

## Неопубликованная статья.

----- Исходное сообщение -----

**Тема:** Статья в сборник ИКИ

**Дата:** Fri, 15 Mar 2013 18:04:40 +0400

**От:** Svetlana Karimova <feba@list.ru>

**Отвечать:** Svetlana Karimova <feba@list.ru>

**Кому:** lilialex <lilialex@yandex.ru>,

Vladimir Kopeikin <kopeikin@izmiran.ru>

Уважаемые авторы!

Ваша статья «Георадарное обследование воронок Тунгусского метеорита», представленная к публикации в издании «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», прошла рецензирование в редакционной коллегии издания. К сожалению, по решению редколлегии статья была отклонена от публикации по причине недостаточной обоснованности высказанных предположений и сделанных выводов.

Дополнительно, нам стало известно, что эта рукопись уже опубликована в электронном варианте.

Убедительно просим Вас впредь представлять на рассмотрение редколлегии только материалы оригинальных исследований.

Благодарим за внимание к нашему изданию!

С наилучшими пожеланиями,  
Светлана Каримова

Секретарь редколлегии периодического издания  
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли  
из космоса»

Институт космических исследований РАН  
Отдел Исследования Земли из космоса  
Тел: +74953334256

# Георадарное обследование воронок Тунгусского метеорита

В.А. Алексеев<sup>1</sup>, В.В. Копейкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ТРИНИТИ, 142190 г. Троицк Московской обл.

E-mail: [lilialex@yandex.ru](mailto:lilialex@yandex.ru)

<sup>2</sup>ИЗМИРАН им Н.В. Пушкова, 142190 г. Троицк Московской обл.

E-mail: [kopeikin@izmiran.ru](mailto:kopeikin@izmiran.ru)

В работе приведены результаты георадарного профилирования, зондирования и ручного бурения воронок Тунгусского метеорита. Показано, что все обследованные воронки имеют ударное происхождение и не связаны с подземными водоносными слоями, которые находятся ниже уровня вечной мерзлоты. Средняя глубина воронок 10 м. Практически на всех больших воронках зафиксированы глыбы льда. На воронках, где проводилось бурение, установлено, что этот лед либо прозрачен, иногда с цветными оттенками, либо имеет чистый молочный цвет. Есть основания предполагать, что это лед Тунгусской кометы.

**Ключевые слова:** Тунгусский метеорит, георадарная съемка, ручное бурение, кометный лед.

## Введение

В 1927 г. Кулик Л.А. открыл уникальный вывал леса — место падения тунгусского космического тела (ТКТ) и нашел большое количество предполагаемых кратеров (воронок) вблизи эпицентра падения частей Тунгусского метеорита. (Кулик 1939).

Схема вывала приведена на рис. 1.

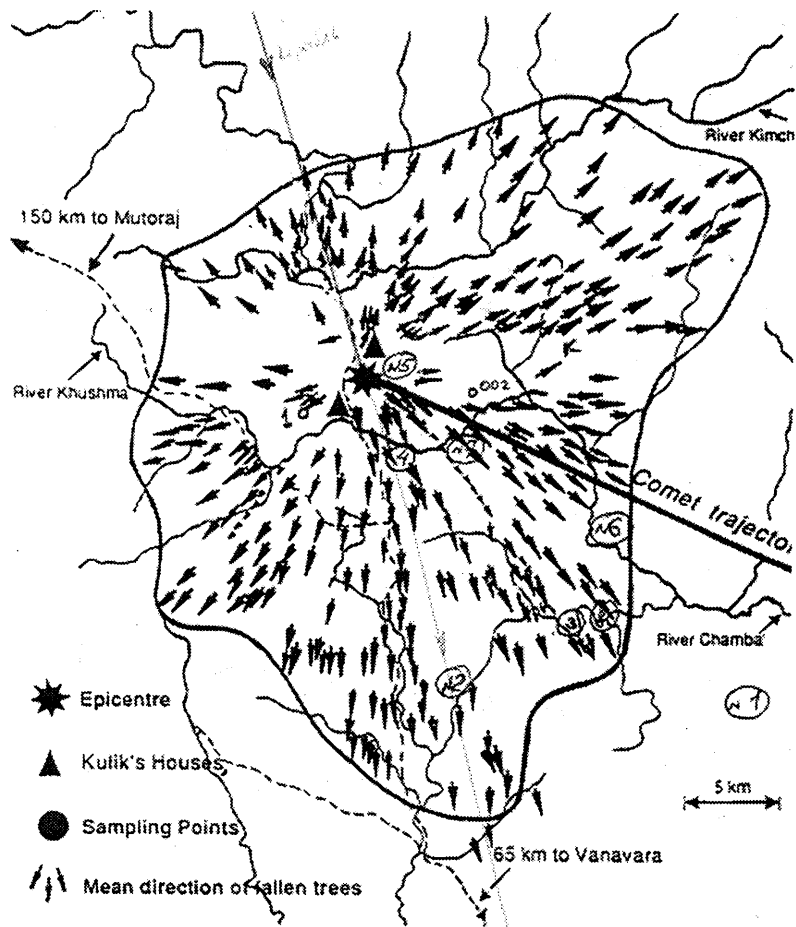


Рис. 1. Вывал леса, обнаруженный Л.А. Куликом.

Основное внимание Л.А. Кулик в своих исследованиях посвятил Суловской воронке, которая, как он определил по вывалу леса, находится в эпицентре падения метеорита.

В 1928 г. в южном борту воронки была прорыта траншея глубиной 4 м. Как отмечается в (Кандыба, 1998):

*«на глубине 1.5 м. от поверхности западного склона бугра и в 5-ти метрах от его подошвы и начала траншеи землекопы наткнулись на два относительно свежих лиственничных ствола. Эти довольно толстые стволы лежали наклонно, вершины их подняты под углом 25 и 35 градусов к горизонту и были направлены на юго-восток по азимутам 125 и 150 градусов. Под обоими стволами в окружении торфа находились линзы чистого льда. Осмотр показал, что оба дерева погибли живыми — это не были сухостойные экземпляры...»*

В своем дневнике Кулик записал:

*«Несомненно, что они (поваленные стволы — К.Х) никакого отношения к болотным образованиям не имели и участия в образовании торфяных слоев не принимали. Несомненно также и то, что их юго-восточный конец был приподнят при надвигании пластов торфа, то есть они принимали участие в этом движении. В противном случае они лежали бы плашмя параллельно погребаящим их слоям торфа. С другой стороны, наличие линз чистого льда над ними указывает на возможное первоначальное наличие пустот, то есть на то, что, по-видимому, и здесь слои торфа были сброшены на них.*

Кулик предполагал, что наличие пустот в торфе может привести к появлению линз чистого льда из-за дождей, но в таком случае обязательно в них должны были быть заморожены элементы мха, что никто не отмечает, а все, наоборот, говорят об округлой форме прозрачных ледяных глыб.

В октябре 1928 И.М. Сулов зарисовал поперечный разрез борта. Эта зарисовка приведена в (Хазанович Вульф, 2008). Не совсем понятно употребление термина «конденсатор», наверное, этим словом И.М. Сулов обозначил чистоту льда, имея ввиду слово «конденсат».

В 1929 г. в составе экспедиции Кулика участвовала болотовед Л.В. Шумилова:

*«Возраст воронки, подсчитанный по годичным слоям торфа, равен 21 году, то есть образовалась она летом 1908 г., в год катастрофы.»* (Шумилова, 1963)

После смерти Кулика в немецком плену в 1942 г., исследование тунгусской катастрофы продолжил известный космофизик Флоренский К.П. (Флоренский, 1963). Он, используя наблюдения с

самолета, не обнаружил в районе падения Тунгусского космического тела кратеров, и его доклад об этом в Академии наук повлиял на все дальнейшее исследование тунгусского метеорита на 50-летний период. Силы многочисленных исследователей были направлены на поиски рассеянного вещества тунгусского взрыва. В это же время была организована Комплексная Самодеятельная Экспедиция (КСЭ) под руководством профессора Плеханова Г.Ф. и академика медицины Васильева Н.В. Результаты этой экспедиции за 50 лет опубликованы в многочисленных сборниках. Уникальные обзоры этих работ приведены в монографиях (Васильев 2004) и (Плеханов 2005). Эти работы не касаются поисков кратера падения Тунгусского метеорита, поскольку происходили они лишь эпизодически. Изучение многочисленных округлых болотных образований проводилось известным болотоведом Львовым Г.Ф. (Львов, 1963) и Шумиловой Л.В. (Шумилова, 1963), которые считали, что найденные Л.А. Куликом кратеры (воронки) имеют термокарстовую природу и не связаны с ТКТ.

В данной работе мы опираемся на глубинные георадарные исследования, которые были проведены впервые в истории исследования ТКТ, а также на опыт исследования воронок Сихоте-Алинского метеорита, которые имеют много совпадающих элементов в своей структуре, несмотря на их разную природу. Многие исследования мы сопоставляли с наземными исследованиями прошлых лет и дешифровкой космических и авиа снимков, полученных с борта самолета в 1999 г.

На рис. 2 показан район наших исследований, куда входила Сусловская воронка, Северные острова Южного болота, а также западная часть Северного болота. Работа заключалась в георадарном профилировании и зондировании воронок.

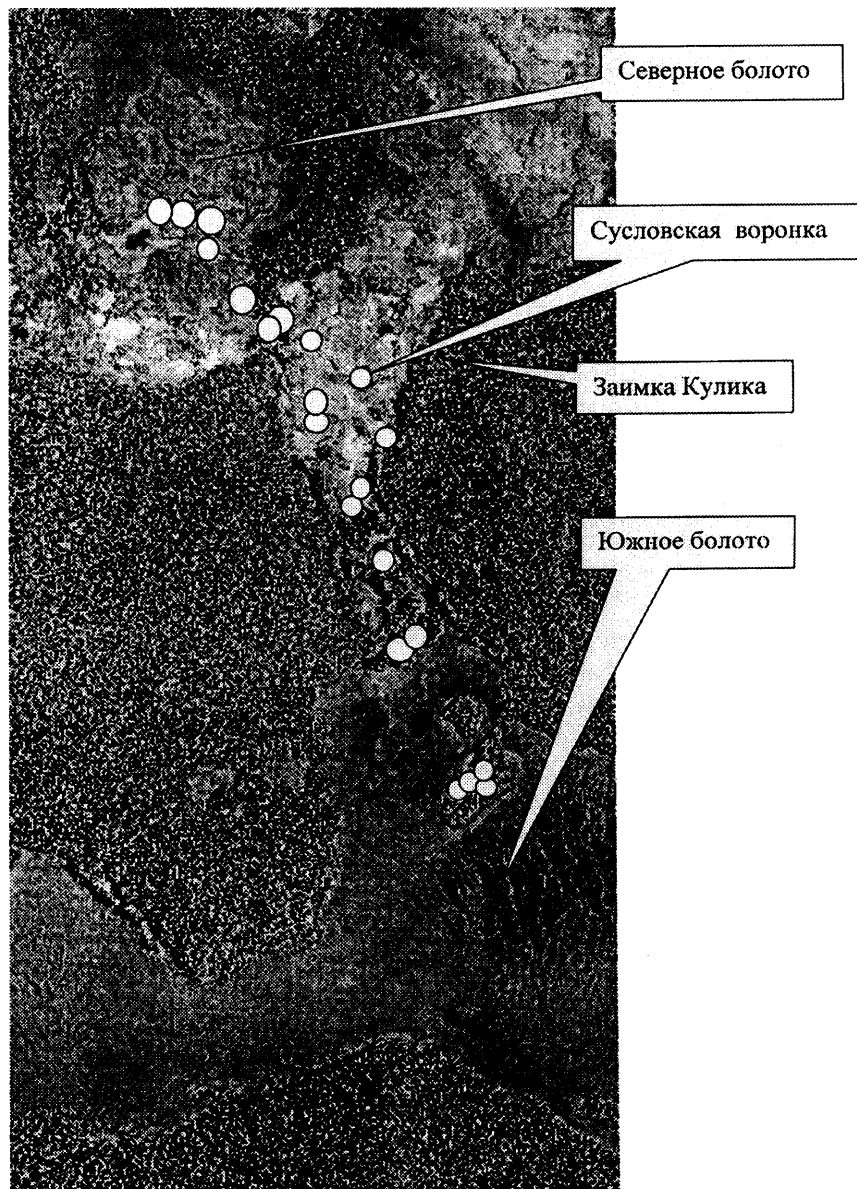


Рис. 2. Расположение некоторых из исследованных нами воронок, нанесенное на аэрофотоснимок 1999 г.

## Материалы и методы

В экспедициях 2009 г. и 2010 г. в районе падения Тунгусского метеорита было проведено георадарное обследование 40 воронок.

Для этой цели был использован сверхширокополосный импульсный георадар «Лоза» со следующими техническими характеристиками (Копейкин и др., 2003):

1. Длительность импульса, представляющего собой один период колебания тока в антенне 5 нс
2. Энергетический потенциал прибора не менее 120 ДБ
3. Импульсная мощность передатчика 1 МВт
4. Антенны передатчика и приемника - резистивные диполи с центральной частотой 100 МГц.

Диаграмма направленности прибора около 50 градусов, она определяется характеристиками подстилающей поверхности, которые также определяют форму излученного импульса. Разрешение прибора по глубине и расстоянию колеблется в проведенных съемках от 5 до 10 см.

На рис. 6-9 приведены профили (сечения) воронок, которые представляют собой записи радарограмм, снятые с шагом 10 см. вдоль трассы. На вертикальной оси с правой части рисунка указана задержка сигнала в наносекундах, на оси с левой части рисунка указана глубина в метрах, пересчитанная через среднюю скорость прохождения сигнала, вычисленную методом ОПВ – общего пункта возбуждения (зондированием).

Методика георадарной съемки включает в себя два основных способа: профилирование и зондирование. Профилирование предполагает перемещение радиолокатора по трассе с закрепленными на фиксированном расстоянии между собой антеннами передатчика и приемника (в нашем случае – 1.5 м.). Прибор регистрирует время прохождения сигнала до отражающего объекта, которое зависит как от глубины его залегания, так и от скорости распространения радиоволн в среде, которая для реальных почв может меняться почти в 10 раз.

Для того, чтобы исключить неоднозначность между скоростью радиоволны и глубиной залегания отражающего объекта, используется метод зондирования, или метод ОПВ.

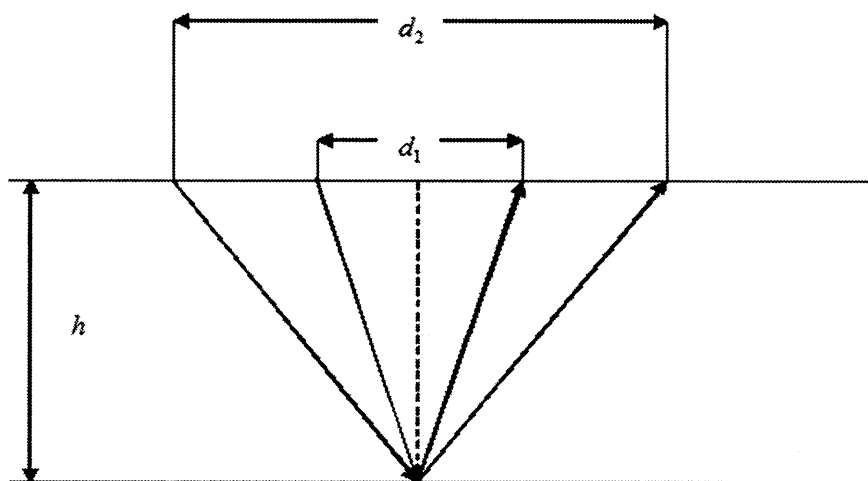


Рис. 3. Схема расположения антенн передатчика и приемника при зондировании.

В этом методе антенны передатчика и приемника перемещаются в противоположных направлениях и строится годограф — функция задержки сигнала от расстояния между антеннами (рис. 3). По годографу определяется глубина залегания слоя, а также скорость распространения волны в среде, однозначно связанная с его диэлектрической проницаемостью.

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d_2^2 (ct_1 + d_1)^2 - d_1^2 (ct_2 + d_2)^2}{(ct_2 + d_2)^2 - (ct_1 + d_1)^2}} \quad (1)$$

$$V = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{d_1^2 - d_2^2}{(ct_1 + d_1)^2 - (ct_2 + d_2)^2}} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{c^2}{V^2} \quad (3)$$



В формулах (1-3)  $h$  - глубина залегания отражающей границы,  $d$  - расстояние между антеннами,  $c$  - скорость света в вакууме,  $V$  - скорость радиоволны в среде,  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость слоя.

Амплитуда сигналов отображена цветовой гаммой «географической карты»: положительные амплитуды — тона красного, отрицательные амплитуды — тона синего. Никакой дополнительной обработки записей сигналов не проводилось. Размер по горизонтали указан в метрах.

## Результаты

Воронки Тунгусского метеорита занимают площадь в 2.5 тыс. кв. км. (Васильев, 2004).

Обследованные нами 40 воронок расположены в эпицентре взрыва, на удалении от Суловской не более, чем на 1.5 км.

Многочисленные фрагменты ТКТ падали в тайгу, в болото, на склоны гор.

Форма воронок связана с механическими свойствами среды, с которой фрагменты испытали соударение — плотности, вязкости, упругости т.д. Все обследованные нами воронки можно разделить на три основных типа:

1 тип. Блюдцеобразные. Имеют форму блюдечка со стенками положительной кривизны. Вокруг воронки имеется вал.

2 тип. Кувшинообразные. Имеют форму кувшина с вертикальными или с отрицательной кривизны стенками. Внешний вал отсутствует.

3 тип. Клинообразные. Имеют форму клина с крутыми стенками положительной кривизны. Внешний вал отсутствует. Занимает промежуточное положение между 1 и 2 типом.

Основные особенности формы воронок могут быть пояснены численным моделированием падения капли воды в мелкий и глубокий бассейн (Поттер, 1975).

Падение капли в мелкий бассейн (Рис. 4) объясняет особенности первого типа: блюдцеобразную форму и наличие внешнего вала.

Падение капли в глубокий бассейн (Рис. 5) объясняет возникновение стенок с отрицательной кривизной и вспучивание дна.

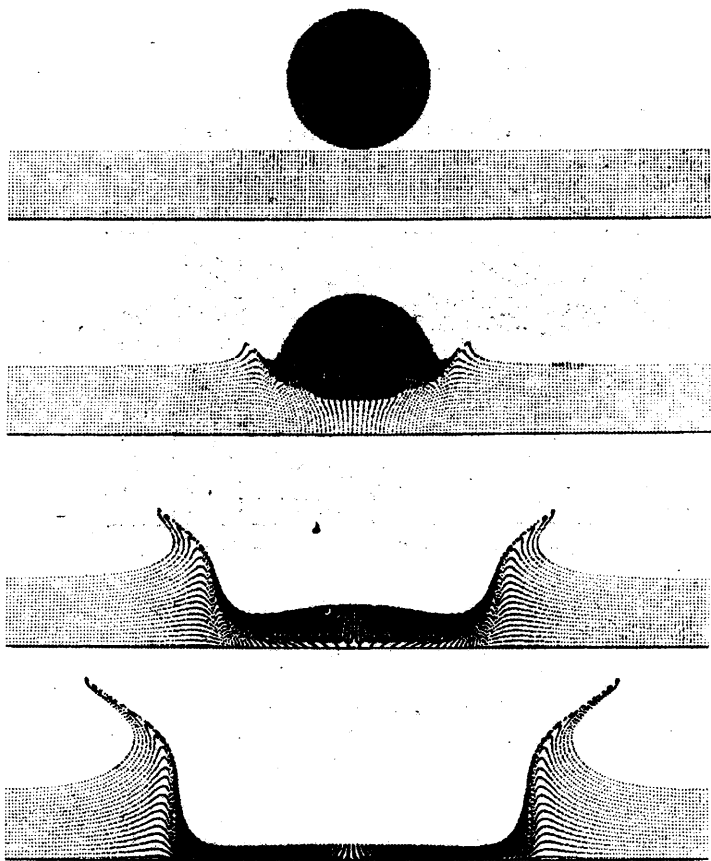


Рис. 4. Падение капли в мелкий бассейн.

К первому типу относится Сусловская воронка. Ее сечения север-юг и запад-восток приведены на рис. 6 и 7. На них отмечаются ледяные глыбы, как в составе стенок, так и на дне. Лед, который указан на радарограммах всех воронок выносками, определен по электрической проницаемости методом ОПВ по снятым годографам. Среднее значение электрической проницаемости 2.55 единиц, с разбросом по измерениям не более 10 процентов. Там, где проводилось бурение, радарные данные о наличии льда подтверждены поднятыми из скважины образцами.

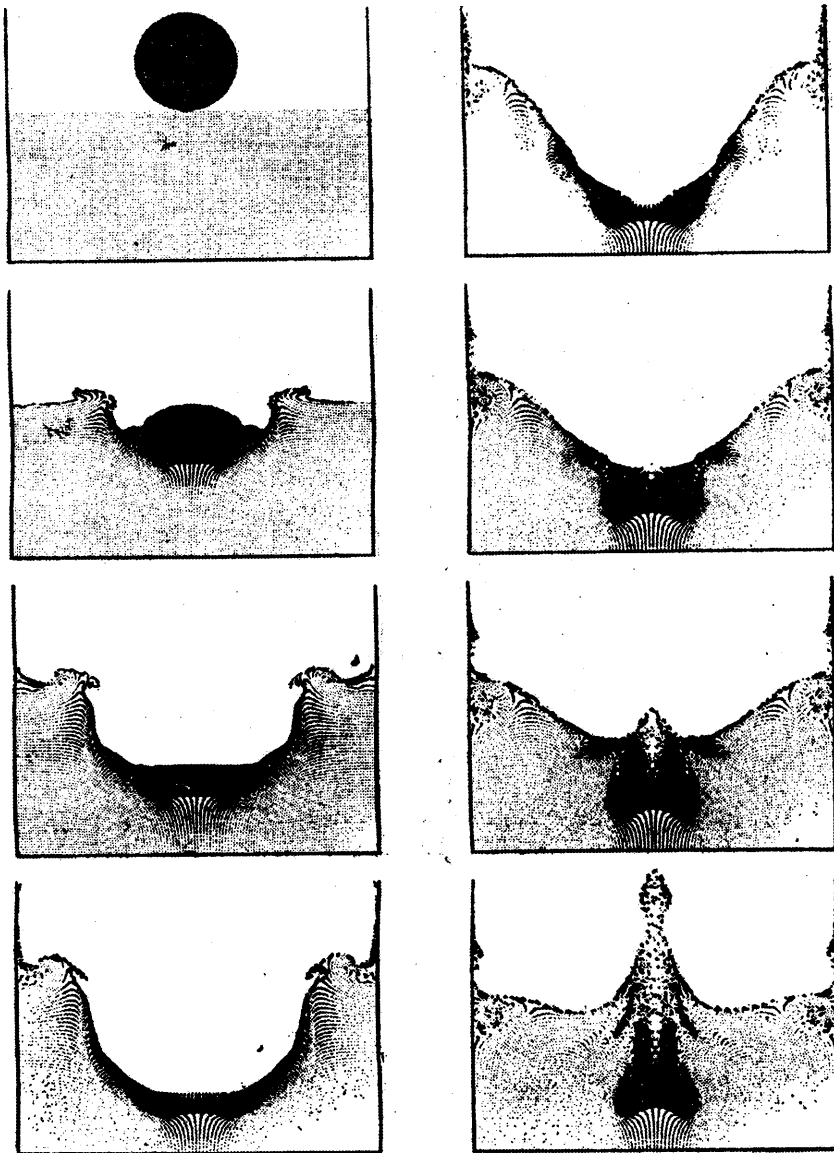


Рис. 5. Падение капли в глубокий бассейн.

В 1930 г. Л.А. Кулик бурил Сусловскую воронку. На глубине 25 метров из скважины пошла вода. Она растопила часть ледяных глыб возле устья скважины на дне. Результат действия подземных вод хорошо виден на рис. 6. Возле устья ледяные глыбы отсутствуют, не растаявшие имеют уклон к северу, замерзшая подземная вода застыла в виде гладкой поверхности. Положение устья скважины указано выноской.

Воронка второго типа приведен на рис. 8. Такие воронки характерны для падения фрагментов космического тела в болото, имеют вертикальные или отрицательной кривизны стенки и вспучивание дна в центре.

Воронки третьего, промежуточного типа (Рис. 9), имеют клинообразную форму сечения. Они, как правило, находятся на границе болота, рядом с тайгой. В них также отмечается наличие глыб льда.

## **Обсуждение результатов**

Все обследованные нами воронки расположены в вечной мерзлоте и имеют среднюю глубину 10 метров. Отчетливо прослеживается нижняя граница воронок, что говорит об отсутствии их связи с подземными водами, залегающими ниже слоя мерзлоты, которые могли бы быть причиной их образования. Гипотеза о том, что они имеют термокарстовое происхождение и расширяются в годичных циклах, не соответствует действительности: следы раскопа Кулика 1928 года существуют до сих пор и находятся на том же самом месте.

Во многих воронках наблюдается подъем грунта в центре, как это следует из хорошо известных астроблем.

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

## **Заключение**

Несмотря на то, что после экспедиции К.П. Флоренского большинство исследователей придерживаются мнения об отсутствии кратеров Тунгусского метеорита, постепенно число сторонников ги-

потезы о падении ледяной кометы и наличии таких кратеров растет. Это не удивительно, поскольку в этом случае исчезают все противоречия и загадки Тунгусского феномена.

Вот основания для такого вывода.

1. За несколько дней до события в масштабах всей Земли наблюдались аномальные явления — «предвестники», которые заключались в необычно высокой светимости вечернего и ночного неба, а так же в появлении необычных «серебристых облаков». Это Земля вошла в хвост кометы.

2. Во время падения кометы слышалась, как отмечали свидетели, непрерывная «канонада». Это перегретая во время падения ледяная глыба разрывалась на части и даже меняла траекторию полета.

3. Окончательный взрыв произошел на высоте от 5 до 10 км. Глыбы льда, не успевшие превратиться в пар, выбили на земле кратеры на территории более двух тысяч квадратных километров. Сейчас эти кратеры называют воронками.

4. Свидетели рассказывали о многочисленных «кусочках цветного льда», рассеянных по тайге сразу же после взрыва, которые быстро растаяли. В поваленных деревьях наблюдаются повреждения, не имеющие иного объяснения, как аналогичными кусками льда: древесина повреждена, а предмет, повредивший ее, отсутствует.

5. Все остатки кометы, не успевшие испариться и лежавшие на поверхности, или близко к ней, растаяли, поскольку было летнее время. Этим объясняется отсутствие находок тела «Тунгусского метеорита».

6. Большие глыбы льда, выбившие воронки, могли остаться целыми, поскольку попали в вечную мерзлоту - в природный холодильник.

В (Хазанович-Вульф, 2008) высказано предположение, что прозрачный лед, вскрытый при прокладке траншеи экспедицией Кулика, есть ни что иное, как фрагменты кометы.

*«Их повторное обнаружение и последующий анализ представляли бы огромный интерес для науки».*

Мы согласны с этим мнением. По георадарным данным и результатам бурения, две концентрические линзы прозрачного льда, которые были пересечены траншеей в 1928 г., существуют до сих пор. Лед находится в бортах воронки, начиная с глубины 1 м.

Глыбы льда наблюдаются лоатором «Лоза» практически во всех воронках, диаметр которых более 10 м. Только на дне Сусловской

воронки лежит не менее 200 кубометров льда, не считая глыб, которые входят в состав стенок и вала этой воронки.

Форма всех обследованных воронок говорит о том, что они ударного происхождения и причиной их является масса льда, оставшаяся в их стенках и россыпью на дне.

Сопоставляя все полученные данные, у нас есть основания предполагать, что лед и твердые фрагменты Тунгусской кометы могут быть найдены и надежно идентифицированы. Для этого необходимо провести геохимическое исследование льда и окружающих пород в самих воронках и вблизи них.

По крайней мере, эти данные могут служить обоснованием просьбы о выделении РАН финансирования экспедиции специалистов-гляциологов в район падения метеорита.

## Литература

*Кандыба Ю.Л.* Трагедия Тунгусского метеорита // Красноярск: Изд. Сибирского общественно-государственного фонда «Тунгусский космический феномен», 1998. 416 с.

*Васильев Н.В.* Тунгусский метеорит // М.: Русская панорама, 2004. 360 с.

*Флоренский К.П.* Предварительные результаты тунгусской метеоритной комплексной экспедиции в 1961 г. // Метеоритика, 1963. Вып. 23. С. 3-29.

*Плеханов Г.Ф.* Тунгусский метеорит. Воспоминания и размышления. Изд. Томского университета. 1075.

*Львов Ю.А., Иванова Г.М.* // Проблема Тунгусского метеорита: в сб. ст. Томск. Изд. Томского университета. 1963. С 48-58.

*Хазанович-Вульф К.К.* Загадка Суловской воронки. // 100 лет Тунгусскому Кометному Телу. Материалы конференции 25 марта 2008 г. С.-Петербург: Изд-во «Геликон», 2008. С. 81-86.

*Поттер Д.* Вычислительные методы в физике // М.: Мир, 1975. 392 с.

*Шумилова Л.В.* Очерк природы района падения Тунгусского метеорита. // Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд. Томского университета 1963.- С.22-23.

*Копейкин В.В., Морозов П.А., Козляков А.Н., Беркут А.И.* Устройство для радиолокационного зондирования подстилающей поверхности. Патент РФ № 2248585. Приоритет от 15 апреля 2003 г.

# GPR survey of the Tungus meteorite craters

V.A. Alekseev<sup>1</sup>, V. V. Kopeikin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*TRINITI, 142190 Troitsk Moscow Region*

*E-mail: [lilialex@yandex.ru](mailto:lilialex@yandex.ru)*

<sup>2</sup>*IZMIRAN of N.V. Pushkov, 142190 Troitsk Moscow Region*

*E-mail: [kopeikin@izmiran.ru](mailto:kopeikin@izmiran.ru)*

Results of GPR profiling, sounding and manual drilling of the Tungus meteorite craters are given in work. It is shown that all surveyed craters have a shock origin and aren't connected with underground water-bearing layers which are below permafrost level. Average depth of craters is 10 m. Practically on all big craters ice blocks are detected. On craters where drilling was carried out, it is established that this ice or is transparent, sometimes with color shades, or has pure dairy color. There are bases to assume that it is ice of the Tungus comet.

**Keywords:** Tungus meteorite, GPR survey, manual drilling, comet ice.