

МАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ ТУНГУССКИХ СОБЫТИЙ 1908 ГОДА

В. В. Шайдуров

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44
E-mail: shaidurov04@mail.ru

Предлагается новое объяснение геомагнитного эффекта, зарегистрированного магнитографами Иркутской обсерватории во время тунгусской катастрофы 1908 года. Эффект состоял в локальном возмущении геомагнитного поля, начавшемся через две с половиной минуты после основного взрыва в эпицентре тунгусских событий в бассейне реки Подкаменная Тунгуска Красноярского края. Возмущение продолжалось 6 часов и носило немонотонный характер. К настоящему времени выдвинуто несколько гипотез для объяснения этого эффекта. Но большая часть этих гипотез не согласуется с другими данными, а остальные пока не подтверждены количественными показателями или модельными расчетами. Излагаемое здесь объяснение основано на установленном факте распыления в атмосфере микрочастиц и субмикронных вкраплений железа и его окислов в результате абляции и взрыва как главной части тунгусского космического тела, так и его других фрагментов. При остывании этих микрочастиц и вкраплений ниже определенной температуры (называемой точкой Кюри) в магнитном поле Земли за счет хорошо изученного эффекта термонамагничивания они получили значительный удельный магнитный момент. После этого они двигались с учетом взаимодействия с магнитным полем Земли, преимущественно вдоль магнитных силовых линий. В результате осаждения они образовали зоны повышенной намагниченности и повышенной магнитной восприимчивости почв в районе тунгусской катастрофы. Эти зоны тщательно выделены А. П. Бояркиной и С. Д. Сидорас в ходе палеомагнитных исследований рыхлых осадочных пород района тунгусской катастрофы. Причем они существенно отличаются от зон повышенного выпадения других немагнитных материалов. Более того, геометрический анализ зон выпадения магнитных материалов позволяет оценить наклон траектории главного космического тела. Эта оценка в сочетании с другими данными дает довольно большой угол входа тунгусского космического тела к поверхности Земли – около 76°. Такая величина угла находится в согласии с результатами современного математического моделирования высоты взрыва главного тунгусского космического тела.

Ключевые слова: тунгусское космическое тело, микрочастицы и субмикронные вкрапления железа и его окислов, термонамагниченность, палеомагнитные свойства почвы.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 624–631**THE MAGNETIC EFFECTS OF THE TUNGUSKA EVENTS IN 1908**

V. V. Shaydurov

Institute of Computational Modelling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: shaidurov04@mail.ru

In the paper a new explanation for the magnetic effect registered by magnetographs of the Irkutsk Observatory during the Tunguska catastrophe in 1908 is presented. The effect was due to a local perturbation of the geomagnetic field, which began two and a half minutes after the main explosion at the epicenter of the Tunguska event in the basin of the Podkamennaya Tunguska River in Krasnoyarsk Region. The disturbance lasted for 6 hours and had a non-monotonic behavior. By now, several hypotheses have been proposed to explain this effect. But the most part of them is not consistent with other data, and the others have been not yet confirmed by quantitative parameters or model computations. The present explanation is based on the established fact of the sputtering of microparticles and submicron inclusions of iron and its oxides in the atmosphere as a result of the ablation and the explosion of the main part of the Tunguska cosmic body and its other fragments. These microparticles and inclusions, when cooling below a certain temperature (called the Curie point) in the Earth's magnetic field due to the well-studied effect of termomagnetization, received a significant unit magnetic moment. After that they moved with regard to the interaction with the Earth's magnetic field, mainly along the magnetic field lines. In consequence of the deposition, they formed zones of high magnetization and high magnetic susceptibility of soils in the Tunguska catastrophe area. These zones were carefully marked out by

A. P. Boyarkina and S. D. Sidoras during the paleomagnetic studies of friable sediments in the Tunguska catastrophe area. Moreover, they differ significantly from the areas of increased deposition of other, non-magnetic materials. Furthermore, the geometrical analysis of deposition areas of magnetic materials admits estimating the trajectory slope of the main cosmic body. This estimation in combination with other data gives a quite large entrance angle of the Tunguska cosmic body to the surface of the Earth about 76° . This angle magnitude is in agreement with the results of the modern mathematical modeling of the explosion height of the main part of the Tunguska cosmic body.

Keywords: Tungus cosmic body, microparticles and submicronic inclusions of iron and its oxides, thermomagnetization, paleomagnetic properties of soil.

Введение. В течение нескольких минут после полуночи 30.06.1908 г. по гринвичскому времени Земля пересекла траекторию осколков разрушенного космического тела. Большая часть этих осколков сгорела, ионизировалась, взорвалась высоко в атмосфере, вызвав ряд воздушных и наземных эффектов [1–3].

Самые сильные наземные эффекты проявились в хорошо известной и основательно исследованной местности в бассейне реки Подкаменная Тунгуска Красноярского края с координатами «эпицентра» $60^\circ 53'$ с. ш. и $101^\circ 53'$ в. д., где произошло наибольшее поражение растительности и местности.

Поскольку эти события происходили недалеко от Иркутской магнитной обсерватории (~ 900 км), по сравнению с дистанциями до других обсерваторий, то в 1959 г. К. Г. Иванов провел тщательный осмотр магнитограмм, соответствующих этому событию [4]. В результате неожиданно обнаружилось геомагнитное явление, начавшееся через 2–3 минуты после взрыва и продолжавшееся 5–6 часов.

Тогда ученые запросили магнитограммы за период 25 июня – 5 июля 1908 г. во всех обсерваториях мира, функционировавших в 1908 г. 18 обсерваторий любезно прислали копии магнитограмм этого периода. Их анализ показал отсутствие отчетливо выраженных необычных геомагнитных эффектов. Лишь на магнитограммах Свердловской (Екатеринбургской) обсерватории, находящейся на расстоянии ~ 2000 км от эпицентра, обнаружались небольшие особенности, которые можно отнести к последствиям тунгусских событий с большой натяжкой [5; 6].

Таким образом, возмущение геомагнитного поля носило локально-региональный характер. Для более точного выявления этого эффекта из наблюдавшихся изменений компонент магнитного поля исключили суточную вариацию, зависящую главным образом от Солнца. Получившиеся графики приведены на рис. 1. Напомним, что H -компонента характеризует горизонтальную составляющую вектора магнитного поля, Z -компонента – вертикальную, а D -компонента – восточную составляющую.

Необычный эффект этих вариаций получил различные толкования, особенно по некоторой аналогии с геомагнитными эффектами, вызванными ядерными взрывами. Но при ядерных взрывах вызванные возмущения геомагнитного поля начинались с момента взрыва и продолжались максимум 2 часа. А при тунгусских событиях они начались через две с половиной минуты после взрыва и продолжались около 6 часов [7].

В научной литературе предложено несколько возможных механизмов, порождающих магнитный эффект при воздействии крупных космических тел на

атмосферу Земли [4–21]. Большая часть из них не выдержала проверки в случае тунгусских событий, но несколько механизмов не потеряли своей актуальности: возмущение системы ионосферных токов [4–6; 19–21], образование дипольного момента в плазменном следе [11], магнитное возмущение, вызванное ударной волной [11; 16], магнитогидродинамический эффект плюма, распространившегося вдоль траектории космического тела [8; 9]. Конечно, эти механизмы могут вносить свой вклад в магнитный эффект взаимодействия космических тел с атмосферой Земли и приводить к возмущению геомагнитного поля в своих пространственно-временных масштабах. Но некоторые противоречия и плохо объясняемые количественные характеристики в случае тунгусских событий не дают оснований считать один из этих механизмов в качестве основного, порождающего наблюдаемые вариации магнитного поля.

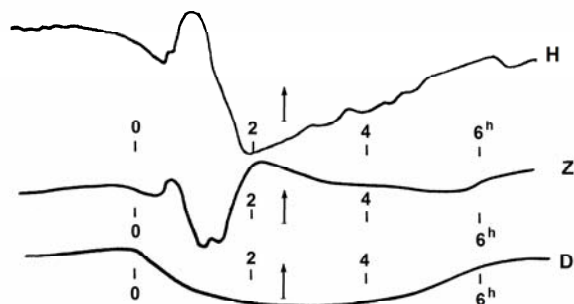


Рис. 1. Вариации геомагнитного поля, зафиксированные Иркутской обсерваторией (из статей К. Г. Иванова [4–6]): стрелки соответствуют амплитуде $10 \gamma = 10^{-4}$ эрстед = $0,00796$ А/м

Намагничивание частиц в магнитном поле Земли. Рассмотрим в качестве гипотезы другой магнитный эффект с простой физической основой. На сегодняшний день с большой достоверностью установлено наличие магнитных материалов в выпавших микрочастицах тунгусского космического тела [22–24]. Во время полета в атмосфере при абляции вещества с поверхности этого тела и его фрагментов срывались перегретые частицы, содержащие железо и его соединения. Отметим, что окислы железа, никеля, кобальта и их некоторые сплавы являются ферромагнетиками и обладают магнитными свойствами при температуре ниже своих точек Кюри [25]. В таблице приведены некоторые материалы и сплавы, обладающие такими свойствами, в порядке понижения их точек Кюри.

Отметим одно важное свойство ферромагнетиков, называемое термонамагниченностью и активно используемое в палеомагнитных исследованиях [26]. Для этих исследований, как и для наших рассуждений, наиболее существенна остаточная термонамагниченность, которая образуется при остывании материала в геомагнитном поле с начальной температурой выше точки Кюри Θ . Рост намагниченности при снижении температуры $T < \Theta$ идёт довольно интенсивно, но при достижении «блокирующей» температуры T_b рост резко замедляется и происходит «замораживание» приобретённой намагниченности. Термонамагниченность может в десятки и сотни раз превышать намагниченность, возникающую в том же поле при комнатной температуре. Для ее разрушения требуются магнитные поля, в десятки и сотни раз превышающие создавшее ее поле.

Точки Кюри некоторых магнитных материалов

Материал	Точка Кюри, К	Точка Кюри, °С
Co	1400	1127
Fe	1043	770
Fe ₂ O ₃	948	675
FeO Fe ₂ O ₃	858	585
NiO Fe ₂ O ₃	858	585
CuO Fe ₂ O ₃	728	455
MgO Fe ₂ O ₃	713	440
Ni	627	354
MnO Fe ₂ O ₃	573	300

Итак, в результате абляции и взрыва шло образование микрочастиц с содержанием железа, его окислов и сплавов. В результате снижения частиц в атмосфере железо и его сплавы частично могли окисляться, но вновь порождали ферромагнитные соединения. При остывании ниже точки Кюри эти частицы приобретали магнитный момент, направленный вдоль магнитной силовой линии Земли. Причем удельный магнитный момент может быть огромным у однодоменных частиц или вкраплений, насчитывающих несколько десятков тысяч молекул [25]. При отсутствии сильного ветра частицы с магнитным моментом после охлаждения ниже точки Кюри снижались уже под влиянием локального магнитного поля, преимущественно вдоль магнитных силовых линий.

Напомним, что в соответствии с нашей гипотезой, изложенной в [27], направление проекции траектории полета главного фрагмента тунгусского тела на поверхность Земли проходило с запада на восток по азимуту $\sim 276^\circ$.

Теперь приведем фрагмент карты модуля остаточной намагниченности (рис. 2) из работы [28] в районе катастрофы. Зона I соответствует максимальному модулю остаточной намагниченности, в среднем равному $143,7 \cdot 10^{-6}$ эрстед = 0,01144 А/м.

В зоне II средняя величина модуля остаточной намагниченности равна $101,3 \cdot 10^{-6}$ эрстед = 0,008061 А/м. В зоне III эта величина еще меньше: $94,7 \cdot 10^{-6}$ эрстед = 0,007536 А/м. И наконец, самая большая зона IV соответствует образцам с остаточной намагниченностью $73,1 \cdot 10^{-6}$ эрстед = 0,005817 А/м. На рис. 2 нами проведена ось симметрии двух зон наиболее интен-

сивного модуля остаточной напряженности. Угол δ между ней и географической параллелью оказался равным 43° . В идеале эта ось является геометрическим местом математических ожиданий положения магнитных частиц, выпадающих с траектории движения тела вдоль магнитных силовых линий Земли. Объяснение, что частицы разнесены в этом направлении ветром после взрыва, не соответствует действительности. Установившаяся в это время погода была безветренной, что отмечали очевидцы этих событий [29; 30].

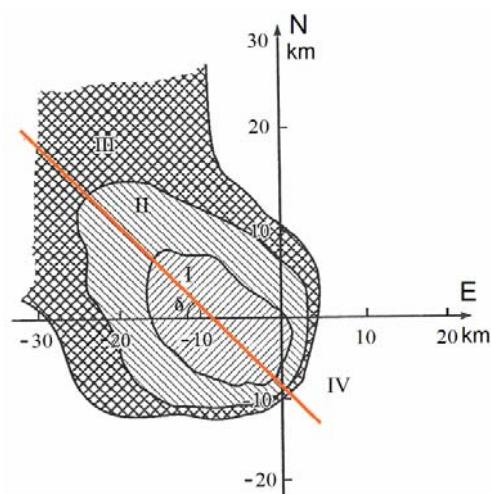


Рис. 2. Зоны вариации модуля остаточной намагниченности в районе тунгусской катастрофы из статьи А. П. Бояркиной и С. Д. Сидорас [28]

В районе тунгусской катастрофы наклонение вектора напряженности магнитного поля Земли было таково, что магнитные силовые линии уходили в земную поверхность с углом $\sim 77^\circ$ [31; 32]. А по геомагнитной модели сайта [32] в июне 1908 г. магнитное склонение в районе эпицентра тунгусской катастрофы составляло $\sim 6^\circ$, т. е. угол между северными направлениями географического меридиана и магнитной стрелки был равен 6° (в отсчете на восток, по часовой стрелке).

Покажем, что в рамках этой простой гипотезы можно оценить угол наклона траектории тела. Для этого рассмотрим чертеж на рис. 3. Оси ON, OE и Oh направлены вдоль восточного, северного и вертикального направлений координат. Сплошная линия АО соответствует траектории космического тела, пунктирная линия ВО является ее проекцией на горизонтальную плоскость. Нас интересует угол $\angle AOB$, обозначаемый через ϕ . Для простоты пренебрежем сферичностью поверхности Земли и рельефом местности. Пунктирная линия СО соответствует оси осадения магнитных частиц.

Итак, пусть частица, находящаяся в точке А, снижается вдоль силовой магнитной линии в точку С. Положим высоту [AB] равной l , тогда длина отрезка [BO] в прямоугольном треугольнике AOB равна $l/\operatorname{ctg} \phi$. Теперь рассмотрим треугольник BOC. Угол между прямой BO и осью OE равен 6° , а угол между

прямой CO и этой осью равен 43° . Так что угол $\angle BOC$ равен 37° . Направление линии BC и оси ON отличается на угол склонения 6° , поэтому угол $\angle CBO$ равен 102° . Оставшийся угол $\angle BCO$ равен 41° . По теореме синусов

$$[BC]/\sin \angle BOC = [BO]/\sin \angle BCO.$$

Отсюда

$$[BC] = l \operatorname{ctg} \varphi \sin 37^\circ / \sin 41^\circ.$$

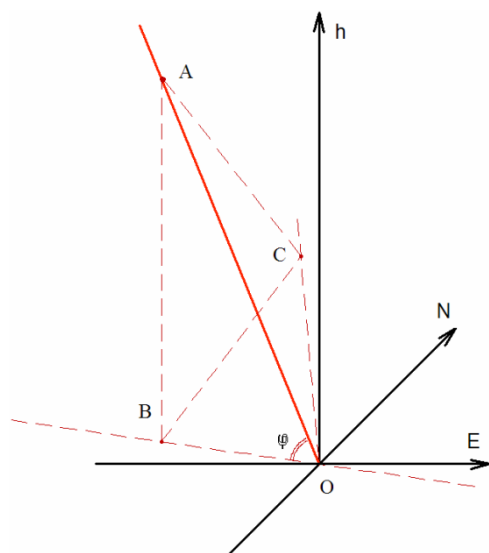


Рис. 3. Геометрическое расположение траектории космического тела AO , его проекции BO и оси выпадения магнитных частиц CO

Теперь рассмотрим прямоугольный треугольник ABC . Поскольку угол $\angle ACB$ совпадает с углом наклона, то он равен 77° . Поэтому

$$[AB] = [BC] \operatorname{tg} 77^\circ,$$

откуда

$$l = l \operatorname{tg} 77^\circ \operatorname{ctg} \varphi \sin 37^\circ / \sin 41^\circ.$$

В итоге

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} 77^\circ \sin 37^\circ / \sin 41^\circ = 3,9734,$$

что соответствует углу

$$\varphi = 76^\circ.$$

Таким образом, на основании этой гипотезы космическое тело вошло в атмосферу Земли по траектории, близкой к вертикальной. Эта оценка находится в согласии с выводами статьи [33] о высоте взрыва тунгусского космического тела.

Сопоставление аргументов и выводов с другими данными. Для опровержения влияния ветра в тропосфере на перенос частиц с магнитными свойствами рассмотрим рис. 4, демонстрирующий распределение другого металла – иридия. В рамках рассматриваемых температур после остывания частиц в воздухе иридий обладает парамагнитными, а не магнитными свойствами. Поэтому влияние магнитного поля на траекторию снижения частиц с его участием было ничтожным. В силу этого обстоятельства распределение иридия оказалось практически симметричным

относительно проекции траектории космического тела. При наличии ветра это распределение было бы другим.

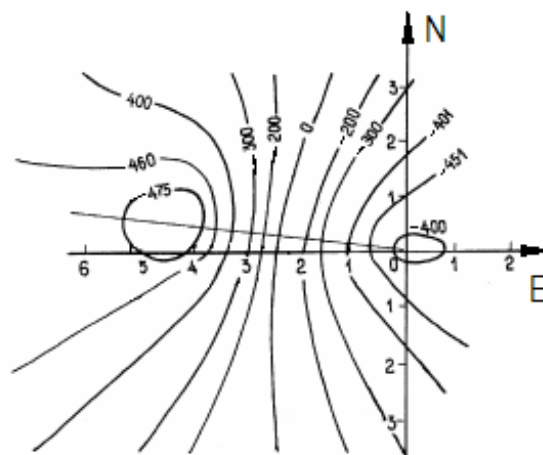


Рис. 4. Распределение иридия в почве, взятое из статьи В. К. Журавлева, Д. В. Демина [34]: здесь знак «-» соответствует уменьшению содержания иридия

Теперь рассмотрим другой фрагмент карты из статьи [28] (рис. 5). На нем изображены три зоны, существенно различающиеся магнитной восприимчивостью материала почвы. Зона I соответствует максимальному среднему коэффициенту магнитной восприимчивости, равному $3,175 \cdot 10^{-4}$. В зоне II этот коэффициент равен $2,246 \cdot 10^{-4}$. И наконец, зона III соответствует среднему коэффициенту магнитной восприимчивости $1,125 \cdot 10^{-4}$.

Сначала объясним источник различия между конфигурациями зон на рис. 4 и 5, порождаемых одним и тем же явлением. Главный источник коэффициента магнитной восприимчивости – малодоменные и особенно однодоменные частицы и вкрапления. С одной стороны, однодоменные частицы обладают огромной магнитной восприимчивостью порядка десятков и сотен тысяч. Поэтому микроскопическое содержание таких частиц в почве достаточно для получения осредненной по объему магнитной восприимчивости порядка 10^{-4} . Вместе с тем, эти частицы и вкрапления в среднем соответствовали субмиллиметровым и микронным размерам. Время снижения таких частиц продолжительнее [35] по сравнению с более крупными частицами, несущими основную остаточную термонамагниченность. За счет однодоменных частиц шлейф носителей повышенной магнитной восприимчивости растянулся и расширился. Поскольку такие частицы разбрасывались вдоль всей траектории полета тела, то они и разносились с соответствующих высот. Принимая во внимание отсутствие ветра в тропосфере, мы вновь должны получить оценку связи высоты и траектории снижения частиц. Это достигается следующим образом. Проведем среднюю линию начального участка зоны I, соответствующего тропосферному участку траектории. Угол между ней и географической параллелью снова равен 43° , что подтверждает рассуждения и выводы предыдущего раздела.

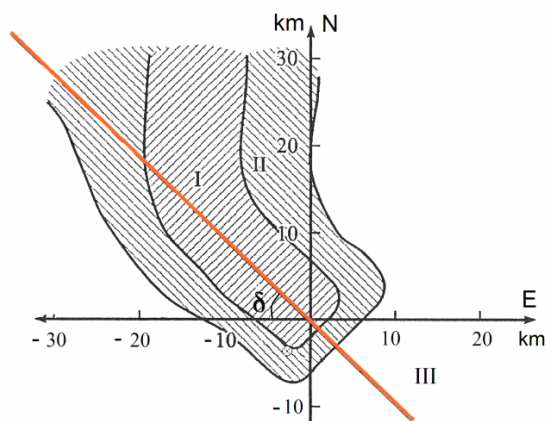


Рис. 5. Зоны вариации магнитной восприимчивости в районе тунгусской катастрофы из статьи А. П. Бояркиной и С. Д. Сидорас [28]

Имея в виду оценку угла наклона траектории в 76° , мы приходим к выводу, что поворот зоны I на север продиктован выпадением этих частиц из стратосферы. Дело в том, что в отличие от спокойной тропосферы в тот день [29], в стратосфере был обычный сезонный ветер с главным направлением с юга на север. Так что положение поворота зоны I косвенно подтверждает близкую к вертикальной траекторию полета космического тела.

Заключение. Итак, мы объяснили происхождение зарегистрированных магнитных эффектов термонамагниченностью микронных и субмикронных магнитных частиц и их вкраплений, состоящих из железа, его сплавов и окислов. Более того, учет силового взаимодействия таких частиц с магнитным полем Земли приводит к некоторой связи между траекторией основной части тунгусского космического тела и осями симметрии зон магнитной восприимчивости и остаточной напряженности магнитного поля района тунгусской катастрофы. В результате получена оценка наклона траектории тунгусского космического тела в 76° .

Еще раз вернемся к направлению траектории полета именно тунгусского тела, а не других фрагментов, проявившихся в других районах восточной Сибири. С этой целью рассмотрим рис. 6, для объяснения которого на свое время и появился ветер определенного направления, «снесший микрочастицы в преобладающем направлении». Между тем, как отмечалось всеми наблюдателями, «стояла ясная и тихая погода» [30]. Вихрь, испытанный жителями непосредственно в эпицентре событий, носил кратковременный локальный характер и «был вызван метеоритом, а не обыкновенным ураганом» [29]. Поэтому рис. 6 подтверждает прилет тунгусского болида с запада от эпицентра, а не с востока. Проекция средней линии выпадения магнитных микрочастиц здесь тоже примерно на 43° повернута по часовой стрелке от западного направления, хотя и не настолько точно из-за смыва этих микрочастиц ближе к руслам или прямо в русла рек. А вот с восточной части от эпицентра такой концентрации магнитных частиц не наблюдается, хотя при подлете с восточной стороны в безветрен-

ную погоду они обязательно должны были появиться в результате абляции и просто выпадения на финальном участке траектории [35].

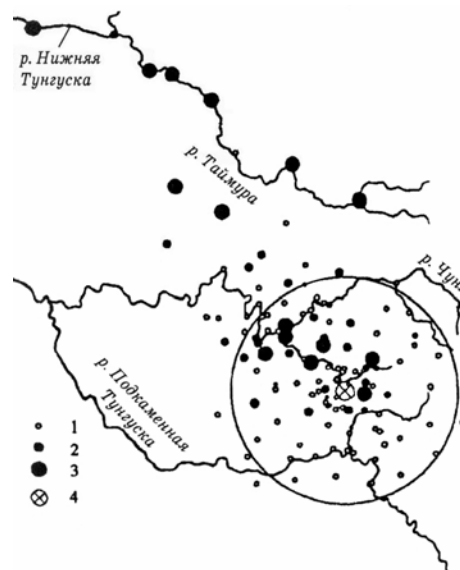


Рис. 6. Распределение магнетитовых шариков в почве на основании работы О. А. Кировой, Н. И. Заславской [36]. Значки, соответствующие цифрам 1–3, отвечают следующей концентрации шариков в пробах: 1 – менее 5; 2 – от 5 до 10; 3 – более 10; область, помеченная цифрой 4, соответствует «эпицентру»

Итак, объяснение магнитных эффектов находится в согласии с основными выводами статьи [28]. Например, обнаруженный эффект «старения» естественной остаточной намагниченности почвы, предшествующей событию 1908 г., может быть объяснен действием коллективного магнитного поля осаждающихся магнитных частиц. Другое дело, что ударная волна не имеет отношения к этому эффекту.

Задержка проявления магнитного эффекта на две с половиной минуты после взрыва связана со временем остывания достаточного количества ферромагнитных частиц ниже точки Кюри.

Теперь о локальности регистрации магнитных явлений. Для наблюдаемой напряженности $\mathbf{H}$ магнитного поля вдали от физического образования с магнитным моментом $\mathbf{M}$ справедлива формула [25; 31]

$$\mathbf{H} = \frac{3\mathbf{r}(\mathbf{r} \cdot \mathbf{M}) - r^2 \mathbf{M}}{r^5}, \quad (1)$$

где $\mathbf{r}$ – радиус-вектор, проведенный из места локализации магнитного образования в точку наблюдения; r – длина этого вектора; $(\mathbf{r} \cdot \mathbf{M})$ – скалярное произведение. Прямое расстояние (не по поверхности Земли) от «эпицентра» тунгусской катастрофы до Иркутской обсерватории составляет ~ 900 км. Колебания напряженности $\mathbf{H}$ магнитного поля в Иркутской обсерватории были в пределах $\sim 67 \gamma$, а ее отклонение от нормы достигало 50γ . Тогда из формулы (1) следует, что амплитуда M (евклидова норма) магнитного момента $\mathbf{M}$ лежит в пределах от $Hr^3/2$ до Hr^3 , где $H \sim 0,04$ А/м – амплитуда колебания напряженности $\mathbf{H}$; $r = 9 \cdot 10^5$ м. В итоге амплитуда M порождающего явления должна

лежать между $1,5 \cdot 10^{16}$ и $3 \cdot 10^{16}$ А·м². Поскольку удельный магнитный момент железа ~ 200 А·м²/кг, то для достижения такой амплитуды M потребовалось бы $7,5 \cdot 10^{10}$ т железа или других ферромагнетиков. С учетом незначительного содержания ферромагнетиков в распыленных материалах тунгусского космического тела эту цифру следует признать недостижимой. Поэтому источником колебания магнитного поля в Иркутске в соответствии с предлагаемой гипотезой вряд ли было магнитное образование в «эпицентре». Скорее всего, это было следствие термонамагниченности пылевого осаждения другого фрагмента (или фрагментов) куда меньшего размера, но взорвавшихся и распыленных существенно ближе к Иркутску. Последствия вторжения таких фрагментов в атмосферу действительно наблюдались очевидцами в поселках на север от Иркутска [30].

А что касается описанного эффекта термонамагниченности в «эпицентре», то, несмотря на возможную ничтожность вызванных им колебаний магнитного поля в Иркутске, остальные геометрические рассуждения об осаждении магнитных микрочастиц и вкраплений остаются справедливыми.

Благодарности. Работа частично поддержана грантом № 14-11-00147 Российского научного фонда.

Acknowledgments. This work was partially supported by grant number 14-11-00147 of the Russian Science Foundation.

Библиографические ссылки

1. Васильев Н. В. Тунгусский метеорит. Космический феномен лета 1908 г. М. : Русская панорама, 2004. 372 с.
2. Гладышева О. Г. Тунгусская катастрофа: детали головоломки. СПб. : Наука, 2011, 181 с.
3. Rubtsov V. The Tunguska Mystery. Heidelberg : Springer, 2009. 318 с.
4. Иванов К. Г. Геомагнитные явления, наблюдавшиеся на Иркутской магнитной обсерватории вслед за взрывом Тунгусского метеорита // Метеоритика. 1961. Вып. 21. С. 46–48.
5. Иванов К. Г. О причине последующих изменений поля в геомагнитном эффекте Тунгусского метеорита // Геомагнетизм и аэрономия. 1961. Т. 1, № 4. С. 616–618.
6. Иванов К. Г. Геомагнитный эффект тунгусского падения // Метеоритика. 1964. Вып. 24. С. 141–151.
7. О влиянии взрыва Тунгусского метеорита на геомагнитное поле / Г. Ф. Плеханов [и др.] // Геология и геофизика. 1961. № 6. С. 94–96.
8. Катастрофические воздействия космических тел / под ред. В. В. Адушкина и И. В. Немчинова. М. : Академкнига, 2005. 310 с.
9. Ковалев А. Т., Немчинов И. В., Шувалов В. В. Ионосферные и магнитосферные возмущения в результате падения небольших комет и астероидов // Астрономический вестник. 2006. Т. 40, № 1. С. 65–76.
10. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение челябинского метеороида // Радиофизика и электродинамика. 2013. Т. 4(18), № 3. С. 47–54.
11. Бронштэн В. А. Магнитный эффект Тунгусского метеорита // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. Т. 42, № 6. С. 854–856.
12. Гольдин В. Д. Об интерпретации некоторых геофизических явлений, сопровождавших падение Тунгусского метеорита // Космическое вещество и Земля. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1986. С. 44–62.
13. Калашников А. Г. О наблюдении магнитного эффекта метеоров индукционным методом // Докл. АН СССР. 1949. Т. 66, № 3. С. 373–376.
14. Калашников А. Г. Магнитный эффект метеоров // Изв. АН СССР. Геофиз. 1952. Вып. 6. С. 7–20.
15. Идлис Г. М., Карягина З. В. О кометной природе Тунгусского метеорита // Метеоритика. 1961. Вып. 21. С. 32–43.
16. Обашев Г. О. О геомагнитном эффекте Тунгусского метеорита // Метеоритика. 1961. Вып. 21. С. 49–52.
17. Ковалевский А. Ф. К вопросу о механизме геомагнитных эффектов крупных взрывов // Тр. Сиб. физ.-техн. ин-та при Томском ун-те. 1962. Вып. 41. С. 87–91.
18. Ковалевский А. Ф. Магнитный эффект взрыва Тунгусского метеорита // Проблема Тунгусского метеорита. Томск : Изд-во Том. гос. ун-та, 1963. С. 187–194.
19. Иванов К. Г. Геомагнитные эффекты взрывов в нижней атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 1962. Т. 2, № 1. С. 153–160.
20. Иванов К. Г. Геомагнитный эффект Тунгусского падения // Метеоритика. 1964. Вып. 24. С. 141–151.
21. Иванов К. Г. Еще раз о проблеме моделирования геомагнитного эффекта Тунгусского падения // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. Т. 42, № 6. С. 857–858.
22. Кирова О. А. О минералогическом изучении проб почв из района падения Тунгусского метеорита, собранных экспедицией 1958 г. // Метеоритика. 1961. Вып. 20. С. 32–39.
23. Флоренский К. П., Иванов А. В., Ильин Н. П. Химический состав космических шариков из района тунгусской катастрофы и некоторые вопросы дифференциации вещества космических тел // Геохимия. 1968. № 10. С. 1163–1173.
24. Ganapathy R. The Tunguska Explosion of 1908: Discovery of Meteoritic Debris near the Explosion Site and at the South Pole // Science. 1983. Vol. 220. P. 1158–1961.
25. Боровик Е. С., Еременко В. В., Мильнер А. С. Лекции по магнетизму. М. : Физматлит, 2005. 512 с.
26. Храмов А. Н., Шолпо Л. Е. Палеомагнетизм. М. : Недра, 1967. 224 с.
27. Шайдулов В. В. Другой сценарий тунгусских событий 1908 года // Вестник СибГАУ. 2014. Вып. 1(53). С. 97–102.
28. Бояркина А. П., Сидорас С. Д. Палеомагнитные исследования в районе падения Тунгусского метеорита // Геология и геофизика. 1974. № 3. С. 79–84.
29. Астапович И. С. Новые материалы по полету большого метеорита 30 июня 1908 г. в Центральной Сибири // Астрономический журнал. 1933. Т. X, № 4. С. 465–486.

30. Показания очевидцев тунгусского падения (каталог) / Н. В. Васильев [и др.]. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1981. 205 с.

31. Яновский Б. М. Земной магнетизм. Л. : Изд-во Ленинград. ун-та, 1978. 526 с.

32. NGDC Geomagnetic Calculators. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). [Electronic resource]. URL: www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/. (accessed 27.03.2015).

33. Chyba C. F., Thomas P. J., Zahnle K. J. The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid // *Nature*. 1993. Vol. 361. P. 40–44.

34. Журавлев В. К., Демин Д. В. К вопросу о химическом составе Тунгусского метеорита // *Космическое вещество на Земле*. Новосибирск, 1976. С. 99–104.

35. Svetsov V. V. Total ablation of the debris from the 1908 Tunguska explosion // *Nature*. 1996. Vol. 383. P. 697–699.

36. Кирова О. А., Заславская Н. И. Новые данные о распыленном веществе из района падения Тунгусского метеорита // *Метеоритика*. 1966. Вып. 26. С. 119–127.

References

1. Vasil'ev N. V. *Tungusskiy meteorit. Kosmicheskiy fenomen leta 1908 g.* [Tungus meteorite. Space phenomenon of summer 1908]. Moscow, Russkaya panorama Publ., 2004, 372 p.

2. Gladysheva O. G. *Tungusskaya katastrofa: detali golovolomki*. [Tungus catastrophe: pieces of the puzzle]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2011, 181 p.

3. Rubtsov V. *The Tunguska Mystery*. Heidelberg: Springer, 2009, 318 p.

4. Ivanov K. G. [Geomagnetic phenomena observed in the Irkutsk magnetic observatory after explosion of the Tunguska meteorite]. *Meteoritika*, 1961, Is. 21, P. 46–48 (In Russ.).

5. Ivanov K. G. [About the reason of the subsequent changes of field in the geomagnetic effect of the Tunguska meteorite]. *Geomagnetizm i aeronomiya*, 1961, Vol. 1, No. 4, P. 616–618 (In Russ.).

6. Ivanov K. G. [Geomagnetic effect of Tungus downfall]. *Meteoritika*, 1964, Is. 24, P. 141–151 (In Russ.).

7. Plekhanov G. F., Kovalevskiy A. F., Zhuravlev V. K., Vasil'ev N. V. [On influence of explosion of Tungus meteorite on geomagnetic field]. *Geologiya i geofizika*, 1961, No. 6, P. 94–96 (In Russ.).

8. *Katastroficheskie vozdeystviya kosmicheskikh tel*. [The catastrophic impacts of cosmic bodies]. Ed. V. V. Adushkin and I. V. Nemchinov. Moscow, Akademkniga Publ., 2005, 310 p.

9. Kovalev A. T., Nemchinov I. V., Shuvalov V. V. [Ionospheric and magnetospheric disturbances as a result of the fall of small comets and asteroids]. *Astronomicheskii vestnik*, 2006, Vol. 40, No. 1, P. 65–76 (In Russ.).

10. Chernogor L. F. [Large-scale perturbations in the magnetic field of the Earth, accompanied by a fall of Chelyabinsk meteoroid]. *Radiofizika i elektronika*, 2013, Vol. 4(18), No. 3, P. 47–54 (In Russ.).

11. Bronshten V. A. [The magnetic effect of the Tunguska meteorite]. *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2002, Vol. 42, No. 6, P. 854–856 (In Russ.).

12. Gol'din V. D. [On the interpretation of some geophysical phenomena accompanied the fall of the Tunguska meteorite]. *Kosmicheskoe veshchestvo i Zemlya*. [Cosmic substance and the Earth]. Novosibirsk, Nauka, Sib. Dep. Pul., 1986, P. 44–62 (In Russ.).

13. Kalashnikov A. G. [On observation of magnetic effect of meteors by induction method]. *Doklady AN SSSR*, 1949, Vol. 66, No. 3, P. 373–376 (In Russ.).

14. Kalashnikov A. G. [The magnetic effect of meteors]. *Izvestiya AN SSSR. Geofizika*, 1952, Is. 6, P. 7–20 (In Russ.).

15. Idlis G. M., Karyagina Z. V. [About cometary nature of the Tunguska meteorite]. *Meteoritika*, 1961, Is. 21, P. 32–43 (In Russ.).

16. Obashev G. O. [About geomagnetic effect of Tunguska meteorite]. *Meteoritika*, 1961, Is. 21, P. 49–52 (In Russ.).

17. Kovalevskii A. F. [On the mechanism of geomagnetic effects of large explosions]. *Trudy Sib. fiziko-tehnicheskogo inst.*, 1962, Is. 41, P. 87–91 (In Russ.).

18. Kovalevskii A. F. [Magnetic effect of Tunguska meteorite explosion]. *Problema Tungusskogo meteorita*. Tomsk, Tomsk St. University Publ., 1963, P. 187–194 (In Russ.).

19. Ivanov K. G. [Geomagnetic effects of explosions in the lower atmosphere]. *Geomagnetizm i aeronomiya*, 1962, Vol. 2, No. 1, P. 153–160 (In Russ.).

20. Ivanov K. G. [Geomagnetic effect of the Tunguska fall]. *Meteoritika*, 1964, Is. 24, P. 141–151 (In Russ.).

21. Ivanov K. G. [Once again about the problem of modeling the geomagnetic effect of Tunguska fall]. *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2002, Vol. 42, No. 6, P. 857–858 (In Russ.).

22. Kirova O. A. [About mineralogical study of the soil samples from the area of the Tunguska meteorite fall, collected by the expedition in 1958]. *Meteoritika*, 1961, Is. 20, P. 32–39 (In Russ.).

23. Florenskiy K. P., Ivanov A. V., Il'in N. P. [The chemical composition of cosmic balls from the area of the Tunguska catastrophe and some questions of substance differentiation of cosmic bodies]. *Geokhimiya*, 1968, No. 10, P. 1163–1173 (In Russ.).

24. Ganapathy R. The Tunguska Explosion of 1908: Discovery of Meteoritic Debris near the Explosion Site and at the South Pole. *Science*, 1983, Vol. 220, P. 1158–1961.

25. Borovik E. S., Eremenko V. V., Mil'ner A. S. *Leksii po magnetizmu*. [Lectures on magnetism]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005, 512 c.

26. Khranov A. N., Sholpo L. E. *Paleomagnetizm*. [Paleomagnetism]. Moscow, Nedra Publ., 1967, 224 p.

27. Shaydurov V. V. [Another scenario of the Tunguska event in 1908]. *Vestnik SibGAU*, 2014. No. 1(53), P. 97–102 (In Russ.).

28. Boyarkina A. P., Sidoras S. D. [Paleomagnetic studies in the area of the Tunguska meteorite fall]. *Geologiya i geofizika*, 1974, No. 3, P. 79–84 (In Russ.).