

Трехмерная радиолокационная визуализация вскрывает неиспользованный ранее поведенческий и биомеханический архив плейстоценовых следов-призраков

Томас М. Урбан^{1*}, Мэтью Р. Беннетт^{2*}, Дэвид Бустос³, Стурт В. Мэннинг¹, Салли С. Рейнольдс², Маттео Бельведер², Дэниел Одесс⁴ и Винсент Л. Сантуччи⁵

¹ Отдел классики и Корнельская древовидно-кольцевая лаборатория, Корнельский Университет, Итака, Нью-Йорк, 14853-3201, США. ² Институт исследований ландшафтов и эволюции человека, Борнмутский университет, Поул, BN12 5BB, Великобритания. ³ Служба национальных парков, Национальный памятник «Белые Пески», а/я 1086, авиабаза Холломан, Нью-Мексико, 88330, США. ⁴ Служба национальных парков, Управление культурных ресурсов, Вашингтон, округ Колумбия, 20240, США. ⁵ Служба национальных парков, Отдел геологических ресурсов, Вашингтон, округ Колумбия, 20240, США.

* email: tmu3@cornell.edu; mbennett@bournemouth.ac.uk

В археологических и палеонтологических отпечатках следов доказательства взаимодействия человека и мегафауны остаются крайне редкими. Недавние работы предполагают, что древние мелководные бассейны в пустынной местности могут содержать такие доказательства, хотя отпечатки могут быть и не видны. Эти так называемые «призрачные следы» составляют богатый архив биомеханических и поведенческих данных, которые остаются в основном неисследованными. Здесь мы представляем доказательства успешного обнаружения и трехмерной визуализации таких следов с помощью георадара (GPR), включая отпечатки следов мамонта и человека. Используя георадар, мы обнаружили, что плотность следов и разнообразие фауны могут быть намного больше, чем это воспринимается невооруженным глазом. Наши данные также свидетельствуют о том, что обнаруживаемое подповерхностное уплотнение породы под следами мамонта коррелирует с типичными закономерностями изменения давления у проживающих в настоящее время слонов. Это открывает будущий потенциал для более сложных биомеханических исследований следов и других вымерших наземных позвоночных. Наш подход позволяет достаточно оперативно обнаруживать и документировать следы, в то же время улучшая полноту данных, доступных в архивах ископаемых объектов.

Следы окаменелостей в виде отпечатков следов встречаются в палеонтологических и археологических записях чаще, чем принято считать. Примеры голоцена и плио-плейстоцена были описаны на большом количестве мест и встречаются главным образом в нелитированных, разрушаемых субстратах¹⁻⁵. Следы свидетельствуют о присутствии животного, анатомии его ноги, численности животных, их ассоциации с другими животными и поведенческом взаимодействии со средой, и используются не только для определения размеров тела и массы животных, но также анатомии и биомеханики формирования следа⁶. В некоторых местах, особенно на американском юго-западе, эти важные детали окаменелостей могут содержать ключ к оставшимся без ответа вопросам о поведении человека в верхнем плейстоцене, особенно связанном с его охотничьим промыслом, а следы открывают доступ к пониманию взаимодействию хищник-жертва за пределами лагеря или местоположения убийства⁷. То, как исследователи обнаруживают и регистрируют следы окаменелости, является быстроразвивающейся областью методов современной ихнологии⁸⁻¹¹, которые имеют решающее значение как для максимизации получаемой информации, так и для сохранения этих хрупких следов прошлого¹². Дно бывших озер, а также мелководных бассейнов пустынной местности, которые широко распространены в Северной и Южной Америке и в некоторых частях Африки, могут содержать такие скрытые ихнологические архивы.

Здесь мы представляем результаты исследования, полученные на территории Национального памятника «Белые Пески» (WHPA), Нью-Мексико, США. Наша работа

демонстрирует эффективность и действенность неразрушающих георадарных технологий для обнаружения и документирования ископаемых следов в мягких отложениях, включая человеческие следы. Ихнофоссилии вымершей фауны *Rancholabrean* широко распространены в WHSA и включают следы хоботных (мамонт), *Folivora* (наземный ленивец), *Carnivora* (собачьи и кошачьи) и *Artiodactyla* (бычьи и верблюдовые), а также людей. Они повсеместно встречаются на обширном гипсовом мелководном бассейне (мелких, периодически пересыхающих солоноватых водоёмах, рис. 1), эрозионном реликте древнего озера Отеро, относящемуся к верхнему плейстоцену. Огромное количество отпечатков следов, десятки тысяч простирающихся на большие площади, позволяют определить взаимодействие между животными и человека с животными посредством подлинного «палео-отслеживания»⁷. Этот ценный ресурс, однако, лишь частично и в определённые моменты виден на поверхности при определенных условиях влажности/солёности, а когда он виден, может быть быстро перекрыт дрейфующим песком. Поэтому иногда такие следы, видимые лишь изредка, в разговорной речи известны как «призрачные следы». Учитывая масштаб рассматриваемой площади, сложность решения задачи является высокой.

Цели георадарного исследования заключались в следующем: (1) проверить, можно ли с помощью этого метода обнаруживать и эффективно различать следы животных, а также людей, включая оценку способности георадиолокации разделять несколько наложенных событий формирования следов на разных горизонтах; и (2) исследовать трехмерную подповерхностную область отпечатков под более крупными животными дорожками, включая то, как они могут меняться в момент формирования отпечатка. В обоих случаях геофизические исследования выполнялись до проведения каких-либо раскопок или подготовки поверхности, за исключением удаления рыхлой поверхностной гальки, чтобы обеспечить плавный ход антенны для улучшения качества данных. Мы обнаружили, что георадиолокация (1) обеспечивает быстрое обнаружение и трехмерную запись отпечатков нескольких видов животных, а также людей; и (2) неразрушающим образом предоставляет информацию об условиях формирования отпечатков большей части мира животных, из которой мы предполагаем сделать биомеханические заключения.

Площадь исследования

На восточной стороне мелкого периодически пересыхающего солоноватого водоёма есть двойной след человеческих отпечатков, который простирается на 800 метров. Этот путь в настоящее время исследуется и, по-видимому, представляет собой след отдельного человека, идущего сначала на север, а затем через некоторое время возвращающегося на юг. Две дорожки параллельны, но смещены друг от друга на расстояние от одного до двух метров. Отдельные следы видны на поверхности при соответствующих условиях влажности, а некоторые участки пути были вскрыты раскопками (рис. 2). Георадарное обследование было проведено вдоль этого пути в месте, где ряд следов хоботных животных, предположительно *Mammuthus columbi*¹³, пересекаются в западном направлении, перпендикулярно двум человеческим следам (рис. 3а). Деформация перед одним из следов мамонта частично перекрыла два следа движущегося на север человека, показывая, что мамонт пересек эту следовую дорожку человека уже после того, как он был сделан. В свою очередь, один след человека на его южном пути накладывается на отпечаток следа мамонта, показывая, что человек пересек данную следовую дорожку на обратном пути. Это указывает на вполне определённую последовательность следовых дорожек, демонстрируя их совместную ассоциацию. И хотя промежуток времени между каждым из трех событий создания следовых дорожек неизвестен, следы мамонта укладываются во временной промежуток между формированием двух следовых дорожек человека (считается, что это был один и тот же человек). Время первоначального присутствия человека в Северной Америке, наряду с

датами вымирания мамонта на континенте подтверждают биостратиграфическую датировку следов позднего плейстоцена в WWSA^{7,14}.

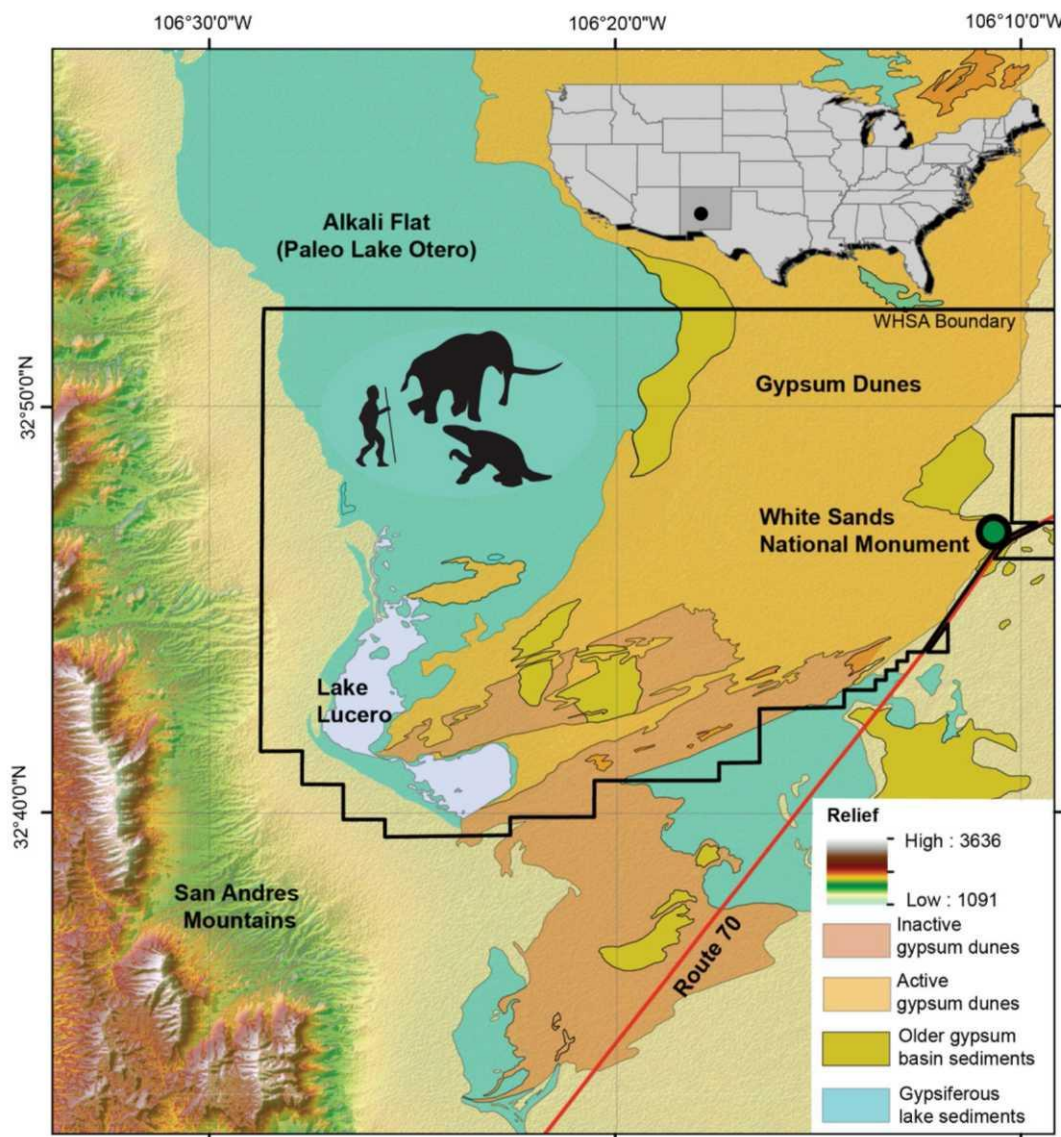


Рисунок 1. Карта показывает Национальный памятник «Белые пески», мелкий периодически пересыхающий солончатый водоём и площадь исследования. Цифровая модель рельефа взята из данных топографической миссии Shuttle Radar Mission 1 в угловых секундах, а геологические данные о поверхности взяты из карт географической съемки США (рельеф в футах). Обратите внимание, что точное положение места исследования не указано в соответствии с требованиями Службы национальных парков (NPS) в соответствии с законодательством США. Заинтересованные стороны могут обратиться в NPS для уточнения местоположения площади. Данные с <https://www.usgs.gov/centers/eros> и карты, сделанные с помощью ArcMap 10.1 (<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/>).

Результаты

Местоположение-1: Результаты нашего георадарного исследования (рис. 3; параметры приведены в разделе «Материалы и методы») показывают, что следы человека можно идентифицировать с помощью георадара с горизонтальным разрешением, достаточным для оценки длины шага (рис. 4). В таблице 1 сравниваются оценки длины шага, измеренные после раскопок, с оценками по данным георадара в Местоположении-1. Результаты в целом сопоставимы и показывают значительное подобие друг от друга. Георадарным методом не удалось идентифицировать только один из 27 человеческих следов, представленных в местоположении 1. Интервал между профилями съемки 12,5 см означал, что в некоторых случаях человеческий след мог быть полностью пропущен или

недостаточно измерен и это позволяет предположить, что 100%-ное успешное обнаружение может быть получено с помощью улучшения условий обследования. Важно отметить, что при обследовании удалось определить цели для раскопок, которые не видны на поверхности (рис. 3, 4). Целесообразно изучения таких участков в дальнейшем.

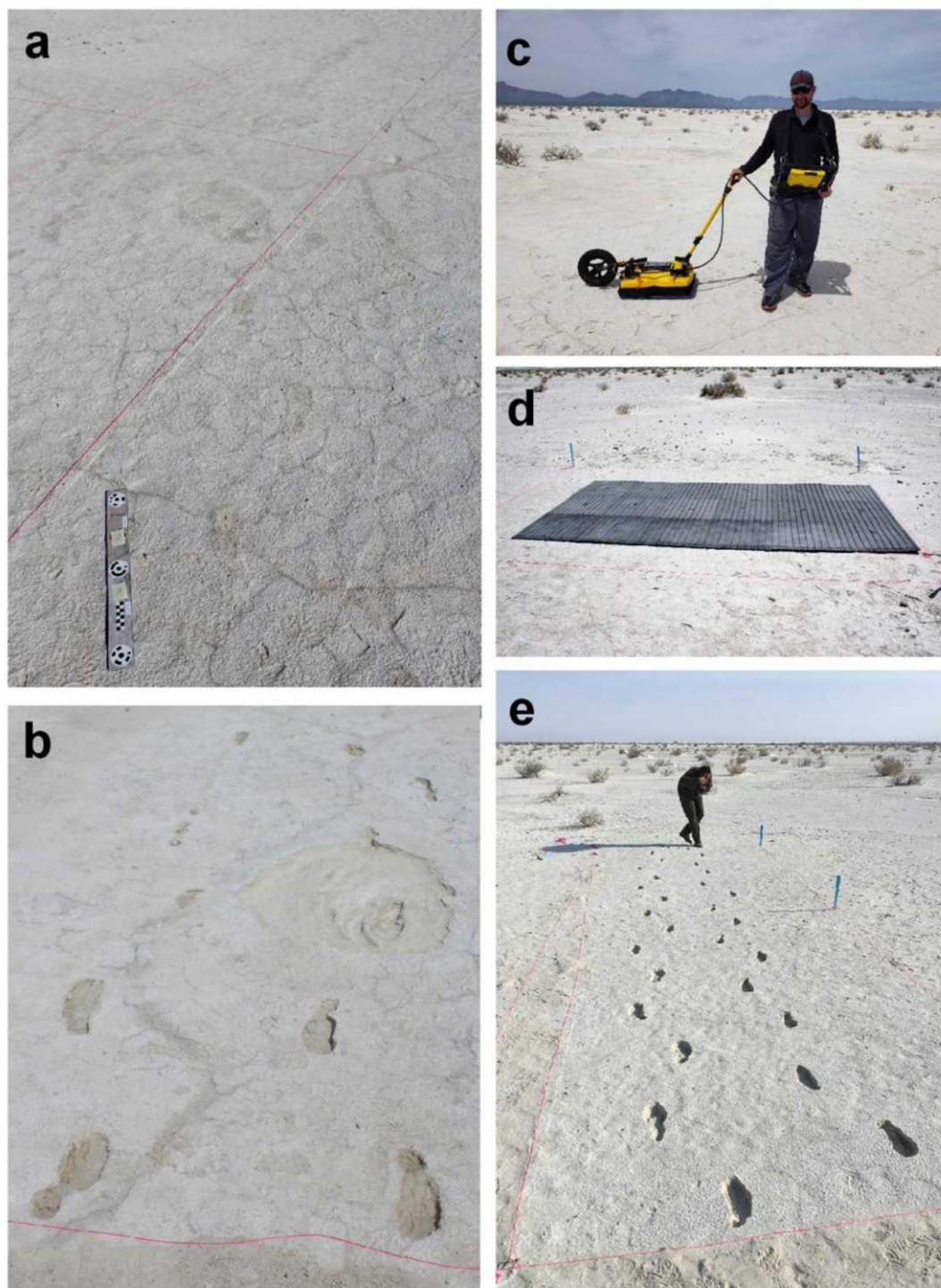


Рисунок 2. Фотографии площади исследования в WHSA. (а) «призрачные следы»: поверхностное отображение следов плохое, что видно из фотографии, и они могут быть видны только при определенных условиях влажности и солёности. Масштаб 500 мм от цели к цели. (б) Отпечатки на месте исследования, раскопанные для обнаружения следов человека и мамонта. (с) Георадарное оборудование, которое использовалось в данном исследовании. (г) Сетчатые пенопластовые маты, используемые для защиты поверхности во время георадарной съемки в соответствии с рекомендациями Джейкоб и др. 30. (е) Раскопки следов человека на месте исследования.

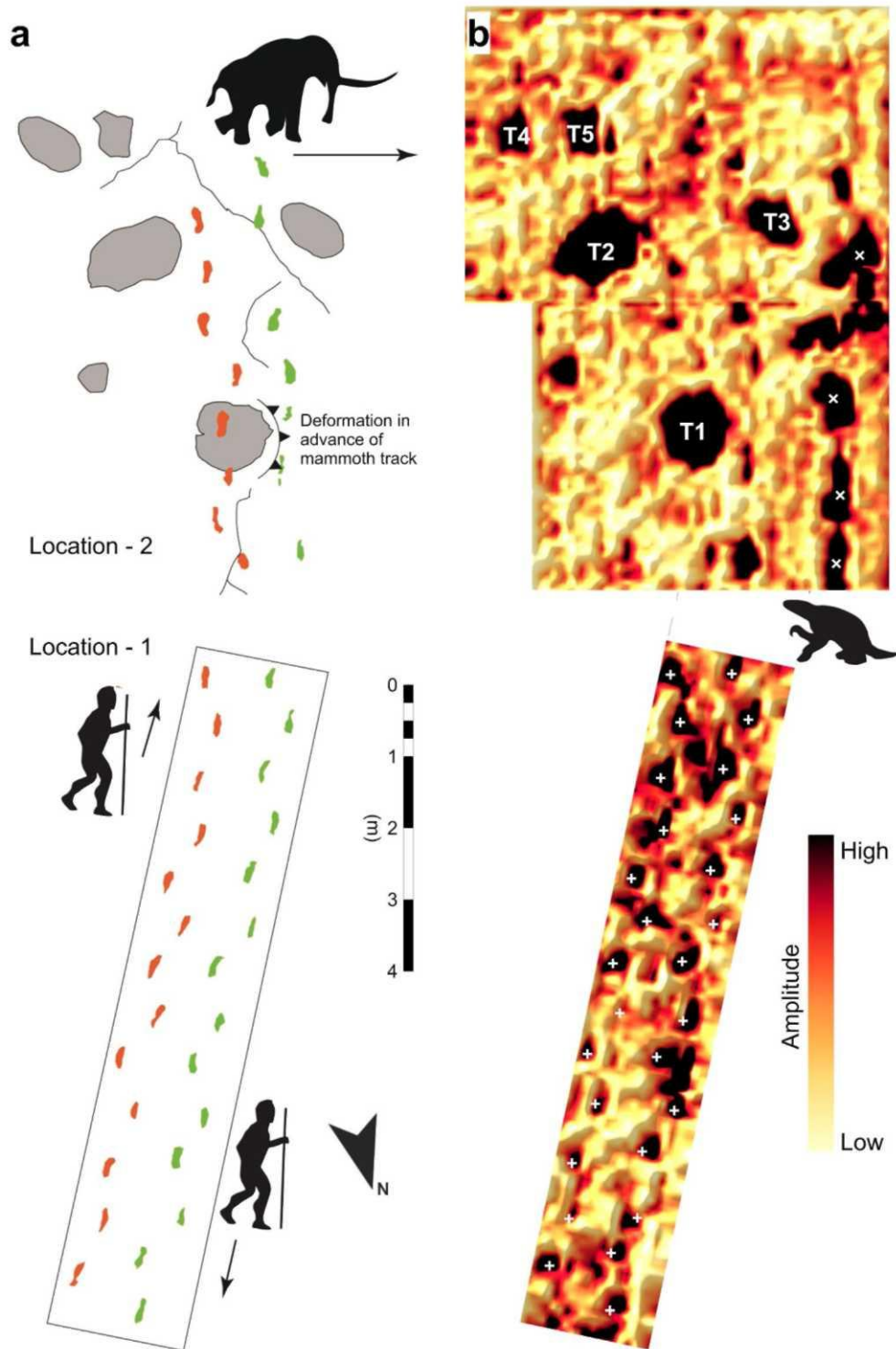


Рисунок 3. (а) Основные отпечатки следов и следовые дорожки, наблюдаемые на участке исследования, которые разделены на Местоположение-1 и Местоположение-2 (показаны в истинных пространственных отношениях). (б) Амплитудный георадарный срез (от 2,0 до 4,0 нс). Отпечатки людей, которые были раскопаны и использовались для анализа, обозначены (+), а неизведанная тропа ленивца (определена в последующих полевых работах) обозначена как (x).

Следует отметить, что некоторые свойства трехмерного отображения человеческих следов делают их различными по данным георадиолокации из-за изменения

детектируемости отпечатков с глубиной (рис. 4). Подробная топологическая информация для подошвенной поверхности отпечатков человеческих следов выходит за пределы разрешения имеющегося набора данных, но для большинства видимых отпечатков их наличия и относительная глубина может быть установлена по данным георадиолокации. Точная оценка скорости распространения георадарного сигнала необходима для оценки абсолютной глубины по двойному времени пробега. Однако сравнение глубины раскопок с данными георадиолокации предполагает скорость 0,05-0,06 м/нс, что является нормальным диапазоном для влажной мелкозернистой среды. Здесь очевиден потенциал для дальнейшего развития метода применением антенн с более высокими частотами, уменьшение межпрофильного интервала и трансиллюминацией (сбор данных в разных направлениях), что должно улучшить разрешение 3D, включая потенциально топологическую информацию для подошвенной поверхности более мелких отпечатков следов (например, человеческих).

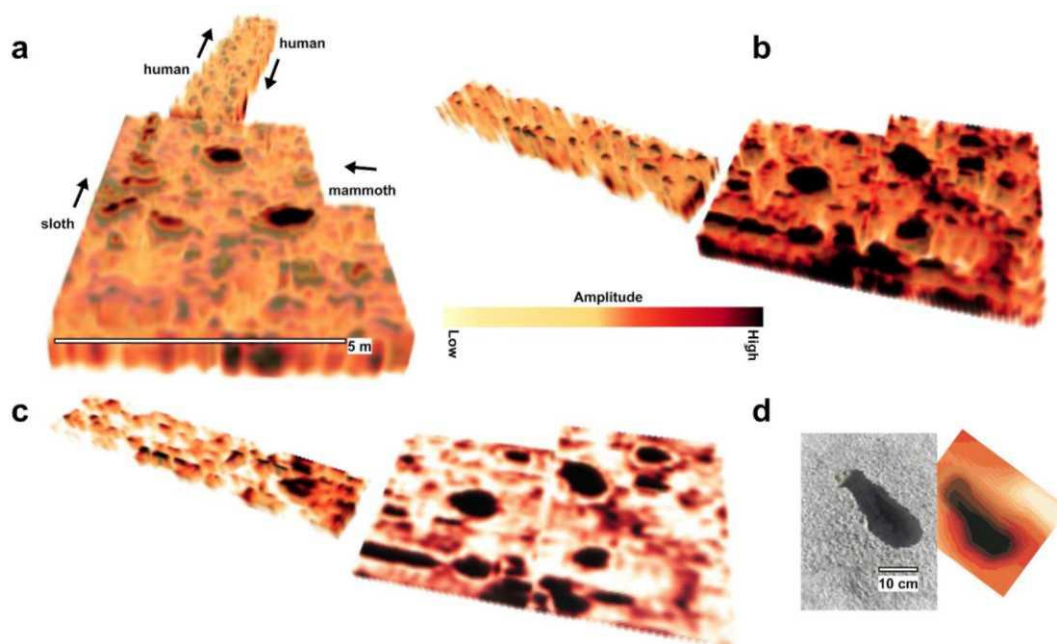


Рисунок 4. Результаты трехмерного представления данных георадиолокации для разных глубин, показывающие скрытые отпечатки следов и их объемные изменения, включая уплотнение под следами. (а) Непосредственно у поверхности (0-5 см). (б) вырезан фрагмент 5-10 см от поверхности. (в) вырезан фрагмент с глубины 10-15 см от поверхности. (d) Фотография раскопанного отпечатка следа человека (слева), а рядом (справа) крупным планом соответствующая аномалия по данным георадарографии, полученная до раскопок на глубине 5-10 см.

	GPR Derived (mm)			Field Derived (mm)		
	Mean	Standard Deviation	N	Mean	Standard Deviation	N
South Размер ступни	281.23	2.38	8	266.78	8.31	15
North Размер ступни	281.8	2.13	12	257.02	8.02	13
North Размер шага	804.7	1.53	12	712.52	2.89	16
South Размер шага	798.02	2.62	10	693.14	2.22	14
North Длина следовой дорожки	1463.33	2.43	12	1422.02	4.21	16
South Длина следовой дорожки	1451	4.35	9	1404.78	4.18	14

Таблица 1. Расчеты размера человеческой ступни, шага и длины шаговой дорожки, полученные на основе георадиолокационных данных для Местоположения 1. Данные следов, полученные в полевых условиях, базируются на выкопанных отпечатках с использованием метода сетки и смещения, тогда как данные треков, полученные методом георадиолокации, базируются на основе аномалий, отмеченных георадаром для местоположения 1 (рис. 3б).

Местоположение-2: На Местоположении-2 были обнаружены как следы мамонта, так и следы человека наряду с целым рядом других потенциальных отпечатков, которые еще предстоит раскопать. Например, аномалии на западной стороне Местоположения-2 (Рис. 3, 4) обеспечили будущие цели раскопок, которые не были видны в какой-либо форме во время съемки. Позднее было определено, что это следы ленивца после того, как они стали частично видимыми после дождя (хотя данная интерпретация является предварительной, поскольку они остаются неисследованными) (рис. 5). Самый большой из следов мамонта (837x714 мм; Рис. 3, T1) был раскопан (Рис. 6с). Деформация перед этим отпечатком частично перекрыла северные следы человека на 200-300 мм к западу. Впоследствии этот след был перекрыт следом ступни человека южной следовой дорожки (рис. 6а, в). Точный контур следа мамонта, который, как полагают, сделан манусом, не является четко определенным, но по аналогии с существующим *Loxodonta africana*, скорее всего, будет соответствовать взрослой (> 50 лет) особи с потенциальной высотой плеч более 3 метров¹⁵⁻¹⁷.

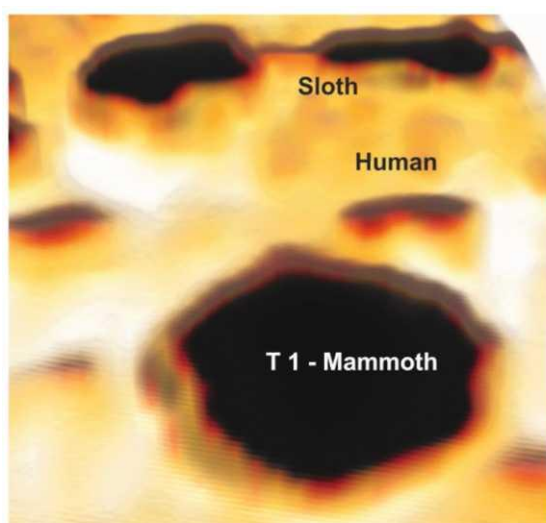


Рисунок 5. Увеличенный фрагмент трехмерной георадарной проекции отпечатка следа мамонта (Т 1) параллельно со следами человека и ленивца. Наличие следов ленивца не было известно до съемки георадарных данных и было позже подтверждено, когда отпечатки стали частично видимыми после периода осадков. Отпечатки ленивца в этом месте остаются не раскопанными.

Структуры деформации под и вокруг следов мамонта были исследованы в других местах WHSA с использованием серии вырытых вручную траншей. Деформация возникает первоначально при воздействии вниз передней части оставляющей отпечаток стопы, за этим возникает задне-направленный компонент сдвига пятки стопы, до тех пор пока сброс давления не вызовет выход жидкости. Конкретные структуры имеют вариации в зависимости от подповерхностной стратиграфии, но всегда приводятся в действие передней нагрузкой. Эти наблюдения хорошо согласуются с данными о среднем подошвенном давлении, полученными для африканских слонов (*Loxodonta africana*)¹⁸. Для африканских слонов характерны подошвенные пики давления в боковой и дистальной частях стопы^{19,20}, что соответствует областям максимальной деформации под отпечатком. На рисунке 6 показаны два среза глубины в местоположении-2; нижняя или близкая к нижней часть отпечатка отображается на рис. 6а (от 4 до 6 нс), также показан отпечаток человека на дорожке 1 (T1), что дополнительно иллюстрирует рис. 6с. На глубинах чуть ниже (от 6 до 8 нс), показанных на рис. 6б, изменения амплитуд георадарного сигнала видны на следах мамонта, с более высокими амплитудами на передней и боковой сторонах отдельных отпечатков. Этот слой соответствует тому, что находится непосредственно под поверхностью истинного следа. В целом это похоже на подошвенное давление, которое наблюдал Панайотопулу и др.²⁰ для существующих в настоящее время

африканских слонов (*Loxodonta africana*; рис. 6d). В вертикальном разрезе (рис. 7a) амплитудная диаграмма, продолжающаяся ниже отпечатков, имеет форму крючка с вершиной на передней стороне отпечатка; это соответствует направлению движения.

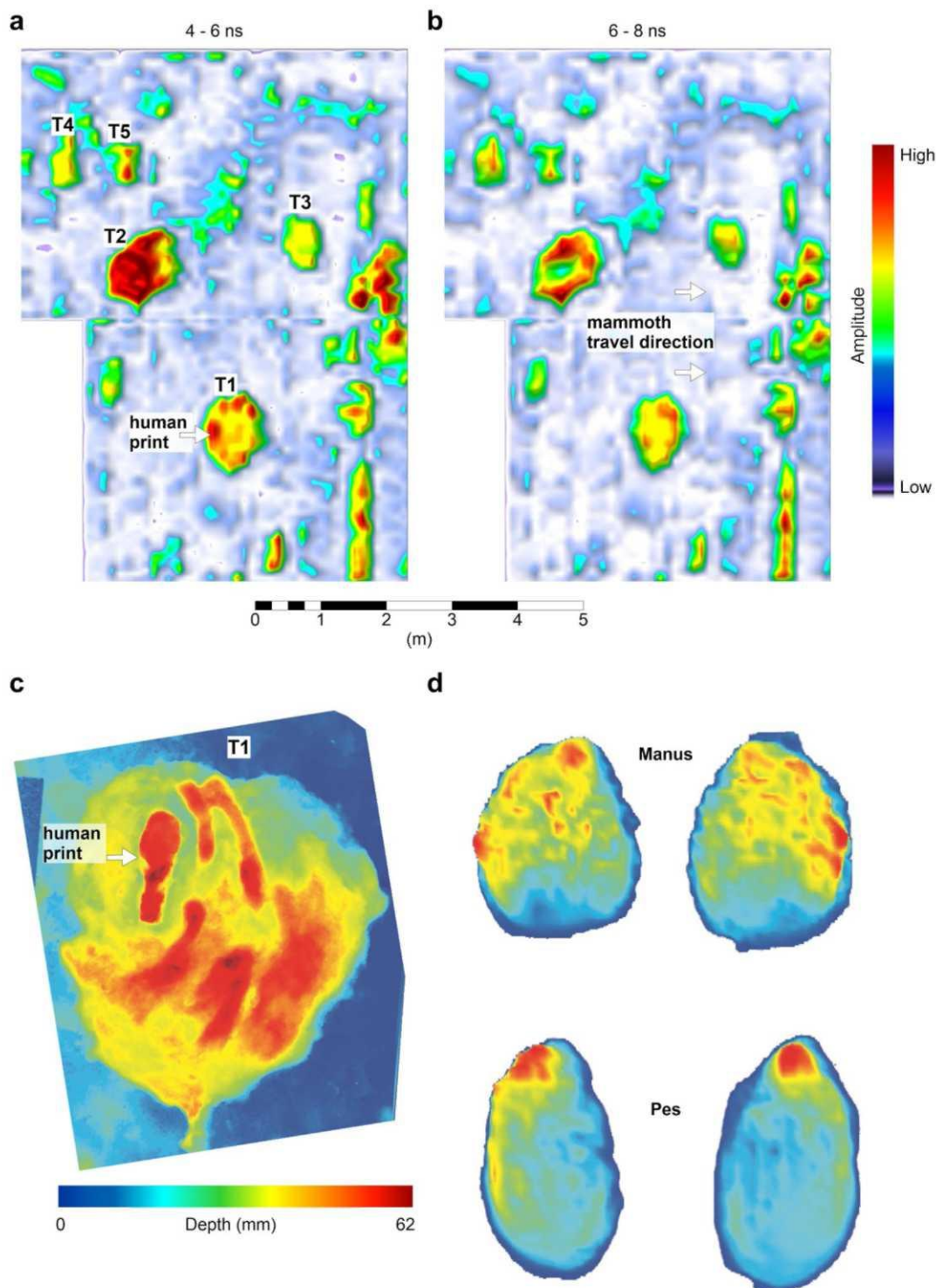


Рисунок 6. Местоположение - 2 поперечный георадарный срез в заданное время пробега сигнала со сравнительными данными. Каждый срез 2 нс представляет приблизительно толщину 5-6 см. (a) Дно или близкое к нему положение истинных следов, с наложенным следом человека, видимым по периметру T1. (b) Срез непосредственно под следами дает амплитудные закономерности, аналогичные тем, которые наблюдаются по данным подошвенного давления. (c) Глубины, полученные при раскопках самого большого отпечатка следа мамонта (T1) с отпечатком человека. (d) Данные о среднем подошвенном давлении африканских слонов (*Loxodonta africana*), предоставленные Панайотопулу и др.²⁰. Это базируется на средних записях пяти слонов и методах, описанных Панайотопулу и др.²⁰. Значения для каждого из пяти животных получены на количестве записей давления от 1 до 24.

Беннет и др.¹⁸ показали, что это соответствует области пиковой деформации под следами мамонта в WHSA и вызвано биомеханикой локомоции. Представленные здесь закономерности прослеживаются на всех следах мамонта исследуемой площади (рис. 7а, б) и согласуются с их трехмерной структурой (рис. 7б). Мы предполагаем, что вариации амплитуды с глубиной определяют сжатие осадочной породы, что согласуется с записями подошвенного давления для существующих хоботных. Деформация под действием весовой нагрузки мамонта может вызвать сжатие породы и теоретически увеличить диэлектрическую проницаемость в уплотненной среде за счет уменьшения доли воздуха с низкой диэлектрической проницаемостью на единицу объема. В свою очередь это должно увеличить площадь поверхности на единицу объема вместе с влажностью почвы, в результате чего получается небольшое уменьшение скорости георадарного сигнала, что приводит к более высоким амплитудам отраженного сигнала там, где возникает уплотнение почвы. Поэтому мы предполагаем, что данные георадарного сигнала содержат некоторое подобие записи подошвенного давления вымершего мамонта.

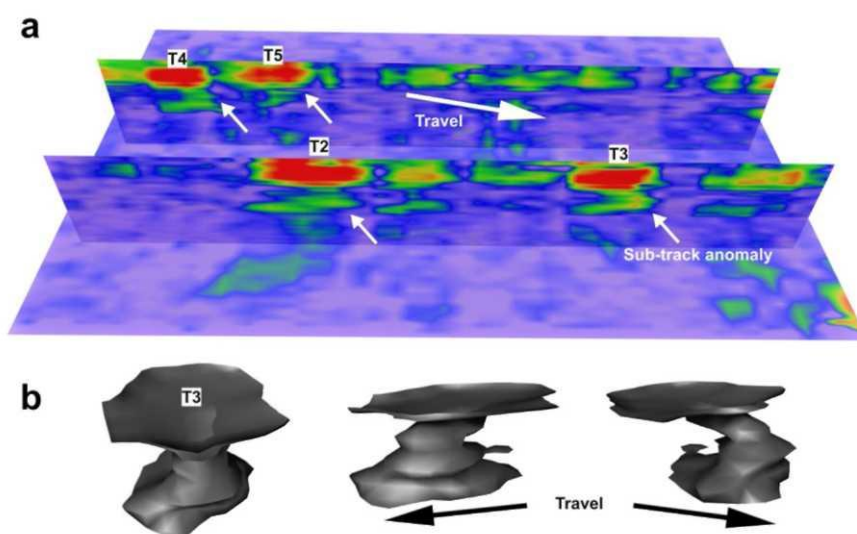


Рисунок 7. (а) Георадарная диаграмма, показывающая изменения амплитуды сигнала под отпечатками следов мамонта. Обратите внимание на «крючковидную» структуру, обозначенную белыми стрелками, последовательно указанными в направлении движения мамонта. (б) Изоповерхность амплитуды георадарного сигнала из T3, повернутой таким образом, чтобы показать несколько ракурсов трехмерной структуры подповерхностной аномалии отпечатка.

Обсуждение

Не так давно мы сообщали об использовании магнетометра для обнаружения следов мамонта на WHSA11 и ограничения, о которых упоминалось в этой работе, преодолеваются с использованием георадарных технологий. Во-первых, магнитометр менее надежен в обнаружении небольших отпечатков, как например оставленных человеком. Человеческие следы обнаруживаются только в том случае, если основание истинного следа (подошвенная контактная поверхность) глубоко пропечатано относительно поверхности (> 200 мм). Глубина трека а, следовательно, объем заполнения оказываются критической величиной. Однако следы мамонта обнаруживаются всегда. Прибор также подвержен воздействию периодического внешнего электромагнитного шума от активности военных, расположенных недалеко, что характерно для WHSA и немаловажно. И, наконец, магнитные данные не очень хорошо подходят для предоставления трехмерных данных, что особенно ценно в тех случаях, когда отпечатки имеют скрытую часть, не видимую на поверхности перезаписанных следообразующих событий⁷. Тем не менее, он даёт возможность более широкой разведки, который может быть использован там, где имеются очевидные следы на поверхности, или же для общей

разведки предполагаемых местоположения следов, в особенности для более крупной фауны. Это, например, нормальные береговые разрезы мелководных бассейнов в пустынной местности и бывшие озерные образования где теоретически можно идентифицировать следы по аналогии с типами распределения, описанными в последних полевых наблюдениях^{21,22}.

С другой стороны, с помощью георадарной съемки удалось обнаружить 96% существующих человеческих следов и всех более крупных позвоночных. Результаты показывают, однако, что с улучшенной методикой обследования все человеческие следы могут быть легко обнаружены с точки зрения масштабирования. Следы становятся обнаружимыми благодаря заполнению, которое показывает отражение георадарного сигнала с более высокой амплитудой, чем от вмещающей среды. Этот контраст обусловлен, вероятно, иными электрическими свойствами внутри отпечатков следов, чем в окружающих отложениях, и более высокой диэлектрической проницаемостью, что, вероятно, отражает разницу в содержании воды из-за текстурных особенностей. В этом случае реакция георадара предполагает, что субстрат, заполняющий отпечатки, удерживает больше влаги, чем окружающие отложения даже в сухих условиях, что вполне подтверждается при раскопках следов.

Однако именно подповерхностные изменения амплитуды под следами мамонта мы считаем особенно значимыми. Они проявляются как области более высокой амплитуды, которые, вероятно, имеют объяснение, отличное от того, что постулировано выше для самих отпечатков. С аномалиями подотпечатка, это не вновь принесённые отложения, которые объясняют отражения, но мы теоретически предполагаем, что это сжатие уже существующих отложений, которое изменяет их диэлектрическую проницаемость. Сходство между записями подошвенного давления существующих до настоящего времени слонов и участками аномально высокой амплитуды непосредственно под областью отпечатка, предполагает, что георадар обнаруживает запись подошвенного давления ниже следа мамонта из-за, как мы предполагаем, сжатия отложений под отпечатком. Эта предложенная нами схема сжатия не была видна при раскопках, и, по крайней мере, в тестируемом месте ее можно различить только с помощью георадара.

Обычный биомеханический вывод на основе отпечатков следов часто зависит от замены давления на глубину, в которой более глубокие области отражают более высокое подошвенное давление. Однако было обнаружено, что это справедливо только для мелких отпечатков, как например в случае следов человека²³, но это вопрос, который редко ставится под сомнение в ихологических исследованиях для крупных или вымерших производителей отпечатков. Другие экспериментальные работы, которые исследовали эту взаимосвязь на современных человеческих следах, также обнаружили, что эта зависимость несущественна^{24,25}. Существует много причин, по которым деформация может не быть связана исключительно с объемом отпечатка (то есть глубиной), и, кроме того, тафономические процессы могут быстро изменять наблюдаемую топологию следа, скрывая любые отношения²⁶. Например, топология отпечатка следа мамонта (T1) в Местоположении-2 (Рис. 2b, 6c) не отражает аномалии подповерхностного давления (Рис. 6b). Наши результаты показывают, что независимо от изменения глубины следа запись давления кодируется через свойства отложений под отпечатком (вероятное сжатие), а в некоторых случаях это не зависит от отпечатка и его топологии.

На основе логических предположений, потенциально тысячи записей о подошвенном давлении ожидают сбора в таких местах, как WHSA и в других местах в Северной Америке^{1,7} и Намибии^{26,27} без необходимости проведения раскопок отпечатков следов. Вот этот потенциал улучшит наше понимание биомеханики вымерших животных и может дать важную информацию для разработки ещё более сложных биомеханических моделей как на основе, так и для существующих в настоящее время слонов, а также по аналогии с анатомически сходными динозаврами, такими как зауроподы²⁸. Это может также улучшить качество геотехнических моделей, применяемых как к следам слонов, так

и к следам мамонтов, так как это позволит использовать расчетное подошвенное давление, а не в настоящий момент - однородные инденторы²⁹.

На таких местоположениях, как «Белые пески», новый архив данных в виде редкой и уникальной ихнологической записи должен быть вскрыт. Доступ к этой записи в любых условиях с использованием неразрушающих геофизических методов имеет важное значение для эффективности исследований, сохранения и управления ресурсами памятника «Белые Пески», а также за его пределами. Знание того, где находятся неизведанные отпечатки следов, является ключевым шагом в управлении, мониторинге и определении приоритетов для сохранения ресурсов, тем более что раскопки в конечном итоге приводят к потерям. С использованием съемки с более высоким разрешением в будущем мы ожидаем, что выемка грунта не всегда будет необходима в широком масштабе для изучения таких отпечатков. Неопубликованные данные экспериментов с различными частотами антенн показали, что наиболее устойчивые результаты получены с антенной 250 Гц, по крайней мере, в WNSA, где грунт имеет высокую диэлектрическую проницаемость, и что повышенное разрешение можно получить, увеличив плотность сети наблюдений включая перпендикулярные профили. Наши неопубликованные тесты с более высокими частотами антенн (500 МГц и 1 ГГц) показывают некоторые обнадеживающие перспективы получения более детальных измерений на более коротких отпечатках следов как, например, человеческих, которые будут предметом будущей статьи. Независимо от этого, эффективность данного подхода заключается не только в визуализации топологии скрытых отпечатков, но также и в дополнительной информации, полученной о сжатии под отпечатком. Таким образом, помимо непосредственных и очевидных преимуществ определения местоположения и визуализации самих следов, георадиолокация предлагает дополнительную вспомогательную информацию о давлении и импульсе благодаря обнаруживаемым воздействиям на отложения как ниже, так и вокруг отпечатков. Решаемые и последовательные тенденции в георадарных данных предполагают, что каждый след имеет соответствующую подструктуру, вызванную уплотнением окружающих отложений. Первоначальные результаты показывают, что это связано как со сжатием от веса, оставляющего отпечаток следа, так и со сдвигающими усилиями от формируемого при этом импульса. Следовательно, информация о размере и направлении создателя отпечатка, вероятно, представлена в георадарных данных более широко, предлагая ранее неисследованный путь к биомеханике вымерших видов, таких как мамонт. Это имеет значение для изучения ископаемых следов далеко за пределами памятника «Белые Пески», включая возможность того, что при подходящих условиях эти контрасты уплотнения под отпечатками могут сохраняться после литификации и, следовательно, присутствовать ниже следов динозавров или других вымерших позвоночных.

Материалы и методы

Место исследования было выбрано из общей длины двойной дорожки (> 800 м) на основе наличия комбинации различных следов животных. Обследуемый участок был разбит и сфотографирован до и после раскопок с использованием монополя. Ортотрансформированные фото-мозаики были сделаны с использованием Agisoft Photoscan Pro (v. 1.5.0; www.agisoft.com). Следы были выкопаны с помощью щеток и зубочисток. Однажды раскопанные трехмерные модели отпечатков были сделаны с использованием DigTrace (www.digtrace.com), который использует OpenMVG структуру с открытым исходным кодом из движка фотограмметрии. Записи подошвенного давления были подтверждены Ольгой Панайгиотопулой¹⁹. Это состояло из нескольких записей о подошвенном давлении для каждой ноги пяти африканских слонов, собранных с использованием платформы подошвенного давления Zebris Medical. Средства для каждой ступни были совместно зарегистрированы и объединены для получения данных.

Георадарное оборудование включало блок 250 МГц Noggin от Sensors and Software Inc. (<https://www.sensoft.ca/products/noggin/overview/>). Параметры прибора включали временное окно 120 наносекунд, 8 стеков и 5 см. интервал трассировки. Обработка данных георадиолокации выполнялась с помощью ЕККО_View; ЕККО_mapper (Sensors and Software Inc.) и включала фильтр dewow, усиление и envelope. Георадарные изображения были получены с помощью VOXLER 4 и Surfer 14 компанией Golden Software Inc. www.goldensoftware.com/products

Для покрытия участка геофизической разведки были использованы маты из пенопласта толщиной 10 мм. Они были предварительно размечены линиями с интервалами 12,5 см. Расстояние между георадарными профилями 12,5 см обеспечивало покрытие 18 м²/час для параллельных разрезов, включая установку и перемещение защитных пенопластовых прокладок. Несмотря на трудоёмкость, это обеспечило довольно быстрый и неразрушающий способ сбора информации, в местах, где предполагалось наличие отпечатков. После раскопок треки начинают немедленно разрушаться и должны быть оцифрованы в 3D (с помощью фотограмметрии или оптического лазерного сканера) или физически отлиты в целях консервации. Для сравнения - раскопки и трехмерный захват с помощью фотограмметрии Местоположения-1 заняли приблизительно 26 часов или 0,15 м²/час.

Доступность данных

Данные, связанные с этим документом, могут быть запрошены у авторов.

Получено: 27 февраля 2019 года; Принят: 25 октября 2019 года;

Опубликовано на сайте: 11 ноября 2019 г.

Ссылки на литературу

1. Retallack, G. J. et al. Late Pleistocene mammoth trackway from Fossil Lake, Oregon. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 496, 192-204 (2018).
2. Altamura, F. et al. Archaeology and ichnology at Gombore II-2, Melka Kunture, Ethiopia: everyday life of a mixed-age hominin group 700,000 years ago. *Sci. Reports* 8, 2815, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21158-7> (2018).
3. McLaren, D. et al. Terminal Pleistocene epoch human footprints from the Pacific coast of Canada. *PLOS One* 0193522, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193522> (2018)
4. Helm, C. W. et al. A New Pleistocene Hominin Tracksite from the Cape South Coast, South Africa. *Sci. Reports* 8, 3772, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22059-5> (2018).
5. Hatala, K. G. et al. Hominin track assemblages from Okote Member deposits near Ileret, Kenya and their implications for understanding fossil hominin paleobiology at 1.5 Ma. *Journal of Human Evolution* 112, 93-104 (2017).
6. Bennett, M. R. & Morse, S. A. *Human Footprints: Fossilised Locomotion?* 216 pp (Springer International Publishing, 2014).
7. Bustos, D. et al. Footprints preserve terminal Pleistocene hunt? Human-sloth interactions in North America. *Sci. Adv.*, 4, p. eaar7621 (2018).
8. Belvedere, M. et al. Stat-tracks and mediotypes: powerful tools for modern ichnology based on 3D models. *PeerJ* 6, e4247, <https://doi.org/10.7717/peerj.4247> (2018).
9. Falkingham, P. L. et al. A standard protocol for documenting modern and fossil ichnological data. *Palaeontology* 61, 469-480 (2018).
10. Bennett M. R. & Budka M. (2019) *Digital Technology for Forensic Footwear Analysis and Vertebrate Ichnology*, 251 pp (Springer-Nature, Cham, 2018).
11. Urban, T. M., Bustos, D., Jakeway, J., Manning, S. W. & Bennett, M. R. Use of magnetometry for detecting and documenting multi-species Pleistocene megafauna tracks. *Quat. Sci. Rev.* 199, 206-213 (2018).
12. Bennett, M. R., Falkingham, P., Morse, S. A., Bates, K. & Crompton, R. H. Preserving the Impossible: Conservation of Soft-Sediment Hominin Footprint Sites and Strategies for Three-Dimensional Digital Data Capture. *PloS One* 8, e60755, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0060755> (2013).
13. Lucas, S. G. et al. Mammoth footprints from the upper Pleistocene of the Tularosa Basin, Dona Ana County, New Mexico. *New Mexico Mus. Nat. Hist. Sci. Bull.* 42, 149-154 (2007).
14. Moreno-Mayar, J. V. et al. Early human dispersals within the Americas *Science* 362, 6419, <https://doi.org/10.1126/science.aav2621> (2018).

15. Western, D., Moss, C. & Georgiadis, N. Age estimation and population age structure of elephants from footprint dimensions. *Journal Wildlife Man*/47, 1192-1197 (1983).
16. McNeil, P., Hills, L. V., Kooyman, B. & Tolman, S. M. Mammoth tracks indicate a declining Late Pleistocene population in southwestern Alberta, Canada. *Quat. Sci. Rev.* 24, 1253-1259 (2005).
17. Pasenko, M. R. Quantitative and qualitative data of footprints produced by Asian (*Elephas maximus*) and African (*Loxodonta africana*) elephants and with a discussion of significance towards fossilized proboscidean footprints. *Quat. Int.* 443, 221-227 (2017).
18. Bennett, M. R. et al. Soft-sediment deformation below mammoth tracks at White Sands National Monument (WNSA, New Mexico): implications for biomechanical inference from tracks. *Palaeo* 3(527), 25-38 (2019).
19. Panagiotopoulou, O., Pataky, T. C., Hill, Z. & Hutchinson, J. R. Statistical parametric mapping of the regional distribution and ontogenetic scaling of foot pressures during walking in Asian elephants (*Elephas maximus*). *J. Exp. Biol.* 215, 1584-1593, <https://doi.org/10.1242/jeb.065862> (2012).
20. Panagiotopoulou, O. et al. Foot pressure distributions during walking in African elephants (*Loxodonta africana*). *Royal Society open science* 3(10), 160203 (2016).
21. Cohen, A., Lockley, M., Halfpenny, J. & Michel, A. E. Modern vertebrate track taphonomy at Lake Manyara, Tanzania. *Palaios* 6, 371-389 (1991).
22. Cohen, A. S., Halfpenny, J., Lockley, M. & Michel, E. Modern vertebrate tracks from Lake Manyara, Tanzania and their paleobiological implications. *Paleobiology* 19, 433-458 (1993).
23. Bates, K. T. et al. Does footprint depth correlate with foot motion and pressure? *Journal of the Royal Society Interface* 10, p.20130009 (2013).
24. D'Aout, K., Meert, L., Van Gheluwe, B., De Clercq, D. & Aerts, P. Experimentally generated footprints in sand: analysis and consequences for the interpretation of fossil and forensic footprints. *Am. J. Phys. Anthropol.* 141, 515-525 (2010).
25. Hatala, K. G., Dingwall, H. L., Wunderlich, R. E. & Richmond, B. G. The relationship between plantar pressure and footprint shape. *Journal of Human Evolution* 65, 21-28 (2013).
26. Kinahan, J., Pallet, J., Vogel, J., Ward, J. & Lindique, M. The occurrence of elephant tracks in the silt deposits of the lower Kuiseb River, Namibia. *Cimbebasia* 13, (37-43 (1991).
27. Morse, S. A. et al. Holocene footprints in Namibia: the influence of substrate on footprint variability. *Am. J. Phys. Anthropol.* 151, 265-279 (2013).
28. Hutchinson, J. R., Miller, C., Fritsch, G. & Hildebrandt, T. The anatomical foundation for multidisciplinary studies of animal limb function: examples from dinosaur and elephant limb imaging studies. In *Anatomical Imaging* (pp. 23-38). Springer, Tokyo (2008).
29. Schanz, T. et al. Quantitative interpretation of tracks for determination of body mass. *Plos One* 8(10), p.e77606 (2013).
30. Jacob, R. W., Berna, F., Urban, T. M. & Chazan, M. Effect of two different protective surface material on ground penetrating radar signal characteristics. *Proceedings of the 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)* (2018).

Благодарности

Эта работа финансировалась соглашением о сотрудничестве между Национальным памятником «Белые Пески» и Корнельским университетом. Мнения и выводы принадлежат авторам и не обязательно отражают политику Службы национальных парков (NPS). MRB выражает признательность Совету по исследованиям окружающей среды за гранты (NE/H004246/1 и NE/M021459/1). Также авторы выражают искреннюю благодарность Ольге Панайгиотопулу за предоставление доступа к данным о подошвенном давлении африканских слонов.

Авторский вклад

Полевые работы были предприняты T.U., D.B., M.R.B., V.S. и D.O. в апреле 2018 г. Геофизическая обработка была выполнена T.U. M.R.B. был ответственным за связи с подошвенным давлением и написал большую часть рукописи с T.U. M.B., S.M. и S.C.R. способствовали написанию, добавили свои точки зрения и понимание, относящиеся к их области знаний.

Конкурирующие интересы

Авторы заявляют об отсутствии конкурирующих интересов.

Дополнительная информация

Переписка и запросы на материалы должны быть адресованы T.M.U. или M.R.B. Информация о перепечатках и разрешениях доступна по адресу www.nature.com/reprints. Примечание издателя Springer Nature остается нейтральным в отношении юрисдикционных претензий на опубликованных картах и институциональной принадлежности.

Открытый доступ

Эта статья лицензируется в соответствии с международной лицензией Creative Commons Attribution 4.0, которая разрешает использование, совместное использование, адаптацию, распространение и воспроизведение на любом носителе или в любом формате, при условии, что вы предоставили соответствующий кредит первоначальному автору (авторам) и источнику, обеспечили ссылку на лицензию Creative Commons и указали, были ли внесены изменения. Изображения или другие материалы третьих лиц, представленные в этой статье, включены в лицензию Creative Commons этой статьи, если иное не указано в кредитной линии материала. Если материал не включен в лицензию Creative Commons данной статьи и ваше предполагаемое использование не разрешено законом или превышает разрешенное использование, вам необходимо получить разрешение непосредственно от правообладателя. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© Автор (ы) 2019