

УСТАНОВЛЕНИЕ МЕСТ ПРОВЕДЕНИЯ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ НА КИТАЙСКОМ ПОЛИГОНЕ ЛОБНОР

Випин Гупта

В статье рассказано, как использовались коммерческие спутниковые фотографии в сочетании с данными о приходе сейсмических Р-волн для установления местоположения двадцати одного китайского ядерного испытания. Результаты содержат набор уточненных оценок места проведения атмосферных и подземных испытаний, а также векторов ошибок между начальными сейсмическими оценками и уточненными оценками мест проведения. Анализ результатов дает новую информацию о схеме китайских ядерных испытаний, которая использована для пересмотра истории китайских испытаний и содействует спутниковому контролю над полигоном. Статья завершается оценкой возможностей коммерческих спутниковых изображений для контроля над ядерными полигонами и суждениями о значении результатов с точки зрения верификации Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний.

После защиты диссертации автор работает стажером в Центре по изучению безопасности и технологии при Ливерморской национальной лаборатории имени Лоуренса (Ливермор, Калифорния). Эта статья подготовлена при содействии Министерства энергетики США по контракту W-7405-Eng-48 с Ливерморской национальной лабораторией. Выраженные автором взгляды являются его личным делом.

ВВЕДЕНИЕ

В отличие от французского, российского и американского полигонов, китайский полигон вблизи озера Лобнор продолжает использоваться для испытаний ядерных взрывных устройств. Он приобрел дурную славу во всем мире в качестве единственного действующего полигона, привлекающего внимание четырех других ядерных держав и остального международного сообщества. С 1992 г. несколько стран и неправительственных организаций внимательно наблюдают за деятельностью китайского полигона, чтобы определить будущие китайские намерения испытаний, оценить возможности китайского модернизированного ядерного арсенала и понять дипломатическую позицию Китая по вопросам моратория на ядерные испытания и Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний¹.

Возросший интерес к китайским ядерным испытаниям совпадает с опубликованием нескольких исследований, которые предоставили нам большее понимание геологии полигона и истории ядерных испытаний на нем. Дж. Мацко из Геологической службы США опубликовал наиболее полное к данному времени геологическое описание типов пород на полигоне². Его выводы основаны на анализе нескольких статей, опубликованных в китайских технических журналах. Р. Норрис и др. из Совета по защите природных ресурсов опубликовали наиболее современную историю китайских ядерных испытаний³. В их книге содержатся детали организации полигона вблизи озера Лобнор, описание ядерных испытаний (что является значительным техническим достижением) и перечень фактов по каждому китайскому ядерному испытанию до 1993 г. В дополнение к вкладу Р. Норриса и др. Джон Мэрфи уточнил оценки сейсмической энергии для 11 китайских подземных взрывов⁴. Его оценки вытекали из усредненных по наблюдательной сети частотных спектров, порожденных взрывами⁵.

Кроме оценок энергии взрыва, недавно были выполнены два исследования для точного определения места взрыва проведенных китайских ядерных испытаний. В одном из них, выполненном Дугласом и др. из английского Центра по атомным вооружениям, используются геологические анализы Мацко и данные по приходу телесеизмических Р-волн для уточнения сейсмических оценок определения положения китайских ядерных испытаний, приводившихся в бюллетенях Международного сейсмического центра (ISC) до 1988 г.⁶. Другое исследование, проведенное автором, основано на коммерческих спутниковых изображениях и данных по приходу телесеизмических Р-волн⁷. Анализы спутниковых фото-

графий точно указали на места проведения двух китайских испытаний, использовавшихся затем в качестве географических опорных точек для уточнения сейсмических оценок определения мест проведения остальных китайских ядерных испытаний, о которых сообщалось в бюллетенях ISC и NEIS (Национальной службы по информации о землетрясениях) до 1992 г.

В этой статье рассказано, как использовались коммерческие спутниковые фотоизображения наряду с сейсмическими данными для определения мест проведения двадцати одного китайского ядерного испытания. Результаты содержат набор уточненных оценок мест проведения атмосферных и подземных испытаний, а также векторы ошибок между координатами по данным ISC и NEIS и новыми оценками координат. Значения систематических и случайных ошибок дают ценное понимание полезности использования данных ISC и NEIS для ориентирования датчиков космического базирования на наземные точки подрыва ядерных устройств. Уточненные оценки положения демонстрируют также новые факты о схеме китайских ядерных испытаний. Эта ранее неизвестная схема оказалась полезной для предсказания ориентации испытательной шахты и диапазона мощности двух китайских ядерных испытаний 25 сентября 1992 г. и 5 октября 1993 г., пока фотографии с коммерческих спутников по ним только подготавливались⁸.

Можно использовать улучшенные оценки определения мест проведения прошлых китайских испытаний для контроля за китайским полигоном в будущем, чтобы сократить размеры наземной области, которую надо сфотографировать и проанализировать на предмет обнаружения новой деятельности по ядерным испытаниям. Результаты показали что примерно 200 кв.км из общей площади полигона в 100 000 кв.км все еще используются для ядерных испытаний. Это значительное сокращение представляющей интерес площади, как кажется, оказывается особенно полезным для отбора коммерческих фотографий полигона с высоким разрешением. Поскольку цена фотографий такого рода определяется размерами снятой площади, полная цена может быть значительно сокращена при сведениях к минимуму представляющей интерес площади⁹.

В следующем разделе статьи приводятся сейсмические данные, использовавшиеся в данном исследовании и алгоритм ООЭ (Joint Epicenter Determination - определение общего эпицентра) для уточнения оценок сейсмического метода определения места проведения взрыва. В третьем разделе детализируются процессы обработки и анализа снимков с многоспектрального сканера "Лэндсат" (MSS) и

крупноформатной камеры "Шаттла" (LFC) для обнаружения идентификации и нахождения положения точки взрыва 3 октября 1984 г. Географическое положение этого подземного испытания было использовано в качестве одной из двух опорных точек для ООЗ. В четвертом разделе представлены результаты и их анализ. Анализ предоставляет новую информацию о схеме китайских ядерных испытаний, которая использовалась для пересмотра истории китайских ядерных испытаний и способствует спутниковому контролю за полигоном. Статья завершается оценкой возможности использования коммерческих спутниковых снимков для контроля за ядерными испытаниями и соображениями о значении результатов для верификации Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний.

ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПРОВЕДЕНИЯ КИТАЙСКИХ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Сейсмические данные

Известно, что с 1964 г. по 1992 г. на китайском полигоне было проведено 23 атмосферных и 15 подземных испытаний¹⁰. Из числа этих известных испытаний семь атмосферных и четырнадцать подземных испытаний были зарегистрированы сейсмическими средствами и сообщения о них появились в бюллетенях ISC и NEIS¹¹. Семь атмосферных испытаний были выполнены при весьма малой приведенной высоте взрыва, чтобы вызвать обнаруживаемый сейсмический сигнал¹².

В Табл.1 приведены оценки ISC и NEIS по времени взрыва географическому положению и магнитуде сейсмической волны (m_b) для 21 ядерного испытания. В таблице указываются также наилучшие существующие оценки мощности взрыва и число станций, сообщивших о каждом сейсмическом событии, а также тип ядерного испытания.

Вычисление места проведения ядерного испытания

Для каждого ядерного испытания, приведенного

Таблица 1

Зафиксированные в бюллетенях ISC и NEIS сейсмические события, которые вызваны ядерными взрывами на китайском ядерном полигоне

Дата	Время по Гринвичу	Широта	Долгота	m_b	Мощность кт ¹³	Число станций	Тип испытаний
17.06.67	00:19:09.8	40.800	89.400	4.7	3300	18	A
22.09.69	16:14:58.9	41.350	88.330	5.2	19.2	95	U
29.11.69	08:40:26.2	40.720	89.300	4.5	3000	5	A
14.10.70	07:29:58.9	40.920	89.400	4.6	3400	9	A
27.06.73	03:59:45.9	40.662	89.675	4.8	2000-3000	33	A
17.06.74	05:59:52.5	40.552	89.463	4.5	200-1000	9	A
27.10.75	00:59:59.2	41.433	88.400	5.0	2.5	58	U
17.10.76	05:00:03.8	41.644	88.210	4.9	2.6	56	U
17.11.76	06:00:17.6	40.782	89.661	4.6	4000	25	A
14.10.78	01:00:02.3	41.419	88.633	4.9	3.4	76	U
16.10.80	04:30:28.9	41.038	89.900	4.4	200-1000	6	A
04.05.83	05:00:02.0	41.627	88.313	4.5	1	9	U
06.10.83	09:59:58.0	41.526	88.721	5.5	14.9	215	U
03.10.84	05:59:58.0	41.543	88.672	5.4	9.1	172	U
19.12.84	06:00:02.8	41.624	88.218	4.7	1.3	43	U
05.06.87	04:59:58.5	41.547	88.720	6.2	250	529	U
29.09.88	07:00:02.0	41.524	88.154	4.6	2.5	25	U
26.05.90	07:59:57.8	41.566	88.688	5.4	11.5	219	U
16.08.90	04:59:57.6	41.564	88.770	6.2	189	513	U
21.05.92	04:59:57.2	41.549	88.835	6.6	650	262	U
25.09.92	07:59:58.4	41.780	88.413	5.1	8	37	U

* Данные NEIS; A - атмосферный взрыв и U - подземный взрыв

в Табл.1 в бюллетенях ISC и NEIS, дается время прихода короткопериодичной (0.5-5 Гц) Р-волны на каждую сейсмическую станцию, которая сообщила о событии. Чтобы определить место каждого испытания, эти времена прихода используются для нахождения четырех неизвестных величин: широты, долготы, глубины и времени взрыва. Для расчетов требуется эмпирически выведенная модель прохождения сейсмических волн, которую называют "графиком времени прохождения" или "таблицей времени прохождения". В этой модели составляется таблица времен, которые потребуются сейсмическим волнам для прохождения разных расстояний. В данном исследовании применялась глобальная таблица времен прохождения, предложенная Джеффрисом и Балленом¹⁴. Она лучше всего подходит для определения места сейсмического события, когда расстояние от точки взрыва до каждой приемной станции превышает 2000 км - то-есть речь идет о телесеизмических Р-волн моделируются при помощи глобальной модели, поскольку они не ограничиваются корой и верхней мантией, где свойства прохождения определяются местными и региональными геологическими структурами (см. Рис.1).

Определение положения сейсмически обнаруженного ядерного испытания рассчитывается путем итераций. Алгоритм требует решения системы линейных уравнений, каждое из которых описывает траекторию от точки взрыва до конкретной сейсмической станции¹⁵. Делается начальное предположение о положении точки взрыва. Используя это предположение и таблицы времени прохождения, вычисляются предсказания времен прихода для каждой из станций, обнаруживших ядерное испытание. При помощи метода наименьших квадратов положение точки взрыва меняется так, чтобы свести к минимуму полные отличия между предсказанными и фактическими временами прихода. Используя уточненные оценки положения, процесс продолжают до тех пор, пока полная ошибка не достигнет асимптотического значения.

В решении имеются случайные и систематические ошибки. Случайные ошибки можно значительно уменьшить, если событие регистрируется 10-20

сейсмическими станциями, распределенными вокруг точки взрыва в пределах 360° , и если времена прихода измеряются точно¹⁶. Систематические ошибки в определении положения связаны с отклонениями модели времени прохождения сейсмических волн от фактического поведения Земли. Отклонения могут быть связаны с местными и региональными особенностями прохождения под источником взрыва и удаленным сейсмическим приемником, а также с крупномасштабными аномалиями в мантии¹⁷. Величина и знак систематических ошибок меняются в зависимости от географического района. Величина компонента систематической ошибки обычно больше амплитуды компонента случайной ошибки. Для существующей глобальной сети сейсмических станций значение систематической ошибки оценивается примерно в 20 км, а значение случайной ошибки - не выше 10 км¹⁸. Величина той и другой ошибок возрастает в 2-3 раза для слабых сейсмических сигналов ($m_b < 4.5$) при регистрации небольшим числом станций с ограниченным угловым распределением вокруг точки взрыва.

Для сейсмически обнаруживаемых ядерных взрывов, проводимых на определенном полигоне, систематическая ошибка определения положения может быть уменьшена при использовании методики, которую называют "определением общего эпицентра" (ООЭ). Она позволяет одновременно рассчитать место проведения нескольких ядерных испытаний относительно фиксированного эпицентра и времени

подрыва, известных для по крайней мере одного ядерного взрыва в том же районе¹⁹. Если географическое положение опорного взрыва может быть определено несейсмическими методами, то ООЭ-метод эффективно калибрует расчет сейсмического определения положения, уменьшая систематические ошибки определения координат и обеспечивая скорее абсолютное, нежели относительное нахождение места проведения каждого ядерного испытания из представленного списка. Этот метод может также выдать таблицу коррекций времени прохождения для каждой сейсмической станции. Такие коррекции компенсируют наблюдаемые различия между моделью времени прохождения и реальным поведением Земли. Для наблюдения будущих ядерных испытаний в том же районе можно пользоваться этими коррекциями, чтобы уменьшить систематические ошибки при определении места проведения испытания, не применяя специально ООЭ-метод.

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ КОММЕРЧЕСКИХ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Чтобы воспользоваться ОУВ-методом и уточнить приведенные в Табл.1 оценки сейсмического определения мест проведения китайских ядерных испытаний, следовало бы установить хотя бы для одного испытания, указанного в этой таблице, его географическое положение без использования сейсмических методов. Просмотр китайской техниче-

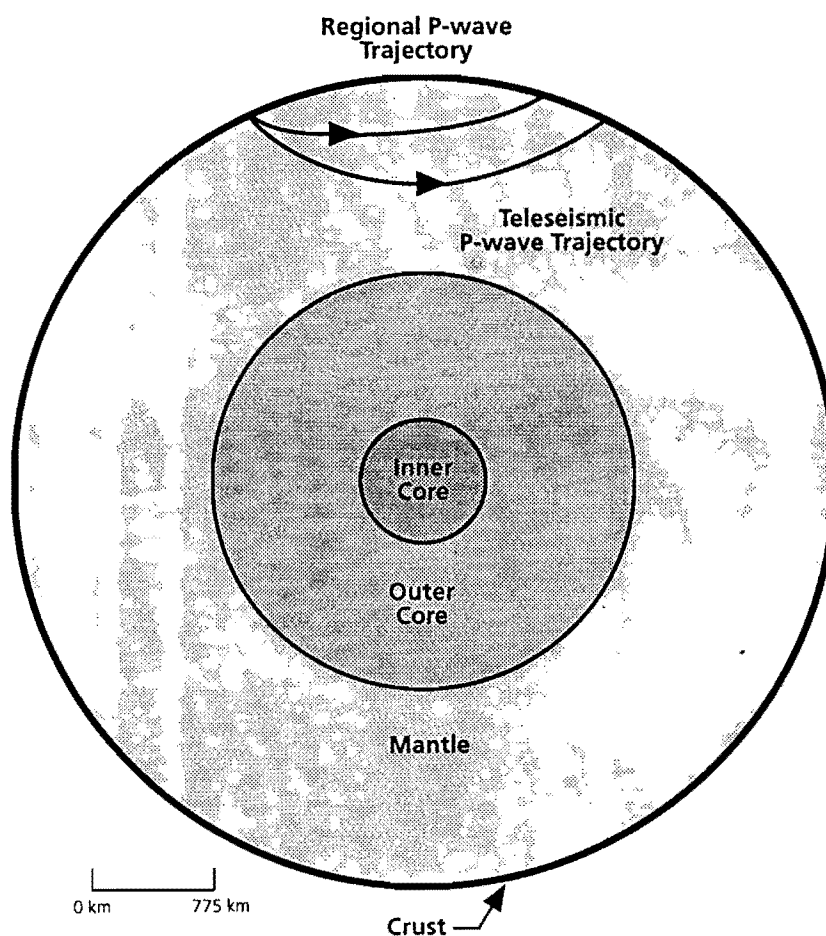


Рисунок 1

Траектории Р-волн на региональных (<2000 км) и телесеизмических (>2000 км) расстояниях. Скорость меняется с глубиной, так что путь искривляется в соответствии с законом Снеллиуса.

ской и нетехнической литературы оказался безуспешным для обнаружения места проведения любого из 21 ядерного испытания, хотя появились важные сведения об относительном положении мест проведения четырех подземных ядерных взрывов²⁰. Простр американской и английской литературы также не привел к нахождению полезного опорного взрыва. С учетом того, что нет опубликованных географических данных по китайскому полигону, остается только другой эффективный источник требуемой информации - коммерческие спутниковые изображения.

Было получено и проанализировано множество фотоизображений в попытке обнаружить, идентифицировать и точно определить место проведения прошлых китайских ядерных испытаний. Были собраны снимки многоспектрального сканера (MSS) "Лэндсат-1", крупноформатной камеры (LFC), панхроматического и многоспектральных каналов спутника "СПОТ-1", картографа Thematic Mapper (TM) "Лэндсат-4", а также радиолокатора с синтезированной апертурой (FAR) на спутнике "Алмаз-1". Анализ изображений, полученных на MSS и LFC, обеспечил определение положения двух ядерных испытаний, которые были использованы в качестве опорных событий для ООЭ-метода. Первым из точно зафиксированных испытаний был атмосферный взрыв 27 июня 1973 г. с координатами 40.7985 ± 0.0005 с.ш. и 89.8091 ± 0.0005 в.д. Это испытание было обнаружено, идентифицировано и привязано к определенной точке в результате анализа наложения оцифрованных изображений с MSS, полученных 12 июня 1973 г. (t-15 дней) и 30 июня 1973 г. (t+3 дня)⁴⁸. Вторым испытанием стал подземный взрыв 3 октября 1984 г. Его нашли при анализе изображения с LFC (7 октября 1984 г.) и MSS (4 октября 1972 г.).

Поиск места взрыва 3 октября 1984 г.

В шесть часов утра по Гринвичу 3 октября 1984 г. Китай произвел подземное ядерное испытание,

вызвавшее относительно сильный сейсмический сигнал ($m_b = 5.4$). Пятого октября 1984 г. в 2.03 по Гринвичу на низкую околоземную орбиту был запущен "Спейс Шаттл" "Челленджер" с крупноформатной камерой LFC. Летая по орбите с наклоном 57° , LFC начал запрограммированную программу набора изображений в естественном свете, в инфракрасных лучах и на панхроматической пленке. Седьмого октября 1984 г. в 7.31 по Гринвичу LFC получил панхроматические стереоизображения китайского полигона - это произошло через четыре дня, час и 31 минуту после того, как Китай провел там подземное ядерное испытание. Изображения LFC Nos. 496 и 497 были получены с высоты 266.2 км и 266.0 км соответственно. Они покрывали район в 200×200 кв.км, куда попадали указанные в бюллетенях ISC и NEIS (и приведенные в Табл.1) места проведения 21 китайского ядерного испытания.

По оценкам ISC, место проведения испытания 3 октября 1984 г. имеет координаты 41.54 ± 0.15 с.ш. и 88.67 ± 0.019 в.д. Эта оценка была выбрана в качестве центральной точки для поиска. Основываясь на предыдущих сейсмических исследованиях смещения данных по определению места события, величина систематической ошибки в оценке ISC считалась равной 20 км по порядку величины. Направление вектора систематической ошибки было неизвестно, что привело к появлению района поиска с площадью порядка 1200 кв.км. Поиск был сосредоточен на площади такого размера в пределах северо-западного квадранта (76.8 км $\times$ 102.4 км) обработанного ортоизображения LFC, где нет искажений по высоте местности. Ортоизображение с размером сетки 4 пикселей 50 м было получено с LFC-снимка No. 496 с учетом цифровой модели возвышения, взятой из стереопары LFC⁴⁹.

Технической задачей поиска было обнаружение поверхностных особенностей на ортоизображении LFC, которые можно было бы определить как четкие изменения в естественной окружающей среде. Обнаружение изменений в этом районе требует калиб-

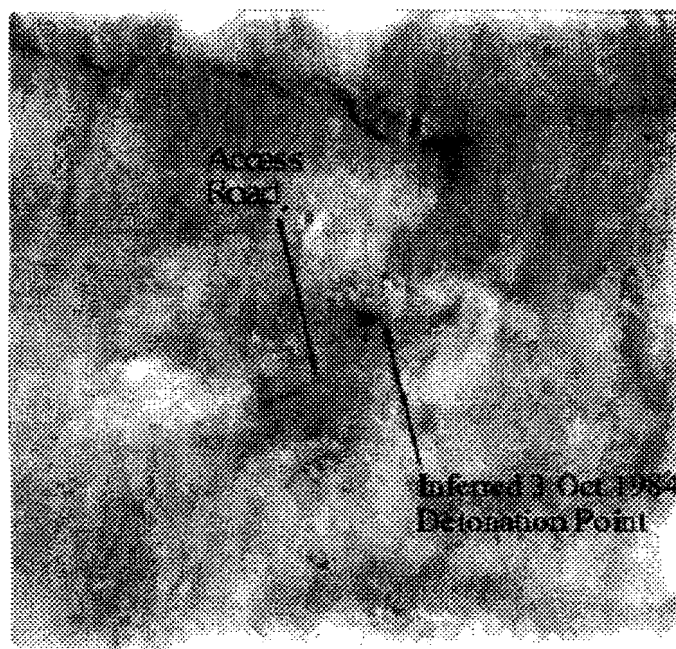


Иллюстрация 1

Предполагаемая точка взрыва 3 октября 1984 г., указанная на сравнительном изображении размером 13.55 км $\times$ 13.30 км. Изображение получено при сравнении снимка MSS (4 октября 1972 г.) в синтезированном диапазоне с ортоизображением LFC (7 октября 1984 г.). На иллюстрации стрелками указаны положения подъездной дороги и предполагаемой точки взрыва.

ровочного изображения для сравнения. Идеальным было бы изображение, полученное как раз перед испытанием. К сожалению, в каталоге имевшихся коммерческих спутниковых изображений не было таких снимков "перед испытанием". В качестве замены для калибровочного снимка было использовано изображение местности, полученное на MSS "Лэндсат-1" 4 октября 1972 г. Оно оказалось самым старым из имевшихся спутниковых снимков местности.

Чтобы воспользоваться этим калибровочным снимком, в изображение MSS были введены радиометрические поправки на атмосферное рассеяние; затем изображение перевели в панхроматический диапазон, геометрически преобразовали в формат LFC-ортоизображения, перезаписали в сетку пикселей с шагом 50 м, оцифровали и сравнили с LFC-изображением в этом временно выбранном диапазоне (см. Приложение А). Соотношение изображений показывало природу и масштаб изменений на поверхности произошедших в период между получениями двух этих снимков. Пиксели, где не было никаких изменений между 4 октября 1972 г. и 7 октября 1984 г. (или они были незначительны), выглядели в умеренно серых тонах. Те пиксели, которые отражали поверхностные изменения, выглядели как темные или светлые с амплитудой степени изменения от нуля (чисто черный) до 255 (чисто белый).

На LFC-ортоизображении было найдено, что эти особенности имеют более высокое альbedo по сравнению с ближайшим окружением. Высокое значение альbedo объяснялось удалением естественных помех (например, валунов обнаженных пород) и сооружением более ровных поверхностей для облегчения передвижения по дороге²². Структура особенностей не была однородной и контрастировала с мощными дорогами в этом районе²³. Это дает сильные основания для предположения, что крупное пятно и дорога к нему не были замощены.

На известных полигонах стало привычным делом сооружать подвездные дороги, кончающиеся в местах, выбранных для ядерных испытаний в глубоких вертикальных шахтах. Подземные ядерные испытания требуют крупномасштабной наземной деятельности, как для подготовки испытания, так и для анализа результатов. В эту деятельность входят бурение до и после испытания, помещение на место устройства, закрытие скважины и размещение приборов, включая кабели для связи²⁴. Разумно предположить, что китайцам приходится брать на себя те же самые задачи при испытаниях в вертикальных шахтах. Разумно также ожидать, что такая деятельность приведет к повреждению поверхности и изменит тем самым ее отражательные характеристики.

Поскольку временные особенности, найденные на сравнительном изображении, внешне приблизительно походили на площадки с вертикальными шахтами на других местах для ядерных испытаний, и поскольку эти особенности располагались достаточно близко от мест проведения известных китайских испытаний, указанных в оценках ISC и NEIS, разумно сделать заключение что пятно действительно было точкой взрыва при испытании в вертикальной шахте. Факты из китайской технической статьи (автор Ю.Че) придают больше доверия таким выводам при сравнении положения найденного пятна с местом проведения подземного испытания указанным в статье Че (см. Приложение Б).

Рассматривая степень и протяженность изменений поверхности, показанных на Иллюстрации 1, особое положение точки взрыва относительно ближайшего окружения (см. рис.Б-1), и тот факт, что LFC-изображение было получено всего через несколько дней после подземного испытания в этом районе, можно сделать еще один шаг и предположить, что в пределах пятна на поверхности находится точка взрыва. Нигде более на сравнительном изображении не было найдено подобных особенно-

стей, которые можно было бы отнести к прекращению деятельности в точках более старых взрывов или к сезонным ветрам, постепенно стирающим антропогенные изменения на поверхности²⁵.

Пятно само по себе не раскрывает точного положения скважины, где 3 октября 1984 г. произошел взрыв. Пространственное разрешение LFC-ортоизображения не было достаточно высоким для обнаружения шахты или вспомогательной инфраструктуры. Не было также никаких заметных поверхностных эффектов типа растрескивания или просадочных кратеров от самого испытания. Считалось, что точка взрыва находится у восточного угла пятна, поскольку он не примыкает к подъездной дороге, а остальная часть пятна расходится веером к западу от этой точки²⁶. Это положение кажется достаточно удаленным для того, чтобы устраниваться от эффектов ударной волны вблизи ее источника и возможного образования просадочных кратеров. Географическое положение точки взрыва таково: 41.5713 ± 0.0005 с.ш. и 88.7216 ± 0.0005 в.д. Это положение находится в 5.53 км к северо-востоку от точки оцененной ISC как место проведения испытания 3 октября 1984 г. (см. рис.5 и табл.Г-1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГРАММЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЩЕГО ЭПИЦЕНТРА

Применение ООЗ - метода

После сделанного заключения о широте и долготы места проведения испытания 3 октября 1984 г. и предположения, что глубина скважины доходит до уровня моря, стало возможным рассчитать момент взрыва 3 октября 1984 г. Заметим, что модель распространения сейсмических волн не учитывает топографию поверхности и мы предполагали, что источник взрыва и сейсмостанции находятся на уровне поверхности сфероидальной Земли (т.е. на уровне моря). Момент взрыва нужен в качестве опорной временной точки для ООЗ-метода. Задача решалась напрямую без всяких итераций, поскольку только момент взрыва был неизвестной величиной. Были оставлены только показания тех сейсмостанций, для которых расстояние до источника взрыва лежало в пределах $20^\circ - 95^\circ$ (по дуге на земной поверхности), поскольку таблицы времени прохождения Джеффриса-Баллена неточно моделируют региональное прохождение или прохождение через ядро Земли (см. рис.1)²⁷. Для принятой глубины взрыва 0 км было найдено, что момент детонации составляет $05:59:57.99 \pm 0.13$ по Гринвичу.

Этот момент подрыва и географические положения точек испытаний 3 октября 1984 г. и 27 июня 1973 г. были выбраны в качестве опорных данных для ООЗ-метода. Как и при расчетах момента взрыва 3 октября 1984 г., были оставлены показания только тех станций, которые находились от источника взрыва на расстоянии в $20^\circ - 95^\circ$ (по дуге на поверхности сфероидальной Земли). Не учитывались данные со станций, где сигнал был слаб (менее 2σ). Такие слабые сигналы можно приписать ошибкам приборов или неправильной интерпретации данных. После отсеивания этих показаний производился окончательный прогон вычислений по программе ООЗ.

Методика ООЗ обеспечила уточненные оценки положения мест проведения 21 китайского ядерного испытания (см. табл.2). Схема пространственного распределения уточненных положений указывает на наличие четырех разделенных испытательных зон в пределах китайского полигона - трех для подземных испытаний и одного для атмосферных испытаний большой мощности²⁸. Четыре зоны испытаний можно было разрешить и по ООЗ-результатам, полученным Дугласом и др. из английского Центра по атомным вооружениям (ЦАВ)²⁹, хотя данные ЦАВ о

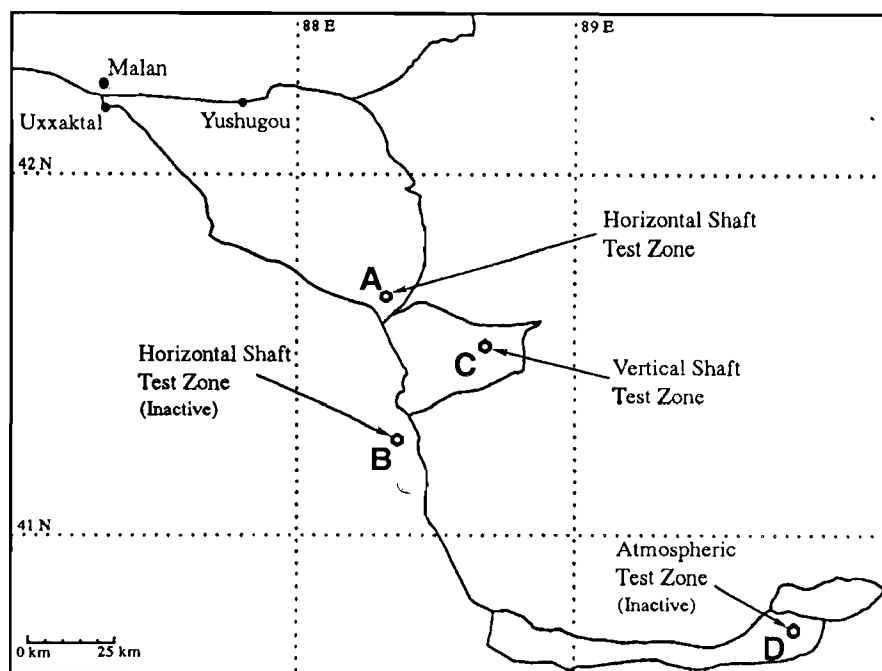


Рисунок 2
Схема китайского ядерного полигона

А - испытательная зона с горизонтальными туннелями; В - испытательная зона с горизонтальными туннелями (сейчас бездействует); С - испытательная зона с вертикальными шахтами; D - зона атмосферных испытаний (сейчас бездействует).

местах проведения испытаний отличаются от того, что приведено в табл.2 в разной степени в зависимости от испытательной зоны (см. Приложение В).

Только две зоны используются сейчас для проведения ядерных испытаний. На рис.2 приведена карта всего полигона, где схематично указаны положения четырех испытательных зон. На карте показаны также местонахождение Малана - научного вспомогательного города и общая схема дорог, взятая из операционного навигационного атласа, выпу-

щенного американским картографическим оборонным агентством.

Из трех испытательных зон, отведенных под подземные ядерные взрывы, две использовались для взрывов в туннелях. Заключение об ориентации скважины для каждого подземного ядерного испытания вытекало из наложения эллипса ООЭ-ошибок (с достоверностью 95%) на цифровую LFC-модель возвышения местности (см. табл.2). Если местность в пределах этого эллипса оказывалась плоской, де-

Таблица 2
Результаты ООЭ-метода для ядерных взрывов на китайском полигоне

Дата	Время по Гринвичу	Широта	Долгота	Зона	Ориентация	Тип
17.06.67	00:19:08.20	40.744	89.775	D	NA	A
22.09.69	16:14:59.21	41.376	88.318	B	Туннель	U
29.09.69	08:40:21.36	40.722	89.515	D	NA	A
14.10.70	07:29:56.91	40.520	89.779	D	NA	A
27.06.73	03:59:46.29	40.7985	89.8091	D	NA	A
17.06.74	05:59:52.72	40.518	89.619	D	NA	A
27.10.75	00:59:58.23	41.375	88.326	B	Туннель	U
17.10.76	04:59:58.80	41.708	88.370	A	Туннель	U
17.11.76	06:00:12.70	40.696	89.627	D	NA	A
14.10.78	00:59:58.01	41.523	88.722	C	Шахта	U
16.10.80	04:30:29.67	40.719	89.651	D	NA	A
04.05.83	04:59:57.82	41.679	88.368	A	Туннель	U
06.10.83	09:59:58.05	41.538	88.714	C	Шахта	U
03.10.84	05:59:57.99	41.5713	88.7216	C	Шахта	U
19.12.84	05:59:58.34	41.737	88.425	A	Туннель	U
05.06.87	04:59:58.26	41.518	88.713	C	Шахта	U
29.09.88	06:59:57.97	41.768	88.380	A	Туннель	U
26.05.90	07:59:57.94	41.569	88.701	C	Шахта	U
16.08.90	04:59:57.70	41.514	88.739	C	Шахта	U
21.05.92	04:59:57.45	41.513	88.774	C	Шахта	U
25.09.92	07:59:58.47	41.716	88.336	A	Туннель	U

NA - не относится к делу; A - атмосферный взрыв; U - подземный взрыв

лался вывод о том, что подземное испытание было проведено в вертикальной шахте. Если местность в пределах эллипса ошибок оказывалась гористой, то испытание считалось проведенным в туннеле.

На рис. 3-5 показано, как сейсмически определенные места проведения китайских ядерных испытаний сводятся к четырем отдельным испытательным зонам (см. Приложение Г, где эти результаты сведены в таблицу). На графике приводятся ISC/NEIS-оценки положения для каждого места и вектор смещения к ООЭ-оценке места проведения. Около ISC/NEIS-оценки указан год проведения испытания. На рис. 4 и 5, кроме года, приводятся месяцы для тех случаев, когда более одного испытания проводилось в течение календарного года. Обратите внимание, что масштаб на рис. 3 отличается от масштаба на рис. 4 и 5. Чтобы проверить согласованность ООЭ-результатов по ошибкам определения местоположения, проводился анализ величин смещения и площади эллипсов ошибок в зависимости от величин амплитуды сейсмической волны (m_b). Величина смещения была мерой определения систематической ошибки, а площадь эллипса ошибок - мерой случайной ошибки.

На рис. 6 показана зависимость величины смещения от силы сейсмического события. График демонстрирует значительное уменьшение систематической ошибки при увеличении значения m_b от 4.0 до 5.0. При $m_b > 5.0$ величина систематической ошибки была нечувствительна к силе события. Этот результат соответствует выводам других сейсмических исследований по определению места события. Для относительно сильных сейсмических сигналов ($m_b > 5.0$), обнаруживаемых 10-20 хорошо распределенными станциями, точность телесеизмического определения положения достаточно нечувствительна к использованию большего числа сейсмических станций.

На рис. 7 приведена зависимость площади эллипсов ошибок от силы сейсмического события. Как и ожидалось с точки зрения статистики, площадь изменяется обратно пропорционально амплитуде сейсмической волны. Для слабых событий, обнаруженных небольшим (<10) числом сейсмостанций, неопределенность определения положения события была значительно больше по сравнению с неопределенностью при более сильных событиях.

ВЫВОДЫ ИЗ ООЭ-РЕЗУЛЬТАТОВ

Отождествление четырех испытательных зон обнаружило, что только небольшая часть площади полигона использовалась для испытаний ядерной взрывчатки. Испытательный район для атмосферных взрывов большой мощности - зона D (40° 45' с.ш. и 89° 30' в.д.) в последний раз использовался 16 октября 1989 г. Зона В (41° 23' с.ш. и 88° 18' в.д.) использовалась для первых двух подземных китайских ядерных испытаний - 22 сентября 1969 г. и 27 октября 1975 г. и с тех пор бездействовала. Два действующих района испытаний - зона А (41° 42' с.ш. и 88° 22' в.д.) и зона С (41° 34' с.ш. и 88° 41' в.д.) используются с 17 октября 1976 г. и 14 октября 1978 г. соответственно. Зоны А и С занимают примерно 200 кв.км из полной площади полигона в 100 000 кв.км.

Кроме раскрытия географической схемы китайского полигона, более точное сейсмическое определение мест взрывов обеспечило большее проникновение в функциональные секреты двух действующих испытательных зон. На рис. 8 и 9 представлены трехмерные графики, на которых сейсмические оценки положения мест проведения испытаний скоординированы с уточненными оценками мощности китайских подземных ядерных испытаний³¹. Места проведения взрывов отложены на универсальной поперечной меркаторской сетке, где по Х-оси отло-

жено направление на восток, а по Y-оси - направление на север. По оси Z в логарифмическом масштабе отложена мощность взрывов.

На рис. 8 использованы ISC/NEIS-оценки мест проведения китайских подземных ядерных испытаний, а на рис. 9 - уточненные ООЭ-оценки тех же событий. Как следует из степени рассеяния на графике, рис. 8 мало что может дать о схеме китайских ядерных испытаний. Наоборот, на рис. 9 четко разделяются три испытательные зоны, использовавшиеся для проведения подземных ядерных испытаний (зоны А В С) и раскрываются два рабочих соотношения между мощностью и местом проведения китайских ядерных испытаний.

Из рис. 9 следует, что действующая зона испытаний в туннелях (зона А) используется исключительно для испытаний с малой мощностью (менее 10 кт). График показывает также, что все подземные испытания с более высокой мощностью (более 10 кт) проводятся исключительно в зоне с вертикальными скважинами (зона С)³². Такая картина наводит на мысль, что горный район Кизил Таг в зоне А с топографической или операционной точек зрения неудобен для проведения испытаний в туннелях при умеренных или больших мощностях взрывов.

Рабочее соотношение между мощностью взрывов и испытательной зоной обеспечивает ограниченную возможность предвидеть диапазон мощности будущих китайских испытаний по дистанционным наблюдениям за крупномасштабной предиспытательной подготовкой в любой из этих зон³³. Схема испытаний дает также дополнительный верификационный механизм для проверки ошибок при предварительной сейсмической оценке мощности взрыва, проведенной вскоре после того, как произошло ядерное испытание.

ВЫВОДЫ И ЗНАЧЕНИЕ

Применение ООЭ-метода в сочетании с определенными по космическим снимкам местами проведения испытаний 3 октября 1984 г. и 27 июня 1973 г. привели к более точным сейсмическим оценкам мест проведения всех китайских ядерных испытаний, о которых сообщалось в бюллетенях ISC и NEIS до 1992 г. Сведение всех испытаний к четырем четким зонам проведения обеспечило ценную информацию о схеме организации работ на полигоне и его работоспособности. Все более растущее понимание прошлой испытательной деятельности использовалось в дальнейшем, чтобы помочь предсказанию и быстрым оценкам китайских ядерных испытаний в 1992 и 1993 гг.³⁴

В будущем результаты данного исследования можно будет использовать для содействия сбору и интерпретации коммерческих спутниковых изображений китайского полигона. Идущие приготовления к испытанию в любой из двух действующих испытательных зон можно будет обнаружить на новых спутниковых снимках этого района. Коррекции времени прихода сейсмического сигнала от будущих китайских ядерных испытаний для расположенных по всему свету станций, предоставляемые ООЭ-методикой, можно будет использовать для уменьшения систематических ошибок определения положения испытаний в реальном времени. Полученные вскоре после ядерного испытания уточненные сейсмические оценки места его проведения можно будет использовать затем для быстрого и точного наведения спутниковых датчиков, чтобы провести сбор изображений после испытания.

Результаты ООЭ-метода показали, насколько большими могут оказаться систематические и случайные ошибки определения положения. Как следует из рис. 6 и 7, ошибки были максимальными для слабых сейсмических событий ($m_b < 5.0$), генерируемых подземными испытаниями с мощностью в не-

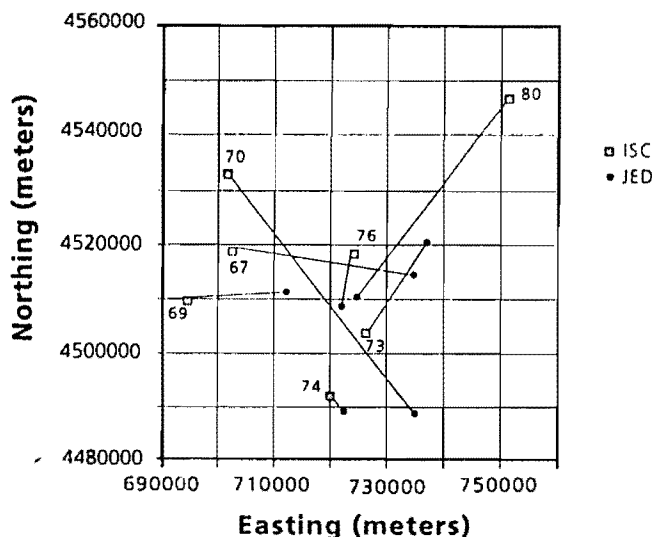


Рисунок 3

Оценки положения мест взрывов по данным ISC и по результатам ООЭ-метода для атмосферных испытаний большой мощности в зоне D. Уточненное положение места взрыва 27 июня 1973 г. получено с MSS- снимка "Лэндсат-1". По оси Y отложено расстояние от экватора, а по оси X - расстояние от Гринвичского меридиана (в метрах).

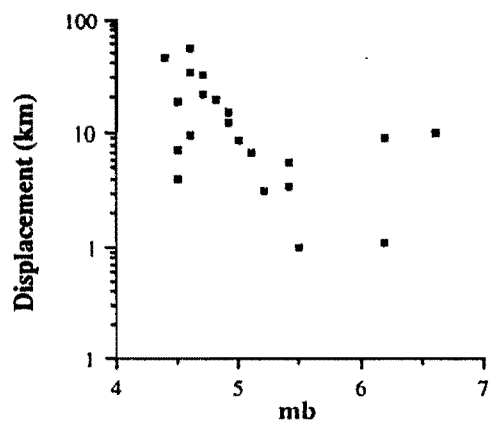


Рисунок 6

Величина смещения оценки положения в зависимости от магнитуды объемной волны

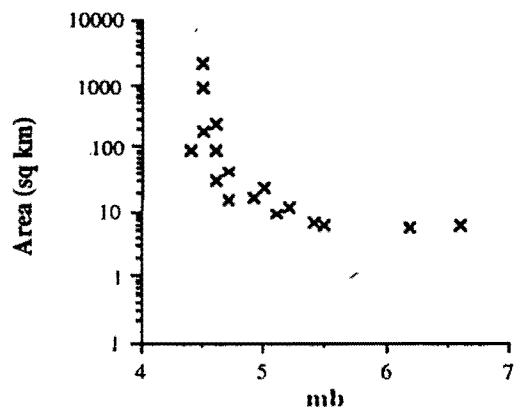


Рисунок 7

Площадь эллипса ошибок (с достоверностью 95%) в зависимости от магнитуды объемной волны

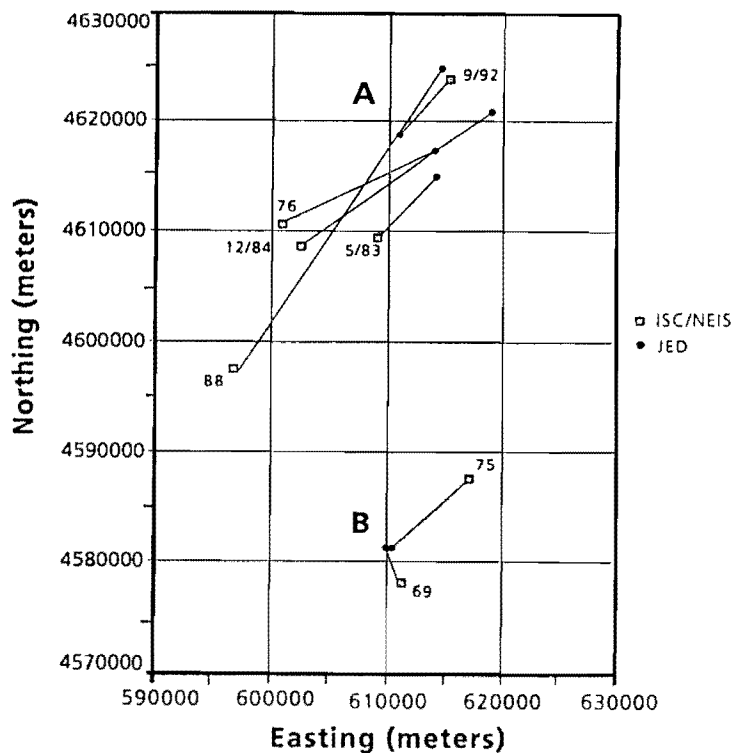


Рисунок 4

Оценки положения мест испытаний в туннелях в зонах А и В по данным ISC/NEIS (квадраты) и по результатам ООЭ-метода (сплошные кружки)

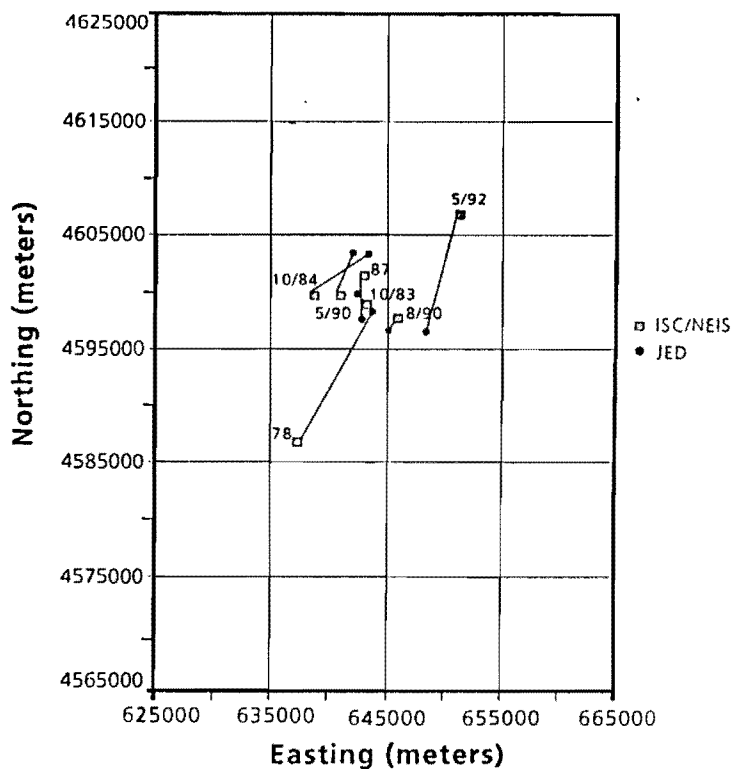


Рисунок 5

Оценки положения мест испытаний в вертикальных шахтах в зоне С по данным ISC/NEIS и по результатам ООЭ-метода. Уточненное положение точки взрыва 3 октября 1984 г. получено с изображений MSS на "Лэндсат-Ш" и LFC.

сколько килотонн или атмосферными испытаниями с мощностью в несколько мегатонн³⁵. Максимальное систематическое смещение составило 55 км, а максимальная площадь эллипса ошибок равнялась 2120 кв.км (см. табл.Г-1). Величина ошибок при определении положения для слабых сейсмических сигналов указывает на желательность несейсмических подходов, например, спутникового дистанционного зондирования для уменьшения района поиска. Необходимость несейсмических подходов все еще справедлива для китайского полигона, несмотря на ООЭ-результаты. Хотя ООЭ-метод уменьшает систематические ошибки определения положения, он не устраняет их полностью. В результате некоторые из уточненных эллипсов ошибок при определении места проведения китайских ядерных испытаний, упомянутых в Приложении Г, могут не содержать реальную точку подрыва. Такие расхождения между ООЭ-оценками и фактическим положением точки взрыва были обнаружены для Казахстанского полигона, когда среднее значение расхождений составило 1.2 км, а усредненный размер эллипса ошибок

был равен 0.7 км³⁶. Если когда-нибудь в дальнейшем станут известными истинные положения точек взрыва при всех китайских ядерных испытаниях, можно было бы провести аналогичное сравнение для оценки ООЭ-результатов приведенных в табл.2 и в Приложении Г.

Значение для верификации Договора о всеобщем запрещении испытаний

В сочетании с исследованиями других ядерных полигонов дистанционное зондирование китайского полигона продемонстрировало эффективность существующих спутников, предоставляющих коммерческие изображения для контроля текущих программ ядерных испытаний³⁷. Впрочем, не утверждалось, что современные спутниковые коммерческие изображения являются существенным компонентом режима верификации Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний (ВЗИ). Хотя стандартные ядерные испытания могут контролироваться коммерческими спутниковыми изображениями,

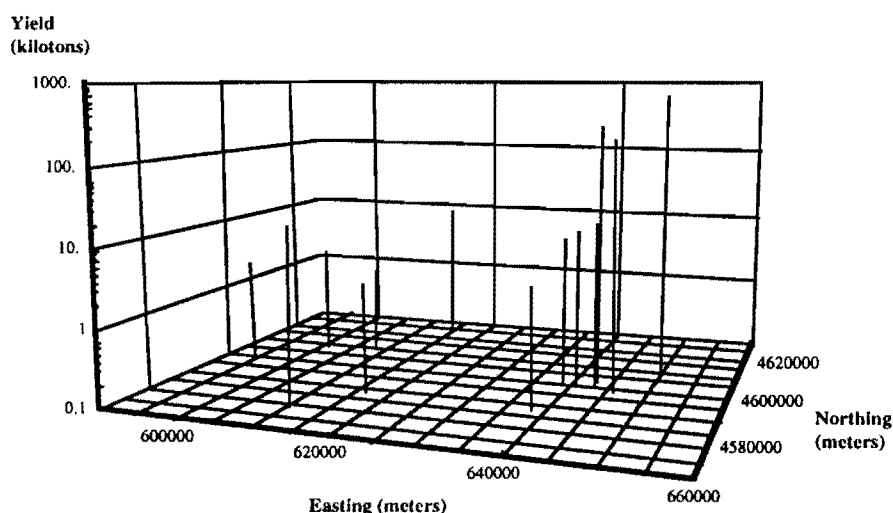


Рисунок 8
Мощности китайских подземных испытаний в зависимости от их положения по оценкам ISC/NEIS (универсальная меркаторская сетка координат)

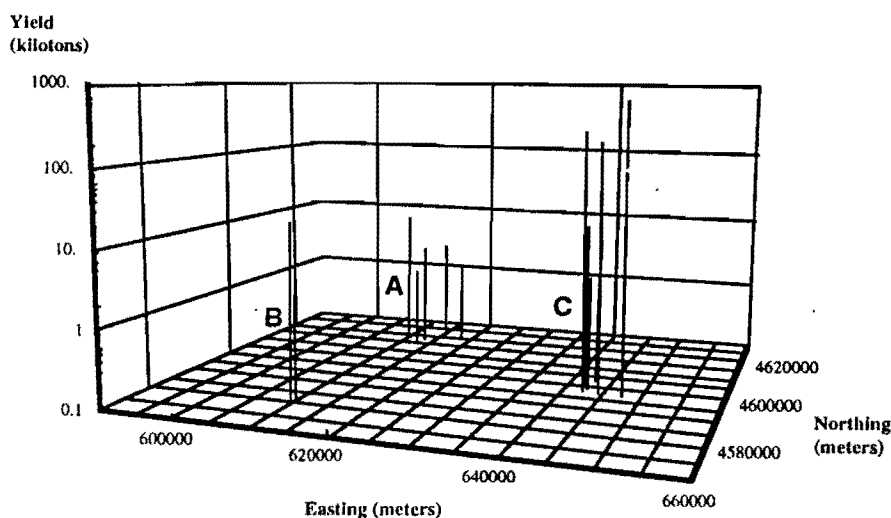


Рисунок 9
Мощности китайских подземных испытаний в зависимости от их положения по оценкам ООЭ-метода (универсальная меркаторская сетка координат)

отсюда не обязательно следует, что таким же прямым способом можно будет наблюдать тайные испытания³⁸.

Используя недвусмысленные сейсмические данные для установления общего расположения полигона, существующие спутники, поставляющие коммерческие снимки, могут обнаружить множество фактов о программах ядерных испытаний. Однако, непосредственно не очевидно, что те же самые спутники могут предоставить аналогичные факты в тех случаях, когда взрывами малой мощности (менее килотонны) вызываются незначительные сейсмические сигналы, когда энергично осуществляются маскировка, утаивание и уловки, или когда испытания могли бы проводиться в любом месте. Таким образом, в ближайшем будущем было бы разумным продолжать использование существующих коммерческих спутников дистанционного зондирования для контроля над известными программами ядерных испытаний и перенести задачи верификации ВЗИ на датчики с более высоким разрешением, имеющиеся на разведывательных спутниках и на вводимых вскоре в действие коммерческих спутниках, которые дают снимки земной поверхности. Эти новые коммерческие спутники, запланированные к пуску в течение ближайших 1-2 лет, будут предназначены для получения панхроматических изображений с разрешением 1-3 м на уровне земной поверхности и многоспектральных изображений в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах с разрешением 4 м³⁹. Такая технология получения снимков с высоким разрешением обладает потенциалом оказаться более полезной для верификации ВЗИ, поскольку она может обеспечить более детальную пространственную и спектральную информацию о маломасштабной деятельности и об эффектах небольших взрывов, которую в настоящее время нельзя отыскать на снимках "Алмаза", "Лэндсата", LFC и "Спота".

Если Договор о всеобщем запрещении ядерных испытаний будет введен в действие в течение нескольких ближайших лет, вырастут важность задачи точного определения мест возникновения слабых сейсмических явлений почти в реальном времени, и, похоже, в той же степени верификационная роль спутниковых изображений с высоким разрешением. Принципиальная роль такой технологии получения изображений состояла бы в сокращении поиска эпицентра от области в несколько тысяч кв.км до района с площадью в несколько десятков кв.км. Подобное уменьшение области поиска существенно не только для эффективного осуществления инспекции на месте⁴⁰, но и для систематического контроля над долей сейсмических явлений приводящих к ошибочной тревоге. Если изображения с высоким разрешением не показывают следов человеческой деятельности или инфраструктуры вблизи эпицентра, то сомнительное сейсмическое явление можно было бы без особых тревог отнести к событиям имеющим естественное происхождение.

Старые изображения со спутников полученные после событий снимки и архив данных по ООЗ-поправкам к времени прихода сигналов на станции всемирной сейсмической сети - все это служит потенциальными источниками снижения неточностей связанных с сейсмическим определением положений событий. В этом исследовании показано, как можно объединить спутниковые снимки и сейсмические данные для определения положения точек китайских взрывов. Техническое новшество для режима верификации ВЗИ будет состоять не только в повышении качества синтезированных данных, но и во внедрении алгоритмов, ускоряющих весь процесс анализа.

ПРИЛОЖЕНИЕ А ЭТАПЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО LFC-MSS СНИМКА С ЦЕЛЮЮ ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ

MSS-изображение "Лэндсата-1" включает в себя четыре спектральных канала, перекрывающие видимую и ближнюю инфракрасную части электромагнитного спектра (см. табл.А-1). Используя уравнения калибровки сенсора "Лэндсата-1" и методику увеличенного рассеяния на темных объектах для оценки величины атмосферного рассеяния можно выразить каждый из MSS-каналов в единицах энергетической яркости без рассеивательного компонента⁴¹:

$$L_i = \alpha_i D_i - \beta_i \quad (A-1)$$

$$\beta_i = \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_4}\right)^4 L_{at} \quad (A-2)$$

где L_i - энергетическая яркость (мВт/стер.см²), D_i - десятичное число, α_i - усиление сенсора (мВт/стер.см²), β_i - атмосферное рассеяние (мВт/стер.см²), λ - длина волны четвертого канала MSS, λ_i - длина волны i-го канала, L_{at} - атмосферное рассеяние в четвертом канале MSS.

Методика увеличенного рассеяния на темных объектах моделирует рассеяние в зависимости от длины волны и использует значение рассеяния в одном канале для вычисления рассеяния в других каналах. В данном случае предполагается, что доминирующим процессом, приводящим к очень прозрачным атмосферным условиям, является рэлеевское рассеяние (λ^{-4}). Рассеяние в четвертом канале измерялось непосредственно по затемненным пикселям. Было обнаружено, что на них падает пренебрежимо малое количество отраженного солнечного света и излучения от соседних наземных областей, на что указывает отсутствие наблюдаемой поверхностной структуры в этих пикселях. В результате значения энергетической яркости внутри затемненного пикселя представляет из себя яркость от атмосферного рассеяния. В табл.А-2 приведены значения усиления сенсора и рассеивательного компонента рассчитанного по уравнению (А-2) для каждого из MSS-каналов.

После проведения радиометрического преобразования и атмосферной коррекции три канала (MSS-каналы 4-6) перекрывающие видимую часть электромагнитного спектра накладывались друг на друга для образования панхроматического канала. Этот синтезированный канал требовался для цифрового сравнения MSS-данных с панхроматическим LFC-ортоизображением. Но, прежде чем это можно было сделать, панхроматический MSS-канал надо было геометрически совместить с LFC-ортоизображением.

Панхроматический MSS-канал был совмещен с северо-западным квадрантом LFC-ортоизображения путем отбора девятнадцати точек привязки, отождествляемых на каждом из изображений с последующим вычислением коэффициентов полиномиальных преобразований второго порядка (уравнения А-3 и А-4) на основе методики наименьших квадратов, за чем последовали геометрическое преобразование и перезапись изображения на 50-ти метровую сетку ортоизображения при помощи билинейной интерполяции. Все точки привязки были совмещены с точностью порядка долей размеров пикселя.

$$x' = C_1 + C_2x + C_3y + C_4x^2 + C_5y^2 + C_6xy \quad (A-3)$$

$$y' = C_7 + C_8x + C_9y + C_{10}x^2 + C_{11}y^2 + C_{12}xy \quad (A-4)$$

где x' - совмещенная x-координата, y' - совмещенная y-координата, x - несовмещенная x-координата, y - несовмещенная y-координата, C_i - константы.

Совмещенный панхроматический MSS-канал затем сравнивался цифровым образом с LFC-ортоизображением посредством поточечного сравнения. Методика рассеивания на темных объектах в ходе операции применялась и к LFC-ортоизображению⁴²:

$$\theta = \arctg\left(\frac{L_{r\text{ mss}}}{L_{r\text{ lfc}} - L_{s\text{ lfc}}}\right) \quad (A-5)$$

где θ - арктангенс отношения яркостей (в радианах), $L_{r\text{ mss}}$ - яркость в синтезированном MSS-канале, $L_{r\text{ lfc}}$ - яркость LFC-ортоизображения, $L_{s\text{ lfc}}$ - атмосферное рассеяние для LFC-ортоизображения.

Угол θ имеет диапазон изменений от 0 до $\pi/2$; он был перенормирован на цифровой диапазон 0 - 255. Сравнительное изображение отображает изменения отражательной способности поверхности. Пиксели с небольшим или нулевым изменением кажутся окрашенными в сероватые тона. Изменения на поверхности изображаются в виде темных или светлых пикселей, для которых величина изменения возрастает по мере того, как характерное десятичное число D стремится к значениям 0 ($\theta = 0$) или 255 ($\theta = \pi/2$). Величина изменения соответствует угловому расхождению в двумерном пространстве признаков между линией, соединяющей начало координат с рассматриваемым пикселем и линией регрессии, на которую ложатся пиксели соответствующие отсутствию поверхностных изменений (см. рис.А-1).

Таблица А-1

Спектральные участки и мгновенное поле зрения прибора MSS "Лэндсат-1"

Спектральный диапазон	Длина волны (мкм)	Мгновенное поле зрения
4 (зеленый)	0.50 - 0.60	79 м
5 (красный)	0.60 - 0.70	79 м
6 (ближний ИК)	0.70 - 0.80	79 м
7 (ближний ИК)	0.80 - 1.10	79 м

Таблица А-2

Значения усиления сенсора и коэффициента атмосферного рассеяния для участка, снятого на MSS "Лэндсат-1" 4 октября 1972 г.

Спектральный диапазон	α мВт/стер·см ²	β мВт/стер·см ²
4	0.01938	0.3710
5	0.01563	0.1903
6	0.01386	0.1072
7	0.06349	0.0416

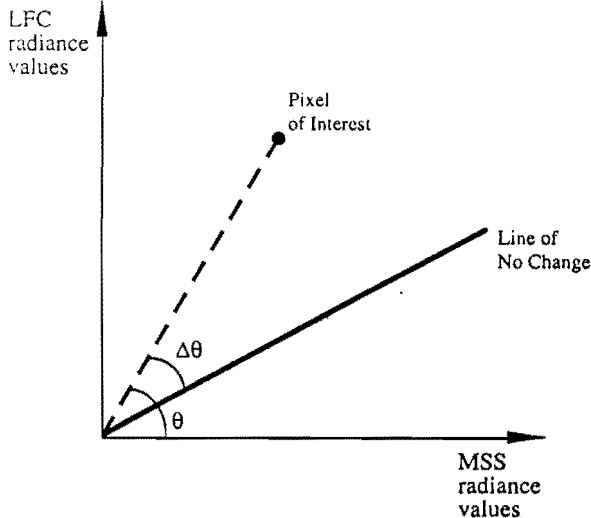


Рисунок А-1

Придание цифрового вида изменениям при помощи углового разделения в пространстве признаков.

По оси Х отложена энергетическая яркость на

MSS-изображении, а по оси Н - на LFC-изображении. Сплошная линия соответствует пикселям, в которых не произошло изменений, а прерывистая линия подходит к рассматриваемому пикселу.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

СОПРЯЖЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЯТНА НА LFC-ОРТОИЗОБРАЖЕНИИ С КИТАЙСКИМ ПОДЗЕМНЫМ ЯДЕРНЫМ ИСПЫТАНИЕМ, ОПИСАННЫМ В ТЕХНИЧЕСКОЙ СТАТЬЕ Ю.ЧЕ

В июльском (1987 г.) выпуске журнала "Шуй-вендижи Гонгченгдижи" ("Гидрология и инженерная геология") содержится техническая статья Юнгтая Че о локальных изменениях уровня грунтовых вод, вызванных двумя подземными ядерными взрывами на китайском ядерном полигоне⁴³. В статье содержится детальная гидрологическая и геологическая информация о полигоне, но в ней нет данных о мощности взрывов, их сроках или о географическом положении двух подземных испытаний⁴⁴. Единственные подробности, приведенные в статье, касаются среды, в которой был проведен взрыв, примерной глубины заложения заряда и относительного расстояния между двумя точками взрыва.

Оба из описанных испытаний были проведены в глубоких вертикальных шахтах ниже уровня подземных вод. Первый взрыв произошел в граните на глубине "около 280 м" а второй - в метаморфическом песчанике на глубине "более 200 м". Относительное положение каждой точки взрыва было указано на мелкомасштабной геологической карте полигона (см. рис.Б-1). Был дан масштаб карты, но географические координаты и тип картографической проекции отсутствуют.

Для четкого определения того, какая часть полигона описана на карте с масштабом 1:115000 на LFC-ортоизображении, был проведен поиск границ геологических особенностей показанных на рис.Б-1⁴⁵. Этот поиск дал пять точечных особенностей, которые можно отождествить как на карте, так и на LFC-изображении. Эти точки привязки использовались для вычисления коэффициентов аффинного преобразования. Затем применялось геометрическое преобразование, переводящее карту на LFC-ортоизображение:

$$x' = C_1 + C_2x + C_3y \quad (Б-1)$$

$$y' = C_4 + C_5x + C_6y \quad (Б-2)$$

где x' - совмещенная x -координата, y' - совмещенная y -координата, x - несовмещенная x -координата, y - несовмещенная y -координата и C_i - константы.

На Иллюстрации Б-1 показано качество подгонки. В верхней половине карты границы метаморфических песчаных конгломератов и золотого материала совпадают с границами ортоизображения. В нижней половине восточная граница золотого материала следует по структурной границе с метаморфическим песчаным конгломератом и метаморфической породой. Отдельные части карты не очень точно совпадают с особенностями на ортоизображении из-за небольшого числа точек привязки, а также в связи с неизвестными геологической и картографической точностями самой карты. Тем не менее, общих между картой и ортоизображением особенностей оказалось достаточно для вывода о том, что оба изображают один и тот же район поверхности. Таким образом, иллюстрация Б-1 дает абсолютную ориентацию карты, что было опущено в статье Че.

На Иллюстрацию Б-1 спроектированы положения первого и второго взрывов, описанных в статье Че. Положение второго взрыва перекрывается с верхней левой наружной частью большого пятна, отождествленного на сравнительном изображении (Иллюстрация 1). Это перекрытие связывает известную

точку взрыва (второго взрыва) с найденным поверхностным пятном. Такая связь усиливает заключение, что указанное на иллюстрации 1 поверхностное пятно является точкой взрыва при ядерном испытании в вертикальной шахте. Дополнительные факторы, приведенные в третьем разделе, дают возможность сделать еще один шаг и прийти к выводу о том, что поверхностное пятно содержит точку взрыва, произведенного 3 октября 1984 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ В
СРАВНЕНИЕ ООЭ-ПОЛОЖЕНИЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ В НАШЕМ ИССЛЕДОВАНИИ,
С ООЭ-ПОЛОЖЕНИЯМИ,
ПОЛУЧЕННЫМИ В АНГЛИЙСКОМ ЦЕНТРЕ
ПО АТОМНЫМ ВООРУЖЕНИЯМ (ЦАВ)

На рис. В-1 и В-2 приведено сравнение ООЭ-результатов, полученных в нашем исследовании, с ООЭ-результатами Дугласа и др. из английского Центра по атомным вооружениям (ЦАВ). На рис.В-1 проведено сравнение определений положений подземных испытаний в зонах А-С, а на рис.В-2 - положений атмосферных испытаний большой мощности

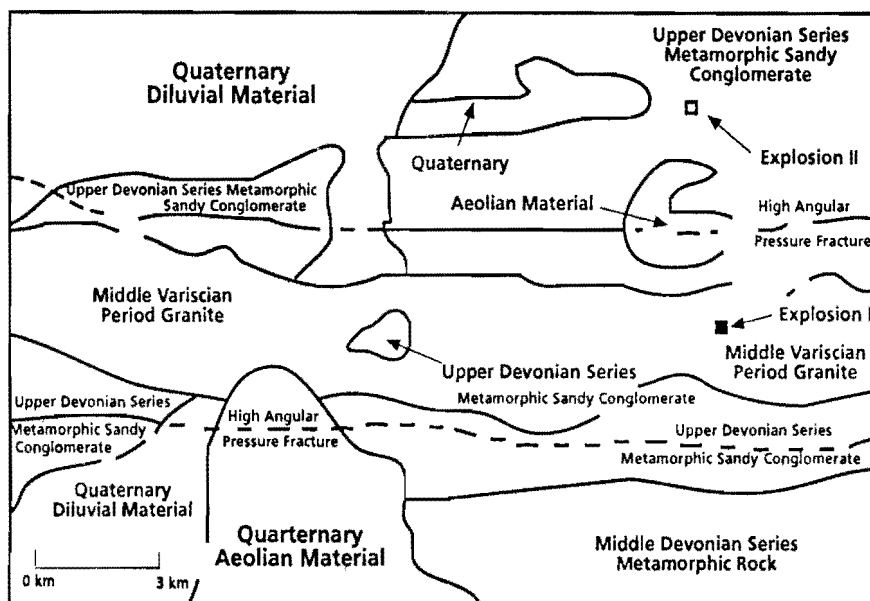


Рисунок В-1

Геологическая карта с указанием двух мест взрывов (масштаб 1:115000), отмеченных квадратами (Explosion I и Explosion II).

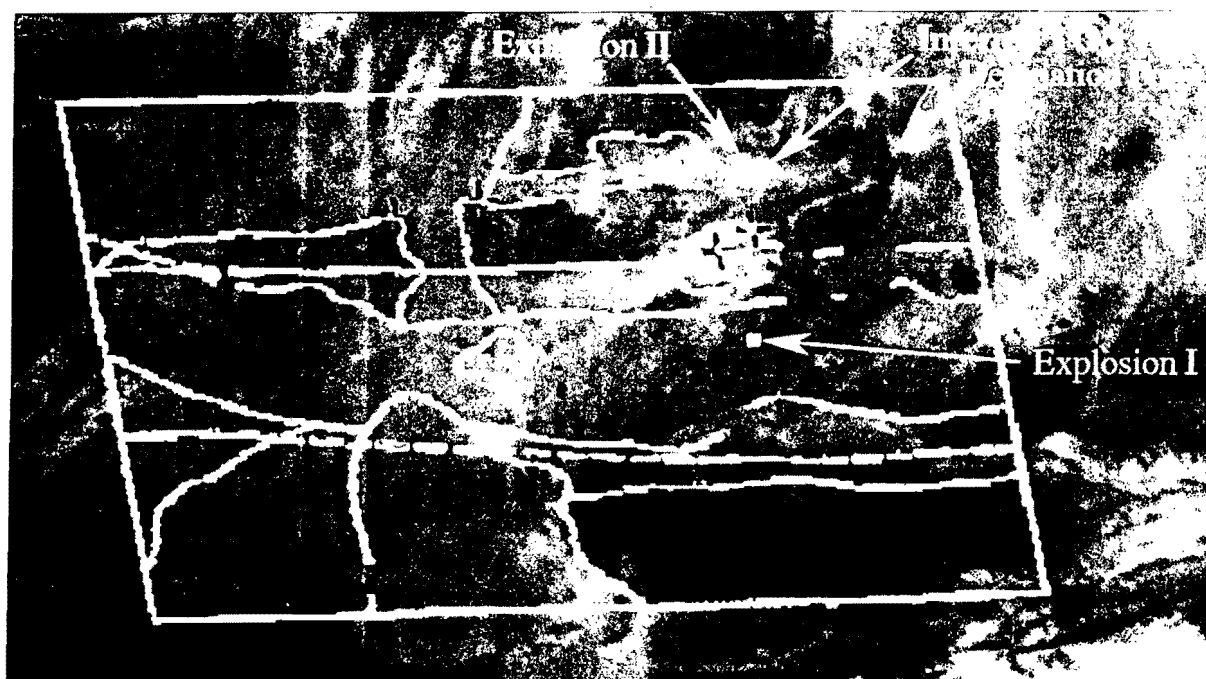
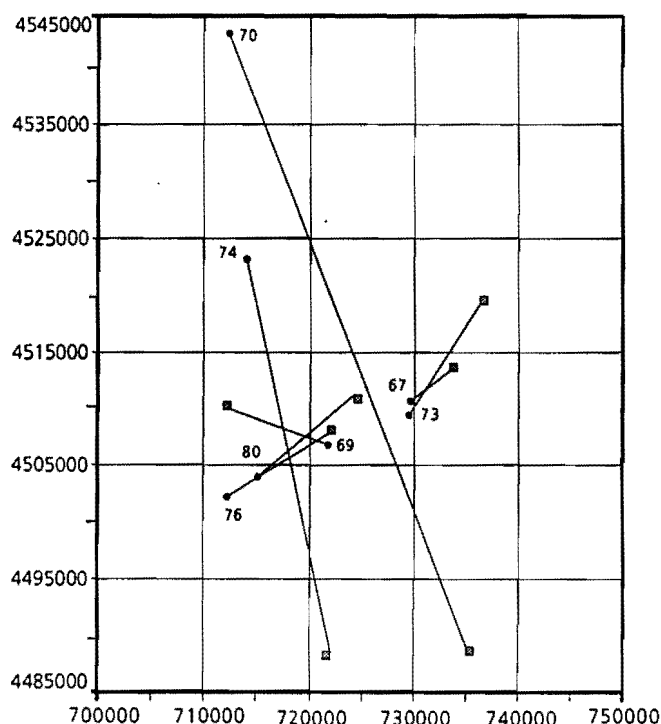
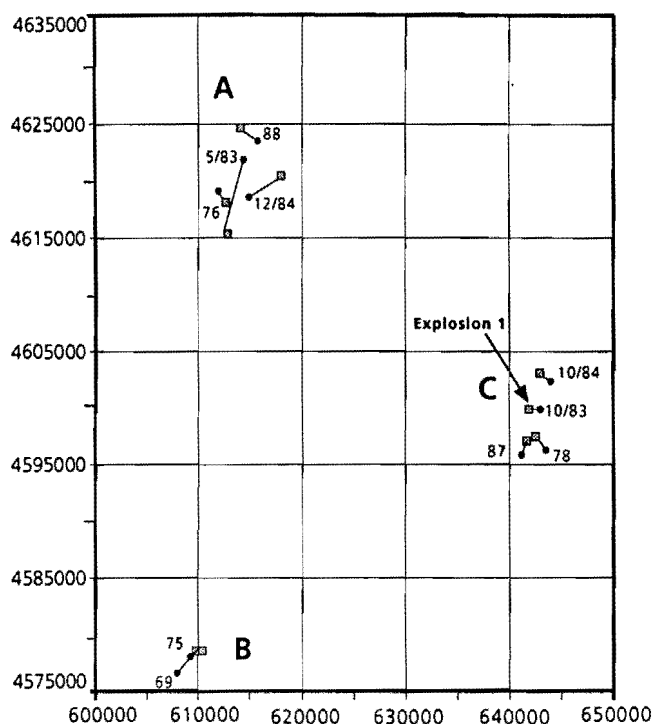


Иллюстрация В-1

Геологическая карта Че (рис.В-1), совмещенная с частью LFC-ортоизображения при помощи опорных точек отмеченных крестами. Размер изображения 24.50 км x 14.10 км. Указано также предполагаемое положение точки взрыва 3 октября 1984 г.



Рисунки В-1 и В-2

Сравнение оценок положения мест проведения китайских подземных испытаний в зонах А-С (рисунок В-1 слева) и атмосферных испытаний в зоне D (рисунок В-2 справа), полученных на основе ООЭ-метода в нашей работе и в исследованиях ЦАВ (используется универсальная поперечная меркаторская координатная сетка). Наши данные указаны квадратами, данные ЦАВ - черными кружками.

в зоне D (см. рис.2, где дана схема полигона). Представлены только положения мест проведения китайских испытаний до 1988 г., поскольку исследования ЦАВ не содержат китайских испытаний после взрыва 29 сентября 1988 г. Положения, определенные в работе ЦАВ на рис.В-1, снабжены указанием месяца и года испытания, если в течение данного календарного года было проведено более одного подземного испытания. Определенные в ЦАВ положения испытаний на рис.В-2 снабжены указанием года испытания.

Различия в положениях между ООЭ-результатами, приведенными в Табл.2, и между ООЭ-результатами ЦАВ показаны соединительными линиями отложенными на графике в том же самом масштабе. Для подземных испытаний указанные на рис.В-1 отличия оказываются незначительными, причем ЦАВ-положения попадают в соответствующие эллипсы 95-процентной достоверности, полученные в нашем исследовании (см. Табл.Г-1). Сходство результатов можно отнести к использованию в обоих исследованиях испытания 3 октября 1984 г. в качестве опорного события.

В исследовании ЦАВ в качестве опорных событий использовались испытания 6 октября 1983 г. и 3 октября 1984 г. Эти два испытания были отобраны на основе простого процесса исключения, проведенного Дж.Матцко из Геологической службы США. Используя карту приведенную на рис.В-1 с примерными географическими координатами точек взрыва и сейсмические данные ISC/NEIS, Матцко отождествил испытания 6 октября 1983 г. и 3 октября 1984 г. как "возможный первый взрыв" и "возможный второй взрыв" соответственно⁴⁶. Исследование ЦАВ полагалось на основанную на большом опыте догад-

ку Матцко, которая, как установлено в нашем исследовании, оказалась справедливой. Анализ изображений LFC и MSS связал второй взрыв и испытание 3 октября 1984 г. (см. Иллюстрацию 1 и Приложение Б), а последующие ООЭ-результаты привели к перекрытию положения первого взрыва и положения испытания 6 октября 1983 г., полученного в нашем исследовании (см. рис.В-1).

Но для атмосферных испытаний в зоне D с большой мощностью взрывов ООЭ-положения в нашем исследовании значительно отличаются от ООЭ-положений ЦАВ (см. рис.В-2). Отличия могут быть связаны с тем опорным событием в зоне D, которое использовалось в нашем исследовании, но не использовалось в исследовании ЦАВ. Испытание 27 июня 1973 г. послужило локальным калибровочным сейсмическим источником для других слабых сейсмических событий, вызываемых атмосферными взрывами. В результате его использование для ООЭ-методики уменьшило ошибки определения положения места взрыва характерные для зоны D, которая удалена от зон для подземных испытаний (см. рис.2).

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ООЭ-МЕТОДА К КИТАЙСКИМ ЯДЕРНЫМ ИСПЫТАНИЯМ

В Табл.Г-1 приведены результаты применения методики определения общего эпицентра. Для каждого испытания, включенного в набор данных, приводятся площадь эксцентриситет и ориентация эллипса ошибок с 95-процентной достоверностью⁴⁷.

Представлены также величина и направление систематической ошибки определения положения по отношению к оценкам ISC/NEIS. Для взрывов 27 июня 1973 г. и 3 октября 1984 г. не приводятся параметры эллипсов поскольку места проведения этих испытаний определялись по коммерческим фотоснимкам со спутников и использовались в качестве фиксированных опорных точек для ООЗ-методики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность Майклу Барнетту, Джону Хассарду, Патриции Льюис и Питеру Циммерману за поддержку и руководство в ходе этого исследовательского проекта. Автор хотел бы также поблагодарить Пола Хржановского, Урсулу Голдстейн, Стива Ярпе, Кейта Наканиши, Мило Нордайка, Фрэнка Пабиана, Сюанну Скайер, Джея Зукка и четырех анонимных рецензентов за их комментарии по предварительным вариантам этой статьи. Программу на языке "Фортран" для определения общего эпицентра (ООЗ) подготовили Алан Дуглас и Джон Янг из английского Центра по атомным вооружениям. Исследование проводилось в лондонском "Империял колледже" при Лондонском университете и в комиссии VERTIC при частичной поддержке со стороны компании Леверхулм и фонда Плаушерс.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Vipin Gupta "Future Chinese Nuclear Tests on the Horizon", Trust & Verify, 30, July/August 1992, pp.2-3 (Presented at the 4th International Summer School on Science and World Affairs, August 28, 1992, Shanghai); R. Jeffrey Smith, "China Planning a Nuclear Test, US Aides Say: Nations Pressure Beijing to Observe Moratorium", "Washington Post, September 17, 1993, p.A1.
2. John Matzko, "Geology of the Chinese Nuclear Test Site near Lop Nor, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China", Engineering Geology, 36, 1994, pp.173-181 (Presented at the 14th Annual

- PL/DARPA Seismic Research Symposium, September 16-18, 1992, Tucson, Arizona).
3. Robert Norris, Andrew Burrows, and Richard Fieldhouse, Nuclear Weapons Databook, Volume V: British, French, and Chinese Nuclear Weapons (Boulder: Westview Press, 1994), pp.350-356.
4. John Murphy, "Yield Estimation and Bias at the Chinese Lop Nor Test Site", pp.1-21 (Presented at the 14th Annual PL/DARPA Seismic Research Symposium, September 16-18, 1992, Tucson, Arizona).
5. Р-волна - это объемная волна сжатия, распространяющаяся через земную кору и мантию Земли.
6. Исследование ЦАВ уточнило также амплитуду объемных волн (m_b) от китайских ядерных испытаний, занесенных в бюллетени ISC по 1988 г., A. Douglas, P. Marshall, and K. Jones, "Body-Wave Magnitudes and Locations of Explosions at the Chinese Test Site, 1967-1989", AWE Report No. O 12/93, December 1993, pp.1-19.
7. Vipin Gupta, "Assessment of the Chinese Nuclear Test Site near Lop Nor", Jane's Intelligence Review, 5(8), August 1993, pp.378-381; Vipin Gupta and Philip McNab, "Sleuthing from Home", The Bulletin of the Atomic Scientists, 49 (10), December 1993, pp.44-47; Vipin Gupta, "The Status of Chinese Nuclear Weapons Testing", Jane's Intelligence Review, 7(1), January 1994, pp.31-35; Vipin Gupta, A Remote Sensing and Photogrammetric Study of the Chinese Nuclear Test Site, PhD thesis (University of London, February 1995), pp.1-264.
8. Gupta and McNab, "Sleuthing from Nome", pp.44-47; Smith, "China Planning a Nuclear Test, US Aides Say: Nations Pressure Beijing to Observe Moratorium", p.A1.
9. Например, изображение высокого разрешения полученное на российской камере KBP-1000 и обработанное с двухметровым разрешением по поверхности стоило в 1993 г. 13 долларов США за 1 кв.км. Таким образом, стоимость снимка на KBP-1000 всей территории китайского полигона

Таблица Г-1
Результаты ООЗ для ядерных взрывов на китайском полигоне

Дата	m_b	Площадь эллипса (км ²)	Большая полуось (км)	Малая полуось (км)	Ориентация ^а (градус)	Вектор ошибки (км)	Направление ^б (градус)
17.06.67	4.7	42.77	5.11	3.56	151.98	32.31	101.02
22.09.69	5.2	11.36	2.56	1.89	140.06	3.08	340.66
29.11.69	4.5	2117.97	159.39	5.57	169.06	18.20	89.28
14.10.70	4.6	219.44	11.11	8.25	155.88	54.82	144.08
27.06.73	4.8	0.00	0.00	0.00	0.00	18.93	34.98
17.06.74	4.5	888.59	28.77	12.93	5.56	3.96	206.29
27.10.75	5.0	23.92	4.33	2.34	156.85	8.68	225.08
17.10.76	4.9	16.10	3.00	2.23	149.35	15.34	60.44
17.11.76	4.6	87.41	12.35	3.00	141.44	9.71	196.46
14.10.78	4.9	16.19	3.00	2.34	136.28	12.51	24.31
16.10.80	4.4	87.54	9.57	3.90	144.53	45.71	218.77
04.05.83	4.5	181.23	19.21	4.01	16.67	7.29	41.72
06.10.83	5.5	6.23	2.11	1.22	36.73	.97	329.82
03.10.84	5.4	0.00	0.00	0.00	0.00	5.53	49.95
19.12.84	4.7	14.59	3.00	2.00	140.58	21.44	52.56
05.06.87	6.2	5.64	2.00	1.22	42.06	8.99	198.26
29.09.88	4.6	29.82	4.89	2.56	136.34	33.61	34.78
26.05.90	5.4	6.77	2.22	1.34	31.68	3.38	16.20
16.08.90	6.2	5.52	2.00	1.22	37.41	1.11	232.59
21.05.92	6.6	6.01	2.11	1.22	38.96	10.13	197.22
25.09.92	5.1	8.97	2.45	1.56	40.39	6.67	222.29

^а Угол ориентации отсчитывается от направления на север по часовой стрелке.

^б Направление вектора ошибки отсчитывается от направления на север по часовой стрелке.

- (100 000 кв.км) составит 1.3 миллиона долларов, если не будет предоставлена значительная скидка. Стоимость снимка на КВР-1000 только действующих частей китайского полигона (200 кв.км) была бы значительно меньше - 2600 долларов.
10. Norris, Burrows, and Fieldhouse, Nuclear Weapons Databook, Volume V: British, French, and Chinese Nuclear Weapons, pp.420-422.
 11. О китайском подземном испытании 5 октября 1982 г. не было сообщено в бюллетенях ISC/NE-IS, хотя его обнаружило небольшое число сейсмических станций.
 12. Приведенная высота взрыва (H_y) определяется выражением $H/Y^{1/3}$, где H - истинная высота взрыва а Y - мощность ядерного взрыва (кт).
 13. Мощности взрывов при атмосферных испытаниях опубликованы в справочнике Norris, Burrows, and Fieldhouse, Nuclear Weapons Databook, Volume V: British, French, and Chinese Nuclear Weapons, pp.420-422. Мощности взрывов при подземных испытаниях опубликованы в работе Gupta, "The Status of Chinese Nuclear Weapons Testing", p.32.
 14. H. Jeffreys and K. Bullen, "Seismological Tables", British Association for the Advancement of Science, Gray-Milne Trust, 1967.
 15. B. Bolt, "The Revision of Earthquake Epicentres, Focal Depths, and Origin-Time Using a High Speed Computer", Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 3, 1960, pp.434-440; B. Bolt, "Earthquake Location for Small Networks Using the Generalized Inverse Matrix", Bulletin of the Seismological Society of America, 60, 1970, pp.1823-1828.
 16. К сожалению, ядерные испытания особенно испытания с малой мощностью часто не обнаруживаются при таких предпочтительных обстоятельствах. Ola Dahlman and Hans Israelson, Monitoring Underground Nuclear Explosions (Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing, 1977), p.189.
 17. Dahlman and Israelson, Monitoring Underground Nuclear Explosions, p.176.
 18. Roger Clark and John Baruch, "Verification of a Comprehensive Test Ban", in Frank Barnaby, ed., A Handbook of Verification Procedures (London: MacMillan Press, 1990), p.88.
 19. Alan Douglas, "Joint Epicenter Determination", Nature, 215 (5096), July 1, 1967, pp.47-48.
 20. Впрочем, для четырех подземных ядерных испытаний не было приведено время подрыва. Yan Lu, "Physical Geological Reactions to Underground Nuclear Explosions", Shuiwendizhi Gongchengdizhi (5), September 1980, pp.13-16; Jinli Wang and Tiezhong Xu, "A Preliminary Study of Abnormal Movement of Ground Water Influenced by an Underground Nuclear Explosion", Shuiwendizhi Gongchengdizhi (5), September 1983, pp. 33-36; Yongtai Che, "Response of Ground Water Level in Wells to Underground Explosion", Shuiwendizhi Gongchengdizhi (4), July 1987, pp.7-12.
 21. Все расстояния измерялись в координатной сетке универсальной поперечной меркаторской проекции (UTM - Universal Transverse Mercator).
 22. Обломы на поверхности от испытания в вертикальной шахте также могли бы увеличить альбедо. Однако при испытаниях в вертикальной шахте невозможно отделить поверхностные эффекты, связанные с подготовкой к испытанию от эффектов взрыва, если только не получить дополнительного изображения непосредственно перед взрывом.
 23. На снимках СПОТа-1 ясно видны мощные дороги на полигоне. Gupta, "The Status of Chinese Nuclear Weapons Testing", p.34.
 24. US Congress, Office of Technology Assessment, The Containment of Underground Nuclear Explosions, OTA-ISC-414 (Washington, DC: US Government Printing Office, October 1989), pp.11-27.
 25. Преобладающие ветры на Любноре дуют с северо-востока со скоростью 65-77 км/час, прочищая этот район в среднем в течение 80 дней каждый год. Shu Peng Chen, ed., Atlas of Geoscience Analyses of Landsat Imagery in China (Beijing: Science Press, 1986), p.178.
 26. Веерообразные конфигурации наблюдались на американском полигоне в Неваде. Thomas B. Cochran, William Arkin, Robert S. Norris, and Milton M. Hoenig, Nuclear Weapons Databook, Volume II: US Nuclear Warhead Production (Cambridge: Ballinger Publishing, 1987), p.48.
 27. В сейсмологии расстояния измеряются углом, под которым из центра Земли видна дуга, соединяющая сейсмический источник и приемную станцию.
 28. Gupta, "Assessment of the Chinese Nuclear Test Site near Lop Nor", pp.379-380.
 29. Douglas, Marshall, and Jones, "Body-Wave Magnitudes and Locations of Explosions at the Chinese Test Site, 1967-1989", pp.4,16.
 30. Dahlman and Israelson, Monitoring Underground Nuclear Explosions, p.189.
 31. За исключением испытаний 22 сентября 1969 г. и 29 сентября 1988 г., уточненные оценки мощностей взрывов, приведенные на рис.8 и 9, были получены на основе сейсмического анализа, который провел Мэрфи (Murphy, "Yield Estimation and Bias at the Chinese Lop Nor Test Site", pp.1-21). Мощность взрыва при испытании 22 сентября 1969 г. взята у Янга (Yang Fujia, "An Informal Talk on the 21 May 1992 Nuclear Test", International Summer School on Science and World Affairs, Fudan University, 28 August 1992). Мощность взрыва при испытании 29 сентября 1988 г. взята у Кларка (Roger Clark, "Report on L-based Yield Estimation of two Chinese Nuclear Tests - 29 September 1988 and 5 October 1993", 4 November 1993, p.1). См. табл.1, где приведены значения мощностей взрыва при китайских подземных ядерных испытаниях до 1992 г.
 32. До того, как начала действовать восточная зона Китай провел одно подземное ядерное испытание (22 сентября 1969 г.) в зоне D, где мощность взрыва, как сообщается, составила 19.2 килотонны (см. Табл.1).
 33. Gupta, "Future Chinese Nuclear Tests on the Horizon", pp.2-3; Gupta, "The Status of Chinese Nuclear Weapons Testing", pp.31-35.
 34. Gupta, "Future Chinese Nuclear Tests on the Horizon", pp.2-3; Gupta and McNab, "Sleuthing from Home", pp.44-47.
 35. Для изучения слабых сейсмических событий с привлечением спутникового дистанционного зондирования и сейсмологии можно воспользоваться многомегатонными испытаниями в атмосфере с низкой приведенной высотой взрыва вместо подземных испытаний с мощностью в несколько килотонн. Атмосферные испытания предпочтительнее, так как легче обнаруживать и отождествлять их наземные следы по спутниковым снимкам.
 36. Для исследования верификации Договора о всеобщем запрете ядерных испытаний имеет смысл изучить старые атмосферные взрывы, которые были обнаружены сейсмическими методами. Можно измерить ошибки сейсмического определения положения места взрыва путем сравнения с положением найденным по спутниковым изображениям, а также оценить на основе дистанционных методов возможности сейсмического точного определения положения слабых сигналов вблизи старых полигонов.

- "Accurate Locations of Nuclear Explosions in Balapan, Kazakhstan, 1987 to 1989", *Geophysical Research Letters*, 20(5), 5 March 1993, p.401.
37. Об изучении американского полигона в Неваде методами дистанционного зондирования смотрите Bhupendra Jasani, "Civil Observation Satellites and Arms Control Verification", Preliminary Report, Department of War Studies, King's College London, August 1992, pp.65-69; Peter Zimmerman, "Study of the Nevada Test Site using Landsat Satellite", CSIS Report, 1993, pp.1-9.
Дистанционное зондирование бывших советских полигонов освещено в работах Ulf Ekblad and Hans-Ake Olsson, "Satellite Imagery Detection of Preparations for Underground Nuclear Explosions", FOA Report с 30560-9.4, Swedish Defense Research Establishment, Linköping, January 1990, pp.1-18; William Leith and David Simpson, "Monitoring Underground Nuclear Tests", in Michael Krepon, Peter Zimmerman, Leonard Spector, and Mary Umberger, *Commercial Observation Satellites and International Security* (New York: St. Martin's Press, 1990), pp.115-124; Johnny Scrove and John Skogan, "The NUPI Satellite Study of the Northern Underground Nuclear Test Area on Novaya Zemlya", NUPI Report No.164, December 1992, pp. 1-51; Lynn Sykes, Jishu Deng, and Paul Lyubomirskiy, "Accurate Location of Nuclear Explosions in Azgir, Kazakhstan, from Satellite Images and Seismic Data: Implications for Monitoring Decoupled Explosions" *Geophysical Research Letters*, 20 (18), 15 September 1993, pp.1919-1922; Thruber et al., "Accurate Locations of Nuclear Explosions in Balapan, Kazakhstan, 1987 to 1989, pp.399-402; C.H.Thruber, H.R.Quin, and R.Saleh, "Catalog of Locations of Nuclear Explosions at Balapan, Kazakhstan, 1965 to 1985", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 11 August 1993, pp.1-13.
 38. Vipin Gupta and John Hassard, "Space-based Electromagnetic Remote Sensing for Monitoring Nuclear Explosive Testing", принятая для печати в *Surveys in Geophysics*.
 39. Некоторые из этих спутников будут способны получать за один пролет изображения высокого разрешения с общей площадью 15000-20000 кв.км. С деталями технических возможностей новых спутников получающих изображения можно ознакомиться в статье Vipin Gupta, "New Satellite Images for Sale", которая будет опубликована в летнем (1995) выпуске журнала *International Security*.
 40. Warren Heckrotte, "On-site Inspection to Check Compliance", in Jozef Goldblat and David Cox, *Nuclear Weapon Tests: Prohibition or Limitation* (New York: Oxford University Press, 1988), p. 255.
 41. Charles Robinove, "Computation with Physical Values from Landsat Digital Data", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48 (5), May 1982, pp.781-784; Pat Chavez, "An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data", *Remote Sensing of Environment*, 24, 1988, pp.459-479.
 42. Обсуждение достоинств сравнения в скombинированном диапазоне дается в работе Gupta, A Remote Sensing and Photogrammetric Study of the Chinese Nuclear test site, pp.160 - 166. Обсуждение важности удаления эффектов атмосферного рассеяния перед сравнением приводится в работе R.Crippen, "The Dangers of Underestimating the Importance of Data Adjustments in Band Rationing", *International Journal of Remote Sensing*, 9(4), 1988, pp.767-776.
 43. Che, "Response of Ground Water Level in Wells to Underground Explosion", pp.7-12.
 44. Хотя времена взрывов не приводятся, два подземных ядерных испытания должны были произойти до июля 1987 г. - до времени опубликования статьи.
 45. Проведя свой геологический анализ района полигона Дж.Мацко свел район поиска к площади, примерно вдвое превышающей участок изображенный на карте. Matzko, "Geology of the Chinese Nuclear Test Site near Lop Nor, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China", pp.173-181.
 46. Matzko, "Geology of the Chinese Nuclear Test Site near Lop Nor, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China", p.176.
 47. Эксцентриситет является количественной характеристикой формы эллипса и может быть выражен в виде функции большой и малой полуосей $e = (1 - \frac{a}{b})$ где e - эксцентриситет a - большая полуось и b - малая полуось. Эксцентриситет эллипса может меняться в пределах от 0 до 1.
 48. Технические детали обработки и интерпретации MSS-снимков от 12 июня 1973 г. и 30 июня 1973 г. приведены в работе Vipin Gupta, "Using Landsat-1 MSS Imagery to Locate the 27 June Nuclear Explosion at the Chinese Nuclear Test Site near Lop Nor" (готовится к печати). Смотрите также Gupta, A Remote Sensing and Photogrammetric Study of the Chinese Nuclear Test Site, pp. 155-180.
 49. Технические детали по получению LFC-орто-изображения приведены в работе Gupta, A Remote Sensing and Photogrammetric Study of the Chinese Nuclear Test Site, pp. 115 - 154.