

ПЕРЕСМОТРЕННАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛОЩАДКИ НА СЕВЕРОКОРЕЙСКОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ ПОЛИГОНЕ ПУНГЕРИ

Дэвид Кобленц и Франк Пэбиан

Оценка физических характеристик местности открывает путь для проведения геологической интерпретации площадок, доступ к которым закрыт. Данная работа показывает полезность такого подхода для создания пересмотренной геологической карты испытательного полигона Северной Кореи посредством геоморфометрии (определяемой как наука количественного анализа земной поверхности), основанной на рекогносцировочных данных, и на исследовании картографических данных. Данное исследование предоставляет способ количественного анализа геологических различий на испытательном полигоне и позволяет предположить, что геологические факторы внесли свой вклад в мгновенный выброс обнаруженных радионуклидов, связанных с ядерным испытанием в 2006 году, по сравнению с событиями 2009 и 2013 годов. Этот метод важен для мониторинга испытаний, потому что он предоставляет:

- 1) лучшее понимание целостности основной скальной породы и характеристик геологической связанности;
- 2) средства для способствования более точного определения мощностей взрыва;
- 3) лучшее понимание удержания события и вероятности выброса; и
- 4) улучшенное понимание потенциальных механизмов переноса радионуклидов, которое может помочь в будущем мониторинге и верификации тайных испытаний.

Дэвид Кобленц работает научным сотрудником по исследованиям и разработкам в Лос-Аламосской национальной лаборатории, отделение наук о Земле и окружающей среде, группа геофизики твердой земли, Лос-Аламос, Нью-Мексико, США.

Франк Пэбиан работает научным сотрудником в Лос-Аламосской национальной лаборатории, отделение анализа и технологии разведки, Лос-Аламос, Нью-Мексико, США.

Почтовый адрес для корреспонденции: David Coblentz, Solid Earth Geophysics (EES-17), Earth and Environmental Sciences Division, Los Alamos National Laboratory, P.O. Box 1663, Mailstop F665, Los Alamos, NM 87545, USA.

Адрес электронной почты: coblentz@lanl.gov

Статья получена 20 августа 2014 года и принята к публикации 27 января 2015 года.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время геологическая характеристика площадок с закрытым доступом ограничивается упрощенными представлениями подповерхностной геологии (например, либо полупространство, либо плоские геологические слои). Это представляет собой важный недостаток, с учетом того, что многие подходы к обнаружению распространения смогли бы выиграть от применения более всеобъемлющих трехмерных моделей подповерхностной геологии. Возможные примеры включают моделирование распространения сейсмических волн и потенциальных путей утечки радионуклидов через трещины в скальной породе, так же как и априорную характеристику и оценку площадки для мониторинга договора. Одним из способов преодоления такого недостатка может стать объединение методов оценки местности и распознавания образов в методологию для улучшения геологической характеристики поверхности¹. Основное положение такого подхода состоит в том, что топография поверхности и природа геологии коренной подстилающей породы тесно связаны между собой. Для поиска корреляций в соотношении между картографией и геологией подстилающих слоев широко использовались предыдущие работы НАСА на испытательной площадке в кратере Писга (рисунок 1). Площадка расположена в пустыне Мохаве в 40 милях (65 километрах) от Барстоу, Калифорния, и она была первоначально выбрана в качестве возможного аналога места лунной посадки². Геология площадки в основном определяется потоками лавы третичного и четвертичного периодов и наносными образованиями четвертичного периода. Исследования данной площадки привели к следующему выводу: "Первоначальная гипотеза о

том, что шероховатость поверхности отражает геологическую природу скальных пород, представляется верной", с оговоркой того, что "... сразу стало ясно, что масштабы сбора образцов, требующиеся для подтверждения гипотез, могут быть разными на каждой из исследуемых площадок"³.

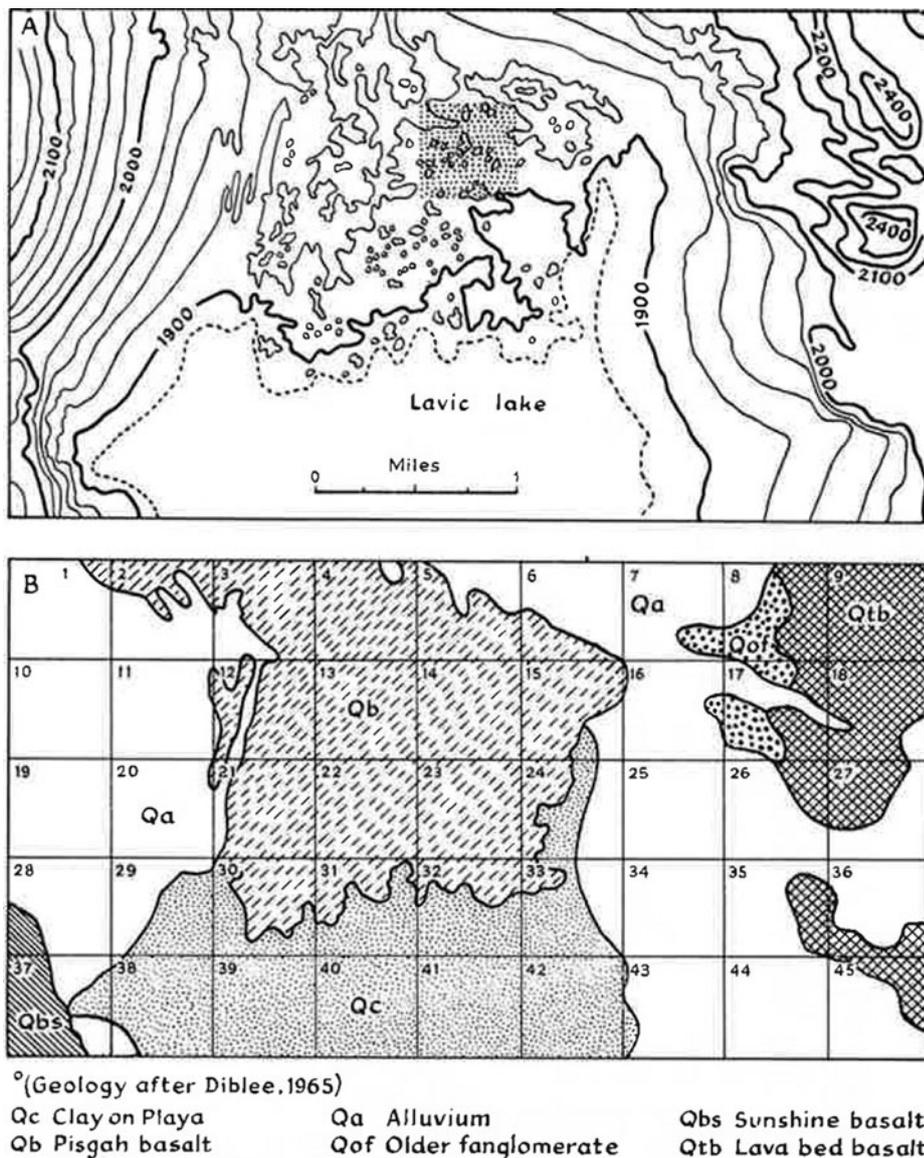


Рисунок 1. Соотношение между топографией (вверху) и геологией подстилающих коренных пород (внизу) в кратере Писга, Калифорния. Эта площадка активно использовалась НАСА в 1960-х и 1970-х годах в качестве испытательного полигона для оценки геологических характеристик по данным дистанционных наблюдений. Надписи на верхней части рисунка (сверху вниз): 1 – озеро из лавы; 2 – масштаб в милях. Надписи под рисунком: 1 – (геология по Дибле, 1965); 2 – Qc – глина на плейасе; 3 – Qb – базальт Писга; 4 – Qa – аллювий; 5 – Qof – старый фангломерат; 6 – Qbs – базальт Саншайн; 7 – Qtb – базальт лавового пласта.

Одним из источников информации для ограничения геологических свойств поверхности в области с закрытым доступом является использование коммерческих спутниковых снимков для рекогносцировки геологического картирования и характеристики поверхности. Применение таких данных специально для ядерных испытательных полигонов в областях с закрытым доступом для задач верификации не является новым⁴.

Историческим примером применения дистанционного зондирования для геологической характеристики было проведенное в 1990 году в Лос-Аламосской национальной лаборатории исследование, которое было направлено на испытательный полигон в Неваде как на контрольный пример, в котором совмещались соответствующие наборы данных (включая данные дистанционного зондирования, геофизические данные, геологические и геоморфологические данные) для того, чтобы идентифицировать и характеризовать геологию региона, где имеются только неполные или неточные наборы данных, или где прямые геологические данные

либо недоступны, либо недостижимы. В том исследовании использовались наилучшие доступные в то время изображения, которые включали четыре основных набора данных с: мультиспектрального сканера спутника "Landsat" (MSS, разрешение 60 метров); прибора тематического картирования спутника "Landsat" (TM, разрешение 30 метров); мультиспектральной камеры спутника "SPOT" (XS, разрешение 20 метров); и панхроматической камеры спутника "SPOT" (Pan, разрешение 10 метров). Это исследование показало, что, несмотря на ограниченный набор датчиков, пространственное разрешение и положения спектральных диапазонов достаточно для того, чтобы сделать возможной экстраполяцию спектральной отражательной способности и морфологической информации некартированной области для литологической дискриминации. Была начата разработка новых процедур анализа изображений и создания тематических карт и их применение к областям, для которых не хватало априорной геологической информации. В то время использовался один метод:

... экстраполяция изображения и наблюдений "наземного контроля данных" для картированной ранее области в прилегающую область, изображения которой были получены с теми же данными, что и для исходной области. Следующим логическим шагом в продвижении приложений дистанционного зондирования (и наших основных исследовательских усилий) была разработка "транспортабельных" методов обработки изображений и баз данных идентификации особенностей, которые могли быть использованы для характеристики геологического окружения недоступных областей, для которых не имеется существенно никакой априорной информации ("наземного контроля данных") о геологии области⁵.

Кроме того, в этом исследовании был сделан вывод о том, что определение локальной подповерхностной геологии требует достоверной осведомленности о региональной геологической обстановке, и того, чтобы сведущий в дистанционном зондировании геолог без предварительного знания о геологии области мог определить базовую геологическую модель, оценив различные факторы, такие, как физическую географию, геоморфологию, структурную геологию, стратиграфию и литологию, гидрогеологию и растительность посредством логических выводов из спектрального и пространственного анализа. Идентификация может быть выведена либо непосредственно из спектральных сигнатур (идеально, если будут обнажены подстилающие скальные породы), либо через распознавание образов (либо субъективно проверкой с применением анализа местности, либо объективно с использованием алгоритмов обработки изображений). Как отметил авторы, "Образы стоков могут предоставить существенную информацию о природе обнажения скальных пород, например, литологии, наклоне поверхности, возрасте и процессах выветривания, которые влияют на обнажение. Подобным образом, оценка географического контекста и морфологии (формы рельефа) поможет геоморфологам в идентификации форм рельефа и интерпретации геологических ландшафтов"⁶.

Эта предварительная работа установила фундаментальную методологию для характеристики геологической площадки местоположений с закрытым доступом.

Окончательной целью характеристики геологической площадки (в данном контексте) является определение свойств скальных пород, которые могут помочь в определении оценок местоположения и (или) мощности взрыва, которые соответствуют определению события испытания⁷.

В данной статье изучается, какая информация о топографии поверхности может быть использована для понимания вариаций геологических свойств, которые влияют на характеристики сопряжения, что может уточнить оценки мощности тайных испытаний. Очевидно, что геология испытательного полигона влияет на выброс радионуклидов. Несомненно, что в испытании 2006 года произошел мгновенный выброс (который мы интерпретируем как результат сильного растрескивания скальных пород в этом местоположении); при испытании 2009 года не было обнаружено никаких выброшенных радионуклидов, и, хотя не было никакого обнаружения мгновенного выброса от испытания 12 февраля 2013 года, было обнаружение задержанной утечки, которое началось примерно через 8 недель после события, 7 апреля 2013 года. Причиной утечки с такой задержкой была либо медленная миграция через естественные или образованные взрывом трещины или изломы, либо прямой результат деятельности человека (например, проникновение в полость взрыва для сбора образцов и т.п.). Тот факт, что между 22 марта и 21 апреля 2013 года на западном портале началась определенная деятельность (согласно изображениям с коммерческих спутников), позволяет предположить, что это может быть вероятной причиной. Геология может повлиять на просачивание радионуклидов несколькими способами; наиболее вероятным из них является миграция газов через уже существовавшие фактуры к поверхности. Поскольку вероятно, что растрескавшиеся скальные породы влияют на топографические сигнатуры поверхности (по сравнению с более цельной скальной породой), представленный ниже анализ предлагает правдоподобный способ для дистанционной оценки испытательных площадок в отношении потенциала выброса газов априорно до взрыва.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОЛИГОНА ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ В ПУНГЕРИ

Точные крупномасштабные (1:50 000 или лучше) геологические карты, основанные на обзорах на местности, района непосредственного расположения полигона для подземных ядерных испытаний Северной Кореи вблизи Пунгери полностью отсутствуют, и, учитывая то, что полигон для ядерных испытаний секретен и доступ к нему закрыт, такие карты вряд ли станут доступными в обозримом будущем. Доступные карты района испытательного полигона мелкомасштабны (от 1:500 000 до 1:1 000 000), и включают одну карту, открыто опубликованную в Северной Корее в 1994 году. Существуют высококачественные крупномасштабные (1:50 000) геологические карты, основанные на обзорах на местности, для районов, прилегающих к испытательному полигону, в том числе две крупномасштабные геологические карты (прямоугольные), резко обрывающиеся в 12 километрах к югу и к востоку от востоку от испытательного полигона, из "Листов" японских геологических отчетов 1920-х и 1930-х годов. В 2010 году Геологическая служба США провела исследование рекогносцировочного картирования по данным дистанционного зондирования с целью достичь ясного и более точного понимания геологической обстановки на полигоне для подземных ядерных испытаний Северной Кореи. Это исследование включало интерпретационную экстраполяцию от комбинации трех крупномасштабных (1:50 000) карт из "Листов" (прямоугольники, покрывающие районы к югу, юго-востоку и востоку от испытательного полигона, выполненные японцами в 1920-х и 1930-х годах) и коммерческими изображениями со спутников: мультиспектральными (14 диапазонов) низкого разрешения (в пределах от 15 до 90 м) с прибора "Улучшенный космический радиометр теплового излучения и отражения (ASTER)" и высокого разрешения со спутника "GeoEye" (1,8 м MS и 0,44 м PAN). Был также проведен спектральный анализ с использованием изображений с прибора "ASTER"; геоморфологический сравнительный анализ поверхности был основан на глобальной цифровой модели высот (GDEM), построенной по изображениям с прибора "ASTER" благодаря совместным усилиям НАСА и Министерства экономики, торговли и промышленности Японии (METI). В исследовании Геологической службы США ограничения полученных экстраполяций (в особенности, учитывая заявленные ограничения, связанные с анализом спектрального профиля) для геологического картирования признаются правильными, но, тем не менее, там делается вывод о том, что "Хотя эта интерпретация в большой степени опирается на субъективные качественные интерпретации структурных и спектральных характеристик геологии, она остается наилучшим приближением, которое может быть сделано на базе имеющейся информации"⁸.

Одной из проблематичных особенностей картирования Геологической службой США является тесная близость предполагаемой геологической границы между диоритами и доломитами, и известняками (смотрите рисунок A1 в сетевом дополнении) к эпицентрам подземных ядерных испытаний 2009 и 2013 годов, что вступает в конфликт с большой вероятностью нарушения удержания вблизи такой границы. Кроме того, не имеется никакого установленного базиса для понимания механизмов возможных механизмов радиоактивной утечки в испытании 2006 года, по сравнению с испытанием большей мощности в 2009 году, где не наблюдалось никакой утечки, за исключением того аргумента, что в испытаниях большей мощности более вероятно создать "полости удержания под нагрузкой"⁹. Не имеется также объективного базиса для определения вероятности возникновения такой утечки в результате любого будущего ядерного испытания в этом районе.

Проведенный Лос-Аламосской национальной лабораторией анализ этой работы показал, что хотя ее выводы, относящиеся к предполагаемой литологической границе в восточной части испытательного полигона, правдоподобны, вторая предполагаемая литологическая граница (предлагающая наличие доломита и известняка в активной области проведения ядерных испытаний) в западной части испытательного полигона сомнительна. Этот обзор привел к предложению дополнительного анализа, который определил базис данного исследования, с пересмотром всей доступной геологической информации и данных дистанционного зондирования с коммерческих спутников, и объединения полученных результатов с разработанной в Лос-Аламосской национальной лаборатории методикой количественной оценки местности в попытке сформировать более четкое понимание геологической обстановки и характера северокорейского полигона ядерных испытаний в Пунгери.

Данное исследование впервые обращается к этим вопросам, характерным для геологии полигона ядерных испытаний в Пунгери. Мы объединяем субъективные обследования, включающие анализ изображений с коммерческих спутников, с объективным количественным "геоморфометрическим" подходом, который получает характеристики местности, свидетельствующие о геологии подстилающих слоев. Дополнительная информация, используемая в данном исследовании, включает недавно ставшую доступной в открытых источниках геопространственную информацию о местоположении событий испытаний, количественную методику обработки изображений, и доступность цифровой модели высот (DEM) площадки полигона с высоким разрешением (5 метров).

Региональная геологическая обстановка

Следующее описание региональной геологической обстановки взято из неопубликованного отчета Геологической службы США (Баттлмен и Мацко, *Сводка заявлений по геологическому атласу из выбранных "Листов"*)¹⁰:

Проведенное в 2008 году исследование геологии местоположения подземного ядерного испытания в Северной Корее в октябре 2006 года позволяет предположить, что испытание было проведено в граните юрского периода в горе Мантхап в северо-восточной части страны. В северокорейском учебнике по геологии указывается, что Мантхапсан представляет собой многофазную интрузию в карбонатные скальные породы серии Пэктусан, погружающуюся в местную породу под углом от 40 до 70 градусов. Первая фаза состоит из диорита и кварцевого диорита; вторая фаза в основном является гранитом; третья фаза в основном состоит из аляскита. Гора Мантхап является частью очень большого батолита Кванмобонг комплекса Хесан, относящегося к тектоническому движению Сонгним.

Широко распространенная последовательность карбонатов большой толщины (серии Матенрей или Пэктусан нижнего протерозойского периода) была отмечена на карте к югу от испытательного полигона (лист 14); мелкомасштабная карта показывает, что эти скальные породы окружают гору Мантхап. Карбонаты интересны потому, что они представляют потенциальную проблему для удержания, и их наличие может ограничивать местоположения будущих испытаний в этом регионе. Крупномасштабные карты также указывают на то, что блоки карбонатов располагаются в гранитной массе в подвешенном состоянии.

Мелкомасштабные карты относительно низкого разрешения (1:1 000 000), покрывающие район испытательного полигона, также показывают экстенсивное развитие мафических вулканических скальных пород четвертичного периода к северу и западу от испытательного полигона вместе с ахейской плутонической границей (гранитом) внутри собственно испытательного полигона.

Рисунок A2 сетевого дополнения показывает пределы японского геологического картирования в трех ключевых японских "Листах" (под номерами 3, 4 и 14), расположенных вблизи полигона ядерных испытаний Пунгери, перекрывающихся, согласно Баттлмену и Мацко, с мелкомасштабной северокорейской геологической картой 1994 года. Ключевым пунктом является то, что компиляция подтверждает наличие как докембрийских (протерозойских) карбонатов (доломитов и известняков), так и диоритов Токурейдо (относящихся к меловому периоду) к югу от испытательного полигона. Мелкомасштабная северокорейская карта 1994 года не показывает продолжения ни одного из этих типов скальных пород к северу на собственно испытательный полигон. Однако, "юрской гранит комплекса Танчон" на новых мелкомасштабных северокорейских картах кажется тем же самым, что и "сланцеватый гранит Мейсен" неопределенного возраста, но, вероятно, юрского периода, показанного на старых японских картах. В совместном отчете Северной Кореи и Китая 2009 года приводится очень мелкомасштабная карта, которая аналогично отождествляет район полигона ядерных испытаний как расположенный внутри "среднеюрского комплекса Танчон", предположительно гранита, рядом с "неогеновыми вулканическими породами", что также согласуется как с отмеченными на японских картах базальтом Шинтокури и вулканическими породами, так и с северокорейской картой 1994 года.

На геологической карте 1994 года в масштабе страны северные корейцы также показали простирающийся с северо-запада на юго-восток разлом, заканчивающийся к западу от горы Мантхап, и вероятно проходящий через район "Южного портала". Мы не можем подтвердить ни наличия разлома в этом местоположении, ни представить догадок по любому потенциальному влиянию такого разлома на будущие испытания в связи с "Южным порталом". Тем не менее, почти прямая долина в направлении с севера на юг между Пунгери и горой Мантхап, по крайней мере, позволяет предположить возможность локального разлома. Однако, район Пунгери и горы Мантхап характеризуется низкой природной сейсмичностью¹¹.

Обзор методологий рекогносцировочного картирования

При создании геологической карты полигона ядерных испытаний Пунгери Питер Чайрико использовал различные методологии рекогносцировочного картирования. Он отметил, что "...были проведены интерпретации для корреляции картированных ранее геологических образований с районами, для которых не имеется никаких геологических данных. Для расширения данных геологической карты в некартированный район данные спектрального анализа, анализа основных компонентов (PCA) и цифровой модели высот (DEM) интерпретировались вместе с информацией на ранее построенных листах карт"¹².

Основываясь на этой работе, мы использовали дополнительные методологии рекогносцировочного картирования, которые включали корреляцию с новой геоморфометрической информацией, определенной из цифровой модели высот (DEM) района с 5-метровым разрешением, дополненной изображениями высокого разрешения с коммерческих спутников "Digital Globe" (как визуализированной в трехмерной перспективе с помощью "Google Earth"), и объединенной с недавно опубликованной подробной геопозиционной информацией по полигону ядерных испытаний Пунгери. Этот подход предоставляет более объективный базис для идентификации литологических образований и их границ, какие присутствуют на рекогносцировочной геологической карте Геологической службы США между картированным мезозойским диоритом и докембрийским гнейсом. Наш подход использует взаимосвязь между геологией и гидрографической сетью, образованной в результате эрозии. Изучение того, как по ландшафту течет вода и как образуется гидрографическая сеть, может предоставить важную информацию о типе и структуре подстилающей скальной породы. Гидрографические сети классифицируются по типу узора, структуре и плотности. Наиболее важным одиночным параметром для количественного описания рельефа является узор гидрографической сети¹³. Мы разработали методику, в которой количественный анализ узора гидрографической сети, полученного из цифровой модели высот (DEM), используется для извлечения геологической информации. Соотношение между различными типами геологии подстилающих слоев схематически иллюстрируется рисунком 2 (рисунок А3 в сетевом дополнении). В частности, мы сконцентрировались на узоре гидрографической сети, формируемом коренной подстилающей породой с большим количеством трещин, которая может быть отождествлена по более изломанному узору гидрографической сети. Наш анализ узора гидрографической сети позволяет предположить характерный узор потоков, согласующийся с двумя различными типами горных пород вдоль литологической границы, которая была определена и нанесена на карту Геологической службой США в 2010 году, и разделить два типа вмещающей породы, связанные с подземными ядерными испытаниями.

Геоморфные особенности ландшафта отражают взаимодействие между ассоциированными с тектоникой процессами подъема и ассоциированными с климатом процессы эрозии. Геология подстилающего слоя контролирует характер ландшафта для обеих этих процессов. Последние достижения в области геоморфометрии предоставляют методику для количественной оценки особенностей ландшафта и объективный подход к оценке геологии (например, типа скальных пород, разлома и распределения трещин), которая влияет на характер ландшафтов.

Наш подход к количественной оценке местности базируется на трех методологиях:

1. анализа собственных значений, который предоставляет информацию о топографической организации и факторе формы (меры силы доминирующей линейной сетки на местности);
2. меры складчатости поверхности, основанной на "ругозности" поверхности, рассчитываемой вычислением среднего изменения высоты между ячейкой сетки и восемью прилежащими ячейками сетки;
3. корреляции гидрографической сети поверхности с геологией и структурой коренной подстилающей породы.

Затем эта информация объединялась с данными, собранными на различных платформах дистанционного зондирования, и картировалась и визуализировалась с помощью программных средств "Global Mapper"¹⁴ и "Google Earth"¹⁵ (вместе с корреляцией доступных региональных геологических карт района для уточнения характеристики геологической площадки).

Контурные высоты (с шагом 50 метров) карты высокого разрешения (5 метров) цифровой модели высот (DEM) показаны на рисунке 3. Эта цифровая модель высот использовалась для расчета узоров гидрографических сетей различных потоков (рисунок 4) как выражения и потенциального индикатора подстилающей геологии. Легче всего идентифицируются перообразные узоры, возникающие на почти плоских базальтовых слоях. Щелочной базальт периода олигоцена Рюдо (Енгдонг) в нижнем правом (юго-восточном углу) явно отличается от оливинового базальта четвертичного периода Шинтокури, окружающего испытательный полигон сверху и слева (западная и северная стороны).

Рисунок А4 сетевого дополнения показывает ругозность (или складчатость поверхности) испытательного полигона, рассчитанную по распределению высот. Покрывающая порода (базальт Шинокури) четко выделяется темно-синим цветом с запад и севера, в то время как нависающая плита из доломита и известняка проявляется как голубая область яйцевидной формы внизу в центре. Эта плита представляет собой эродированные остатки вышележащего известняка, который находился внизу и был поднят батолитической гранитной породой, которая окружает эти остатки.

При использовании корреляционного алгоритма для определения связи складчатости поверхности с типами местности, базовые типы местности испытательного полигона КНДР помогают сделать догадки о геоло-

гической обстановке. Карта характеристики местности (рисунок А5 сетевого дополнения) иллюстрирует, как район с высокой сложностью рельефа (неровная топография, образованная треснутыми и расщепленными сланцами и гнейсами) расширяется до площадки испытательного полигона КНДР. Покрывающие базальты и вулканические пласты маскируют северную часть местности типа подстилающей породы, но можно обоснованно предположить, что она продолжается к северу под базальтовыми и вулканическими пластами.

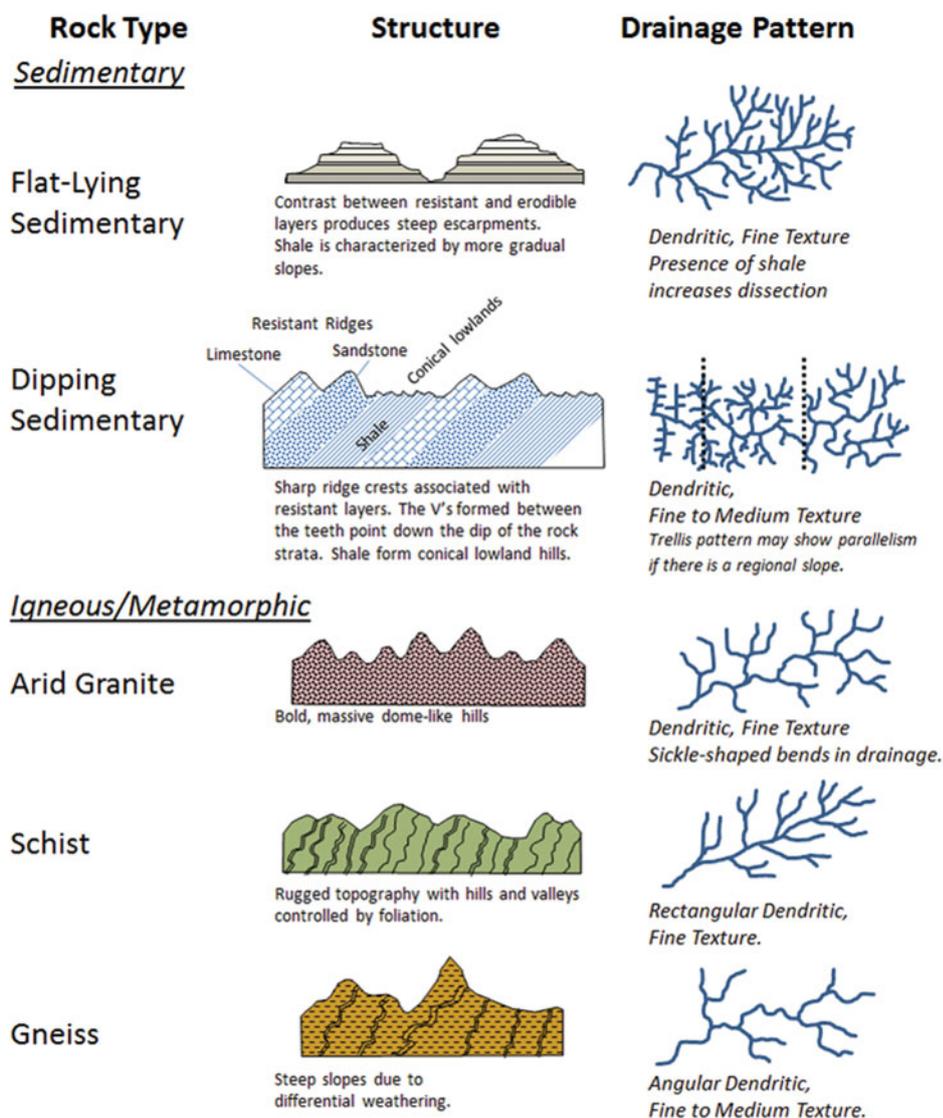


Рисунок 2. Схема взаимоотношений между геологией, характером местности и гидрографической сетью (Д. Уэй). Надписи на рисунке (сверху вниз и слева направо): 1 – тип породы; 2 – структура; 3 – узор гидрографической сети: 4 – осадочные; 5 – плоско лежащие осадочные; 6 – контраст между устойчивыми и подверженными эрозии слоями создает крутые уступы; сланцы отличаются более пологими наклонами; 7 – древовидные, с тонкой текстурой; наличие сланцев усиливает рассечение; 8 – погруженные осадочные; 9 – устойчивые хребты; известняк; песчаник; низкие конусы; сланцы; 10 – острые гребни хребтов связаны с устойчивыми слоями; V-образные формы между зубцами указывают на направление погружения слоев скальной породы; сланцы образуют низкие конические холмы; 11 – древовидные, с тонкой или промежуточной текстурой; если имеется глобальный уклон, то в решетчатом узоре может проявляться параллелизм; 12 – пирогенные или метаморфические; 13 – безводный гранит; 14 – крутые массивные куполообразные холмы; 15 – древовидные, с тонкой текстурой; серповидные изгибы в узоре; 16 – кристаллические сланцы; пересеченная топография с холмами и долинами, контролируемая слоистостью; 17 – прямоугольные древовидные, с тонкой текстурой; 18 – гнейс; 19 – крутые склоны из-за дифференциального выветривания; 20 – угловые древовидные, с тонкой или промежуточной текстурой.

Тонкая настройка карты типов местности и ее преобразование в правдоподобную требует объединения с дополнительной информацией. Например, рисунок А6 сетевого дополнения иллюстрирует синтез топографи-

ческих данных и информации о складчатости поверхности для дальнейшего изображения местоположения и протяженности известнякового нависающего слоя. В настоящее время такой шаг "слияния данных" достигается визуальной инспекцией подготовленного аналитика. Она остается скорее искусством, чем наукой. Дальнейшая работа будет включать дополнительную автоматизацию этого этапа.

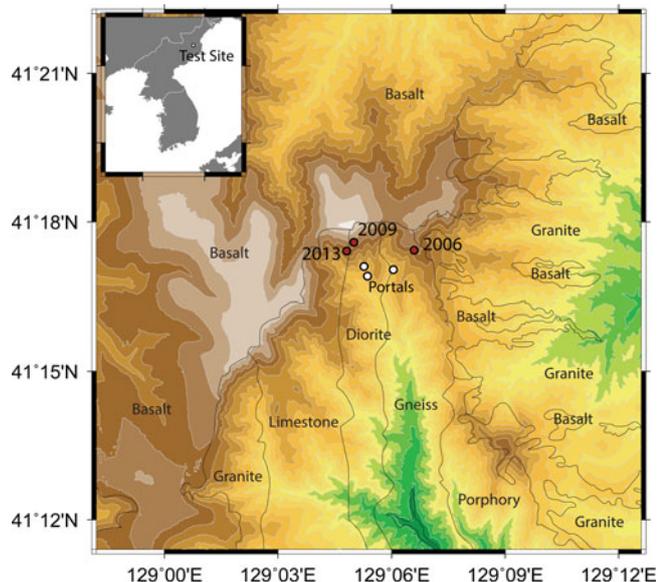


Рисунок 3. Высотные контуры (с шагом 100 метров) для карты цифровой модели высот с разрешением 5 метров площадки полигона ядерных испытаний Пунгери, на которой показаны местоположения испытания (красные кружки) относительные местоположения порталов туннелей (белые кружки). На вставке показано расположение испытательного полигона на Корейском полуострове. Геологические отметки (basalt – базальт; granite – гранит; diorite – диорит; limestone – известняк; porphyry – порфир) и границы взяты из первой работы по рекогносцировочному картированию Чайрико (Геологическая служба США) 2010 года.

Наша окончательная геологическая синтезированная карта полигона для подземных ядерных испытаний в Пунгери показана на рисунке 5 (обращайтесь к рисунку A7 в сетевом дополнении для общего обзора и к рисунку A8 за подробностями). На этих картах объединена вся доступная информация и они представляют собой результат компьютерного автоматизированного анализа и тонкой настройки аналитиками-геологами.

Наша геологическая интерпретация подтверждает, что с запад испытательный полигон граничит с восточным пределом "вулканического плато Пэктусан" четвертичного периода, известного также как плато Каима, состоящего из последовательности горизонтальных вулканических напластований, включающих оливинный базальт Шинтокури вулкана Пэктусан (известного также как Байтоушан, Хакутосан или гора Чангбай), расположенного в 110 км к северо-западу от Пунгери на границе Северной Кореи и Китая (42° 06' с.ш. и 128° 04' в.д.)¹⁶. Эта стратифицированная вулканическая последовательность (вероятно, включающая выпадения туфового пепла) формирует верхние 200 метров горы Мантхап и включает в себя тонкий покрывающий слой базальта, который образует рельефный обрыв вдоль западной и северной части полигона. Последовательность, возраст которой определяется как 1,4 миллиона лет, представляет собой несогласное напластование на коренной подстилающей породе в пределах собственно испытательного полигона¹⁷.

Камнепады, включающие откосы и каменистые осыпи из сероватого базальта, простираются вниз по склону во многих местах, начиная от перелома склона, отмечающего границу несогласное напластования. Эрозионные каналы наиболее четко выделяются ниже разрывов в защитном базальтовом верхнем слое и на откосе. Сильное наводнение в конце лета 2012 года привело к появлению заметных эрозионных обрывов, которые во многих местах полигона очистили коренную подстилающую породу от растительности (предоставив таким образом новые возможные площадки для последующего гиперспектрального анализа).

Основная область строительства туннелей на испытательном полигоне, располагающихся под этими вулканическими напластованиями, находится в коренной подстилающей породе, чаще всего описываемой как гранит юрского периода (например, "сланцеватый гранит Мейсен"), но, более вероятно, состоящего из разнообразных скальных пород, включая гранит, диорит, гнейс, и, возможно, кварцевый порфир. Эти коренные подстилающие породы формируют большой южный склон и эродированный дренажный бассейн.

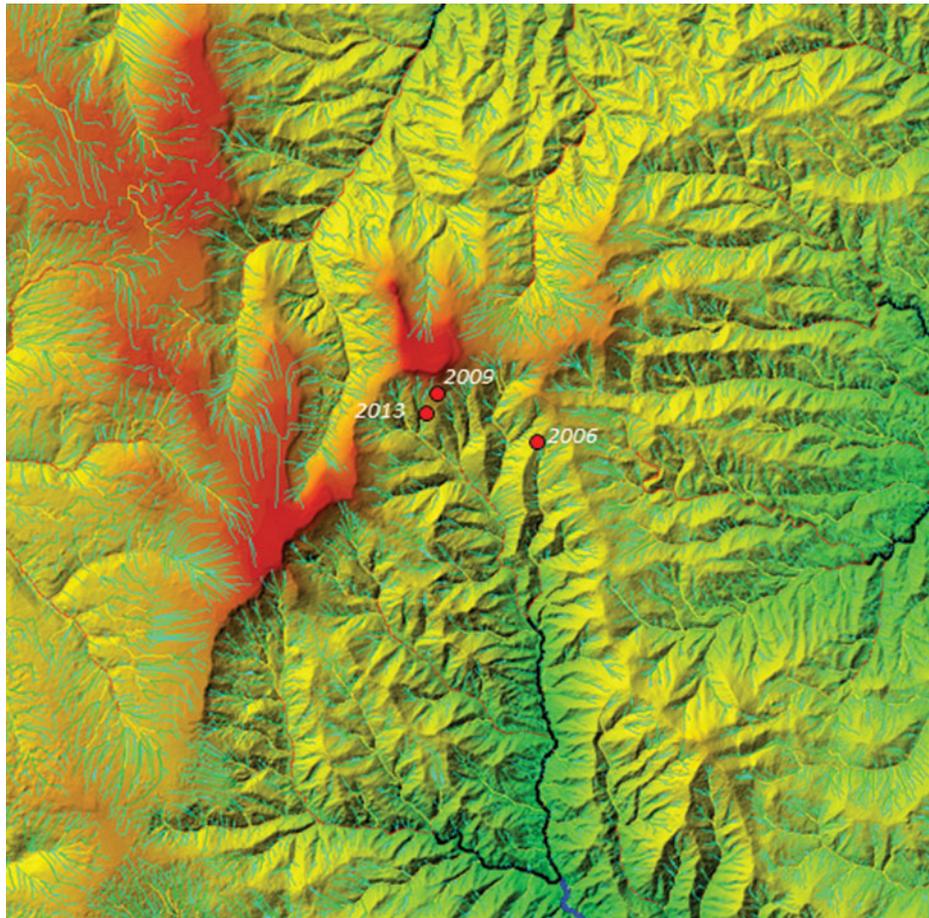


Рисунок 4. Узоры гидрографической сети потоков, определенных по топографической поверхности. Пути потоков окрашены в соответствии с порядком потоков. Вариации узоров гидрографической сети могут быть связаны с геологией подстилающей породы. Кружками обозначены приблизительные местоположения испытаний, проведенных на испытательном полигоне. Окраска фона представляет относительное возвышение (зеленая ниже, желтая средняя и красная выше). Красные области обычно состоят из плоско расположенных слоев, обычно соответствующих узорам гидрографических карт в форме пера, типичным для базальтовых потоков, и которые отмечаются на карте как покрывающий оливиновый базальт Шинтокури.

Восточная часть испытательного полигона, которая ассоциирована с первым ядерным испытанием Северной Кореи в 2006 году, характеризуется в сильной степени расслоенной и трещиноватой скальной породой. Хотя мы, согласуясь с выводами Чайрико, предположительно связали это литологическое образование с продолжением гнейса Саитоку, мы не можем исключить того, что оно является западным продолжением "сланцеватого гранита Мейсен", что также будет согласоваться с мелкомасштабной северокорейской геологической картой 1994 года. Японские геологи (в частности, Иошио Киносаки) отмечают, что скальные породы докембрийской системы Матенрей (которые включают гнейс Саитоку и доломиты с известняками) не только "интенсивно перемешаны друг с другом, но и пронизаны очень большим количеством трещин и внедрений различных пород, таких, как аплит, пегматит, сланцеватый гранит и сланцеватый диорит, что они не могут быть дифференцированы на картах". Коренная подстилающая порода в месте ядерного испытания 2006 года весьма сильно расслоена, и, вероятно, весьма сильно трещиновата, что может помочь в объяснении мгновенного выброса радиоактивности, обнаруженного за пределами Северной Кореи после ее первого ядерного испытания.

Западная часть собственно испытательного полигона, где происходили подземные ядерные испытания 2009 и 2013 года, предположительно интерпретируется и наносится на карту как диорит Токурейдо, хотя мы не можем исключить менее расслоенную и трещиноватую версию сланцеватого гранита Мейсен (или, возможно, более молодого мезозойского гранита, подобного Сентоку). В любом случае, согласно нашему основанному на геоморфометрии анализу, коренная подстилающая порода прямо под горой Мантхап, вероятно,

является твердой и подходящей, более похожей на диорит или гранит, и поэтому, вероятно, представляет хороший выбор для удержания взрывов ядерных испытаний.

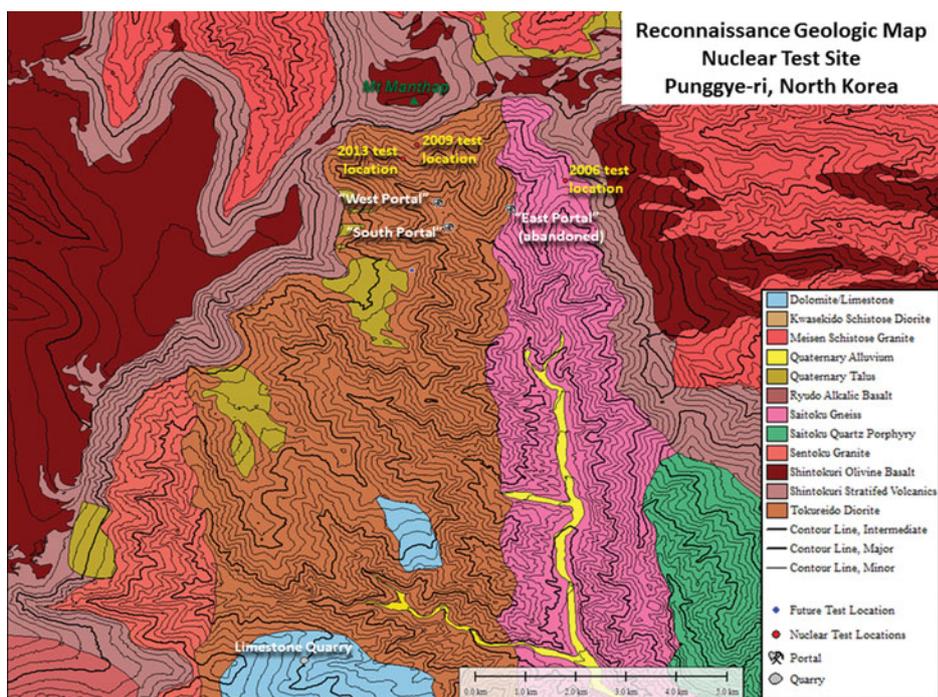


Рисунок 5. Локальная крупномасштабная расчетная геологическая карта полигона ядерных испытаний Пунгери, определенная по различным источникам геологических данных и анализа местности, обсуждаемых в тексте. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 – рекогносцировочная геологическая карта полигона ядерных испытаний Пунгери, Северная Корея; 2 – гора Мантхап; 3 – местоположение испытания 2009 года; 4 – местоположение испытания 2013 года; 5 – местоположение испытания 2006 года; 6 – западный портал; 7 – восточный портал (заброшен); 8 – южный портал; 9 – известняковый карьер. Надписи на легенде (сверху вниз): 1 – доломитовый известняк; 2 – сланцеватый диорит Квасекидо; 3 – сланцеватый гранит Мейсен; 4 – аллювий четвертичного периода; 5 – осыпь четвертичного периода; 6 – щелочной базальт Рюдо; 7 – гнейс Сайтоку; 8 – кварцевый порфир Сайтоку; 9 – гранит Сайтоку; 10 – оливинный базальт Шинтокури; 11 – стратифицированные вулканические породы Шинтокури; 12 – диорит Токурейдо; 13 – контурная линия, промежуточная; 14 – контурная линия, крупная; 15 – контурная линия, мелкая; 16 – местоположения будущих испытаний; 17 – местоположения ядерных испытаний; 18 – портал; 19 – карьер.

ОБСУЖДЕНИЕ

Несколько интересных тем, относящихся к испытательному полигону, могут быть пересмотрены с учетом представленных выше результатов.

Карбонатные породы в окрестностях испытательного полигона Пунгери?

Данное исследование предоставляет объективный базис для оценки правдоподобия наличия доломитовых или известняковых образований в непосредственной близости от эпицентра ядерного испытания 2009 года (как это предполагалось по результатам оценки Геологической службой США снимков с прибора "ASTER"). Наш вывод состоит в том, что не имеется достаточных оснований предполагать существование такой отчетливой литологической границы, разделяющей гору Мантхап рядом с эпицентром ядерного испытания 2009 года. Согласно Баттлмену и Мацко:

... Хотя в непосредственной близости к испытательному полигону на доступных мелкомасштабных геологических картах не показано никаких карбонатов, различия в картах позволяют предположить некоторую неопределенность в протяженности и близости карбонатов к площадке, и даже возможности появ-

ления покрывающих пластов на мезозойских (юрских) гранитах в районе горы Мантхап. Хотя не имеется никаких доказательств того, что ядерное испытание 2006 года проводилось в карбонатных породах, их присутствие может ограничить местоположения потенциальных будущих испытаний в этом регионе¹⁸.

Хотя мы не нашли достаточных подтверждений наличия карбонатных пород (доломитов и известняков системы Матенрей) в непосредственной близости самого испытательного полигона, но, используя "геоморфометрию" и визуальную инспекцию снимков с коммерческих спутников, мы нашли указание на один возможный "покрывающий пласт", который может также быть местом старого известнякового карьера. В нашем анализе, вместе с предыдущим отчетом Геологической службы США, мы нашли согласие с мелкомасштабной северокорейской картой 1994 года, которая показывает, что самая северная часть основного блока доломита и известняка является также местоположением действующего известнякового карьера. Этот карьер был впервые отождествлен как известняковый в 2010 году Чайрико на основании спектрального анализа мультиспектральных снимков с прибора "ASTER" в комбинации с интерпретацией электронно-оптических снимков с коммерческих спутников.

Можно также полагать, что поскольку этот карьер является ближайшим наблюдаемым известняковым карьером к полигону подземных испытаний, маловероятно, чтобы существовал источник известняка, более близкий к самому испытательному полигону. Известняк составляет важную ингредиентом цемента, обычно используемого либо в чистом виде, либо в составе бетона для укрепления стенок туннеля и (или) для целей размещения (сообщалось, что Пакистан в 1998 году запечатывал свой туннель ядерных испытаний в Рас Кох смесью песка и 6 000 мешков цемента). Если бы такой легко доступный источник располагался ближе к испытательному полигону, то он, вероятно, разрабатывался бы для того, чтобы сократить транспортные издержки в отношении времени, расстояния и дизельного топлива для грузовиков.

Тип скальных пород на северокорейском полигоне подземных ядерных испытаний

Оценивая региональную геологическую обстановку, Баттлмен и Мацко отметили¹⁹:

Вообще говоря, плотные и массивные породы с малой пористостью, такие, как гранит ... представляют хорошее окружение для подземных ядерных испытаний. Однако, тектоническая история этого района позволяет предположить, что породы, предшествующие мезозойскому перемещению Сонгним, претерпели деформацию от этого перемещения, и стали расслоенными, срезанными и растрескавшимися, что ухудшило целостность скальной породы. Представленные в атласе наземные фотографии позволяют предположить, что многие породы, включая те, которые сформировались после тектонического перемещения Сонгним, могут быть сильно растрескавшимися, и поэтому удержание будет затруднено и потребует адекватного технического исправления.

Аналогично комментирует и Мерфи²⁰:

...типы поверхностных скальных пород, идентифицированных по ограниченному доступным литературным источникам, для района испытательного полигона Северной Кореи, позволяют предположить наличие подходящих скальных пород, согласующихся с заключением о том, что ядерные испытания проводились в среде с "хорошим сопряжением".

Наш анализ определил присутствие потенциально сильно растрескавшейся породы вблизи "Восточного портала". Сравнение доступных наземных фотографий сильно растрескавшегося кварцевого порфира Сайтоку вблизи деревни Пунгери с обнажениями в восточной части испытательного полигона стало возможным благодаря изучению снимков с коммерческих спутников, доступных на "Google Earth" (рисунок A9 сетевого дополнения). Скальные породы в восточной части самого испытательного полигона сильно расслоены и разбиты, и, следовательно, вероятно являются растрескавшимися. Присутствие расслоения согласуется с описаниями сланцеватого гранита Мейсен²¹.

На основании отчета японского геолога, Ивао Татеива, сланцеватый гранит Мейсен включен в региональный интрузивный геологический фундамент с неизвестным возрастом (но обозначаемый другими как мезозойский или юрский). Татеива описал эти породы как "подвергавшиеся интенсивному сжатию", и отметил, что "простирающиеся и проникновения их плоскостей сланцеватости, которые, очевидно, принадлежат к докритическому периоду, переменны, как это показано на геологических картах. В целом, эти плоскости простираются с северо-запада на юго-восток, резко проникают к северо-востоку или почти вертикально." Расслоения в

обнажениях в восточной части полигона ядерных испытаний Пунгери простираются с северо-запада на юго-восток (примерно на 300-120 градусов) и также проникают с большим наклоном (примерно 65 градусов), хотя к юго-западу они согласуются с региональным простираем (рисунок А10 сетевого дополнения).

В то время как литология восточной части полигона ядерных испытаний Пунгери состоит из расслоенных пород и по крайней мере одного выступающего породного целика (рисунок А11 сетевого дополнения), западная часть характеризуется скругленными склонами и не столь угловым древовидным узором потоков, что более указывает на не расслоенный гранит или диорит. Коренная подстилающая порода, которая была вырыта из Восточного портала несколько более темно-серая, чем коренная порода, вырытая из Западного портала или Южного портала, которая кажется более светло-серой (рисунок А12 сетевого дополнения).

Такие потенциальные различия между коренной породой, доступной из Западного портала, и той, которая доступна из Восточного портала, могут объяснить, почему был заброшен Восточный портал. На то, что Восточный портал в самом деле был заброшен, указывает снос всех зданий рядом с порталом, кроме двух, отсутствие передвижений любых грузовиков, и, что наиболее важно, отсутствие любых работ по ремонту дорог или мостов после сильного наводнения на испытательном полигоне летом 2012 года. Напротив, такие ремонтные работы регулярно наблюдались на Западном и Южном порталах, вместе с активными горными работами и перевозками, связанными с этими порталами.

Факторы удержания, связанные с северокорейскими подземными ядерными испытаниями

Догадки по поводу того, почему первое испытание в 2006 году (ассоциированное с Восточным порталом) сопровождалось выбросом детектируемой радиоактивности в форме инертных газов, в то время как последующие два испытания в 2009 и 2013 годах (ассоциированные с Западным порталом) не сопровождалось ими, могут быть получены при учете нескольких факторов.

Такие факторы могут включать:

1. То, что испытание 2006 года было проведено в месте с меньшим покрытием, и, следовательно, меньшей глубиной залегания по сравнению с последующими испытаниями, и поэтому более близким к поверхности, что способствовало миграции газа.
2. Испытания большей мощности (то есть испытания 2009 и 2013 года) с большей вероятностью создавали "полости удержания под нагрузкой", чем испытание 2006 года с меньшей мощностью.
3. Обнаружение радионуклидов могло быть ложным и не относившимся к испытанию 2006 года.
4. Геология коренной подстилающей породы для испытания 2006 года была менее подходящей, чем для испытаний 2009 и 2013 года (что частично поддерживается геоморфологическим анализом в настоящем исследовании).
5. Северные корейцы могли использовать в испытаниях после 2006 года более надежную стратегию удержания (как северные корейцы явно заявили в анимации, публично показанной в 2010 году).
6. Наличием грунтовых вод на площадке.

Специальные отчеты о грунтовых водах, уровнях грунтовых вод, и насыщении скальных пород вблизи от ядерных испытаний Пунгери отсутствуют. Однако, поверхностные воды регулярно наблюдались в ручьях на самом испытательном полигоне и, что более важно, вода регулярно вытекала из Южного портала. Вблизи от Западного портала на снимках 2013 года был обнаружен возможный отводной канал для дренажа грунтовых вод (в расположении испытаний 2009 и 2013 года, где сейчас ведется строительство нового туннеля), и неясно, наблюдалась ли в прошлом вода вблизи Восточного портала (ассоциированного с испытанием 2006 года).

Комментарий к построению моделей геологических структур для площадок с закрытым доступом

Данное исследование иллюстрирует процедуру для построения и уточнения геологической карты поверхности для площадки с закрытым доступом. Эта информация важна для ограничения информации, используемой для трехмерной модели геологических структур (GFM), которая распространяет геологическую информацию под поверхность. Модель геологических структур предоставляет структурные рамки, наполненные физическими свойствами подповерхностных слоев, и образует базис для моделирования как в ближней зоне, так и в дальней зоне. Процедуры, рассмотренные в данном исследовании для уточнения и модификации геологической карты поверхности, иллюстрируют необходимость экспертного анализа для предоставления интерпретации данных и разработки правдоподобных геологических взаимосвязей.

Дополнительная работа по спектральному анализу

Существует возможность получить и рассмотреть более новые, в период после заводнения, гиперспектральные изображения с приборов "ASTER" (14 диапазонов), или "HYPERION" (220 диапазонов), или "WorldView-3" (29 диапазонов), предпочтительно ранней весной, после снеготаяния и до появления листвы, обратив особое внимание на недавно обнажившуюся коренную породу (и на недавно вынутый грунт из туннеля) для перекрестной проверки наших результатов анализа спектральной геологической библиотеки прибора "ASTER".

Дополнительные применения изображений с радиолокатора с синтезированной апертурой

Применение коммерчески доступных изображений высокого разрешения с радиолокатора с синтезированной апертурой (SAR) также может помочь пролить новый свет на подстилающие литологии и протяженность расслоения и растрескивания, и, если для каждого события (включая любые будущие события) могут быть получены радиолокационные изображения как до испытания, так и после него, то обнаружение интерферометрических когерентных изменений, вероятно, раскроет также малые возмущения поверхности, что обеспечит еще большую точность в отношении позиционирования события.

ВЫВОДЫ

Данное исследование предоставляет пересмотренную основанную на рекогносцировке геологическую карту, характеристику площадки и геологический отчет по области, окружающей полигон подземных ядерных испытаний вблизи Пунгери, Северная Корея. Наше исследование включает пересмотр всей доступной геологической информации, объединенный с оригинальным анализом данных дистанционного зондирования с коммерческих спутников для формирования более точного понимания с использованием нового интегрированного "геоморфометрического" подхода.

Результаты показывают, что северокорейский полигон ядерных испытаний располагается на коренной подстилающей породе типа гранита мезозойского или юрского периода, аналогичной той, которая была показана на мелкомасштабной северокорейской геологической карте, опубликованной в 1994 году. Однако, наши изыскания показывают также, что имеются основания полагать, что прочность этой коренной подстилающей породы может изменяться, и событие 2006 года вероятнее всего произошло в менее прочной, например, раздробленной коренной породе (либо докембрийском гнейсе Сайтоку (как показано на карте), либо в сланцеватом граните формации Мейсен юрского периода), в то время как последующие события испытаний 2009 и 2013 года более вероятно произошли в более прочной породе (либо диорите Токурейдо мелового периода, либо менее раздробленном граните мезозойского периода), предоставляющей лучшее удержание и лучшее сцепление. Такая информация предлагает новое основание для понимания возможных механизмов выброса радионуклидов для испытания 2006 года, по сравнению с испытанием большей мощности 2008 года, в котором не было выброшено обнаружимой радиоактивности, что также позволяет предоставить догадки о причине последующего оставления "Восточного портала", который использовался для поддержки испытания 2006 года.

Мы также обнаружили, что вероятность наличия докембрийского (протерозойского, "Матенрей") известняка и (или) доломита в непосредственной близости от полигона ядерных испытаний мала, что уменьшает таким образом вероятность мгновенного выброса из-за генерации не конденсирующегося углекислого газа в результате любых будущих ядерных испытаний в этом районе. Данное исследование впервые обращается к этим вопросам, специфичным для абсолютных местоположений событий, ассоциируемых с северокорейскими ядерными испытаниями на полигоне ядерных испытаний Пунгери.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы желают выразить особую признательность за поддержку и поощрение данного проекта исполняющую обязанности заместителя Государственного секретаря по контролю над вооружениями и международной безопасности Роуз Готтемеллер и ее персонал (в особенности Ронсонг Джи) из управления верификации и технологий прозрачности Госдепартамента (AVC/VTТ). Авторы благодарят за важную помощь Джона Р. (Рода) Мацко и Питера Чайрико из Геологической службы Соединенных Штатов, Рестон, Виргиния за их любезную помощь в проведении данного последующего исследования, основанного на их собственном новаторском исследовании и их отчетах. Мы благодарим Стивена Джонсона и анонимного рецензента за их конструк-

тивные комментарии, которые усилили данную статью. Эта статья была опубликована как публикация Лос-Аламосской национальной лаборатории LA-UR-13-29311.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная статья представляет собой сокращенную и несколько обновленную версию отчета, законченного по объявлению Госдепартамента (BAA) # 2013-DOS-AVC-VTRDN, контракту #SIAA13AVCVTT0005, по рабочей структуре RNAN техническим руководителем в Лос-Аламосе Дэвидом Кобленцом и исследовательским персоналом Лос-Аламоса, для поддержки управления верификации и технологий прозрачности Госдепартамента (AVC/VTT), которое вместе с нами проводило исследование для данного отчета.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Дополнительные материалы к этой статье можно получить с веб-сайта издателя.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. D. Coblenz, F. Pabian, and L. Prasad, "Quantitative Geomorphometrics for Terrain Characterization," *International Journal of Geosciences* 5 (2014): 247–266.
2. L.F. Dellwig, and R. K. Moore, "The Geological Value of Simultaneously Produced Like- and Cross-Polarized Radar Imagery," *Journal of Geophysical Research* 71 (1966): 3597–3601; L.F. Dellwig, L. F., J. N. Kirk, and R. L. Walters, "The Potential of Low- Resolution Radar Imagery in Regional Geologic Studies," *Journal of Geophysical Research* 71 (1966): 4995–4998.
3. L.F. Dellwig, and R. K. Moore, "The Geological Value of Simultaneously Produced Like- and Cross-Polarized Radar Imagery," 3597–3601 (ссылка 2); L.F. Dellwig, L. F., J. N. Kirk, and R. L. Walters, "The Potential of Low-Resolution Radar Imagery," 4995–4998 (ссылка 2).
4. G.L. Prost, *Remote Sensing for Geoscientists: Image Analysis and Integration* (Boca Raton: CRC Press, 2013).
5. A. Philip, P.A. Davis, and P. A. Schultejan, "Remote Sensing Characterization of Inaccessible Regions: Phase A Control Area: The Nevada Test Site," Los Alamos National Laboratory Report, LA-UR 90-162 (1990).
6. D. Way, *Terrain Analysis: A Guide to Site Selection Using Aerial Photographic Interpretation* (New York: McGraw Hill, 1978).
7. H.J. Patton, and F.V. Pabian, "Comment on 'Advanced Seismic Analyses of the Source Characteristics of the 2006 and 2009 North Korean Nuclear Tests,' by J. R. Murphy, J. L. Stevens, B. C. Kohl, and T. J. Bennett," *Bulletin of the Seismological Society of America* 104 (2014): 2104–2110.
8. P.G. Chirico, "Remote Sensing Reconnaissance Geologic Mapping of the North Korean Underground Nuclear Test Site," (United States Geological Survey, Special Studies Project, Prepared for U.S. State Department, Bureau of Verification, Compliance and Implementation, Washington, D.C., 2010).
9. National Research Council, *The Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty: Technical Issues for the United States*, (Washington, D.C.: The National Academies Press, 2012).
10. K. Buttleman, and R. Matzko, Collection and Digitization of Data from Geological Atlas of Chosen Folios No. 3, 4, and 14; (United States Geological Survey, Special Studies Project, Prepared for U.S. State Department, Bureau of Verification, Compliance and Implementation, Washington, D.C., 2008).
11. R. Carluccio, A. Giuntini, V. Materni, S. Chiappini, C. Bignami, F. D'Ajello Caracciolo, A. Pignatelli, S. Stramondo, R. Console, and M. Ciappini, "A Multidisciplinary Study of the DPRK Nuclear Tests," *Pure and Applied Geophysics* 169 (2012): doi:10.1007/s00024-012-0628-8
12. P.G. Chirico, "Remote Sensing Reconnaissance Geologic Mapping of the North Korean Underground Nuclear Test Site," (United States Geological Survey, Special Studies Project, Prepared for U.S. State Department, Bureau of Verification, Compliance and Implementation, Washington, D.C., 2010).
13. D. Way, *Terrain Analysis: A Guide to Site Selection. Using Aerial Photographic Interpretation* (New York: McGraw Hill, 1978).
14. Global MapperTM, <http://www.bluemarblegeo.com/products/global-mapper.php>.
15. Google Earth, <https://www.google.com/earth/>.
16. T. Kobayashi, "A Sketch of Korean Geology," *American Journal of Science* 34 (1933): 586–606.
17. V.G. Sakhno, "Chronology of Eruptions, Composition, and Magmatic Evolution of the Paektusan Volcano: Evidence from K-Ar, 87Sr/86Sr, and d18O Isotope Data," *Doklady Earth Sciences* 412 (2007): 22–28.
18. K. Buttleman, and R. Matzko, Collection and Digitization of Data from Geological Atlas of Chosen Folios No. 3, 4,

- and 14; (United States Geological Survey, Special Studies Project, Prepared for U.S. State Department, Bureau of Verification, Compliance and Implementation, Washington, D.C., 2008).
19. K. Buttleman and R. Matzko, Collection and Digitization of Data. (ссылка 18)
 20. J.R. Murphy, J. L. Stevens, B. C. Kohl, and T. J. Bennett, "Advanced Seismic Analyses of the Source Characteristics of the 2006 and 2009 North Korean Nuclear Tests," *Bulletin of the Seismological Society of America* 103 (2013): 1640–1661.
 21. I. Tateiwa, "Geological Atlas of Chosen," Folio No. 4, Kyukudo, Meisen, Shichichosan, and Kotendo Sheets (1925).