

## Результаты георадарного и водородного исследования импактных воронок Тунгусского метеорита в 2009 и 2010 гг.

В.А. Алексеев<sup>1</sup>, Н.Г. Алексеева<sup>1</sup>, В.В. Копейкин<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> ГИЦ РФ – Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований  
142190, г.Троицк, Московская обл.

<sup>2</sup> Институт земного магнетизма и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН  
142190, г. Троицк, Московская обл.

Поступила в редакцию 11.08.2011 г.

Проведены георадарные исследования ударных воронок вблизи эпицентра взрыва Тунгусского метеорита. Изучены потоки водорода. Обсуждаются предварительные результаты по фрагментам Тунгусского космического тела.

*Ключевые слова:* метеорит, эпицентр, импактные воронки, георадар, поток водорода; meteorite, epicenter, impact craters, georadar, hydrogen.

### Введение

В экспедициях в июле 2009–2010 гг. были проведены исследования воронок в зоне падения Тунгусского метеорита [1]. Распределение воронок на площади  $2,5 \times 07$  км между Северным и Южным болотами сходно с расположением воронок Сихотэ-Алиньского метеоритного дождя. Это дает основание предположить, что Тунгусский метеорит также при взрыве рассыпался на фрагменты. Наши исследования подтверждают идеи Л.А. Кулика о множественном образовании воронок импактной природы.

С помощью георадара ЛОЗА были изучены внутренние структуры воронок до глубины 20 м. Воронки, выбранные как импактные, сохранили свою форму благодаря вечной мерзлоте и имеют вид конуса, рассекающего болото до глубины примерно 15 м. В структуре воронок просматриваются три зоны: верхние слои современной вечной мерзлоты, нижележащие разрушенные слои и предполагаемые фрагменты разрушенного космического тела, для изучения которого необходимо применить бурение.

Было найдено и обследовано около 40 воронок. Их выделили по аномальной морфологии болот и по виду торфяных валов, а также обнаружили воронки среди леса. Для изучения воронок через их центр прокладывались доски и по ним, с шагом 10 см в направлении с севера на юг и с запада на восток, проводились измерения с помощью георадара.

Для георадарного профилирования и зондирования использовался георадар ЛОЗА со следующими параметрами [2]:

1. Полоса рабочих частот 1–500 МГц.
2. Частота дискретизации сигнала 1 ГГц.
3. Чувствительность приемника 100 мкВ.
4. Импульсная мощность передатчика 1 МВт.
5. Центральная частота резистивных антенн 100 МГц.

Для определения глубины границ слоев и их диэлектрической проницаемости использован метод ОПВ (общий пункт возбуждения).

На рисунках, представляющих собой записи радарограмм без дополнительной обработки, слева указана глубина в метрах, справа – задержка в наносекундах.

Для водородных измерений использовался анализатор водорода, созданный в МИФИ, с разрешением 1 ppm.

Были подробно исследованы Суловская и боковая маленькая воронки. Измерения подтвердили их импактное происхождение, как и предполагал Л.А. Кулик (рис. 1, см. вклейки).

В настоящее время Суловская воронка имеет диаметр примерно 32 м, борта заросли кустарником, в отдельных секторах выросли деревья – березы, сосны, кедры, особенно сильный рост деревьев наблюдался на бортах бывшей траншеи, прорытой Л.А. Куликом в 1928 г. Суловская воронка к настоящему времени заросла болотной растительностью.

Суловская воронка имеет координаты  $60^{\circ}54'13,5''$  с.ш.,  $101^{\circ}54'23,8''$  в.д. Глубина и диэлектрическая проницаемость среды вычислялись по годографу. На рис. 2 (см. вклейки) приведена запись отраженных сигналов без обработки для временной шкалы отсчета вертикальной координаты. Приведенная слева шкала глубин имеет ориентировочный характер. Истинные глубины границ для точки измерения годографа указаны на выносках.

\* Владимир Алексеевич Алексеев (lilialeks@yandex.ru);  
Нина Григорьевна Алексеева (an1tu@mail.ru); Владимир  
Владимирович Копейкин (kopeikin@izmiran.ru).



Рис. 1. Сусловская воронка. В.А. Алексеев и В.В. Копейкин проводят георадарные измерения

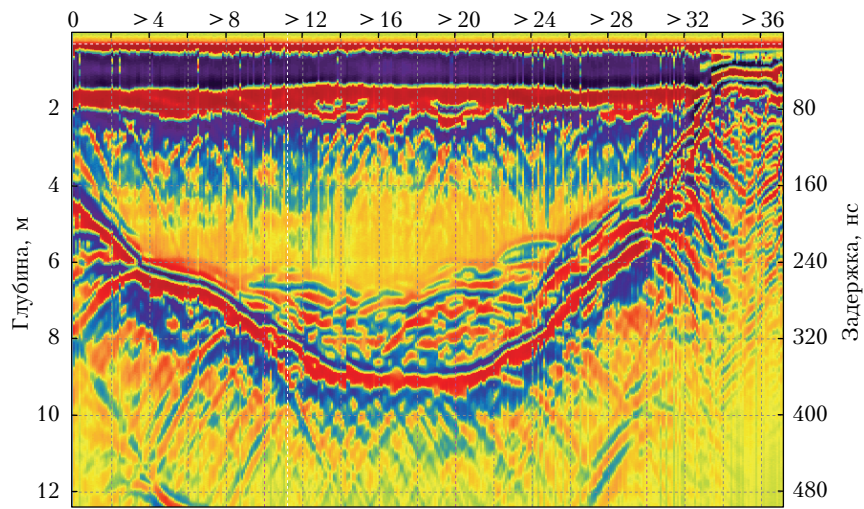


Рис. 2. Сусловская воронка, радарограмма. Сечение север–юг

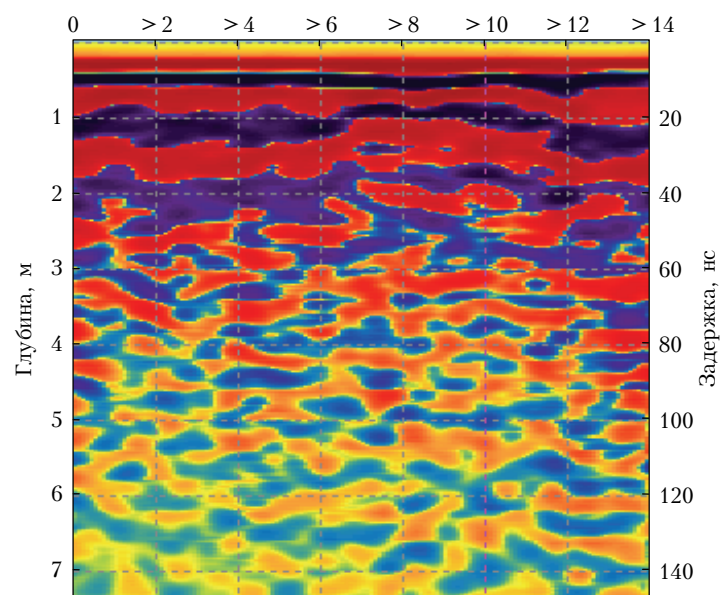


Рис. 4. Георадарный профиль вдоль западного борта Сусловской воронки

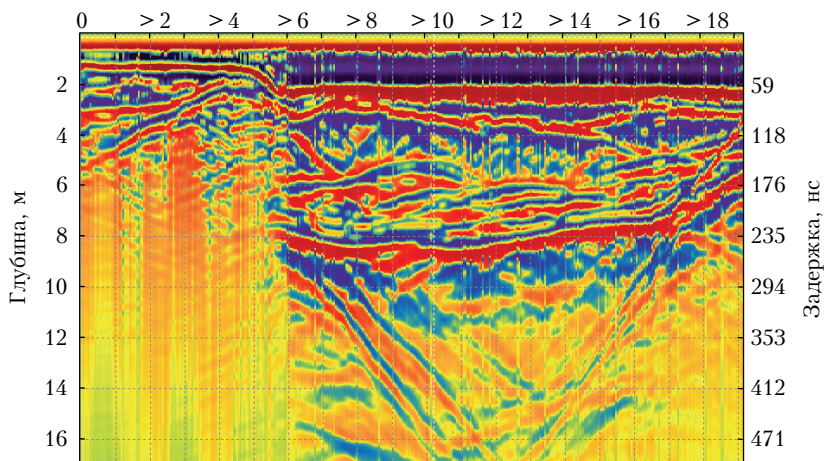


Рис. 5. Профиль двойной воронки, со дна которой после бурения были подняты фрагменты кристаллического прозрачного и темного льда

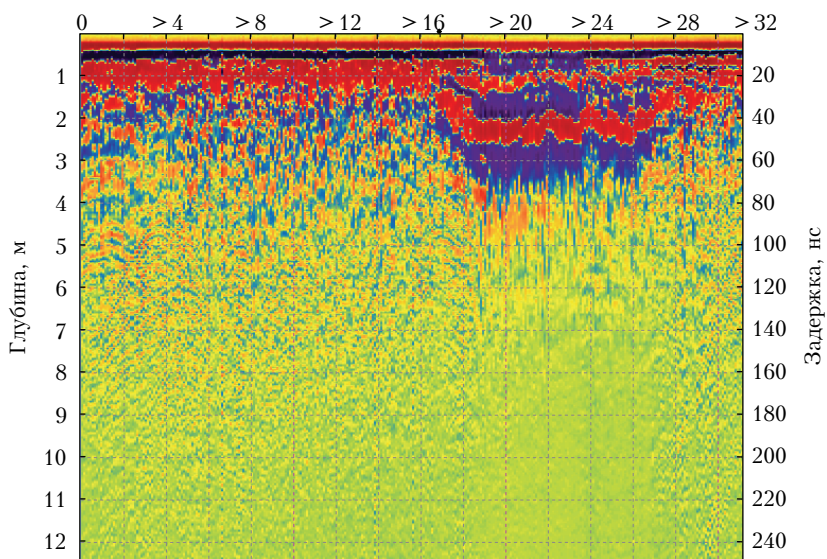


Рис. 6. Воронка на горе Стойковича вокруг камня Джона

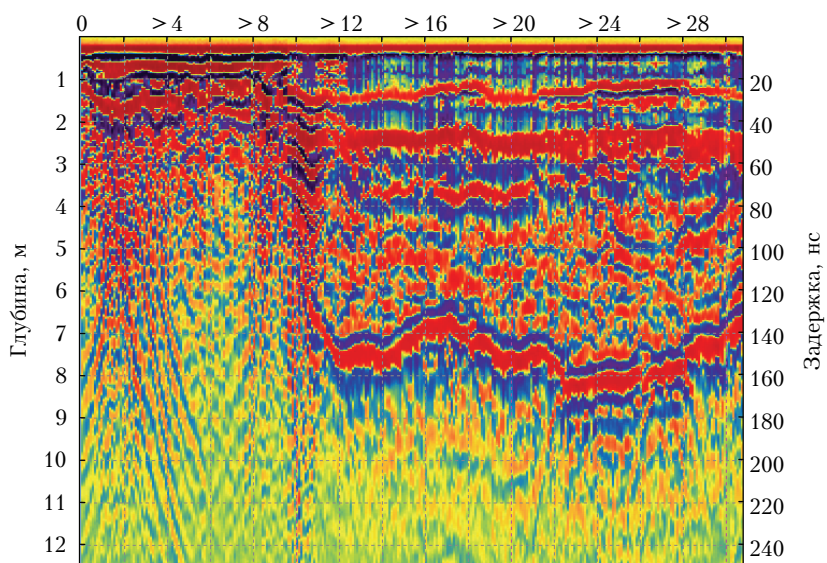


Рис. 7. Воронка № 2

Видно, что воронка имеет форму чаши, как и знаменитый Аризонский кратер, и содержит несколько слоев. Первый слой состоит из болотной растительности и тянется до глубины 2,4 м. Второй слой — из жидкого болотного ила с включениями тянется до глубины 6,9 м. Третий слой — из мерзлых неоднородных глыб — до глубины 8,3 м. Четвертый слой — вечная мерзлота с многочисленными твердыми включениями, возможно осколками Тунгусского метеорита, его нижняя граница не зафиксирована, а общая глубина составляет 10 м. Ручное бурение до 7 м подтвердило наличие темного ила.

К Сусловской воронке примыкает маленькая воронка с многочисленными включениями. Данные по ней и другим воронкам обрабатываются.

Вид и форма Сусловской воронки служат образцом для поиска других импактных воронок на болотах и в лесу.

В 1928 г. Суслов зарисовал профиль одного из бортов траншеи, прорытой экспедицией Л.А. Кулика (рис. 3).

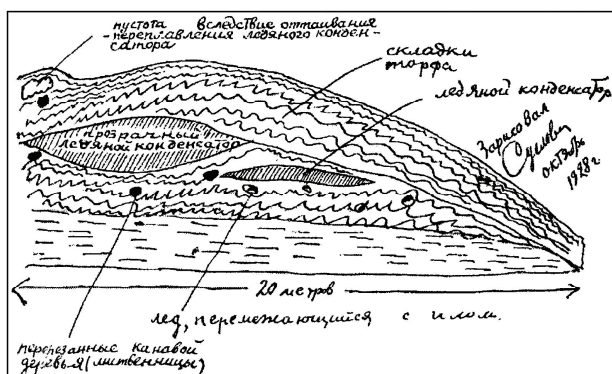


Рис. 3. Профиль разреза траншеи (рисунок Сулова)

В работе [3] высказано предположение, что прозрачный лед, вскрытый при прокладке траншеи экспедицией Кулика, может являться куском льда кометы. Их повторное обнаружение и последующий анализ представляли бы огромный интерес для науки.

По георадарным данным и результатам бурения две концентрические линзы прозрачного льда, пересеченные траншеей в 1928 г., существуют до сих пор. Лед находится в бортах воронки, начиная с глубины 1 м.

Глыбы льда наблюдаются локатором ЛОЗА практически во всех воронках, диаметр которых более 10 м. На дне Сусловской воронки лежит не менее 200 м<sup>3</sup> льда, не считая глыб, которые входят в состав стенок и вала этой воронки.

В 2010 г. была проведена георадарная съемка вдоль траншеи Л.А. Кулика и западного борта Сусловской воронки примерно в 5 м от того разреза, который показан на рис. 3. Профиль представлен на рис. 4 (см. вклейки). Соответствие материала на радарограмме определено по годографу и подтверждено при бурении.

В 2010 г. на некоторых воронках выполнено бурение, в том числе и на Сусловской воронке. Про-

бы, взятые буром, представляют собой, в основном, чистый бесцветный прозрачный лед. Часть проб — прозрачный лед с заметными оттенками красного или синего цвета. Другая часть — это непрозрачный лед чистого молочного цвета. Среди образцов попадаются экземпляры льда с явно выраженной кристаллической структурой.

Сопоставляя данные, можем полагать, что ледяные глыбы, наблюдавшиеся Куликом, были зафиксированы георадаром и обнаружены в процессе бурения. Эти результаты дают основание для обращения в РАН о финансировании экспедиции мерзлотоведов в район Тунгусской катастрофы.

В экспедиции проводились исследования потоков водорода в маршрутах на горы Фарингтон, Стойковича и вокруг Сусловской воронки. На отдельных участках получены аномально высокие потоки водорода, которые связаны с дегазацией разломных структур палеовулкана. Это подтверждает возможность эндогенной природы геохимических аномалий (повышенных концентраций микроэлементов, изотопов в слоях 1908 г.). Аномальные потоки водорода угнетающе действуют на растения, возможно этим объясняется природа светлого пятна, которое просматривается на космических снимках в эпицентре Тунгусской катастрофы.

Водородная съемка вокруг Сусловской воронки показала, что разлом не пересекает эту воронку, а находится в 15 м западнее, в месте, где проходит русло водотока, что также не противоречит ее ударному происхождению.

Следующим объектом изучения была двоякая воронка — пример падения разных фрагментов небесного тела, разнесенного во времени (рис. 5, см. вклейки).

Аномалии по водороду были найдены на профиле при подъеме на гору Стойковича, вокруг камня Джона, поэтому в экспедиции 2010 г. в этом районе были проведены георадарные исследования и получен очень интересный результат. Оказалось, что на склоне горы Стойковича вблизи камня Джона также существует воронка. Это расходится с мнением, что на склонах горы нет воронок, и свидетельствует в пользу их ударной природы (рис. 6, см. вклейки).

На рис. 7 (см. вклейки) показан профиль воронки № 2. В этой воронке было проведено бурение, и в отобранных образцах получены очень интересные данные по содержанию руды, а геологом Агафоновым найдены 20 частиц, почти целиком состоящих из цинка.

Таким образом, наши исследования подтверждают концепцию Л.А. Кулика об ударном происхождении воронок. Необходимо продолжить поиск и георадарные исследования других структур в зоне падения Тунгусского метеорита, чтобы установить полную картину разлета осколков после взрыва этого космического тела.

1. Алексеев В.А., Алексеева Н.Г., Головнев И.Г., Желтов С.Ю., Копейкин В.В., Пелехань Л.Г., Рукавишников В.А., Фальков Э.Я., Чечин В.А. Исследование воронок Тунгусского метеорита, сочетание дистанци-

онных и экспедиционных методов / Дистанционное зондирование Земли: Тезисы докл. конф. М.: ИКИ, 2010. С. 66–67.

2. *Копейкин В.В., Морозов П.А., Козляков А.Н., Беркут А.И.* Устройство для радиолокационного зондиро-

вания подстилающей поверхности. Пат. РФ № 2248585. Приоритет от 15 апреля 2003 г.

3. *Хазанович-Вульф К.К.* Загадка Суловской воронки // 100 лет Тунгусскому Кометному Телу: Мат-лы конф. 25 марта 2008 г. СПб.: Геликон, 2008. С. 81–86.

***V.A. Alekseev, N.G. Alekseeva, V.V. Kopeykin. Results of georadar and hydrogen studies of Tunguska meteorite impact craters in 2009–2010.***

Georadar studies of the impact craters near the Tunguska meteorite epicentern were conducted. Hydrogen moving was studied. Preliminary results about Tunguska meteorite fragments are discussed.