ПРОБЛЕМНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ КОСМИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА НА ТЕРРИТОРИИ СИБИРИ ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА имени В. В. КУЙБЫШЕВА
КОМИССИЯ ПО МЕТЕОРИТАМ И КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ СО АН СССР
ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО СССР. ТОМСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ. ТРУДЫ, ТОМ 6.
ТОМСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ВСЕСОЮЗНОГО АСТРОНОМО-ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА

ПРОБЛЕМА ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА

ВЫПУСК 2

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
Томск — 1967

ТОМСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени В. В. КУЙБЫШЕВА

О МЕХАНИЗМЕ МАГНИТНОГО ЭФФЕКТА ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА

В. К. ЖУРАВЛЕВ, Д. В. ДЕМИН, Л. Н. ДЕМИНА

Возмущение магнитного поля, совпавшее по времени с сейсмическими и барическими эффектами Тунгусского метеорита, было обнаружено только в 1959 г. [1, 3, 4]. Предположение о возможности существования магнитного возмущения, связанного с Тунгусским метеоритом, было высказано независимо рядом участников КСЭ, в связи с чем осенью 1959 года были разосланы соответствующие запросы в магнитные обсерватории, функционировавшие в 1908 году. Одним из оснований для этого предположения явился факт замечательного сходства сейсмических и барических эффектов, а также картины разрушений на месте падения с эффектами высотного ядерного взрыва, с одной стороны, и сообщения о геомагнитных эффектах ядерных взрывов 1958 года — с другой. Как выяснилось, магнитный эффект 30 июня 1908 года оказался бы уникальным геомагнитным явлением, не имеющим ничего общего с магнитными эффектами обычных метеорных потоков [2], если бы он был обнаружен до 1958 года*. В работах [3, 4, 5, 6, 7] было показано, что магнитные возмущения Тунгусского метеорита и высотных ядерных взрывов мегатонной мощности, проведенных США и Англией в 1958 году, имеют амплитуду и длительность примерно одного порядка, а также очень сходную морфологию. Этот же вывод сделан в работах К. Г. Иванова [8, 9].

Несмотря на довольно большое число работ, посвященных геофизическим эффектам сильных взрывов, до настоящего времени нет количественной теории магнитных эффектов ядерных взрывов. Обзоры этих работ сделаны в [5] и [8].

Все авторы, рассматривающие магнитные эффекты ядерных взрывов, проведенных на высотах ниже 100 км, считают первичными причинами магнитного возмущения ударную волну и радиоактивное излучение взрыва, хотя относительная роль этих факторов оценивается по-разному. Существует несколько различных гипотез о механизме геомагнитного эффекта ядерных взрывов.

Открытие магнитного эффекта Тунгусского метеорита, казалось бы, представило замечательную возможность прямого сопоставления обычного и ядерного взрывов, имеющих сравнимую мощность и высоту. Прямой эксперимент для такого сопоставления в настоящее время неосуществим: для этого пришлось бы поднять на высоту порядка 10 км не-

*) Если бы Тунгусское падение произошло после 1958 г., Иркутские магнитограммы, без сомнения, рассматривались бы как веское свидетельство факта ядерного взрыва, а естественный характер явления в целом был бы далеко не очевиден.

сколько миллионов тонн взрывчатых веществ и осуществить их одновременную детонацию.

Можно было ожидать, что, сравнивая магнитограммы Тунгусского взрыва и ядерных взрывов, удается выяснить роль ионизирующего излучения в механизме эффекта.

В действительности оказалось, что сходство тех и других возмущений настолько велико, что напрашивается вывод: радиоактивное излучение ядерного взрыва не играет сколько-нибудь определяющей роли как для возникновения эффекта, так и для его длительности, амплитуды, характера развития во времени. Учитывая, что при ядерном взрыве в верхнюю атмосферу инжектируется огромное число высокоэнергетических зарядов и квантов (общая энергия радиоактивных излучений составляет 10% полной энергии взрыва), этот вывод представляется малоправдоподобным.

Можно, конечно, также сделать допущение, что одинаковые магнитные возмущения могут быть вызваны совершенно различными причинами. Попытки объяснить изучаемые эффекты, исходя из этого положения были сделаны А. Ф. Ковалевским [5] и К. Г. Ивановым [10]. Начальная фаза для ядерных взрывов объясняется действием радиоактивного излучения, для Тунгусского метеорита — приходом ударной волны в слой Е. Главная фаза объясняется термической ионизацией газа на высотах Е-слоя ударной волной в случае метеорита и действием осколков взрыва, поднявшихся в атмосферу, или движениями газа в ионосфере после прохождения ударной волны — для ядерных взрывов. Такой подход в самой постановке вопроса вызывает возражения, поскольку можно считать доказанным, что мощности взрывов метеорита и бомб были одного порядка. Ионизация воздуха ударной волной имеет место и для ядерных взрывов, тем не менее главная фаза Тунгусского эффекта была более длительной и интенсивной по сравнению с взрывами 28/IV, 1/VIII и 12/VIII 1958 года, а не наоборот, как можно было бы ожидать, исходя из позиции авторов работ [5, 10 и др.].

Единственным принципиальным различием между эффектами метеорита и ядерных бомб можно считать запаздывание первой фазы (импульса) 30/VI 1908 года.

Однако можно выразить сомнение в реальности этого запаздывания. В отличие от ядерных взрывов, в случае Тунгусского метеорита истинный момент взрыва неизвестен. Он рассчитывается по началу возмущения на сейсмограммах, при этом постулируется некоторая вероятная скорость распространения сейсмического возмущения и воздушной ударной волны. Систематическая погрешность при этом может быть сравнима с временем запаздывания (порядка 3 минут), несмотря на высокую точность отметок времени на самописцах. То, что эта ситуация могла иметь место, подтверждают данные, приведенные в работе [11].

Согласно информации Национальной Академии наук США, ударная волна ядерного взрыва 12/VIII 1958 года достигла поверхности земли в эпицентре в 10 часов 32 мин. 08 сек. Определение этого момента по сейсмограммам в Токио дало величину 10 час. 34 мин., т. е. погрешность составляла почти 2 мин. [11]. Истинный же момент взрыва в этом случае — 10 час. 30 мин. 0,6 сек — с точностью до нескольких секунд совпал с начальным импульсом геомагнитного возмущения. Не исключено, что запаздывание и в случае Тунгусского взрыва является фиктивным, и наиболее точный момент взрыва дают магнитограммы. Правда, оценки по времени запаздывания высоты и мощности взрыва дали вполне разумные значения [6], [12], укладывающиеся в пределы, установленные другими методами. Надо, однако, иметь в виду, что эти пределы пока еще очень широки: высота определена с точностью ± 4 км, а крайние значения

мощности взрыва различаются на порядок [15]. Уточнить истинный момент взрыва по сейсмограммам, по-видимому, можно, проведя эксперименты по определению скорости распространения сейсмических возмущений на трассе Заимка Кулика — Иркутск.

Таким образом, качественное сравнение Тунгусского магнитного эффекта с магнитными эффектами ядерных взрывов приводит к заключению об их чрезвычайно большом, если не полном, сходстве. Конечно, имеются и некоторые различия, проанализированные, например, в [4, 6]. Можно ли считать эти различия принципиальными — этот вопрос, на наш взгляд, пока остается открытым. Следующим этапом является проведение количественного сравнения и расчета эффектов. В настоящее время это сделать трудно из-за недостаточности информации об условиях проведения и параметрах ядерных взрывов, с которыми производится сравнение, и из-за большой погрешности значений высоты и мощности взрыва Тунгусского метеорита.

Оценки времени распространения ударной волны были сделаны К. Г. Ивановым, на основании их была рассчитана высота и энергия взрыва [1, 12].

Однако этот расчет был основан на использовании теории, строго описывающей движение фронта ударной волны в неоднородной атмосфере лишь в начальной стадии ее распространения.

Нами сделана попытка использования более строгой теории, развитой Ю. П. Райзером для распространения фронта ударной волны по экспоненциальной атмосфере в сторону уменьшения плотности [13]. Исходные данные расчета и его результаты приведены в табл. 1. Параметры атмосферы (плотность (ρ), давление (p_n), скорость звука (С) на разных высотах были взяты из [14] (средние значения для стандартной атмосферы).

На основании данных Е. В. Маслова [15], были взяты три варианта параметров взрыва Тунгусского метеорита: минимальный (вариант № 1 в табл. 1), оптимальный (№ 2), максимальный (№ 3). Остальные варианты в табл. 1 соответствуют ядерным взрывам, с которыми проводилось сравнение. Были взяты данные для ядерных взрывов 1/III 1954 года (Бикини) — № 4 [16], 28/IV 1958 года (о-в Рождества) [17] — № 5, 12/VIII 1958 года (о-в Джонстон) [11] — № 6, а также с ядерными взрывами № 7 и 8, мощность и высота которых приводятся в работах [18] и [19] со ссылкой на сообщение Комиссии по атомной энергии США. Для взрыва № 5 точное значение мощности неизвестно, поэтому было принято ориентировочное значение 1 Мт, высота, так же ориентировочно, была взята 10 км.

Масштаб высоты рассчитывался по формуле: $\Delta = \frac{p_h}{\rho_c \cdot g}$,

где p^h — атмосферное давление на высоте взрыва,

ρ_c — плотность воздуха на высоте взрыва,

g — ускорение свободного падения.

Показатель изэнтропы воздуха для различных высот подсчитывался по формуле:

$$\gamma = \frac{c_h^2 \rho_c}{p_h}, \qquad (2)$$

где C_h — скорость звука на высоте h. Высота слоя E, как и в работе [8], была принята равной 85 *км*, поэтому расстояние, пройденное ударной волной до ионосферы, определялось по формуле

$$R_E = 85 - h, \text{ км} \qquad 3)$$

где h — высота взрыва.

Таблица 1

№ варианта	Энергия взрыва E		Высота взрыва, h (*км*)	Масштаб высоты, Δ (*м*)	Расстояние от точки взрыва до слоя E, R_E (*м*)	Плотность на высоте взрыва, ρ_e (*кг/м*^{3})	Показатель изэнтропы, γ	Показатель автомодельности, α	Коэффициент пропорцион., μ	Атм. давление на высоте взрыва, p_h (*н/м*^{2})	Параметры газа за фронтом уд. волны в ионосфере			Время ухода волны на ∞, τ (*сек*)	Условное время прихода волны в слой E, — t (*сек*)	Наличие магнитного эффекта
	дж	*Мт*									скорость, u (*м/сек*)	плотность ρ $\left(\frac{кг}{м^3}\right)$	давление, p $\left(\frac{н}{м^2}\right)$			
1	$8\cdot10^{15}$	2	6	$7{,}3\cdot10^3$	$7{,}9\cdot10^4$	0,66	1,4	5,7	0,23	47000	133	$7{,}9\cdot10^{-5}$	0,28	1024	260	+
2	$5{,}2\cdot10^{16}$	12	9	$6{,}7\cdot10^3$	$7{,}6\cdot10^4$	0,47	1,4	5,7	0,23	30660	502	$3{,}3\cdot10^{-5}$	1,69	274	63	+
3	$9{,}6\cdot10^{16}$	23	12	$6{,}4\cdot10^3$	$7{,}3\cdot10^4$	0,32	1,4	5,7	0,23	19900	896	$2{,}1\cdot10^{-5}$	3,43	148	34	+
4	$6{,}7\cdot10^{16}$	15	0	$8{,}6\cdot10^3$	$8{,}5\cdot10^4$	1,2	1,3	6,1	0,245	100908	195	$4{,}7\cdot10^{-4}$	2,68	723	234	—
5	$4\cdot10^{15}$	1	10	$7\cdot10^3$	$7{,}5\cdot10^4$	0,4	5,7	0,23	27000	27000	127	$5{,}3\cdot10^{-5}$	0,171	1016	262	+
6	$4{,}2\cdot10^{15}$	1	43	$7{,}6\cdot10^3$	$4{,}2\cdot10^4$	$4{,}1\cdot10^{-3}$	1,6	4,9	0,26	306	512	$7{,}1\cdot10^{-5}$	5,55	94	56	+
7	$1\cdot10^{17}$	25	3,6	$7{,}4\cdot10^3$	$8{,}1\cdot10^4$	0,85	1,4	5,7	0,23	62200	420	$8{,}5\cdot10^{-5}$	3,01	340	84	—
8	$2{,}5\cdot10^{17}$	60	3,6	$7{,}4\cdot10^3$	$8{,}1\cdot10^4$	0,85	1,4	5,7	0,23	62200	665	$8{,}5\cdot10^{-5}$	7,52	215	53	—

Примечание: Знак плюс в последней колонке указывает на наличие геомагнитного эффекта, знак минус — на отсутствие.

При рассмотрении движения ударной волны нас интересовал только момент времени t_E, когда ударная волна уходит на расстояние R_E от точки взрыва, т. е. момент, для которого функции-представители [13] равны 1, а

$$A(-t_E)^{\alpha} = \rho_0 \cdot \Delta. \tag{4}$$

Здесь ρ_0 — плотность воздуха в слое E, которая выражалась через плотность воздуха на высоте взрыва

$$\rho_0 = \rho_c e^{-\frac{R_E}{\Delta}}. \tag{5}$$

Показатель автомодельности находился линейным интерполированием значений, приведенных в [13]. С учетом найденного значения α и γ, рассчитанного по (12), находился коэффициент μ из условия

$$\tau = 25\left(\frac{\Delta^5 \cdot \rho_c}{E}\right)^{\frac{1}{2}}, \tag{6}$$

где τ — время распространения ударной волны от точки, находящейся на высоте $h + 3\Delta$ до бесконечности.

Величина A в формуле (4), согласно [13], определяется как

$$A = \frac{\Delta \rho_c}{e^3 \tau^{\alpha}}. \tag{7}$$

Скорость воздуха за фронтом ударной волны на расстоянии R_E определялась по формуле

$$u = \frac{2\mu E^{\frac{1}{2}} e^{\frac{R_E}{\alpha\Delta} - \frac{3}{\alpha}}}{(\gamma + 1)\Delta^{3/2} \rho_c^{1/2}}. \tag{8}$$

Плотность воздуха за фронтом ударной волны

$$\rho = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \rho_c e^{-\frac{R_E}{\Delta}}. \tag{9}$$

Избыточное давление

$$p = \frac{2}{\gamma + 1} \cdot \frac{\mu^2 E}{e^{\frac{6}{\alpha}} \Delta^3} \cdot \frac{e^{\frac{2R_E}{\alpha\Delta}}}{e^{\frac{R_E}{\Delta}}}. \tag{10}$$

Время прихода ударной волны в слой E в специальной („обратной") системе временных координат [13]:

$$(-t) = t_E = e^{\frac{3}{\alpha}} \cdot \frac{\alpha}{\mu}\left(\frac{\Delta^5 \rho_c}{E}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{R_E}{\alpha\Delta}}. \tag{11}$$

Исходные данные, приведенные в табл. 1, подставлялись в формулы (8—11).

Расчет проводился на электронной вычислительной машине для восьми вариантов, перечисленных в табл. 1. По полученным резуль-

татам были рассчитаны: скорость фронта ударной волны на расстоянии 3Δ от точки взрыва

$$D_{3\Delta} = \sqrt{\frac{\mu^2 E}{\Delta^3 \rho_c} + C_{3\Delta}^2} \quad (12)$$

($C_{3\Delta}$ — скорость звука на высоте $h + 3\Delta$), скорость фронта ударной волны на расстоянии R_E от точки взрыва

$$D_E = \alpha \frac{\Delta}{t_E}, \quad (13)$$

плотность энергии ударной волны на высоте 85 км:

$$U = \frac{\rho u^2}{2}. \quad (14)$$

Результаты этих вычислений приведены в табл. 2.

Так как ускорение ударной волны в экспоненциальной атмосфере происходит только при условии

$$D_{3\Delta} > C_{3\Delta},$$

то для взрывов № 1, 4 и 5 значения u, ρ, p, D_E и U физического смысла не имеют. В этих случаях ударная волна затухает на расстоянии порядка $h + 3\Delta$ и дальше распространяется звуковая волна.

Таблица 2

№ варианта	$D_{3\Delta}$, *м/сек*	D_E, *м/сек*	U *дж/м*^{3}	Наличие магнитного эффекта	Примечание
1	290	160	(0,7)	+	Волна затухает выше $h + 3\Delta$
2	320	605	4,1	+	
3	380	1070	8,7	+	
4	300	210	(8,9)	—	Волна затухает выше $h + 3\Delta$
5	290	150	(0,4)	+	Волна затухает выше $h + 3\Delta$
6	470	670	9,2	+	
7	300	500	7,5	—	
8	350	800	18,5	—	

Из полученных таблиц видно, что какой-либо корреляции между наличием или отсутствием магнитного эффекта и интенсивностью ударной волны не наблюдается. Не удается установить связь и между интенсивностью ударной волны и величиной амплитуды или энергии магнитного возмущения для тех случаев, когда магнитный эффект имел место.

Заметим, что в литературе отсутствуют какие-либо указания на магнитные эффекты, подобные рассматриваемым, при движении в ионосфере космических кораблей и спутников, хотя интенсивности ударных волн могут быть, по-видимому, сравнимыми.

Все это позволяет высказать сомнение в обоснованности теорий, в которых ударная волна выступает как основная причина геомагнитного возмущения. По отношению к ядерным взрывам этот вывод не является неожиданным, однако, в этом случае возникает вопрос о причине высоко-

го уровня ионизации для случая Тунгусского метеорита. Высказывавшиеся предположения о ядерной природе Тунгусского взрыва до сих пор квалифицировались как фантастические и научно не обоснованные [22]. Однако недавно ядерная гипотеза была поддержана в работе Коуэна, Атлури и Либби [23]. Но прежде чем обращаться к этому варианту, естественно попытаться найти объяснение в рамках более привычных представлений.

Возникает вопрос, не мог ли служить источником дополнительной ионизации след болида в плотных слоях атмосферы. Тело, входящее в атмосферу Земли со скоростью 7 км/сек на высотах от 6 до 60 км, создает след с концентрацией электронов 10^{11}—10^{12} см$^{-3}$ [24], т. е. на много порядков выше, чем ионосферная концентрация и концентрация, создаваемая ядерными взрывами на высотах, рассматриваемых в настоящей статье [16]. Взаимодействие ударной волны со следом в принципе могло бы вызвать магнитные возмущения. Серьезным затруднением для этого предположения является тот факт, что траектория метеорита, которая в настоящее время является наиболее вероятной (азимут 115°), находится к северо-востоку от Иркутской магнитной обсерватории. То же относится к варианту траектории Е. Л. Кринова и последнему варианту траектории И. С. Астаповича [25]. При этих траекториях, при любом механизме возмущения изменение магнитного склонения должно было бы иметь восточное направление, тогда как в действительности, согласно последним данным К. Г. Иванова, эта вариация имела противоположное направление [9] (ранее считалось, что возмущение в D-составляющей вообще отсутствовало). Высказанное предположение требует специального анализа. В частности, далеко не очевидно, что магнитные эффекты ядерного взрыва и взаимодействия ударной волны со сравнительно узким столбом ионизированной плазмы дадут возмущение практически одинакового характера.

Чтобы оценить, в какой степени на полученный результат может повлиять неопределенность метеорологических условий, нами был проведен расчет параметров ударной волны оптимального варианта Тунгусского взрыва с учетом вариаций температуры, плотности и давления, типичных для Средней Сибири в июле.

Входящие в формулы (6), (8), (9), (10), (11) значения Δ и ρ_c были рассчитаны для экстремальных значений температуры, давления и влажности. В табл. 3 приведен в качестве примера результат расчета на основе данных станции Игарка за июль 1952 года для высоты 9 км. Эти данные, взятые из Аэроклиматического справочника СССР (1957 г.), можно считать типичными.

При изменении температуры в пределах 225—251°К и давления 299—327 мбар масштаб высоты Δ меняется в пределах от 6 до 8 км, а ρ_c от 0,415 до 0,507 кг/м^3. Определены параметры ударной волны при 4 различных комбинациях предельных значений Δ и ρ_c.

Из табл. 1, 2 и 3 видно, что разброс плотности энергии, избыточного давления и других параметров, который может быть вызван изменением метеорологических условий, не превышает разброса, связанного с неопределенностью значения мощности взрыва. Следовательно, представляется маловероятным, чтобы сделанный выше вывод об отсутствии корреляции между параметрами ударной волны и наличием магнитного возмущения мог быть изменен, если бы в нашем распоряжении были точные данные о состоянии атмосферы 30 июня 1908 года.

Этот вывод должен быть снова рассмотрен, когда будут опубликованы более подробные сведения о параметрах ядерных взрывов, а также в том случае, если удастся уточнить высоту и мощность взрыва Тунгусского метеорита.

Таблица 3

№ варианта	Энергия взрыва, E (*дж*)	Высота взрыва, h (*км*)	Масштаб высоты, Δ (*м*)	Расстояние от точки взрыва до слоя, E, R_E (*м*)	Плотность на высоте взрыва, ρ_c (*кг/м*^{3})	Параметры газа за фронтом уд. волны в слое E			Время ухода волны на ∞, τ (*сек*)	Условн. время прихода волны в слой E, $(-t)$ (*сек*)	Плотность энергии уд. волны в ионосфере, U (*дж/м*^{3})
						скорость u (*м/сек*)	плотность ρ (*кг/м*)^3	давление, p (*н/м*^{2})			
9	$5{,}2\cdot10^{16}$	9	$6\cdot10^3$	$76\cdot10^3$	0,507	484	0,000036	1,69	284	66	4,21
10	$5{,}2\cdot10^{16}$	9	$8\cdot10^3$	$76\cdot10^3$	0,415	297	0,00019	3,28	401	128	8,35
11	$5{,}2\cdot10^{16}$	9	$6\cdot10^3$	$76\cdot10^3$	0,415	796	0,000008	0,99	195	36	2,50
12	$5{,}2\cdot10^{16}$	9	$8\cdot10^3$	$76\cdot10^3$	0,507	268	0,00023	3,28	443	142	8,25

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов К. Г. Метеоритика. 1961, в. 21, 44, 46.
2. Калашников А. Г. Докл. АН СССР, 1949, 66, 3.
3. Плеханов Г. Ф., Ковалевский А. Ф., Журавлев В. К., Васильев Н. В. Известия вузов СССР. «Физика», 1960, 2, 236.
4. Плеханов Г. Ф., Ковалевский А. Ф., Журавлев В. К., Васильев Н. В. Геология и геофизика. 1961, 6, 94.
5. Ковалевский А. Ф. Труды СФТИ, 1962, 41, 87.
6. Ковалевский А. Ф. В сб.: «Проблема Тунгусского метеорита». Томск, 1963, 187.
7. Журавлев В. К. В сб.: «Проблема Тунгусского метеорита». Томск, 1963, 195.
8. Иванов К. Г. Геомагнетизм и аэрономия. 1962, 2, 153.
9. Иванов К. Г. Метеоритика. 1964, 24, 141.
10. Иванов К. Г. Геомагнетизм и аэрономия. 1961, 1, 616.
11. Uyeda H., Maeda H., Kimpara A., Obayashi T., Ishikawa S., Karoabata I. Journ. Geomagn. and Geoelectr., 1959, II, 65, 62.
12. Иванов К. Г. Астрон. журн., 1963, 40, 329.
13. Райзер Ю. П. Журн. прикл. мех. и техн. физ., 1964, 4, 49.
14. Тверской П. Н. Курс метеорологии. Л., ГИМИЗ, 1962.
15. Маслов Е. В. В сб.: «Проблема Тунгусского метеорита». Томск, 1963, 105.
16. Действие ядерного оружия (пер. с англ.). Воениздат. М., 1963.
17. Mason R., Vitousek M., Nature. 1959, 184, N 4688, 52.
18. Machta L., List R., Telegradas K. Journ. Geoph. Res. 1962, 67, 1399.
19. Oksman J., Kataja E. Annales Academie Scientiarum Fennical A VI, Physica, Helsinki. 1962.
20. Золотов А. В. Докл. АН СССР, 1961, 136, 84.
21. Плеханов Г. Ф. В сб.: «Проблема Тунгусского метеорита», Томск, 1963, 3.
22. Флоренский К. П. Метеоритика, 1963, 323, 3.
23. Cowan C., Atluri C. R., Libbi W. F., Nature, 1965, 206, 861.
24. Klaimon J. AIAAJ. 1964, 2, 4.
25. Астапович И. С. В сб.: «Физика комет и метеоров», Киев, 1965, 105.

11. Заказ 160