КАРТОГРАФИЯ

© И. В. Флоринский, 2008

К 100-летию Тунгусского феномена. Цифровое моделирование рельефа в районе эпицентра

И. В. Флоринский

Природа болида, взорвавшегося 30 июня 1908 года в 0 ч 14,5±0,8 мин по Гринвичу над сибирской тайгой в районе реки Подкаменная Тунгуска, до сих пор остается дискуссионной [1]. Масса Тунгусского космического тела (ТКТ) составляла не менее 1 млн т. Взрыв произошел на высоте 8±2 км в точке с координатами 60°53'09" с. ш. и 101°53'40" в. д. (эпицентр Фаста). Энергия взрыва составила не менее 30 Мт тротилового эквивалента. Площадь области лесоповала, вызванного взрывом, превышает 2000 км^2 [1].

Одной из наиболее обоснованных является кометная гипотеза природы ТКТ [1]. Для более точной аргументации природы Тунгусского феномена необходим анализ вещества ТКТ. На протяжении нескольких десятков лет основным направлением полевых исследований в районе эпицентра был поиск распыленного вещества и микрочастиц ТКТ [1, 7, 8, 10]. Анализ микрочастиц в смоле деревьев, переживших катастрофу [10], и исследование изотопного состава углерода, азота и водорода в верховых торфяниках Sphagnum fuscum [7] позволяют говорить о неравномерности пространственного распределения вещества ТКТ в районе эпицентра. Предполагается, что это связано с вторичными взрывами фрагментов ТКТ на высоте 1–2 км, а также с падением на землю мелких осколков ледяного ядра кометы и их последующим таянием [7].

При подобном сценарии рельеф земной поверхности должен был частично определить перераспределение в ландшафте растаявшего кометного вещества. Для прогноза участков местности с повышенным содержанием вещества ТКТ могут быть полезны карты зон относительной аккумуляции.

В приближении гладкой поверхности действуют два механизма локальной аккумуляции потоков: их конвергенция и относительное замедление [4]. Мерой конвергенции потоков служит горизонтальная кривизна поверхности k_h. Потоки дивергируют при $k_h > 0$ и конвергируют при $k_h < 0$. Мера относительного замедления потоков – вертикальная кривизна поверхности k_v. Потоки ускоряются при $k_v > 0$ и замедляются при $k_v < 0$. Определения и формулы k_v и k_h неоднократно публиковались ранее [4]. На участках, где обе кривизны имеют отрицательные значения, одновременно происходят конвергенция и замедление потоков. Такие участки называют зонами относительной аккумуляции.

На картах зон относительной аккумуляции отображаются участки местности, где особенности геометрии рельефа обеспечивают локальное накопление мигрирующих в ландшафте веществ – воды, растворенных или взвешенных в ней веществ и других жидкостей [5]. Для получения карт зон относительной аккумуляции, транзита и сноса используются цифровые модели k_v и k_h. Исходными данными для их расчета служат цифровые модели высот (ЦМВ).

Рассмотрим участок, расположенный в непосредственной близости от эпицентра взрыва ТКТ – в междуречье рек Кимчу и Хушма. Размеры участка составляют 8600×8450 м (рис. 1). В пределах участка находится Куликовский палеовулкан триасового возраста [2], выраженный в рельефе кольцевой цепью сопок, окружающих заболоченную котловину.

ЦМВ участка была получена с помощью цифрования горизонталей топографической карты масштаба 1:100 000. Исходная нерегулярная ЦМВ включает в себя 4800 точек. С помощью триангуляции Делоне и гладкой интерполяции кусочными полиномами была получена матрица высот 431×423 с шагом

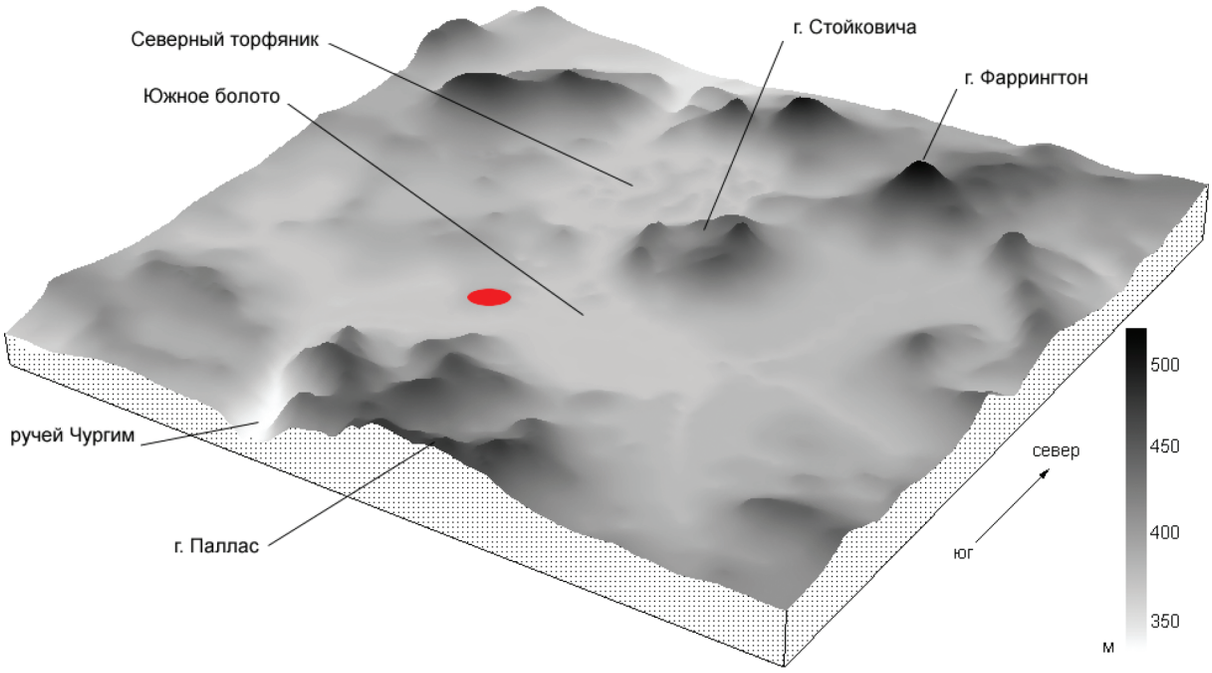

Рис. 1. Блок-диаграмма района эпицентра взрыва Тунгусского метеорита (перспективное изображение, 5-кратное увеличение вертикального масштаба). Красная точка – эпицентр Фаста

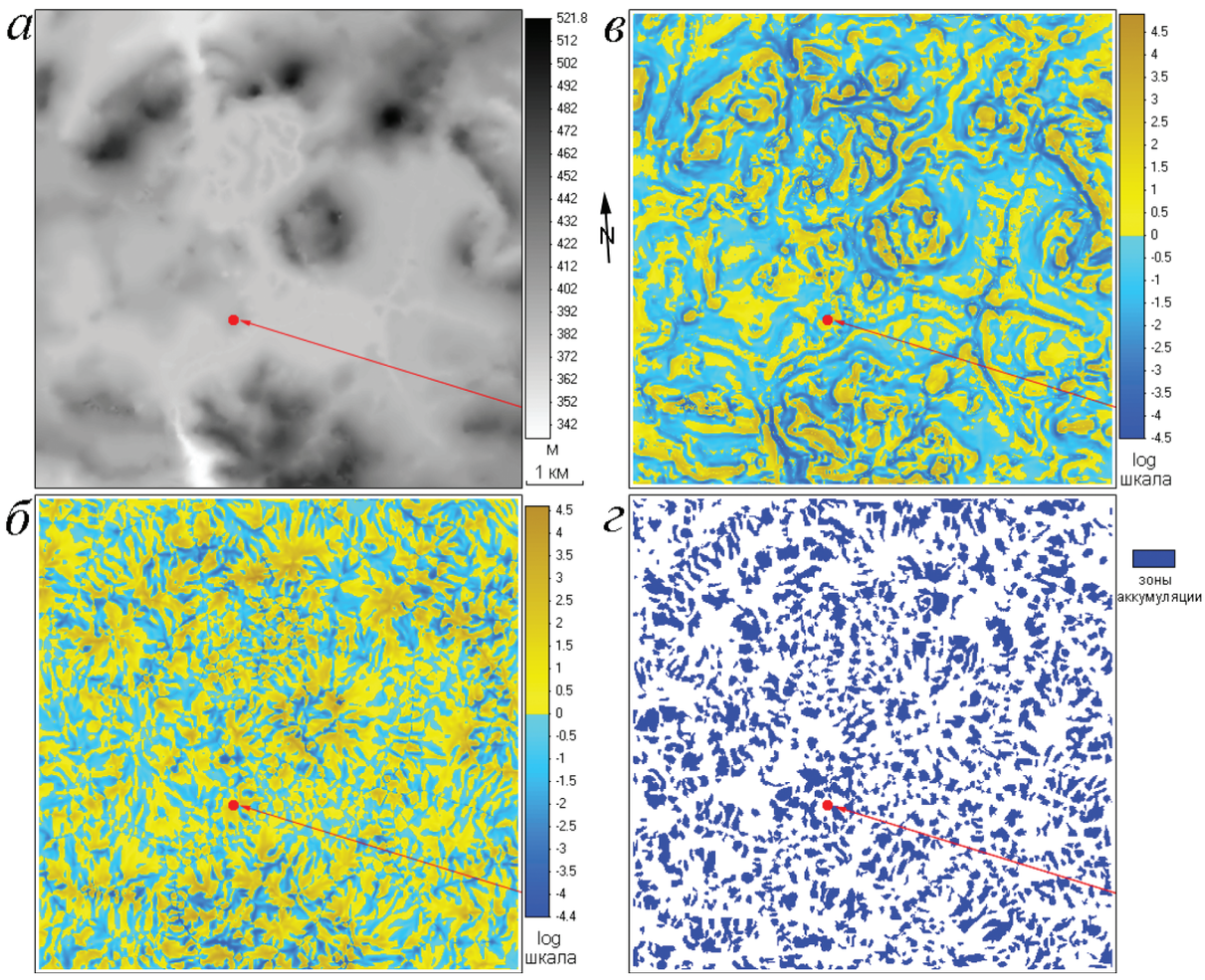

Рис. 2. Район эпицентра взрыва Тунгусского метеорита:

а – высоты; *б* – горизонтальная кривизна; *в* – вертикальная кривизна; *г* – зоны относительной аккумуляции; красная точка – эпицентр Фаста; красная стрелка – предполагаемая траектория полета ТКТ

сетки 20 м (см. рис. 2, *а*). Для подавления высокочастотного шума регулярная ЦМВ была сглажена с помощью скользящего окна 3×3. По сглаженной ЦМВ с помощью метода, опубликованного в работе [6], были рассчитаны модели k_h и k_v (см. рис. 2, *б*, *в*). На основе этих моделей получена карта зон относительной аккумуляции (см. рис. 2, *г*). Все модели имеют разрешение 20 м.

Чтобы избежать потери информации о пространственном распределении значений k_v и k_h, при картографировании было применено логарифмическое трансформирование их значений (см. рис. 2, *б*, *в*). Учитывалось, что динамический диапазон этих характеристик содержит положительные и отрицательные значения. Составление ЦМВ и построение блок-диаграммы (см. рис. 1) проведены с помощью программы Surfer 6.04. Интерполяция, расчеты и картографирование (см. рис. 2) выполнены с использованием программы LandLord 4.0 [3].

На блок-диаграмме (см. рис. 1) хорошо видна кальдера Куликовского палеовулкана. На карте k_v (см. рис. 2, *в*) в трех километрах северо-восточнее эпицентра выделяется кольцевая структура – центральный выводной канал палеовулкана (гора Стойковича).

Карта k_h (см. рис. 2, *б*) показывает области конвергенции и дивергенции потоков – соответственно синие и желтые участки изображения. Области конвергенции и дивергенции отображают соответственно отроги долин и хребтов. Эти области формируют т. н. потоковые структуры. В пределах данного участка потоковые структуры хорошо проявляются на склонах сопок (см. рис. 2, *б*). Карта k_v (см. рис. 2, *в*) отображает области относительного замедления и ускорения потоков – соответственно синие и желтые участки изображения. На ней, в частности, устанавливаются бровки и подножия сопок.

Места предполагаемого падения растаявших мелких осколков ледяного ядра кометы [7] неизвестны и не могут быть установлены. Поэтому использовать известные методы цифрового моделирования рельефа [5], чтобы указать пути миграции и аккумуляции растаявшего кометного вещества, невозможно. На карте зон относительной аккумуляции (см. рис. 2, *г*) видны все участки местности, где особенности геометрии рельефа теоретически могли обеспечить локальное накопление кометного вещества. Карта может быть использована для оптимизации маршрутов отбора почвенных образцов или торфяных колонок.

Очевидно, что точность и разрешение ЦМВ и полученных морфометрических карт определяются характеристиками оцифрованной топографической карты (высота сечения рельефа 20 м, на выположенных участках проведены дополнительные горизонтали). Для выположенных заболоченных участков точность как топографической карты, так и рассчитанных цифровых моделей рельефа явно недостаточна. Более точная ЦМВ и карта зон относительной аккумуляции района Тунгусской катастрофы может быть получена на основе материалов крупномасштабной маршрутной аэрофотосъемки, проведенной экспедицией «Тунгуска-99» [9]. Для описания заболоченных участков целесообразно использовать информацию не о высоте дневной поверхности, а о глубине болот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бронштэн В. А.* Тунгусский метеорит: история исследования. – М.: А. Д. Сельянов, 2000. – 310 с.

2. *Сапронов Н. Л., Соболенко Н. Л.* Некоторые черты геологического строения Куликовского палеовулкана триасового возраста (район падения Тунгусского метеорита в 1908 г.) // Проблемы метеоритики. – Новосибирск: Наука, 1975. – С. 13–19.

3. *Флоринский И. В., Грохлина Т. И., Михайлова Н. Л.* LANDLORD 2.0: система анализа и картографирования геометрических характеристик рельефа // Геодезия и картография. – 1995. – № 5. – С. 46–51.

4. *Florinsky I. V.* Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations // Progress in Physical Geography. – 1998. – Vol. 22. – № 1. – P. 33–60.

5. *Florinsky I. V.* Solving three problems of exploration and engineering geology by digital terrain analysis // International Journal of Ecology and Development. – 2007. – Vol. 8. – № F07. – P. 52–65.

6. *Florinsky I. V.* Computation of the third-order partial derivatives from a digital elevation model // International Journal of Geographical Information Science. – 2009. – Vol. 23. – № 2 . – P. 213–231.

7. *Kolesnikov E. M., Boettger T., Kolesnikova N. V.* Finding of probable Tunguska Cosmic Body material: isotopic anomalies of carbon and hydrogen in peat // Planetary and Space Science. – 1999. – Vol. 47. – № 6 – 7. – P. 905–916.

8. *Kolesnikov E. M., Hou Q. L., Xie L. W., Kolesnikova N. V.* Finding of probable Tunguska Cosmic Body material: anomalies in platinum group elements in peat from the explosion area // Astronomical and Astrophysical Transactions. – 2005. – Vol. 24. – № 2. – P. 101–111.

9. *Longo G., di Martino M.* Remote sensing investigation of the Tunguska explosion area // Proceedings of the SPIE. – 2003. – Vol. 4879. – P. 326–333.

10. *Serra R., Cecchini S., Galli M., Longo G.* Experimental hints on the fragmentation of the Tunguska cosmic body // Planetary and Space Science. – 1994. – Vol. 42. – № 9. – P. 777–783.