

ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО СОЮЗА ССР. ТОМСКИЙ ОТДЕЛ

БЕТАТРОННАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
МЕДИЦИНСКОГО ИНСТИТУТА

Труды, том V

1963

ПРОБЛЕМА
ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА
(СБОРНИК СТАТЕЙ)

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Томск — 1963

МАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ ВЗРЫВА ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА

А. Ф. КОВАЛЕВСКИЙ

Падение Тунгусского метеорита утром 30 июня 1908 г. сопровождалось значительными сейсмическими, барическими, световыми и другими явлениями геофизического характера. Взрыв метеорита вызвал также своеобразные и отчетливые изменения в геомагнитном поле [1, 2, 3, 15], в свое время оставленные без внимания. По нашей просьбе были любезно присланы копии магнитограмм (в некоторых случаях таблицы среднечасовых значений) за период 25 июня — 5 июля 1908 г. из следующих пунктов: Иркутска, Свердловска, Тбилиси, Ленинграда, Урбаново, Копенгагена, Потсдама, Кью и Фелмоута, Шамбон-ла-Форэ, Коимбры, Сан-Хуана, Гонолулу, Алибага, Гельвана, Тананариве, Дублина, Сан-Фернандо.

Как показал просмотр всех магнитограмм, в указанную десятидневку геомагнитное поле было сравнительно спокойным. Слабая возмущенность, наблюдавшаяся в некоторые дни, носит пространственно ограниченный характер и отмечается лишь несколькими близко расположенными друг к другу обсерваториями. В момент падения метеорита, а также некоторое время спустя ни одной магнитной обсерваторией, кроме Иркутской, не были отмечены изменения, которые можно было бы отнести к эффекту взрыва метеорита.

По данным Иркутской обсерватории, 29 июня 1908 г. магнитное поле было слабо возмущено, однако в течение 6—7-часового интервала, непосредственно предшествовавшего взрыву метеорита, оно было почти спокойно. 30 июня в 0 час. 20,0 мин. по среднему гринвичскому времени, через 2,8 мин. после взрыва по обобщенным сейсмическим и барометрическим данным, горизонтальная составляющая геомагнитного поля H внезапно импульсом возросла на $3,5\gamma$ ($1\gamma = 10^{-5}$ эрстеда), 2,3 минуты оставалась на этом уровне, слегка уменьшаясь (рис. 1), затем быстро стала увеличиваться и в течение 18 минут возросла еще на 20 гамм, оставаясь в течение последующих 14 минут примерно на этом уровне. В 0 час. 51,8 мин. началось уменьшение H , продолжавшееся до 1 часа 41 минуты. За этот период H уменьшилась на 67 гамм. Далее началось постепенное восстановление ее до нормального уровня, продолжавшееся до 4—5 часов.

На рис. 1 приведена для сравнения соответствующая часть нормального суточного хода H , построенная по усредненным среднечасовым значениям H за период 25 июня — 5 июля 1908 г. Данные за 30 июня для получения усредненной кривой не использовались. Как видно из рисунка, ход кривых в интервале 0 час. 20 мин. — 4 часа совершенно различен: в 4 часа кривая H , наблюдавшаяся 30 июня, вследствие увеличения горизонтальной составляющей пересекает усредненную кривую и далее остается несколько выше ее до 11 часов, следуя параллельно ей. Но эти

слегка повышенные значения H от 4 до 11 часов связаны не со взрывом. Скорее это следствие слабой возмущенности, видной на рисунке. Кроме того, хорошо известно, что даже в соседние и совершенно спокойные в геомагнитном отношении сутки кривые могут быть значительно смещены друг относительно друга. Это вызывается или смещением токовых систем в ионосфере, или изменением плотности тока в них.

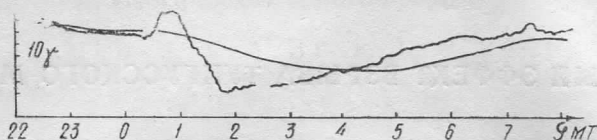


Рис. 1.

Изменение вертикальной составляющей геомагнитного поля Z в этот период носит характер отрицательной бухты (рис. 2). Возмущение продолжалось с 0 час. 18,6 мин. до 2 час. Максимальное уменьшение Z в этот период наблюдалось на 25,5 γ по отношению к нормальному, невозмущенному значению.

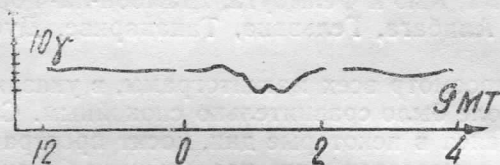


Рис. 2.

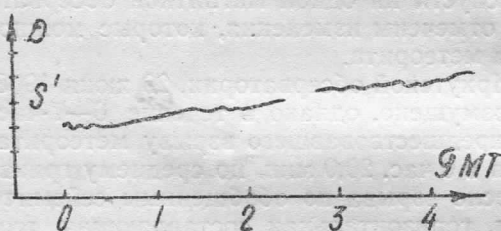


Рис. 3.

Никаких изменений в поведении магнитного склонения в этот период не обнаружено (рис. 3), что, возможно, объясняется расположением места взрыва почти на одном меридиане с Иркутском.

Описанное возмущение нельзя причислить к типу распространенных бухтообразных возмущений геомагнитного поля по следующим причинам: 1) оно не отмечено на других обсерваториях мира, тогда как бухты носят обычно мировой характер; 2) амплитуда возмущения значительно превосходит амплитуды обычно наблюдающихся в Иркутске бухт, которые имеют средние значения для H 40 гамм, для Z 2—12 гамм, для D 5—10'; 3) продолжительность возмущения значительно превышает продолжительность бухтообразных возмущений, длящихся обычно не более чем 1,5—2 часа; 4) самый вид возмущения слишком необычен и не похож на формы магнитной активности, вызываемые солнечной деятельностью.

Учитывая вышеизложенное, а также близкое совпадение во времени взрыва и начала возмущения, можно утверждать, что взрыв метеорита вызвал необычное возмущение геомагнитного поля, отчасти похожее на магнитную бурю с внезапным началом, но необычайно малой продолжительности и с малой подвижностью элементов поля. К. Г. Иванов, также изучавший описываемый эффект, пришел к аналогичным выводам [3, 15].

Как уже упоминалось, анализ магнитограмм других обсерваторий показал, что на них нет никаких изменений, которые можно было бы связать с падением метеорита. Это указывает на то, что магнитное возмущение, вызванное Тунгусским метеоритом, проявилось на сравнительно ограниченной площади радиусом не менее 900 км (Иркутск) и не более 2500 км (Свердловск). Последнюю цифру уточнить уже, к сожалению, невозможно из-за отсутствия в то время обсерваторий, ближе расположенных к Иркутску.

Как нами уже предварительно сообщалось [1, 2], при попытке сравнить геомагнитный эффект взрыва метеорита с эффектами, наблюдавшимися при каких-либо других явлениях, было обнаружено некоторое сходство с магнитными эффектами ядерных взрывов. Как известно, 1 и 12 августа 1958 г. на высотах «свыше» 60 и «около» 30 км соответственно Соединенными Штатами были произведены ядерные взрывы над атоллom Джонстон в Тихом океане. Время взрыва 10 час. 50 мин. 05 сек. и 10 час. 30 мин. 08 сек. по Гринвичу [4] (местная ночь). Сразу же после взрыва (в пределах точности отметок времени, причем для Гонолулу и Апиа точность начала ± 1 сек) на близко расположенных магнитных обсерваториях Гонолулу, Пальмира, Фэннинг, Джервис и Апиа были отмечены необычные возмущения геомагнитного поля с внезапным началом [5, 6, 7, 4]. В табл. 1 приведены географические и геомагнитные координаты всех станций и их расстояния от атолла Джонстон.

Таблица 1

Пункт	Географические коорд.		Геомагнитные коорд.		Расстояние от атолла, км
	широта	долгота	широта	долгота	
Джонстон	16°,7 с. ш.	169°,4 з. д.	14°,3 с. ш.	256°,5 в. д.	—
Гонолулу	21°,3 с. ш.	158°,1 з. д.	21°,1 с. ш.	266°,5 в. д.	1340
Пальмира	5°,9 с. ш.	162°,1 з. д.	5°,2 с. ш.	265°,8 в. д.	1430
Фэннинг	3°,9 с. ш.	159°,4 з. д.	3°,8 с. ш.	268°,8 в. д.	1890
Джервис	0°,4 ю. ш.	160°,1 з. д.	0°,6 ю. ш.	269°,1 в. д.	2380
Апиа	13°,8 ю. ш.	171°,8 з. д.	16°,0 ю. ш.	260°,2 в. д.	3680
Гуам	13°,6 с. ш.	144°,9 в. д.	4°,0 с. ш.	212°,9 в. д.	4860

На рис. 4 приведены магнитные вариации северной X , восточной Y , и вертикальной Z компонент геомагнитного поля на всех станциях по Мацусита [7]. В Иркутске в 1908 г. магнитное склонение было равно 2° [9], что позволяет в достаточно точном приближении считать северную и горизонтальную составляющие тождественными и проводить сравнение эффектов ядерных взрывов и взрыва метеорита непосредственно, без пересчета экспериментальных результатов. Впрочем, поведение поля при ядерных взрывах также хорошо видно из векторных диаграмм. На рис. 5 приведены векторные диаграммы в горизонтальной плоскости, дающие

представление о поведении Н. и Д. Цифры у точек означают время, прошедшее с момента взрыва.

На обсерваториях Пальмира, Фэннинг и Джервис, находящихся к юго-востоку от атолла, возмущение 1/VIII-1958 было сходным. После взрыва горизонтальная составляющая внезапно импульсом возросла на 8—12 гамм и оставалась на этом повышенном уровне 5—10 минут.

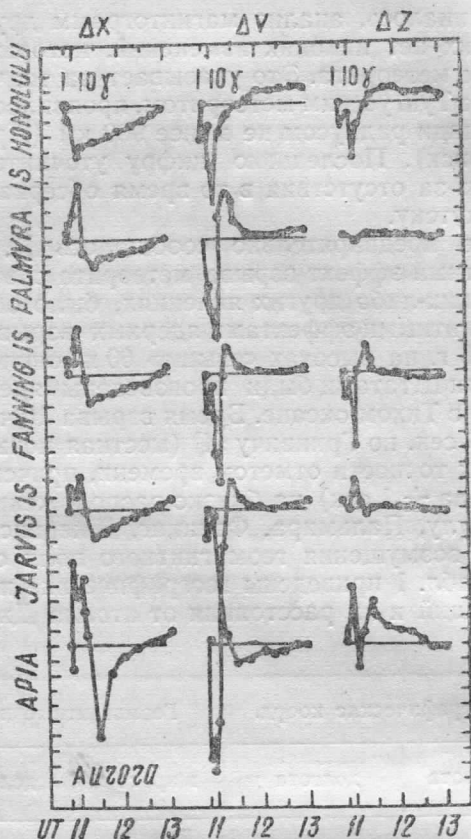


Рис. 4. 1) Гонолулу, 2) Пальмира, 3) Фэннинг, 4) Джервис, 5) Апия.

Этот период можно назвать первой фазой возмущения. Затем начался быстрый рост Н и спустя 13 минут после взрыва она достигла максимального значения $+25-30$ гамм по отношению к невозмущенному значению (вторая, или главная, фаза). После этого следует быстрое уменьшение Н, и она опускается на $15-20$ гамм ниже нормального уровня. Достигнув минимума, горизонтальная составляющая начала возрастать и спустя около часа после взрыва возвратилась к невозмущенным значениям.

Возмущение Н на ст. Апия началось отрицательным импульсом, дальнейший ход его отчасти похож на только что описанный для трех станций. Однако векторная диаграмма Н для Апия более сложна. На этой станции отмечено также необычное свечение неба, начавшееся сразу после взрыва и имевшее все симптомы полярного сияния. Все исследователи, изучавшие это свечение, относят его без сомнений к эффекту ядерного взрыва [5, 7, 4].

Возмущение на ст. Гонолулу также имело внезапное начало с отрицательным импульсом в 8 гамм. Спустя 8 минут после взрыва Н начала уменьшаться далее и в 11 часов 03 минуты достигла минимального значения — 49 гамм по отношению к нормальным значениям. Постепенное восстановление продолжалось до 13 часов. В целом возмущение имеет бухтообразный вид.

Изменения Z почти на каждой станции были различными. В Гонолулу и Фэннинг они начались внезапным отрицательным импульсом, в течение главной фазы значения уменьшились еще на 40—60 гамм. Затем начался быстрый рост, значения несколько превзошли нормальные. После этого наступило постепенное восстановление. В обсерватории Пальмира возмущение почти не проявилось. На станциях Джервис и Апия вариации Z имеют пилообразный вид.

Аналогичные изменения в геомагнитном поле наблюдались и 12 августа 1958 г., однако, вследствие меньшей высоты взрыва они несколько меньше по амплитудам, а начальная фаза длилась дольше.

Сравнивая данные по магнитным эффектам ядерных взрывов и взрыва Тунгусского метеорита, можно отметить следующие общие черты:

1) Изменения всех компонент геомагнитного поля характеризуются внезапным началом.

2) Общий ход возмущения в Н одинаков в обоих случаях: спустя несколько минут после внезапного начала наступает более постепенное, но больше по амплитуде изменение. В случае эффектов на обсерваториях Пальмира, Фэннинг, Джервис и эффекта Тунгусского метеорита — это рост Н, затем падение ее ниже нормального значения с последующим постепенным восстановлением.

3) Возмущения в Z имеют общие черты для Гонолулу, Фэннинг и Иркутска.

4) В общем ходе Н и Z различия между обоими эффектами не выходят, в сущности, за пределы различий для отдельных станций в случае ядерных взрывов.

5) Общая длительность возмущений примерно сравнима: для ядерных взрывов около часа, для метеорита по Н 4—5 часов, по Z 2 часа. Возмущение на станции Апия длилось около 2-х часов.

6) Возмущения в обоих случаях носили локальный характер. В случае ядерных взрывов они уже не отмечались обсерваторией Гуам, отстоящей от атолла Джонстон на 4860 км, а в случае взрыва метеорита Свердловской обсерваторией (около 2500 км).

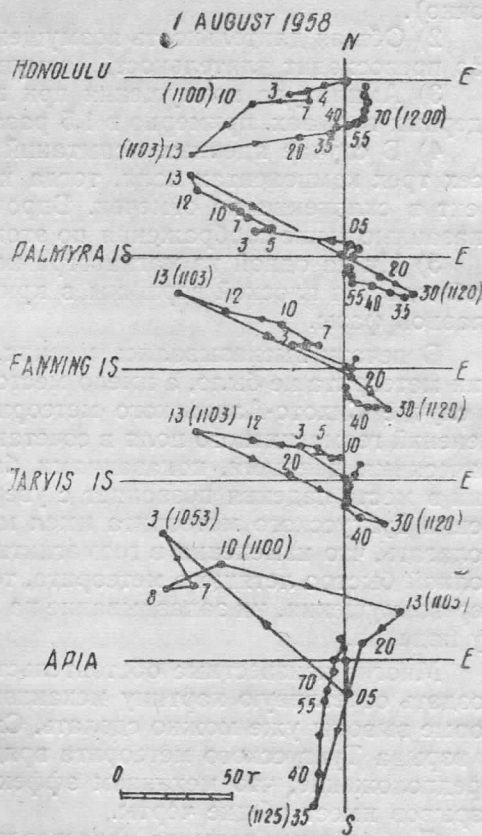


Рис. 5. 1) Гонолулу, 2) Пальмира, 3) Фэннинг, 4) Джервис, 5) Апия.

Но между описываемыми эффектами имеются и следующие различия:

1) В случае ядерных взрывов внезапный импульс отмечен одновременно на всех станциях и сразу же после взрыва. Для Гонолулу и Апия время SSC совпадает с моментом взрыва с точностью ± 1 сек. для других станций менее точно [4]. В случае же эффекта метеорита наблюдается запаздывание магнитного возмущения на 2,8 минуты по сравнению с моментом взрыва (отмеченное в [1] запаздывание на 7 минут ошибочно).

2) Общая длительность возмущения в случае метеорита в несколько раз превосходит длительность возмущений от взрыва бомб.

3) Амплитуда возмущения при взрыве метеорита больше, чем при ядерных взрывах примерно в 1,5 раза.

4) В случае ядерных испытаний отмечены отчетливые эффекты во всех трех компонентах поля, тогда как в случае взрыва метеорита эффект в склонении не отмечен. Впрочем, следует принять во внимание указанные выше соображения по этому вопросу.

5) Ни на одной из магнитограмм с эффектами ядерных взрывов не наблюдается плоской вершины в кривой H , отмеченной в Иркутске для главной фазы.

В печати высказывались мнения, что собственно взрыва при падении метеорита не было, а имело место простое рассыпание на куски, как в случае Сихото-Алиньского метеорита [10, 11]. Однако характер изменений геомагнитного поля в сочетании с показаниями очевидцев, сейсмическими данными, показаниями барографов и характером разрушений в месте падения позволяет с уверенностью утверждать, что при падении Тунгусского метеорита имел место именно *взрыв*. Если же предполагать, что изменения в геомагнитном поле связаны с баллистической волной быстро летящего метеорита, то необъяснимы ни сложный характер возмущения, ни запаздывание на 2,8 минуты по отношению к моменту падения.

Многие неизвестные обстоятельства взрыва пока что не позволяют создать отчетливую картину механизма магнитного эффекта, хотя некоторые выводы уже можно сделать. Сходство эффектов ядерных взрывов и взрыва Тунгусского метеорита вряд ли случайно, и можно высказать предположение, что механизм эффекта даже у качественно различных взрывов имеет общие черты.

Для ядерных взрывов представляется возможной следующая схема. При взрыве за счет рассеянного гамма-излучения возникло большое количество комптоновских и фотоэлектрических электронов. Это привело к резкому повышению ионизации на большой площади. Возможно также, что большую роль играл и бета-распад нейтронов. Возникновение ионизации сразу после взрыва на всей площади над станциями наблюдения подтверждается резким возрастанием минимальных отраженных частот на ионосферной станции в Мауи (Гавайские острова) через 20—30 сек. после взрыва [7], а также нарушением радиосвязи на трассах Гонолулу — Хирайзо (Япония) и Сан-Франциско — Хирайзо, начавшимися сразу после взрыва [12]. Линия Сан-Франциско — Хирайзо отстоит от атолла не ближе чем на 3600 км. Повышение ионизации создало благоприятные условия для распространения гидромагнитной волны. Распространяясь с большой скоростью, она и вызвала почти одновременное внезапное начало на всех станциях. Исследования Маеды и Ондоно [13], обнаруживших приход в Шимозато и Онагаву возмущений магнитного поля со скоростью 540 км/сек, как будто бы подтверждает такую возможность.

Вторая фаза вызывается сильными движениями уже имеющегося ионизованного газа под действием ударной волны. При движении возникли сильные динамотоки, установлению которых и соответствует максимум фазы.

Понижение поля и последующее восстановление его связаны, по-видимому, с перемещением токовой системы относительно станции наблюдения и ее постепенным затуханием.

При взрыве метеорита мог реализоваться следующий механизм. Ударная волна, образовавшаяся при взрыве, вначале имела большую скорость, которая уже на расстоянии в несколько км от места взрыва стала сравнима со скоростью звука. Распространяясь во все стороны, волна достигла области E ионосферы и вызвала движение ионизованного газа. Так как взрыв произошел утром, когда уже достаточно высока электронная концентрация слоя E, то нет необходимости привлекать дополнительный источник ионизации. И можно предположить, что если бы взрыв произошел местной ночью, то эффект или не наблюдался бы совсем, или проявился значительно слабее. Для прохождения до высоты 80 км (нижняя граница слоя E) волне потребовалось около 3-х минут. Так объясняется запаздывание магнитного эффекта. Сразу же после возникновения движений в слое E возникла гидромагнитная волна. Распространяясь с большой скоростью, волна очень быстро (вероятно, через несколько секунд) достигла района Иркутска и вызвала начальный импульс магнитного возмущения. Дальнейшие изменения магнитного поля объясняются, как и в случае ядерных взрывов, действием ударной волны, вызвавшей динамотоки в слое E.

Отдельные детали описанного механизма могут быть спорными, однако, не подлежит, по-видимому, сомнению, что эффект начался после достижения ударной волной ионизованной области атмосферы. Это позволяет оценить высоту взрыва метеорита. Поскольку взрыв произошел в воздухе, то момент взрыва, рассчитанный по сейсмическим данным — 0 час. 17,2 мин. гринвичского времени, — не соответствует действительности. Это момент прихода ударной волны, сам же взрыв произошел раньше.

Примем средние скорости звука для интервалов высот 0—10 км, 10—30 км, 30—60 км и 60—80 км соответственно 320; 302; 340 и 331,5 м/сек. Для нижней границы слоя E примем цифру 80 км. Составим несколько простых уравнений:

$$1) \quad \frac{10000-X}{320} + \frac{20000}{302} + \frac{30000}{340} + \frac{20000}{331,5} = Y;$$

$$2) \quad \frac{X}{320} = Z; \quad 3) t + Y = 20,0 \times 60; \quad 4) t + Z = 17,2 \times 60,$$

где X — высота взрыва, Y — истинное запаздывание магнитного эффекта, Z — запаздывание сейсмического толчка, t — истинный момент взрыва.

Решая уравнения, находим $X=12,5$ км; $t=0$ час. 16,5 мин.; $Z=40$ сек. и $Y=3,5$ мин.

В действительности скорость ударной волны все время остается выше скорости звука. Если принять для нее среднее значение 340 м/сек, то получим $X=11$ км; $t=0$ час. 16,6 мин.; $Z=34$ сек; $Y=3$ мин. 23 сек.

Пользуюсь случаем выразить признательность всем вышеперечисленным обсерваториям за предоставленные материалы, а также А. Л. Куллингтону за магнитограммы обсерватории Апия с эффектами ядерных взрывов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плеханов Г. Ф., Ковалевский А. Ф., Журавлев В. К., Васильев Н. В. О геомагнитном эффекте взрыва Тунгусского метеорита. Известия вузов МВО СССР, „Физика“, № 2, 1960.
2. Плеханов Г. Ф., Ковалевский А. Ф., Журавлев В. К., Васильев Н. В. О влиянии взрыва Тунгусского метеорита на геомагнитное поле. Геология и геофизика, № 6, 1961.
3. Иванов К. Г. Геомагнитные явления, наблюдавшиеся на Иркутской магнитной обсерватории вслед за взрывом Тунгусского метеорита, 1960, рукопись.
4. A. G. McNish, Geomagnetic effects of highaltitude nuclear explosions. Journ. Geophys. Res., vol. 64, № 12, 1959.
5. A. L. Cullington, A man — made or Artificial Aurora. Nature, vol. 182, № 4646, 1958.
6. H. Maeda. Geomagnetic Disturbances Due to Nuclear Explosion. Journ. Geophys. Res. vol. 64, № 7, 1959.
7. S. Matsushita. On Artificial Geomagnetic and Ionospheric Storms Associated with High — Altitude Explosions, Journ. Geoph. Res., v. 64, № 9, 1959.
8. P. H. Fowler C. J. Waddington. An Artificial Aurora. Nature, vol. 182, № 4651, 1958.
9. Коковкин К. Ф. Вековой ход магнитного поля Земли в Иркутске—Зуе. Труды научно-исследовательских учреждений Гидрометслужбы, серия VI, вып. 3, 1946.
10. Вронский Б. И. Тайна Тунгусской катастрофы. Природа, № 3, 1960.
11. Станюкович К. П. Об эффектах падения больших метеоритов, Метеоритика, вып. 18, 1960.
12. T. Obayashi, S. C. Coroniti, E. T. Pierce, Geophysical Effects of High—Altitude Nuclear Explosions. Nature, vol. 183, № 6473, 1959.
13. H. Maeda T. O n d o n, Evidence of Quasi—Perpendicuear Propagation of Hydromagnetic Waves caused by Nuclear Explosions. Nature, № 4755, vol. 188, 1960.
14. Фесенков В. Г. О воздушной волне, произведенной падением Тунгусского метеорита 1908 г. Метеоритика, вып. 17, 1959.
15. Иванов К. Г. О причине последующих изменений поля в геомагнитном эффекте Тунгусского метеорита. Геомагнетизм и аэрономия, т. 1, № 4, 1961.

Magnetic effect of Tungus meteorite explosion.

A. F. Kovalevsky.

There are described magnetic field modifications of the Earth which were recorded at Irkutsk observatory after the meteorite explosion. There are noted similarities and differences between the effect of Tungus explosion and magnetic effects of nuclear trials. A mechanism of geomagnetic effect is suggested. The altitude (11—12 km) and the meteorite explosion moment are determined according to Greenwich (0 hour 16.6 min).