши производственных зданий X-333, X- 330 и X-326.

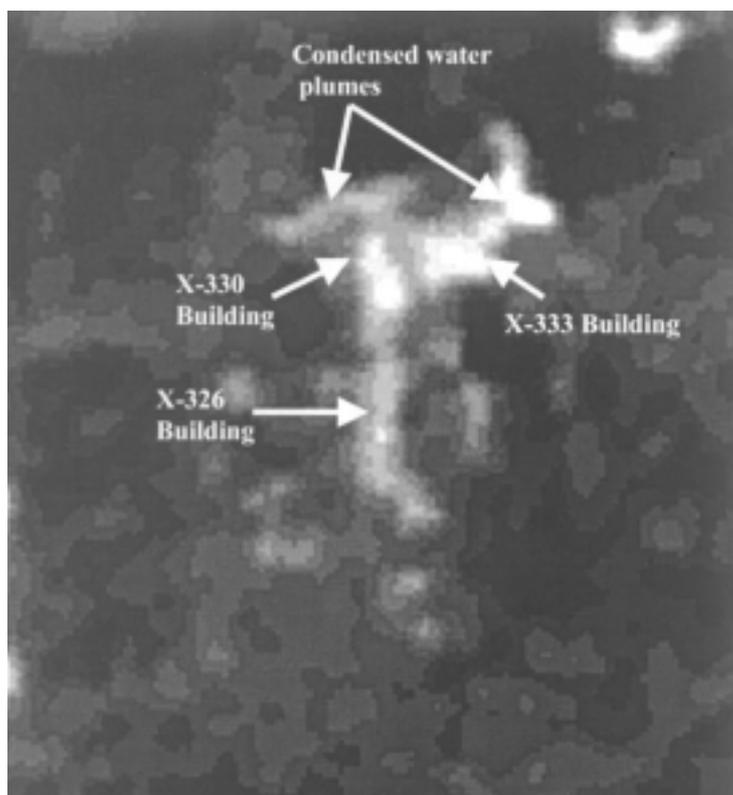


Рис.4г: ТИК снимок "Ландсата-5", полученный 16 февраля 1991 г. Крыши производственных зданий видны не столь явно, как на рис.4в – возможно, это связано с охлаждающим эффектом свежего ветра. Но облака пара, наблюдаемые к северо-западу и к северо-востоку от производственных зданий на снимке-близнеце в видимом диапазоне (рис.4б), видны также и на ТИК снимке.

Благодаря вовлечению больших запасов UF_6 в процесс производства на ГДЗ урана оружейного качества (90% U^{235}) время, необходимое для достижения равновесия, составляет от двух до трех месяцев¹⁸. Поэтому сроки повторного просмотра спутником в несколько дней должны быть адекватными для обнаружения работы ГДЗ.

На рис.5 приведен снимок "Короны" площадки Димона, где находится израильский плутониевый промышленный реактор. Он имеет градирню с принудительной тягой, снабженную двумя вентиляторами. По оценкам, мощность реактора порядка 70 МВт. Но сухой пустынный воздух на площадке может свести к минимуму наличие сконденсировавшегося облака на выходе из градирни. Поэтому представляется затруднительным производить верификацию закрытия этого реактора на основе коммерческих фотоспутников. Полученный со спутника ИКОНОС снимок пакистанского реактора Хушаб также четко указывает, что у реактора есть градирня с принудительной тягой¹⁹. Можно с трудом заметить облака пара над некоторыми окнами на снимках, полученных в феврале 2000 г., и это подтверждает, что реактор работает. Исходя из размера градирни, похоже, что мощность этого реактора сравнима с мощностью реактора в Димоне.



Рис.5: Рассекреченный снимок с американского спутника, работавшего по программе "Корона", где приведено изображение ядерных установок в Димоне (Израиль). Съемка производилась спутником КН-4В 29 сентября 1971 г. с пространственным разрешением 1.8 м. Стрелками указаны реактор и градирня.

Снижение влажности выходящего воздуха примерно на 10% приведет к исчезновению облака пара. Этого можно добиться путем перемешивания окружающего воздуха с насыщенным водой воздухом внутри градирни (см. рис.А-1). Впрочем, пока внешняя влажность не будет очень низкой, за это придется платить большим снижением охлаждающей мощности градирни.

Отстойные бассейны

Реакторы с проточной системой охлаждения часто имеют отстойные бассейны, где хранится речная вода до прокачки через реактор. Эти отстойные бассейны могут также использоваться для аварийного охлаждения, если откажут насосы, подающую воду из реки. На рис.6а показан триплет бассейнов перед L-реактором в Саванна Ривер (США). Высохший отстойный бассейн будет хорошим индикатором того, что реактор заглушен. Это можно обнаружить на снимках с метровым разрешением благодаря изменению отражательной способности участка с бассейном.

Подобная ситуация иллюстрируется на рис.6б, где представлен снимок 1969 г. со спутника КН-4В, на котором видны три крупных отстойных бассейна рядом с ядерным комплексом Джукван в Китае. Похоже, что два темных бассейна слева содержат воду, а правый кажется сухим.

Впрочем, бассейны будут высыхать при отсутствии потребности в воде только при сухом климате, как в районе Джуквана. В сырых районах, например, на площадке Саванна Ривер, где количество осадков превышает скорость испарения, бассейны останутся заполненными, если не открыть стоки для воды.

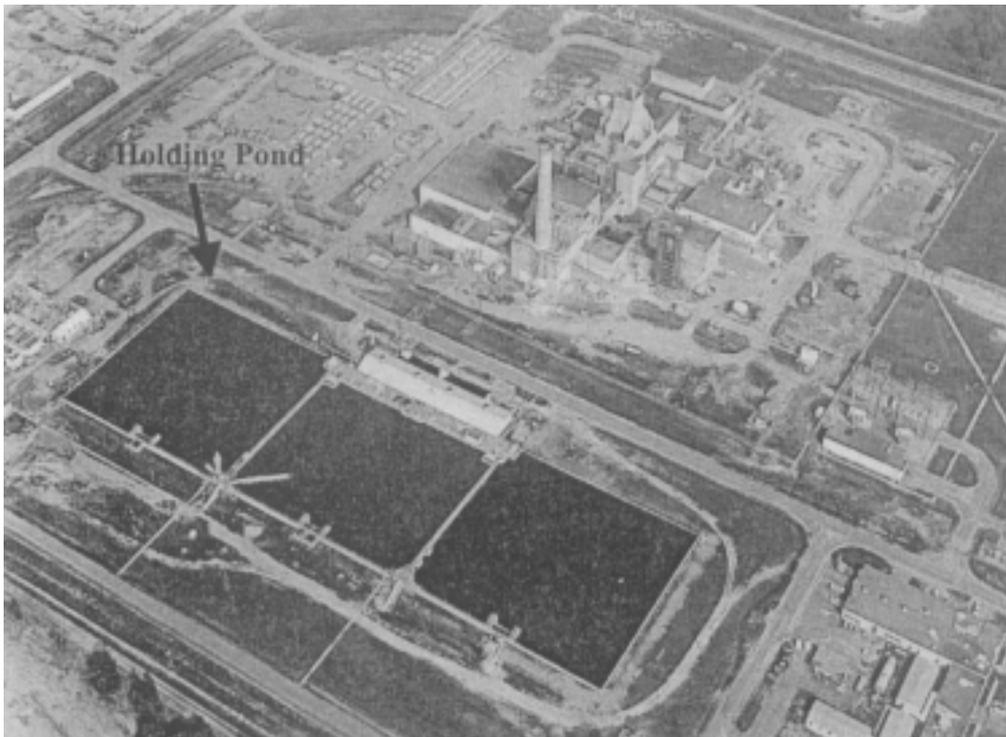


Рис.6а: Отстойные бассейны с охлаждающей водой перед L-реактором на площадке Саванна Ривер.



Рис.6б: Отстойные бассейны в ядерном комплексе Джукван. Три больших бассейна около реактора скорее всего предназначены, чтобы хранить запасную воду для охлаждения реактора. Похоже, что более темные бассейны содержат воду. Снимок сделан спутником КН-4В 9 сентября 1969 г.

Проверка операционного статуса промышленных реакторов и ГДЗ в ТИК диапазоне

Тепловые инфракрасные (ТИК) датчики могут обнаружить небольшую разницу температур, но из-за относительно низкого пространственного разрешения наблюдаемые ими объекты должны либо иметь очень большой размер, либо быть достаточно теплыми, чтобы привести к появлению сигнала, превышающего порог обнаружения увеличения излучения, в одном или нескольких пикселях (см. Приложение Б).

Градирни

Хотя ТИК датчики обладают гораздо более низким пространственным разрешением в отличие от датчиков, работающих в очень близком инфракрасном диапазоне, они могут обнаружить теплые облака водяного пара, выходящего из градирни, как ночью, так и днем, а также на фоне снега. Облака видны в ТИК диапазоне только там, где сконденсировавшиеся капли водяного пара видны человеческим глазом. Это связано с тем, что молекулы воды и воздуха излучают только на характерных молекулярных частотах, а это излучение обычно поглощается аналогичными молекулами в лежащей выше более холодной атмосфере до того, как излучение освобождается и может быть обнаружено датчиками спутника. Напротив, часть температурного излучения, испускаемого каплями в видимом облаке пара, попадает в окна прохождения через атмосферу (в диапазоне 8-14 мкм) и поэтому может пройти через атмосферу.

Видимое облако от градирни обычно, по крайней мере, на несколько градусов Цельсия теплее окружающего воздуха. Размер покрываемого им участка зависит от влажности окружающего воздуха (см. Приложение А). Если этот размер сопоставим с мгновенным полем зрения пикселя в ТИК датчике и если облако теплее лежащего под ним грунта, относительную температурную разницу легко должны зафиксировать датчики на спутниках, указанных в табл.4 (их температурное разрешение лучше 1°C). Действительно, облака пара от градирен ГДЗ в Портсмуте, наблюдавшиеся к северо-западу и северо-востоку от производственных зданий в видимом диапазоне (рис.4б), заметны также на аналогичном ТИК снимке (рис.4г)²⁰.

Охлаждающие бассейны, реки, эстуарии и т.п..

Охлаждающие бассейны – это водные массивы, где охлаждаемая вода передает свое тепло в атмосферу благодаря излучению, конвекции и испарению. Из-за низкой скорости теплопередачи с единицы площади требуется большая площадь поверхности бассейнов. В Приложении В подсчитана требуемая площадь на единицу мощности

$$A/P = (Inr)/[K\Delta T]/\text{МВт(тепл)} \quad (1)$$

Здесь K – коэффициент теплопереноса от воды к воздуху и (благодаря ТИК излучению) в космическое пространство, обычно он равен $20-40 \text{ МВт}/(\text{км}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, ΔT – разница между температурой сбрасываемой для охлаждения воды (T_d) и температурой водозабора (T_i), а

$$r = (T_d - T_e)/(T_i - T_e)$$

где T_e – равновесная температура поверхности бассейна, когда выделяющее энергию предприятие не работает.

Рассмотрим в качестве примера охлаждающий бассейн на площадке ядерного реактора в Чернобыле (рис.7). Предположим, что $K = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ и выберем для T_d , T_i и T_e значения 35 , 25 и 20°C , соответственно, Тогда $r = 3$, а $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$. Подстановка в ур-ие (1) дает $A/P = 3.7 \text{ км}^2/\text{ГВт(тепл)}$, что совпадает с приводимыми в справочнике значениями $2-8 \text{ км}^2/\text{ГВт(тепл)}$ ²¹.

До аварии 26 апреля 1986 г. на Чернобыльской площадке иногда работали одновременно четыре реактора. Электрическая мощность каждого из них составляла около 1 ГВт , а

эффективность преобразования тепловой энергии в электрическую была равна примерно 33%.

Поэтому охлаждающий бассейн был спроектирован для рассеивания максимально около 8 ГВт тепловой энергии. Для принятых нами выше значений параметров подсчитанная из уравнения (1) площадь охлаждающего бассейна составляет примерно 20 км², что, грубо говоря, соответствует рис.7, полученному на основе ТИК датчика "Ландсата", где показано распределение поверхностной температуры в охлаждающем бассейне до и после аварии²².

На рис.8 приведены два ТИК изображения комплекса "Маяк" по получению плутония и тригия в Озерске (Челябинске-65) на Урале²³. На обоих снимках отчетливо видны следы теплой воды, простирающиеся к северу на значительное расстояние вдоль восточного края озера Кызылташ. Поверхностная температура воды на следе в 1987 г. выше максимум на 10⁰С, чем у остальной воды в озере. На тепловом снимке 1993 г. теплый след больше по размеру и теплее остальной воды максимум на 15⁰С. Этот след вероятно связан с реакторами по производству тригия, поскольку все пять промышленных плутониевых реакторов были закрыты к концу 1990 г. (см. табл.1).

Рис.9 показывает тепловую картину (ТИК диапазон), полученную с самолета, который летел на высоте 1.2 км. Так, показаны выбросы теплой воды от реакторов С и L на площадке Саванна Ривер (США), протекающие по болотной местности рядом с рекой Саванна²⁴. Реакторы работали на мощности, превышавшей 2.5 ГВт (тепл). Потоки теплой воды имеют в длину около 4 км и покрывают площадь более 0.5 км² при температуре, которая, по крайней мере, на 5 К выше температуры реки. Реакторы в Ханфорде сбрасывали теплую воду в реку Колумбия. Индийские исследовательские реакторы Друва и Цирус в Тромбее сбрасывают теплую воду в залив (см. рис.10).

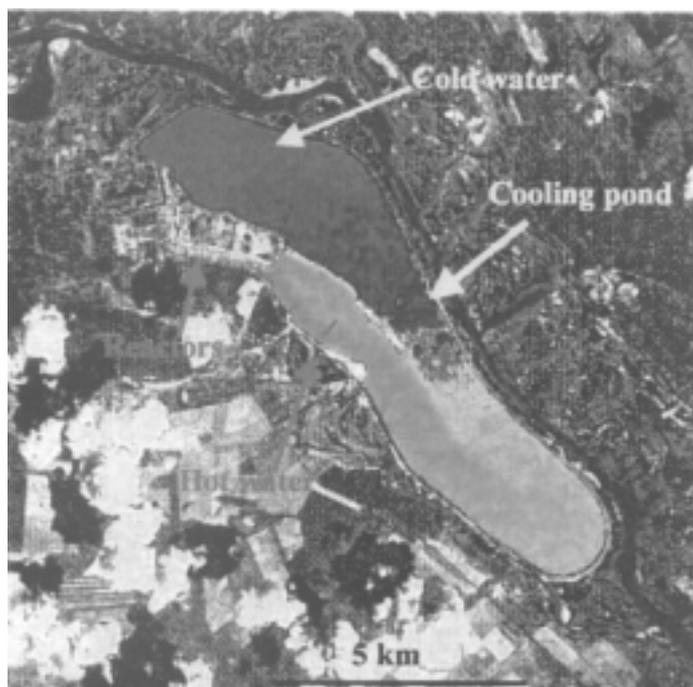


Рис.7а: ТИК изображение Чернобыльской площадки ядерного комплекса (Украина). Оно получено "Ландсатом-5" 22 апреля, когда реакторы работали нормально. Нижние стрелки указывают на реактор и на теплую воду, а верхние на холодную воду и бассейн.



Рис.7б: ТИК изображение того же участка, полученное тем же спутником после аварии. Стрелки указывают на реактор и бассейн.

До тех пор, пока охлаждаемая вода выбрасывается в поверхностные воды, участки с повышенной температурой должны обнаруживаться вокруг точки выброса при помощи спутниковых ТИК датчиков. Впрочем, по крайней мере, теоретически, выброс можно скрыть, если выводить его через длинную трубу со многими отверстиями, лежащую достаточно глубоко, так чтобы перемешивание приводило к температуре, которая неотличима для датчиков от температуры поверхностных слоев воды. При избыточной температуре 15°C объем выброса, выносящего 1 ГВт (тепл) составит $16\text{ м}^3/\text{с}$. Чтобы снизить этот перепад температур до 0.2°C (это предел регистрации у спутника АСТЕР), потребуется растворение в 75-кратном объеме воды, что увеличит объем выброса до $1200\text{ м}^3/\text{с}$. Для сравнения укажем, что расход воды в Енисее (крупнейшей реке в России) около Красноярска составляет, по крайней мере, несколько тысяч $\text{м}^3/\text{с}^{25}$. Три подземных ядерных реактора, сбрасывающие воду в реку поблизости от Красноярска, имели общую тепловую мощность до 6 ГВт, так что при хорошем смешивании могло оказаться возможным скрыть их выбросы от спутника АСТЕР. Реактор с мощностью всего 0.03 ГВт мог бы произвести одно "значительное количество" плутония в год (этого достаточно для создания одной бомбы). У многих рек расход воды достаточен, чтобы скрыть нагретую воду от такого небольшого реактора.

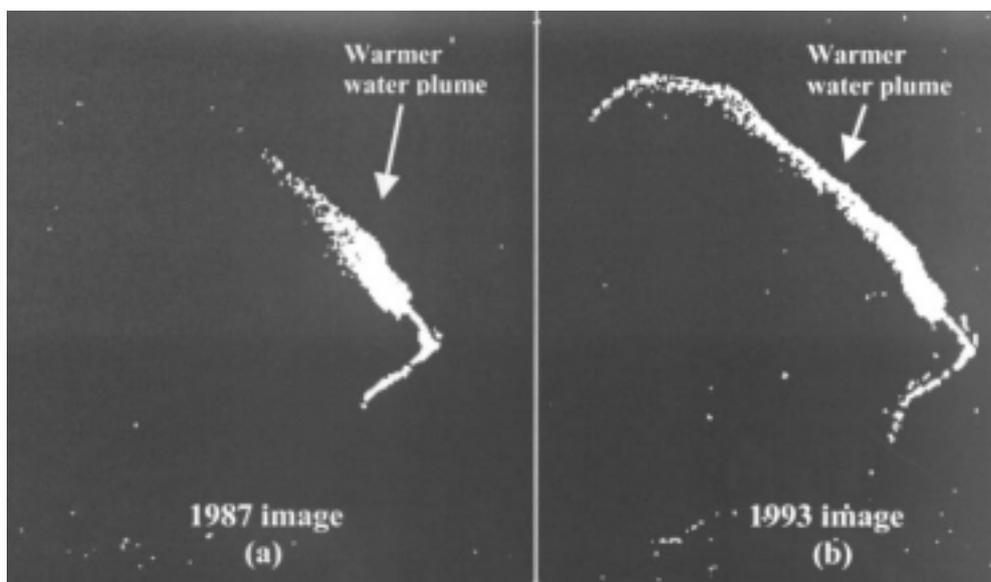


Рис.8: ТИК изображения ("Ландсат-5") выбросов теплой воды в озеро Кызылташ из Озерского комплекса по производству плутония и трития: а) 1 августа 1987 г.; б) 13 мая 1993 г.

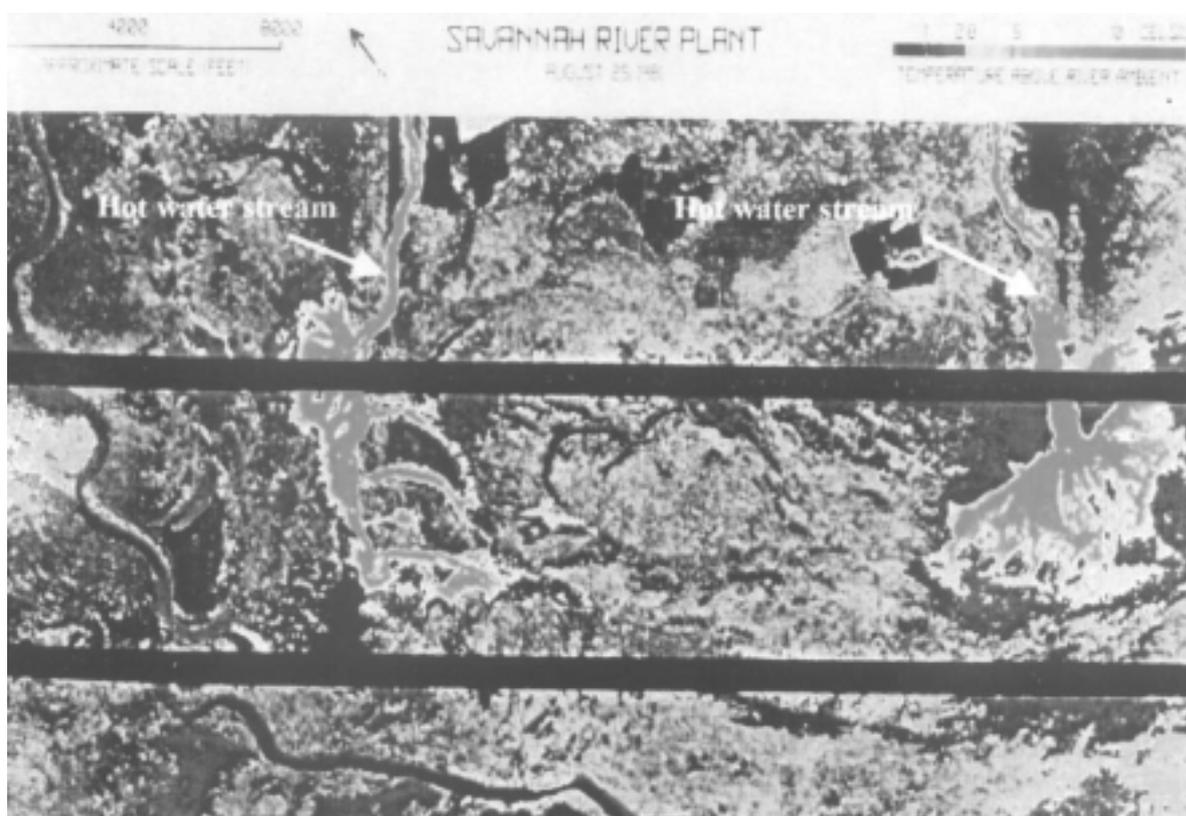


Рис.9: ТИК изображение потоков (указаны стрелками) теплой воды, сбрасываемой в болота от двух промышленных плутониевых реакторов на площадке Саванна Ривер (США).

Обнаружение повышенной температуры крыши производственного помещения работающего ГДЗ

Минимальная температура UF_6 на ГДЗ должна быть надежно выше температуры конденсации или замерзания (см. фазовую диаграмму на рис.11)²⁶. Рабочая температура находящегося в процессе производства газа обычно выше $70\text{ }^{\circ}C$. Следовательно, температура воздуха на участках, где находятся компрессоры, обычно много выше внешней температуры²⁷. На американских заводах эти участки находятся на верхнем этаже производственных

помещений. Чтобы поддерживать более низкую температуру на рабочих участках нижних этажей, внешний воздух всасывается на первый этаж и выпускается через крышу. Вентиляторы на крышах помещений для процесса обогащения в Портсмуте видны на рис.4а. Из-за больших размеров производственных помещений ГДЗ повышенная температура их крыш обнаружима на ТИК снимках коммерческих спутников.

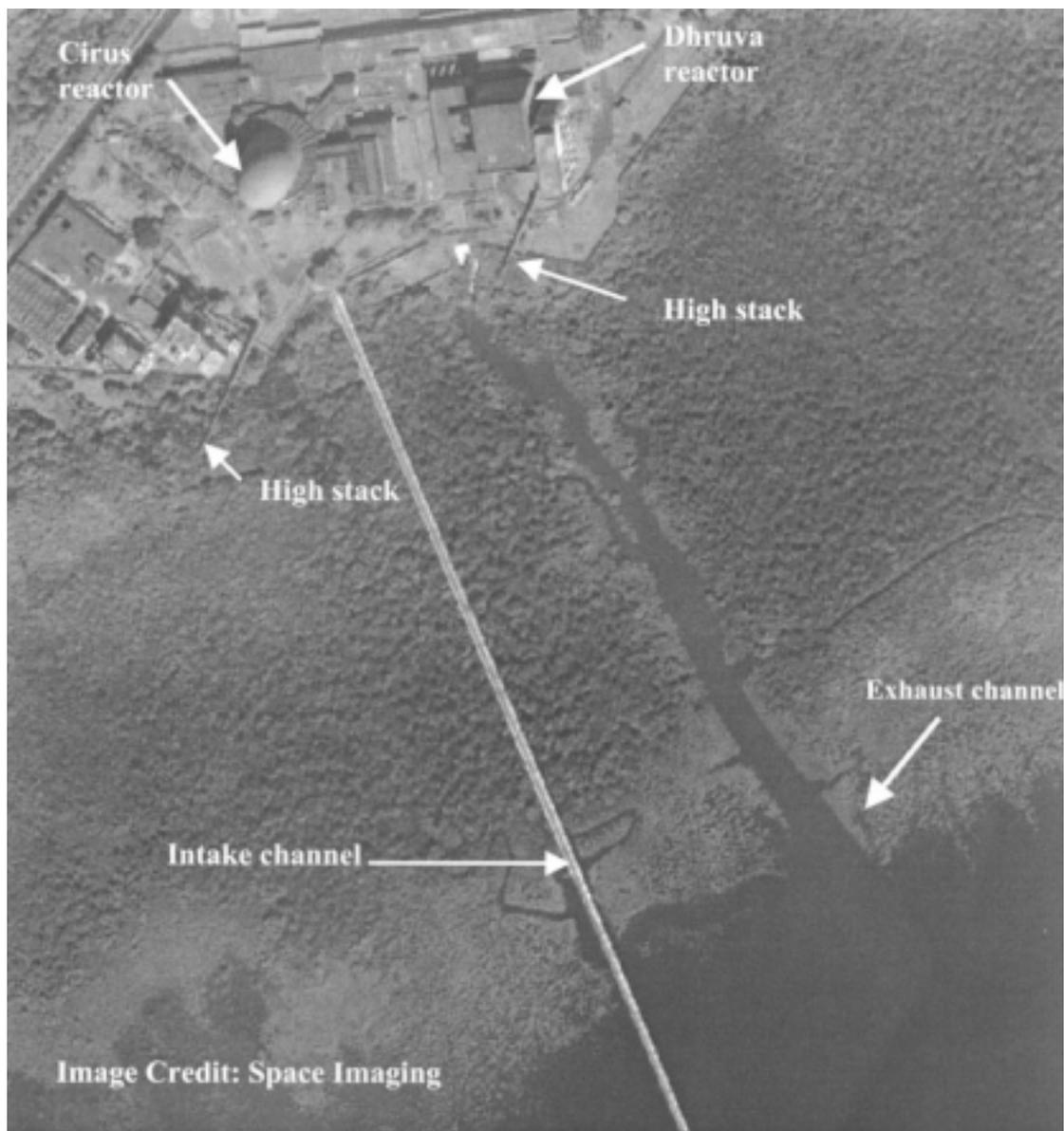


Рис.10: Охлаждающие устройства для "производящих изотопы" индийских реакторов Цирус и Дрива в Тромбее. Реакторы используют топливо из естественного урана и тяжелую воду в качестве замедлителя. Реактор Цирус 40 МВт(тепл) начал работать в 1960 г.; реактор Дрива на 100 МВт(тепл) – в августе 1985 г. Оба реактора производят плутоний для индийского ядерного оружия и работают без гарантий МАГАТЭ, Охлаждающая вода из залива поступает по длинному водозаборнику. Сбрасываемая вода возвращается в залив по водотоку. Видно, как более светлая выбрасываемая вода смешивается с более темной водой залива. Снимок получен спутником ИКОНОС 27 февраля 2000 г.

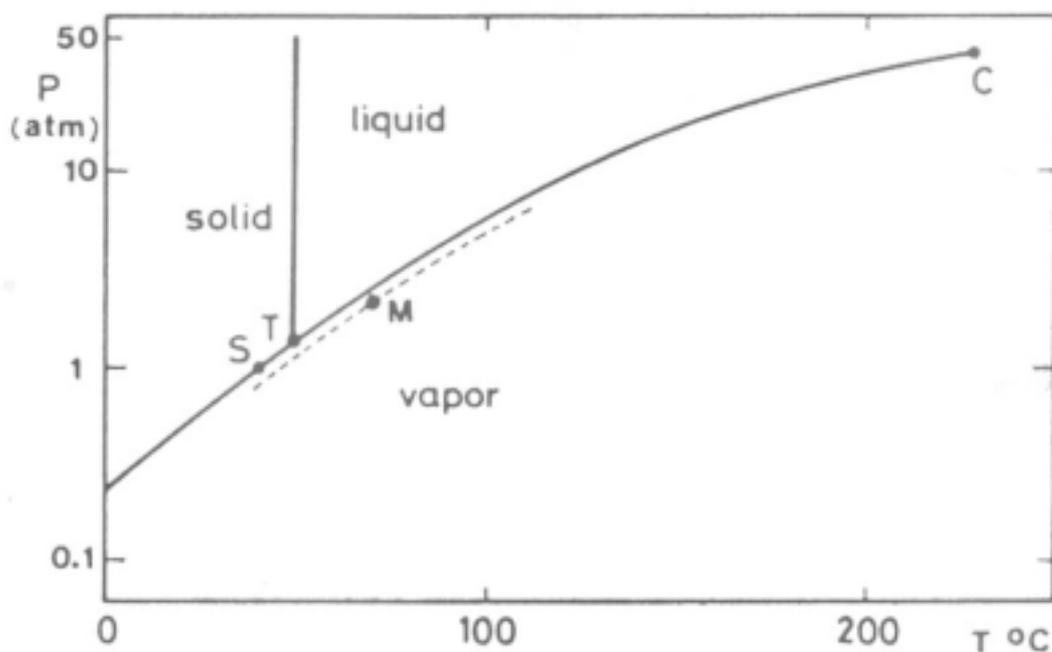


Рис.11: Фазовая диаграмма UF_6 . В тройной (Т) и критической (С) точках температура и давление составляют (64.05 $^{\circ}C$ и 1.50 атм) и (230.0 $^{\circ}C$ и 45.5 атм), соответственно. Температура сублимации (в т.С) при одной атмосфере составляет 56.5 $^{\circ}C$. Штрихованная линия с т.М на ней соответствует рабочим условиям, безопасным от угрозы конденсации шестифтористого урана.

Пример: ГДЗ в Портсмуте, США²⁸

ГДЗ в Портсмуте на юге штата Огайо работал с 1954 г. В 1993 г. завод прекратил производство ВОУ, но он продолжает выпускать НОУ (низко обогащенный уран) для ядерных энергетических реакторов.

Обогатительный каскад размещен в трех больших двухэтажных производственных помещениях, обозначаемых Х-333, Х-330 и Х-326 (см. табл.2 и рис.4а). Во всех трех помещениях оборудования для рабочего газа и соответствующие клапаны и трубопроводы размещены на верхних этажах, У каждого помещения своя система охлаждения, рассеивающая избыточное тепло в окружающую среду с помощью испарительных градирен. ГДЗ потребляет около 2260 МВт(э) при работе на полную разделительную мощность, равную 8.3 миллионам единиц работы по разделению в год²⁹. Обычно завод потребляет около 1000 МВт(э). Это соответствует типичному потреблению энергии на единицу площади производственных помещений, составляющему около 2.6 кВт/м².

Производственные помещения ГДЗ в Портсмуте настолько велики, что они покрывают мгновенное поле зрения нескольких пикселей датчика "Ландсата-5", и настолько нагреваются, что их избыточная температура должна быть обнаружена при работе компрессоров внутри зданий.. При стопроцентной излучательной способности пороги чувствительности ТИК детекторов составляют 0.5-1 $^{\circ}C$ для "Ландсатов-5,7" и 0.2 $^{\circ}C$ для спутника АСТЕР, а это соответствует увеличению радиационного потока на 3-6 и 1 Вт/см², соответственно, что примерно в тысячу раз меньше потребления тепла на заводе.

В течение дня температура крыши на ГДЗ может отличаться от температуры окружающего грунта из-за разного коэффициента поглощения солнечного излучения, а по ночам крыша и грунт могут охлаждаться с разной скоростью из-за различной тепловой инерции и разного воздействия ветра. Уверенность в обнаружении поэтому, как кажется, требует более высокого увеличения температуры крыши по сравнению с оцененными выше пороговыми значениями.

На ТИК снимке, полученном "Ландсатом-5" в утреннее время (9.45 по местному времени) в марте 1992 г. (рис.4в), крыши производственных помещений явно излучают гораздо

больше тепла, чем окружающий фон. На более раннем снимке, полученном в феврале 1991 г. в то же местное время (рис.4г), помещения видны в ТИК диапазоне, но менее отчетливо, что возможно связано с охлаждающим эффектом относительно резкого зимнего ветра³⁰. Хорошо заметные (в ТИК и видимом диапазонах) теплые облака водяного пара, поднимающиеся от одной из градирен с принудительной тягой, указывают, что завод в это время работал. Основываясь на этих результатах, мы ожидаем, что ТИК снимки от спутника АСТЕР укажут на нагрев производственных помещений практически при всех условиях во время работы ГДЗ.

Пример: ГДЗ Ланжу, Китай

ГДЗ Ланжу расположен на берегу Желтой реки вблизи города Ланжу в китайской провинции Ганьсу. Это был первый источник урана оружейного качества, начавший работу в середине января 1964 г. Опубликованные оценки определяют его начальную мощность в 10 000-50 000 кг-единиц в год, а затем она выросла до примерно 300 000 кг-единиц в год³¹.

Рис.12 демонстрирует снимок ГДЗ Ланжу, полученный спутником ИКОНОС 5 февраля 2000 г. По нашим оценкам, производственное помещение имеет около 600 м в длину и 60 м в ширину. При его нынешней мощности и при удельном энергопотреблении 2.4 МВт/кг-единица потребляемая заводом электрическая мощность составит 86 МВт, что соответствует примерно 2.4 кВт(тепл)/м².

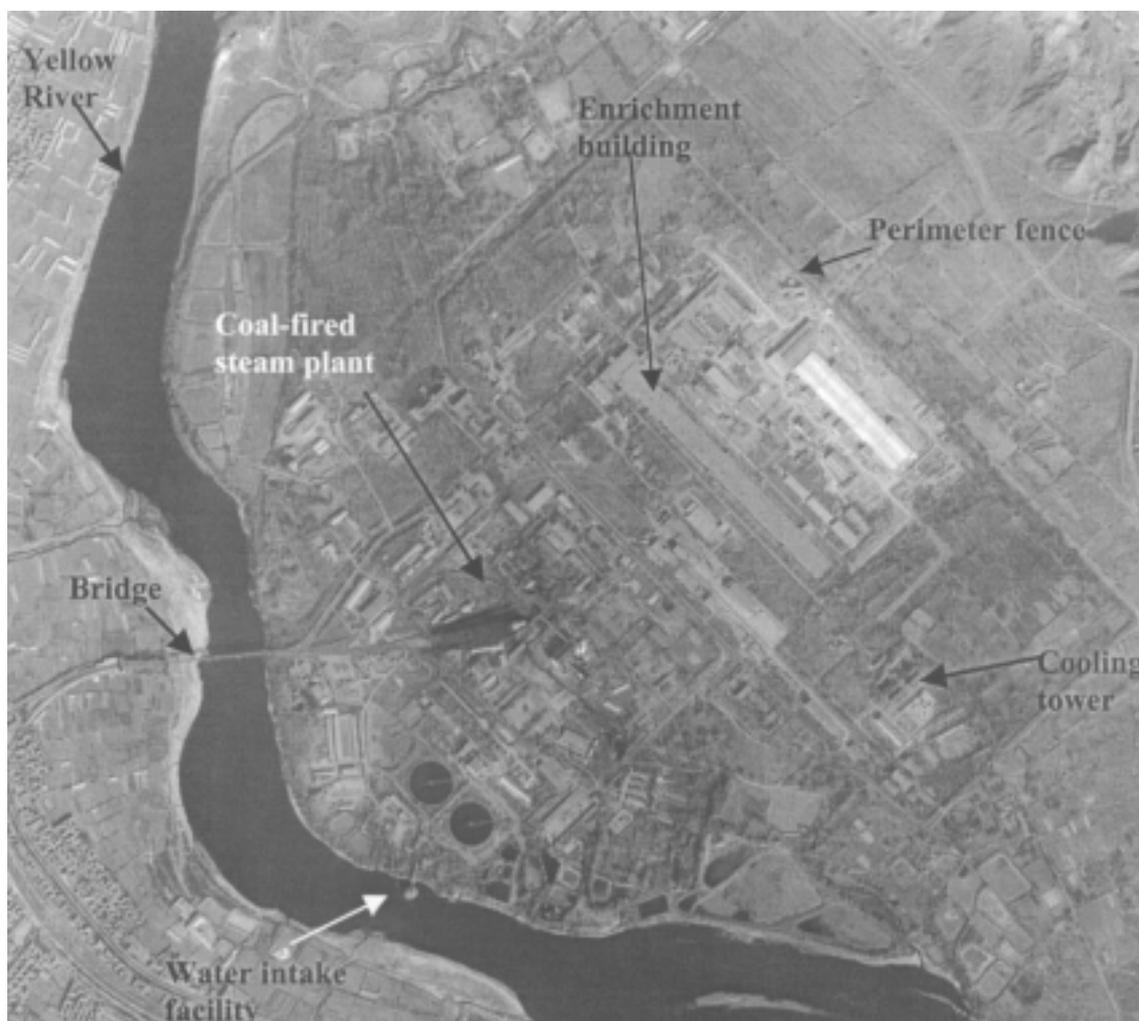


Рис.12а: Спутниковый снимок участка вокруг китайского ГДЗ Ланжу по обогащению урана. Размеры длинного помещения доля обогащения составляют примерно 600м на 60м. Этот черно-белый снимок с метровым разрешением был сделан примерно в 10.30 утра 5 февраля 2000 г. спутником ИКОНОС. Обозначения на снимке (сверху вниз): река Желтая, обогатительное помещение, ограда, угольная ТЭЦ, мост, градирня, водозаборник.



Рис.12б: Крупные планы отдельных участков снимка, приведенного на рис.12а. На верхнем изображении видно здание, содержащее обогатительный каскад (обратите внимание на вентиляторы для теплого воздуха, установленные на крыше). На нижнем левом изображении видны градирни с принудительной тягой (два ряда по восемь башен в каждой). Отсутствие облаков водяного пара указывает, что завод не работает. Нижнее правое изображение - это ТЭЦ, работающая на угле. Черная зона (в середине, слева) – это часть рассыпанного угля. Узкие длинные структуры покрывают конвейеры, переносящие уголь к топкам. Источником облака водяного пара могут быть небольшие градирни, относящиеся к ТЭЦ.

Ширина 60 м завода Ланжу означает, что она только частично попадает в поле зрения пикселей "Ландсата-5" или АСТЕР (120 м и 90 м, соответственно). Это увеличивает дополнительный поток ТИК энергии, требуемой для преодоления пороговых условий обнаружения, в 2-4 раза для "Ландсата-5", в 1-2 раза для "Ландсата-7" и в 1.5-3 раза для АСТЕР в зависимости от того, как поле зрения их пикселей перекрывает ширину помещения (см. Приложение Б).

Тепловое изображение ГДЗ Ланжу было получено "Ландсатом-5" 3 февраля 1989 г. Производственное помещение не было обнаружено в ТИК диапазоне. Возможно, что завод не работал³². Впрочем, возможно также, что он работал, но усредненная по пикселу излучаемая мощность оказалась ниже порога дискриминации ТИК детектора. В любом случае, мы ожидаем, что ТИК датчики "Ландсата-7" и спутника АСТЕР смогут обнаружить работу этого завода при большинстве окружающих условий, если изоляционные свойства крыши сравнимы с тем, что есть на ГДЗ в Портсмуте.

Аналогичные анализы можно провести для ГДЗ Кейпнхурст (Англия) с мощностью 100-150 т-единиц в год и для ГДЗ Пьеррелат во Франции (мощность 400-600 т-единиц в год).

Пример: Пакистанский завод Кахута для центрифужного обогащения

Потребуется проверки на местах для верификации отсутствия производства ВОУ на работающих заводах по обогащению урана. Мы ожидаем, что крупные ЦОЗ будут продолжать работу по получению НОУ для энергетических ядерных реакторов при наличии моратория на производство делящихся материалов для оружия.

Небольшие и неэкономные ЦОЗ, подобные тому, что работает в Кахуте (Пакистан), могут быть закрыты. Впрочем, благодаря своим небольшим размерам и относительно низкому

потреблению энергии такие заводу не нуждаются в специальных системах охлаждения, например, в градирнях.

Потребление электроэнергии на установках с газовыми центрифугами значительно ниже, чем на ГДЗ. Удельное энергопотребление обычно составляет 100-300 кВт/кг-единица, что почти в 10 раз ниже, чем для ГДЗ³³. Обычно для охлаждения различных систем ЦОЗ используется охлажденный воздух, а окончательное выделение тепла в атмосферу осуществляется охлаждаемыми воздухом излучателями, расположенными на крыше, или градирнями с принудительной тягой.

Как считается, начиная с середины 80-х гг, Пакистан производил уран оружейного качества на ЦОЗ Кахута в количествах, достаточных для ядерного оружия, применяя центрифуги западной конструкции. Считается, что производственная мощность составляла 9000-15000 кг-единиц в год³⁴.

Размеры производственного помещения ЦОЗ Кахута можно оценить путем сравнения с первым заводом Алмело, расположенном в Голландии. Этот демонстрационный ЦОЗ, начавший работу в 1976 г., обладал мощностью 200 000 кг-единиц в год. Его полная площадь составила 120 м на 120 м (14 000 м²)³⁵. При удельном энергопотреблении 100-300 кВт/кг-единица такой ЦОЗ рассеивал бы 150-500 кВт тепла, или 150-460 Вт/м². Для сравнения укажем, что обычное американское административное здание потребляет в среднем около 70 Вт/м²³⁶.

Размер завода Алмело почти соответствовал полю зрения пиксела. ТИК изображения этого завода и его соседа-близнеца в Гронау (Германия) были получены "Ландсатом-5" 19 июля 1992 г. Никаких признаков обнаружено не было. Специалисты пришли к выводу, что заводы не работали в то время, но более вероятно, что повышение температуры крыши оказалось слишком малым, чтобы его можно было обнаружить³⁷. Возможно, более чувствительный ТИК датчик, например, датчик на спутнике АСТЕР, смог бы обнаружить повышение температуры. Впрочем, обнаружение столь слабого сигнала будет усложнено охлаждением от ветра и т.п.

Если сопоставлять с заводом Алмело, то центрифуги Кахуты должны бы поместиться в здание с площадью 650-1100 м². Такая площадь составит 5-10% поля зрения пиксела у "Ландсата-5", 18-36% - у "Ландсата-7" и 8-16% - у спутника АСТЕР. Поэтому, чтобы обнаружить тепло от крыши Кахуты, надо соответствующим образом улучшить пространственное разрешение ТИК датчиков. Это должно быть выполнено. Например, если объединить оптику спутника с метровым разрешением и ТИК детектор, то такой детектор получит пространственное разрешение около 20 м. И все же, сигнал от одного пиксела будет гораздо менее убедительным, чем реальное изображение, полученное для ГДЗ в Портсмуте.

Дополнительным осложнением станет то, что может оказаться возможным запускать и останавливать ЦОЗ при малом количестве материала в процессе обогащения за времена, более короткие по сравнению с временами повторного прохождения спутника над заводом (если он применяется в единственном числе, а не как часть спутниковой системы).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Спутниковые фотоснимки метрового разрешения могут обнаружить облака водяного пара от градирен, относящихся к большим промышленным реакторам и к ГДЗ. Похоже, что значительную часть времени то же самое могут делать ТИК датчики. При сухом пустынном воздухе облака окажутся очень краткосрочными.
- Как показали предыдущие авторы, для реакторов с охлаждающими бассейнами или с проточными системами ТИК изображения могут обнаружить следы теплой воды, выпускаемой в принимающий объем воды. При сбросе в реку с достаточным течением, следы можно сделать невидимыми, если осуществлять сброс и перемешивание на глубине.
- Повышенные температуры крыш очень крупных работающих ГДЗ можно обнаружить на ТИК изображениях существующих гражданских спутников. ТИК датчики "Ландсата-7" или спутника АСТЕР могут обнаружить повышенные температуры нагретых крыш на ГДЗ среднего размера (например, в Ланжу), но "Ландсат-5", по-видимому, не сможет этого сделать. Не представляется возможным следить за работой небольших ЦОЗ (например, завода Ка-

хута в Пакистане) с помощью изображающих систем на существующих коммерческих спутниках.

Таким образом, новое поколение гражданских спутников не может заменить инспекцию на местах для Договора о запрещении производства делящихся материалов (ДЗДМ). Впрочем, они могут дополнять такие инспекции и до того, как ДЗДМ вступит в силу, могут увеличивать доверительность к заявлениям о моратории на производство, когда такие моратории приводят к закрытию промышленных реакторов и ГДЗ. В отличие от информации, полученной американскими и российскими наблюдательными спутниками, сведения от коммерческих спутников могут быть доступны всем заинтересованным странам и неправительственным организациям.

Существует потенциальная опасность, что какая-то страна может вступить в особые отношения с оператором коммерческого спутника для скупки всех изображений своих "деликатных" районов, чтобы не допустить к ним другие организации. Впрочем, с учетом количества конкурирующих запускаемых систем метрового разрешения (см. табл.3) кажется маловероятным, чтобы одна страна смогла организовать такие связи со всеми операторами.

В будущем международное верификационное агентство могло бы владеть одним или несколькими спутниками для специальных наблюдений³⁸.

Приложение А

Протяженность облаков пара от градирен с увлажненными стенками

В градирнях с увлажненными стенками (с естественной вентиляцией или с принудительной тягой) первичный механизм охлаждения заключается в испарении. Теплая вода стекает через прокладки на дне градирни, а воздух течет через них вверх³⁹. Обычно конструкция градирни приводит к почти полному насыщению на выходе из прокладок. Температура насыщения входящего воздуха (при которой степень насыщения дойдет до 100%) определяет, сколько воды вносит с собой воздух, а температура выходящего воздуха – сколько воды выносятся.

По мере того, как воздух поднимается вверх, он расширяется и охлаждается. Происходит конденсация водяных паров, что приводит к почти постоянному присутствию видимого облака⁴⁰. После того, как облако выходит из градирни, его подъемная сила приводит к дальнейшему увеличению высоты⁴¹. Оно будет также смешиваться с окружающим воздухом. Сколь далеко с подветренной стороны будет образующаяся смесь оставаться перенасыщенной, зависит от уровня насыщения окружающего воздуха. Это показано линией, соединяющей точки на рис.А-1, - "психометрической диаграмме"⁴², определяющей количество воды (в граммах) на кубометр насыщенного воздуха в зависимости от температуры. Точка "о" на рисунке соответствует насыщенному выходящему воздуху на выходе из градирни при температуре около 25 °С. Точка "i" соответствует входящему или окружающему воздуху при 8 °С и влажности 70 %. Все смеси выходящего и внешнего воздуха лежат на линии, соединяющей эти точки. Точка "с", где линия пересекает кривую насыщения, обычно называется критической точкой раствора. На линии между "о" и "с" воздушная смесь перенасыщена, происходит конденсация и поэтому облако становится видимым. Между точками "с" и "i" облако становится ненасыщенным и начинает исчезать. Если окружающий воздух уже насыщен, видимое облако будет, в принципе, неограниченно расширяться.

С учетом линейности влажности при растворении определим критическую степень растворимости (R_d) выходящего воздуха в критической точке растворения

$$R_d = (T_o - T_i) / (T_c - T_i) \quad (A-1)$$

где приведены температуры в рассмотренных выше точках.

Возрастание температуры и скорости воздуха, выбрасываемого из градирни с естественной вентиляцией

Энтальпия испарения воды составляет около 2.4 МДж/кг, а удельная теплоемкость воздуха равна 1 кДж/(кг·°C). Поток уносимой энергии - МВт(тепл) на м² выходной апертуры – на вершине градирни равен

$$p = j[0.001(T_o - T_i) + 2.4(F_o - F_i)] \text{ МВт(тепл)/м}^2 \quad (\text{A-2})$$

где F_i и F_o - массовые доли водяного пара во входящем и выходящем воздухе, а $\Delta T = T_o - T_i$ -разница температур входящего и выходящего воздуха. Кроме того

$$j = \rho_o V_o \quad (\text{A-3})$$

Это расход воздуха через апертуру градирни в кг/м²-с, где ρ_o – плотность выходящего воздуха (кг/м³), а V_o – его скорость (м/с).

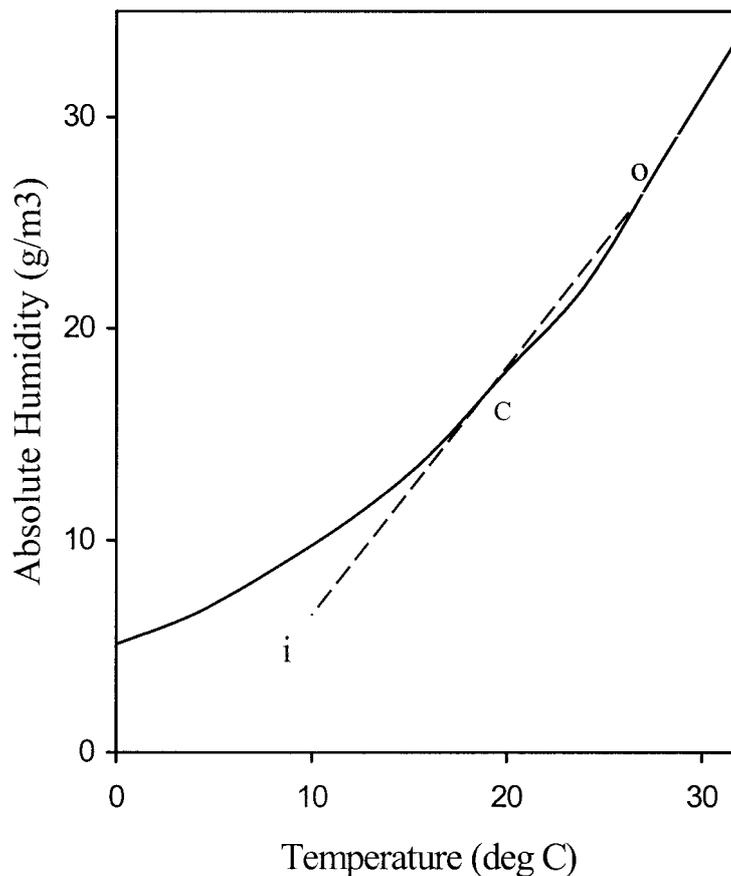


Рис.А-1: Упрощенная психометрическая диаграмма, показывающая насыщенную влажность воздуха в зависимости от температуры. Воздух в облаке из градирни будет следовать по прямой штрихованной линии, где насыщенный выбрасываемый воздух с влажностью и температурой, определяемыми точкой "o", растворяется во внешнем воздухе, влажность и температура которого соответствуют точке "i". По оси абсцисс отложена температура (°C), по оси ординат – абсолютная влажность (г/м³).

В градирне с естественной вентиляцией скорость газа на выходе определяется разностью плотностей между находящимся внутри и вне градирни воздухом ($\Delta\rho$) и высотой градирни h (м)⁴³ в соответствии с формулой сохранения энергии

$$(1/2)\rho_o V_o^2 = K\Delta\rho gh \quad (\text{A-4})$$

где $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести, а K – множитель меньше единицы, отражающий уменьшение доступной потенциальной энергии из-за потерь на рассеяние в прокладках и в других местах градирни (обычно значение K близко к 0.25)⁴⁴. Используя закон идеального газа, получим

$$\Delta\rho/\rho_o \approx \Delta T/T_i \quad (\text{A-5})$$

Тогда уравнение (A-4) принимает вид

$$V_o^2 \approx (2K)(\Delta T/T_i)gh \quad (\text{A-6})$$

или

$$V_o \approx 0.9 C_s [\Delta T]^{1/2} \quad (\text{A-7})$$

Множитель подобия

$$C_s = [(4K)(h/50)(300/T_i)]^{1/2}$$

равен единице при $K = 0.25$, $h = 50 \text{ м}$ и $T_i = 300 \text{ К}$.

Подставив (A-3) и (A-7) в (A-2) и положив $\rho_o \approx 1 \text{ кг/м}^3$, получим

$$\rho \approx 0.9 C_s (\Delta T)^{1/2} [0.001 \Delta T + 2.4(F_o - F_i) \text{ МВт/м}^2] \quad (\text{A-8})$$

В уравнении (A-8) $F_o = F_w^s(T_o)$ и $F_i = f_i F_w^s(T_i)$, где f_i – степень насыщения поступающего воздуха, а в промежутке $10\text{-}30 \text{ }^\circ\text{C}$

$$F_w^s(T) \approx [3.7448 + 0.365118N - 0.0016594 T^2 + 0.00047455 T^3] 10^{-3} \quad (\text{A-9})$$

весовая доля воды, переносимой насыщенным воздухом в зависимости от температуры T ($^\circ\text{C}$).

На рис.А-2 приведен график зависимости ρ от ΔE для $h = 60 \text{ м}$, $f_i = 0.1$ и $T_i = 0, 10, 20, 30 \text{ }^\circ\text{C}$. В случае градирен в Томске, если поток снимаемой энергии составляет около 0.3 МВт/м^2 ⁴⁵, то можно увидеть, что при $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и 50%-ной влажности возрастание температуры в облаке выброса составит около $14.5 \text{ }^\circ\text{C}$. Из уравнения (A-7) следует, что скорость воздуха на выходе из градирни равна в этом случае около 4 м/с .

Расползание облака

В наиболее привычном подходе к моделированию перемешивания в облаке предполагается распределение Гаусса. При этом увеличенная концентрация воды вдоль оси облака дается выражением

$$\chi = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \left\{ 1 + \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{2H}{\sigma_x}\right)^2\right] \right\} \quad (\text{A-10})$$

где χ – увеличенная массовая концентрация воды (кг/м^3), Q – скорость испарения воды (кг/с), σ_y и σ_z (которые зависят от подветренного расстояния x) – стандартные отклонения концентрации воды в облаке в поперечном и вертикальном направлениях (м) по мере дрейфа вдоль ветра⁴⁶. H – высота центральной линии облака, которая может зависеть от x , если подъемная сила облака вынуждает его подниматься, а u – средняя скорость ветра (м/с).

Характер роста параметров расползания σ_y и σ_z с увеличением подветренного расстояния x зависит от условий стабильности в самом низком "смешивающемся" слое атмосферы. Эти условия стабильности разделяются на шесть классов: А-Ф. Класс А самый неустойчивый, например, вечером яркого солнечного дня, когда почва теплее атмосферы и поэтому генерирует поднимающиеся тепловые потоки. Самый устойчивый класс Ф наблюдается, к примеру, ранним утром после ясной ночи, когда почва холоднее лежащего выше воздуха. Различные создатели моделей предлагали эмпирические функциональные представ-

ления для параметров расползания в каждой категории устойчивости. Мы использовали аналитические формы, приведенные Гринном и др.⁴⁷.

Начальная концентрация воды на выходе из градирни дается выражением

$$\chi_o = \frac{Q}{\pi R^2 V_o} \quad (\text{A-11})$$

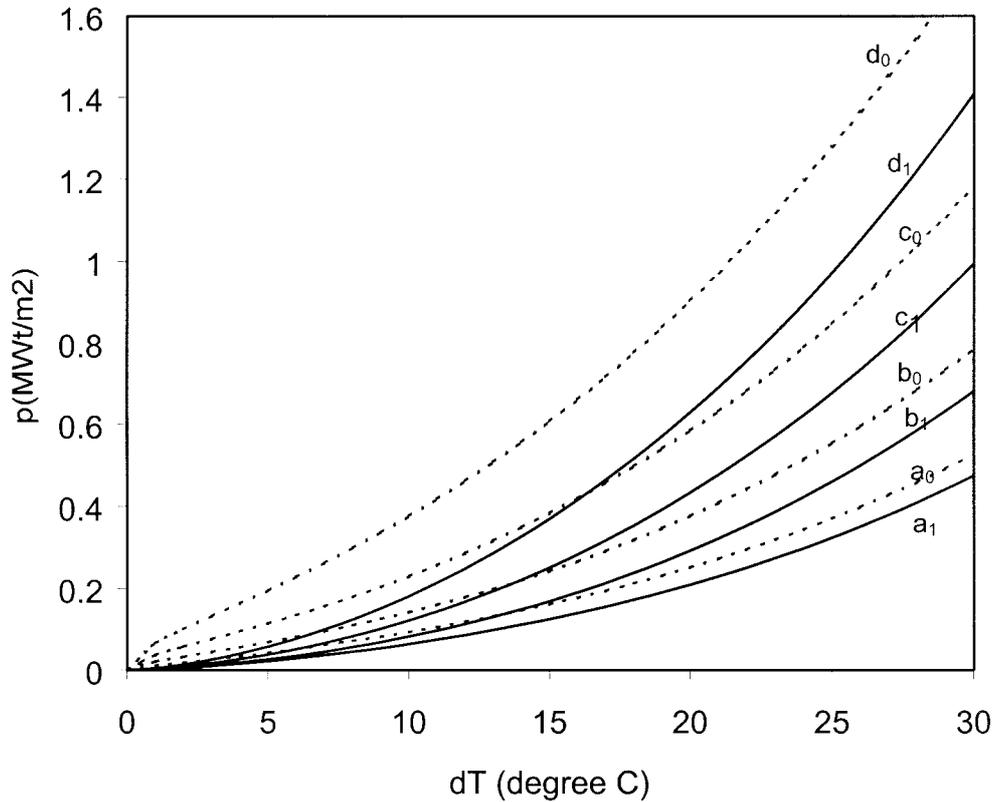


Рис.А-2: Мощность градирни (МВт/м²) в зависимости от увеличения температуры ΔT при различной температуре (T_i) и относительной влажности (f_i) окружающего воздуха: a_0 : $T = 0$, $f = 0$; a_1 : $T = 0$, $f = 1$; b_0 : $T = 10^\circ\text{C}$, $f = 0$; b_1 : $T = 10^\circ\text{C}$, $f = 1$; c_0 : $T = 20^\circ\text{C}$, $f = 0$; c_1 : $T = 20^\circ\text{C}$, $f = 1$; d_0 : $T = 30^\circ\text{C}$, $f = 0$; d_1 : $T = 30^\circ\text{C}$, $f = 1$.

где R - радиус выпускного отверстия градирни, а V_o - скорость выхода воздуха из градирни. Комбинируя уравнения (А-10) и (А-11), получим

$$\sigma_y^o \sigma_z^o = \frac{R^2 V_o}{2u} \quad (\text{A-12})$$

где σ_y^o и σ_z^o - начальные значения σ_y и σ_z на вершине градирни.

Если использовать уравнение (А-10) на достаточно коротких расстояниях с подветренной стороны, когда величина σ_z^o становится сравнимой с расстоянием от облака до земли или до верхней части "смешивающего слоя", то степень растворения вдоль центральной линии облака выражается в виде

$$\frac{\chi_o}{\chi} = \frac{\sigma_y \sigma_z}{\sigma_y^o \sigma_z^o} \quad (\text{A-13})$$

Когда это отношение повысится до величины R_d , концентрация на центральной линии падает ниже уровня насыщения и облако исчезает.

Рассмотрим в качестве примера снова градирни реакторов в Томске-7: мощность охлаждения $0.3 \text{ МВт(тепл)/м}^2$, $h = 60 \text{ м}$, $R = 30 \text{ м}$, $V_0 = u = 4 \text{ м/с}$, а T_0 на $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ меньше температуры, при которой воздух проходит через прокладку со 100%-ным насыщением. При температуре окружающего воздуха $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и влажности 80% критический множитель растворения на краю видимого облака, подсчитанный на основе уравнений (А-1), (А-8), (А-9) и рис. А-1, равен примерно четырем. Соответствующая длина облака, подсчитанная на основе уравнений (А-13) и (А-10), оказывается равным 50 м, 200 м и 500 м для погодных классов А, D и F, соответственно.

На рис.А-3 представлены действительные размеры облака, видимые сверху. При тех же самых характеристиках градирни и указанных выше состояний погоды за исключением изменения относительной влажности до 50% длины облака уменьшатся до 20 м, 80 м и 200 м, соответственно.

Используя подобные расчеты, можно заключить, что практически при всех погодных и рабочих условиях облако сконденсировавшихся водяных паров будет видно, по крайней мере, на выходе из работающих градирен с естественной вентиляцией. При низкой относительной влажности окружающего воздуха и высокой температуре воздуха размеры такого облака малы и оно быстро расплзается. При малой скорости ветра и высокой влажности (или низкой температуре) окружающего воздуха облака могут быть очень плотными и простираться с подветренной стороны на несколько км до того, как полностью исчезнут.

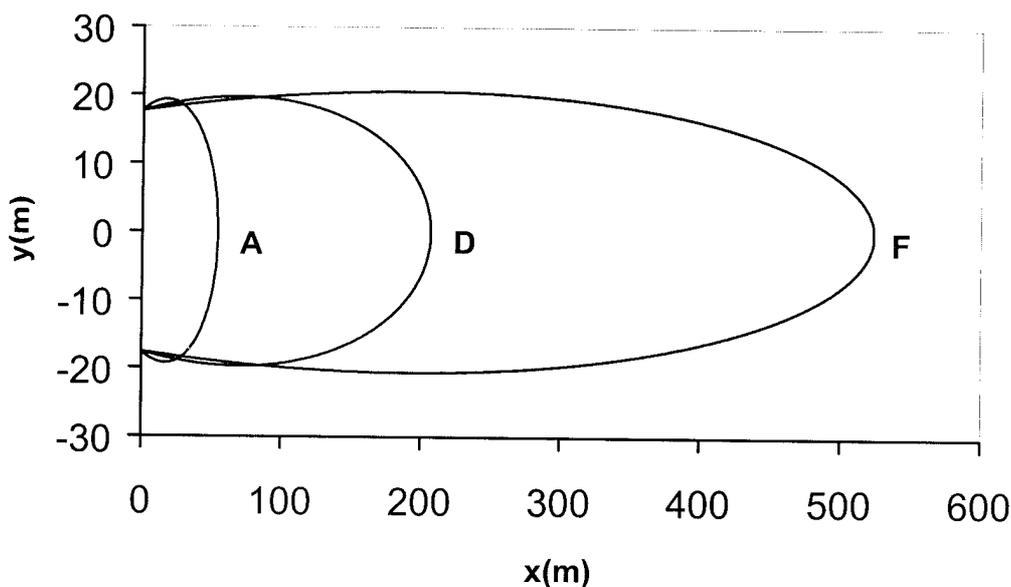


Рис.А-3: Горизонтальное сечение по центральной линии видимого облака, рассчитанного для градирни в Северске при погодных условиях А, D и F. Координаты x и y — расстояния вдоль ветра и поперек ветра от начальной точки (0,0), соответствующей вершине градирни (имеющей радиус 15 м). Температура окружающего воздуха равна $20 \text{ }^\circ\text{C}$, а относительная влажность — 80%

Приложение Б

Возможность обнаружения объектов, меньших по сравнению с полем зрения ТИК пикселей

Поверхность излучает полный поток энергии $S = \varepsilon \sigma T^4$, где ε - излучательная способность поверхности, σ - постоянная Стефана-Больцмана [$5.67 \times 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K}^4)$], а T — абсолютная температура тела. У большинства неметаллических поверхностей излучательная способность лежит в диапазоне 0.85-1 (Значение 1 соответствует черному телу). Поэтому полная мощность, излучаемая поверхностью с площадью A составит

$$P = \varepsilon \sigma T^4 A \quad (\text{Б-1})$$

Если площадь теплового объекта A , пересекаемая полем зрения пиксела (A_p) спутникового ТИК детектора, меньше, чем A_p , то эффективное увеличение температуры, отмеченное детектором, будет взвешенным по площади средним между температурой объекта и фоновой температурой

$$\varepsilon T^4 f + \varepsilon_b T_b^4 (1 - f) = \varepsilon_b T_{\text{eff}}^4 \quad (\text{Б-2})$$

где ε_b и T_b - излучательная способность и температура фона, соответственно, а $f = A/A_p$ - часть поля зрения пиксела, покрытая теплой поверхностью.

Если решить уравнение (Б-2) относительно величины $(T - T_b)$, малой по сравнению с T_b , получим

$$\Delta T_{\text{eff}} \equiv T_{\text{eff}} - T_b \approx \{(\varepsilon/\varepsilon_b)(T - T_b) + (1/4)[(\varepsilon/\varepsilon_b) - 1]T_b\}f \quad (\text{Б-3})$$

Чтобы быть обнаруженной, величина ΔT_{eff} должна превысить порог чувствительности ТИК детектора ΔT_{th} . В этом приближении можно положить $\varepsilon = \varepsilon_b = 1$ и тогда уравнение Б-3 принимает вид

$$A(T - T_b) \geq A_p \Delta T_{\text{th}} \quad (\text{Б-4})$$

В качестве предельного примера рассмотрим возможность обнаружения облаков водяного пара, если они видны только внутри вершин градирен реакторов в Томске-7 – это, как кажется, почти тот случай, который виден на рис.3 для некоторых градирен в Томске-7. Мы подсчитали в Приложении А, что при температуре окружающего воздуха 20°C и влажности 50% разница температур между входящим и выходящим воздухом в градирне будет около 14.5°C . Площадь вершины одной градирни составляет около 700 м^2 . Если температура грунта также равна 20°C , то $A(T - T_b) \approx 10^4 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. На реакторе Джикван площадь каждой вершины градирни примерно вдвое меньше, чем в Томске-7. Для сравнения укажем, что в соответствии с табл.4 величина $A_p \Delta T_{\text{th}}$ для ТИК детекторов на "Ландсатах-5,7" и на спутнике АСТЕР составляет 7000-14000, 2000-4000 и $1600 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, соответственно. Поэтому похоже, что если даже облако покрывает площадь, не превышающую поверхности градирни в Томске-7 или на реакторе Джикван, оно должно быть обнаружено ТИК детекторами на "Ландсате-7" и на спутнике АСТЕР. Но возможность обнаружения ТИК детектором на "Ландсате-5" будет зависеть от эффективного размера облака и разницы между его температурой и температурой почвы.

Однако, из уравнения (Б-3) видно, что ΔT_{eff} может оказаться выше порога, если даже отсутствует разница температур, но существует отличие в излучательной способности крыши и окружающего фона. Когда $T = T_b$, то при $f = 1$ и $T_b = 300 \text{ К}$ $\Delta T_{\text{eff}} = 1 \text{ К}$, если разница между излучательными способностями достигает 1.3%. Поэтому для поверхности типа крыши ГДЗ сравнение величины ΔT_{eff} при спокойном и ветреном днях окажется полезным для определения того, какая часть ΔT_{eff} связана с реальным различием температур, а какая – с отличием отражательных способностей. В ветреный день величина $T - T_b$ увеличится значительно из-за усилившегося конвективного охлаждения (см. обсуждение двух ТИК изображений ГДЗ в Портсмуте на рис.4в и 4г в основном тексте).

В соответствии с уравнением (Б-1) вызываемое повышенной температурой крыши различие в мощности, излучаемой крышей и окружающим фоном, составляет в пересчете на единицу площади

$$\Delta P_r \approx 4\sigma\varepsilon_b T_b^3 \Delta T_{\text{eff}} \text{ Вт/м}^2 \quad (\text{Б-5})$$

В приближении, когда $\varepsilon_b = 1$ и $T_b = 3000 \text{ К}$ это дает $\Delta P_r = 6\Delta T_{\text{eff}} \text{ Вт/м}^2$.

Приложение В

Определение размеров охлаждающих бассейнов

При заданной площади поверхности наиболее эффективным охлаждающим бассейном станет достаточно глубокий, позволяющий внутренним течениям (вызываемым различием плотностей) легко поднимать теплую воду на поверхность. Ввод воды должен быть расположен в самой холодной точке поверхности бассейна и следует также обеспечить минимальное смешивание теплой воды с более холодной водой на глубине, чтобы добиться наиболее высокой температуры теплого поверхностного слоя⁵⁰. Время, требуемое для прохождения воды через бассейн, зависит от скорости прокачки и объема бассейна, а изменение температуры между забираемой заводом и сбрасываемой водой – от скорости прокачки и площади поверхности бассейна. Поскольку поверхностная температура воды меняется в зависимости от расстояния до точки сброса, скорость теплообмена с поверхности бассейна неоднородна.

Скорость теплопереноса со всей поверхности бассейна определяется выражением

$$P = \int K(T_s - T_e)dA \quad (B-1)$$

где K - коэффициент поверхностного теплообмена ($\text{Вт}/\text{м}^2\text{-}^\circ\text{C}$), A – площадь поверхности бассейна (м^2), а T_s и T_e - местная и равновесная температуры поверхности, соответственно ($^\circ\text{C}$).

Равновесная температура поверхности воды соответствует случаю, когда нет теплообмена между поверхностью и атмосферой, а также (из-за излучения) с космическим пространством. Коэффициент поверхностного теплообмена зависит от скорости ветра, локальной температуры поверхности и температуры смоченного термометра, помещенного над бассейном (T_w). Эта зависимость от параметров изображается в следующем виде⁵¹

$$K=3.7+3.97(1+0.05V^2)(1.04+0.761T'+0.0026T'^2)\text{Вт}/(\text{м}^2\text{-}^\circ\text{C}) \quad (B-2)$$

Здесь V – скорость ветра ($\text{м}/\text{с}$), а $T' = (T_s + T_w)/2$. Коэффициент поверхностного теплообмена обычно лежит в диапазоне $20\text{-}40 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{-}^\circ\text{C}$ ⁵².

В равновесном состоянии и при равновесном течении эта скорость диссипации тепла равна разнице между потоком тепла в бассейн и выводом тепла из бассейна. Если ввести величину ΔT , равную разнице между температурой сброса T_d и температурой вывода T_i , то

$$P = C_w \rho J_w \Delta T \text{ Вт} \quad (B-3)$$

где ρ - плотность воды ($1000 \text{ кг}/\text{м}^3$), C_w - удельная теплоемкость воды ($4200 \text{ Дж}/\text{кг}\text{-}^\circ\text{C}$), J_w - расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$). При $\Delta T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ $J_w = 16 (\text{м}^3 \text{ с}) \text{ ГВт}(\text{тепл})$.

При равновесии можно приравнять уравнения (B-1) и (B-3)

$$C_w \rho J_w (T_d - T_i) = \int K(T_s - T_e)dA \quad (B-4)$$

Такое же уравнение, связывающее расход воды и скорость потерь тепла, можно написать для полоски поверхности бассейна со средней температурой T_s и с разницей температур dT_s между ее сторонами вверх и вниз по течению – отсюда приходим к дифференциальному уравнению

$$C_w \rho J_w dT_s = K(T_s - T_e)dA \quad (B-5)$$

Его интегрирование дает следующий результат:

$$\ln[(T_d - T_e)/(T_i - T_e)] = KA/(C_w \rho J_w) \quad (B-6)$$

Скомбинировав уравнения (В-6) и (В-3), получим удельную площадь бассейна на МВт(тепл), требуемую для заданного охлаждающего отношения $r \equiv (T_d - T_e)/(T_i - T_e)$:

$$A/P = (\ln r)/K(T_d - T_i) \text{ км}^2/\text{МВт(тепл)} \quad (\text{В-7})$$

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Steven Fetter and Frank von Hippel, "A Step-by-Step Approach to a Global Fissile Materials Cutoff," *Arms Control Today* 25 (October 1995): No.8, 3-8.
2. Mark Hibbs, "China Said to be Preparing for Decommissioning Defense Plants", *Nuclear Fuel*, May 17, 1999; David Albright, Frans Berkhout and William Walker, *Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996 – World Inventories, Capabilities and Policies* (Oxford University Press, 1997).
3. Как сообщают, американские спутники KH-12, впервые запущенные в ноябре 1992 г., достигли разрешения порядка 10 см в видимом диапазоне. На них имеются также фотосистемы в тепловом инфракрасном (ТИК) диапазоне. Если ТИК система использует ту же самую оптику, ее разрешение может быть порядка 2 м.
4. M. Krepon, et. al., *Commercial Observation Satellites and International Security*, (New York: St.Martin's Press, Inc., 1990); M. Slack and H. Chestnut, *Open Skies – Technical, Organizational Operational, Legal and Political Aspects*, (Canada: York University, 1990); M. Krepon et. al., *Open Skies, Arms Control, and Cooperative Security*, (New York: St.Martin's Press, Inc., 1992).
5. www.fas.org/nuke/guide/russia/facility/nuke/index .
6. Камеры KH-4B принимают изображения на фотопленку. Для таких систем наиболее общее определение разрешения основано на числе равноудаленных линий, помещенных на стандартной мишени для разрешения, которое может быть разрешено на мм пленки. Для обнаружения объекта необходимо иметь примерно одну пару линий. Пространственное разрешение в данной статье определяется для электронно-оптических датчиков: это размер минимальной площади на поверхности, которую захватывает элемент системы детектора – пиксел. Такая площадь называется мгновенным полем зрения. Примерно двух пикселов хватает для представления такой же наземной информации, как и пара линий на обычном контрасте пленки. Поэтому разрешение снимка коммерческого спутника (один пиксел) в 1 м сравнимо с разрешением 1.8 м для снимков KH-4B. Впрочем, надо заметить, что при использовании современной цифровой методики обработки изображений снимки с метровым разрешением новых коммерческих спутников можно сделать четче необработанных снимков от спутников KH-4B.
7. Kam W.Li and A.Pridy, *Power Plant System Design* (John Wiley & Sons, 1985).
8. Производство одного кг урана оружейного качества при содержании урана-235 порядка 0.25% в остатках обедненного урана требует около 208 кг-единиц работы по обогащению. Обычный ГДЗ требует затратить 2.3-3 МВт-часов на каждую кг-единицу. Работа по разделению D (кг-единица) дается соотношением $D = WV(e_w) + PV(e_p) - F(e_f)$, где P – масса продукта (кг), W – масса выброшенного обедненного урана (кг), а F – масса начального топлива (кг). $V(e) = (2e - 1)\ln[e/(1-e)]$, e_p , e_w и e_f – долевые обогащения потоков продукта, отходов и начального топлива. $F = P(e_p - e_w)/(e_f - e_w)$, а $W = (e_p - e_f)/(e_f - e_w)$.
9. J.Weisman, R.Eckart, *Modern Power Plant Engineering* (Prentice-Hall, Inc., 1985).
10. Нагревание одного кг сухого воздуха от 20 °С до 30 °С требует 10 кДж. Добавление воды до полного его насыщения потребует испарения 12 г воды, а при этом поглощается еще 28 кДж.
11. Израильский реактор Димона и пакистанский реактор Хушаб используют градирни с принудительной тягой .
12. <http://www.fas.org/nuke/guide/russia/facility/nuke/index.html>
13. Реактор EI работал с сентября 1958 г. до декабря 1990 г. и произвел по оценкам 10 тонн плутония оружейного качества. Реактор ADE-3 работал с июля 1961 г. до августа 1992 г. и произвел, как считается, 14 тонн плутония оружейного качества. Nils Bohmer and Tho-

- mas Nilsen, Seversk (Tomsk-7) (*Bellona Working Paper*, No.4, 1985); *Plutonium and Highly Enriched Uranium* 1996.
14. Частное сообщение Олега Бухарина, Центр по изучению энергетики и окружающей среды, Принстонский университет, 1999 г.
 15. Из недавно рассекреченной коллекции снимков со спутников КН-1 – КН-6 за период 1960-72 гг. Этот снимок взят со спутника КН-4В. Указатель к этим снимкам содержится на странице Интернета Геологической службы США: <http://edcwww.cr.usgs.gov/glis/hyper/guide/disp>.
 16. Следует отметить, что на снежном фоне будет трудно отличить облака пара (за пределами вершины градирни) от снега, потому что они имеют очень сходные спектральные свойства в видимой и ближней ИК областях (0.4 – 1.3 мкм). Но их легко можно разделить в средней ИК области спектра (1.3 – 3 мкм) и, в частности, в полосах 1.55-1.75 и 2.10-2.35 мкм. В этих полосах облака обладают очень высокой отражательной способностью и кажутся белыми, а снег имеет низкую отражательную способность и поэтому на снимках выглядит темным. Поэтому можно использовать многоспектральные сканеры с низким разрешением (как на Ландсате ТМ) для того, чтобы в зимнее время отличать облака от снега. Смотрите также Roger M.Hoffer, "Biological and Physical Considerations in Applying Computer-aided Analysis Techniques to Remote Sensor Data" in Swain, P.H. and S.M.Davis (ed), *Remote Sensing: The Quantitative Approach* (New York: McGraw Hill, 1978), 227-289.
 17. Необходимое для производства плутония оружейного качества выгорание в промышленных реакторах с топливом из естественного урана составляет около ГВт-день на тонну топлива. Энергетические реакторы сконструированы так, чтобы делить большую часть урана-235 в своем топливе. Это соответствует выгоранию около 7 ГВт-день на тонну при топливе из естественного урана или 30-60 ГВт-день для реакторов на обогащенном (3-6%) уране.
 18. Равновесное время для каскада обогащения урана – это время, требуемое для получения первого образца проектного продукта в процессе, который начинался с заполнения каскада образцом исходного материала.
 19. <http://www.fas.org/nuke/guide/pakistan/facility/khushab.html>.
 20. Фонд Карнеги в рамках проекта по нераспространению провел испытание, где были взяты ТИК снимки "Ландсата-5" с участком территории Брукхейвенской национальной лаборатории, на котором располагается исследовательский реактор с мощностью 60 МВт. Снимки были выбраны для двух дней: когда реактор работал и когда он был остановлен. Реактор использовал градирни закрытого типа (скорее всего, со смачиваемыми поверхностями) для рассеивания тепла. Снимки не дали убедительных признаков наличия тепловых особенностей при работе реактора. Смотрите Leonard S.Spector, "Monitoring Nuclear Proliferation", in *Commercial Observation Satellites and International Security*, ed. Michael Krepon, et al., Carnegie Endowment for International Peace, 1990. Этот результат совпадает с нашими оценками в Приложении Б. Но вероятность обнаружения должна быть высокой для ТИК спутника с высоким разрешением (например, АСТЕР).
 21. L.C.Wilbur, *Handbook of Energy System Engineering: Production and Utilization* (John Wiley & Sons, 1985).
 22. *United States Army Multispectral Imagery Product Guide*, Second Edition, ATC-IA-2681-030-94, May 1994.
 23. Bhupendra Jasani and Alan Blackburn, "Piercing into Secret Nuclear Establishment Using Imagery from Civil Satellites", in *Proceedings of the 21st Annual Conference of the Remote Sensing*, 11-14 Sept., 1995, Paul Curran and Colette Robertson, eds.
 24. Frank von Hippel, D.F.Albright and B.G.Levi, "Stopping the Production of Fissile Materials for Weapons", *Scientific American*, September 1985.
 25. Мощность соседней Красноярской ГЭС составляет 6 ГВт(э). Если высота дамбы равна 100 м, то это соответствует расходу воды 7000 м³/с при эффективности 90%.
 26. S.Villani, "Uranium Enrichment", in *Topics in Applied Physics*, Vol.35, (Springer-Verlag, New York, 1979).
 27. Например, на французском ГДЗ Трикастин температура воздуха в тех помещениях корпуса, где содержатся обогатительные ячейки, должна поддерживаться при 80 °С. Смотрите M.Molbert, "The Eurodif Program", in *Recent Developments in Uranium Enrichment*,

- J.R.Merriman, et al., eds. (New York: American Institute of Chemical Engineers, 1982), vol.98, 221.
28. После завершения данной статьи более детальный анализ этих снимков провел Адам Бернштейн. A.Bernstein, *Monitoring Large Enrichment Plants Using Thermal Imagery from Commercial Satellites: A Case Study* (Sandia National Laboratories, report SAND 2000-8671, 2000), 15.
 29. Здание X-333 с 640 обогатительными ячейками имеет высоту 25 м и занимает площадь 0.1 км² (440 м x 300 м). Типичная рабочая температура и давление участвующего в процессе газа составляют 127-140 °С и 0.35-1 атм. Здание X-330 содержит 1100 ячеек промежуточного размера, имеет высоту 20 м и занимает площадь 0.13 км² (660 м x 200 м). Наконец, здание X-326 содержит 2280 небольших ячеек, работающих в конечной стадии каскада (с высоким обогащением); его высота равна 19 м, а площадь – 0.12 км² (680 м x 170 м). Brookhaven National Laboratory, *Transparency Measures for DOE SNM Production Facilities*, SSN 93-7 (December 1993).
 30. Потери тепла черным телом при 20 °С составляют примерно $6(T_r - T_s)$ Вт/м², где T_r – температура крыши, а T_s – излучательная температура неба. Конвективные потери тепла оцениваются как $(5.7 + 3.8V)(T_r - T_a)$ Вт/м², где V – скорость ветра (м/с), а T_a – температура воздуха. [John A.Duffie and William A.Beckman, *Solar Energy Thermal Processes* (John Wiley & Sons, 1974), p.83]. Если положить $T_s = T_a$, то суммарный коэффициент потерь тепла с поверхности $C_s = (11.7 + 3.8V)$ Вт/(м²-К) вырастет примерно в три раза от ситуации со слабым ветром до ситуации со скоростью ветра 6 м/с. Если поток тепла через крышу определяется главным образом проводимостью материала крыши, примерно равной 0.5 Вт/(м²- К) при толщине изоляции 10 см, то такой ветровой эффект понизит разницу температур ($T_r - T_a$) в три раза.
 31. *Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996: World Inventories, Capabilities and Policies*, 127.
 32. Сообщают, что ГДЗ Ланжу завершил производство ВОУ в 1987 г. (см. табл.2). Но он еще мог производить НОУ в 1989 г.
 33. International Nuclear Fuel Cycle Evaluation, INFCE/PC/2/2, *Enrichment Availability*, (IAEA, Vienna, 1980), 133.
 34. См. [31], p.275.
 35. B.Jasani, et al., *Enhancing IAEA Safeguards Using Commercial Satellite Imagery – A Pilot Study*, November 1996, (University of London, Department of War Studies, UK and the Federal Republic of Germany Safeguards & Programs, SRDP-R-240, JOPAG/12.95-PRG-265, Task A.16/JNT D 882, 1996)/
 36. U.S. Congressional Office of Technology Assessment, *Building Energy Efficiency* (1992), 24.
 37. См. [35].
 38. Hui Zhang, “A View on the Application of Overhead Imagery to Strengthen the IAEA Safeguards Regime”, in *Arms Control and the Rule of Law: A Framework for Peace and Security in Outer Space*, J.Beier and S.Mataija, eds (Toronto: New York University, 1998).
 39. N.P.Cheremisnoff et al., *Cooling Towers: Selection, Design and Practice* (Ann Arbor Science Publishers, Inc., 1981); W.Stanford and G.Hill, *Cooling Towers: Principles and Practice* (England Carter Industrial Products Limited, 1972); R.Woodson, “Cooling Towers”, *Scientific American*, May 1971; W.Maze, “Practical Tips on Cooling Tower Sizing”, *Hydrocarbon Process*, (1967), No.2.
 40. F.R.Barber, et al., “The persistence of plumes from natural draught cooling towers,” *Atmo. Envir.* 8 (1974), p.407. Для ненасыщенного воздуха температура восходящего воздушного потока будет падать как $Mg/(9R/2) = 0.0077$ °С/м, где M – молярная масса воздуха (0.029 кг), g – ускорение свободного падения (9.8 м/с²), а R – газовая постоянная [8.3 Дж/(моль.К)]. Впрочем, нагревание при конденсации водяных паров будет компенсировать этот эффект. Например, при 25 °С охлаждение на 1 °С уменьшит количество воды, содержащееся в кг насыщенного воздуха на 1.2 г и при этом выделится 2.9 кДж тепла – такого количества достаточно, чтобы поднять температуру на 2.9 °С. Поэтому окончательным результатом станет уменьшение охлаждения насыщенного воздуха при такой температуре всего до 0.0028 °С на метр.
 41. G.Csanady, “Bent-Over vapor plumes”, *J.Appl.Meteor.* 10 (1971), 36.

42. *Cooling tower plume modeling and drift measurement*, (New York: The American Society of Mechanical Engineers, 1975).
43. Обычно вдвое больше диаметра при вершине.
44. См. [21].
45. Считая, что охлаждающая мощность каждой градирни составляет 200 МВт на основе числа градирен на реактор и опубликованной тепловой мощности реакторов.
46. Смотрите, например, D.Bruce Turner, *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersing Modeling*, (CRC Press, 1994). Второй член в фигурных скобках уравнения (А-10) связан с отражением облака от земли.
47. A.Green, et al., "Analytic extensions of the Gauss plume model," *JAPCA*, Vol.30, (1980), No.7. Для значений x менее 1 км можно использовать приближение $\sigma_y \approx k_y x$, $\sigma_x \approx k_z x$, где $k_y = 0.25, 0.08, 0.04$, а $k_z = 0.1, 0.05, 0.02$ для условий стабильности А, D и F, соответственно. Для источника со значительным размером, как в нашем случае, значения x следует заменить на $x + x_y$ и $x + x_z$, где x_y и x_z выбраны так, чтобы σ_y и σ_z имели верные начальные значения при $x = 0$.
48. *1993 ASHRAE Handbook: Fundamentals* (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1983), 3, 8.
49. K.W.Li and A.Priddy, *Power Plant System Design* (John Wiley & Sons, 1983); G.Jirk, et al., "Steady State Equation of Cooling Pond Performance," *J. Hydraulics Division, ASCE* 106 (Hy6) (June 1980).
50. G.H.Jirk et al., "Cooling Impoundments: Classification and Analysis," *J. Energy Division, American Society of Civil Engineers*, Vol.105 (Aug.1979), No.EY2.
51. D.K.Brady et al., "*Surface Heat Exchange in Power Plant Cooling Lakes*" research report, John Hopkins University Press, 1969; Смотрите также[49]. Температура смоченного термометра T_w неявно определяется температурой воздуха T_a и его относительной влажностью f : $T_w = T_a + 2400\{[1 - f]F(T_a) - F(T_w)\}$, где $F(T)$ – долевой вес воды в насыщенном воздухе, как определяется в уравнении (А-9). Значение 2400 – это отношение энергии испарения воды к удельной теплоемкости сухого воздуха.
52. См. [51].