

Анализ результатов воздействия шаровой молнии на оконное стекло

НИКИТИН А.И., БЫЧКОВ В.Л., ВЕЛИЧКО А.М., НИКИТИНА Т.Ф., ЩЕЛКУНОВ Г.П.

Приведены результаты исследования стекла, в котором образовалось отверстие в результате действия шаровой молнии. Характер повреждений стекла и выпавшего из отверстия диска может быть объяснён тем, что они могли появиться из-за быстрого нагрева стекла со стороны, противоположной той, где находилась молния, за которым последовало быстрое охлаждение стекла. В стёклах не обнаружено признаков радиоактивности. С помощью рентгеновского спектрометра был исследован элементный состав различных участков поверхности стекла. Содержание основных элементов, входящих в состав стекла, — кислорода, кремния, натрия, магния, калия и кальция — для контрольного образца и для обеих сторон диска оказалось одинаковым. Однако анализ кромки диска, на которой напряжение достигло предела прочности стекла, показал, что в этом месте поверхность стекла в 2 раза меньше содержит кремния и в 1,4 раза больше кислорода.

Ключевые слова: шаровая молния, отверстие в стекле, изменение элементного состава стекла

Из-за кратковременности существования шаровых молний и непредсказуемости времени и места их появления единственным источником сведений о их характеристиках являются описания свидетелей события, редкие фотографии и следы воздействия шаровой молнии (ШМ) на различные объекты. Среди последних большую ценность представляют результаты взаимодействия шаровых молний с оконными стёклами. Как правило, ШМ при контакте со стеклом «вырезает» в нём круглое отверстие диаметром 5–8 см, однако имеются многочисленные сообщения и о том, что шаровая молния проходила через стекло, не повреждая его. Многими исследователями проводились попытки смоделировать действие ШМ, нагревая небольшой участок стекла. Эти опыты позволили определить, что для создания отверстия ШМ должна затратить на нагрев стекла энергию не меньше нескольких килоджоулей. Однако полной идентичности результатов указанного воздействия и результатов действия ШМ так и не было достигнуто. Так же недостаточно понятным остаётся механизм «выбивания» из стекла диска, как правило, имеющего острую кромку. В настоящей статье сделан ещё один шаг в исследовании свойств стекла, контактировавшего с

The results from a study of a glass in which a hole appeared due to the effect of ball lightning are presented. The nature of damage inflicted to the glass and to the disk that fell out from the hole can be explained as follows. These damages could occur as a result of rapid heating of the glass on the side opposite to that on which the lightning was, followed by rapid cooling of the glass. No signs of radioactivity were found in the glasses. The elemental composition of different parts of the glass surface was studied using an X-ray spectrometer. The content of oxygen, silicon, sodium, magnesium, potassium, and calcium, which are the main elements used in the glass composition, was found to be the same for the check sample and for both sides of the disk. However, an analysis of the disk edge the stress on which reached the glass strength limit showed that the glass surface in this location contained a factor of 2 less silicon and a factor of 1.4 more oxygen.

Key words: ball lightning, hole in a glass, change in the elemental composition of glass

ШМ: впервые проведён элементный анализ его поверхности. Обнаружено, что состав стекла заметно изменился: на краю диска оно оказалось обеднённым кремнием и обогащённым кислородом. Полученный результат может помочь продвигаться в понимании природы ШМ.

Описание события. 13 апреля 1994 г. в г. Щёлково Московской области (Россия) была солнечная безветренная погода. Около 17 ч хозяйка одной из квартир увидела боковым зрением яркую вспышку в окне, после которой через 1,5–2 секунды она услышала звон падающего стекла [1]. Она обнаружила, что в стекле наружной рамы толщиной 3 мм появилось круглое отверстие размерами около 8,2×7,6 см, а под ним между наружным и внутренним стеклом лежал круглый диск, выпавший из отверстия (см. рис. 1). Центр отверстия был расположен в нижней части оконного стекла размерами 97×49 см на расстоянии 42 см от его нижнего края и в 17 см от правого края. При этом внутреннее стекло рамы осталось неповреждённым.

Следы воздействия ШМ на стекло. *Характеристики отверстия.* Отверстие в стекле с внутренней стороны окна (со стороны помещения) представляет собой овал, большая ось которого наклонена к

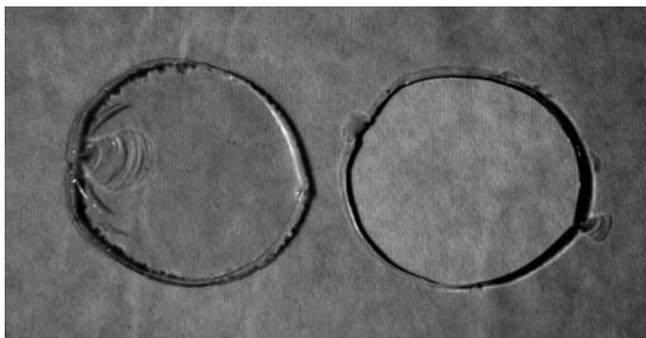


Рис. 1. Отверстие в стекле (справа) и диск, выпавший из отверстия (слева); размеры осей диска и отверстия 8,2 и 7,6 см

горизонту под углом 24° . Размер отверстия вдоль этой оси 82,0 мм, размер в направлении, перпендикулярном большой оси, — 76,7 мм. На противоположных краях отверстия, лежащих на большой оси овала, имеются два трапециевидных скола длиной 10 мм и глубиной около 200 мкм. Размер основания трапеции 10 мм, размер верхней части 6 мм. На краях сколов (около оснований трапеций) имеются концентрические дуги, центр которых расположен примерно на краю отверстия. Левую часть отверстия окаймляет серповидный ободок с максимальной шириной в центре 6 мм, представляющий собой след отколотого тонкого слоя стекла, оставшегося на краю выпавшего диска. Край отверстия с внутренней стороны стекла скруглён, а стенка отверстия по всей длине имеет гладкую зеркальную поверхность. Это является свидетельством того, что эта часть стекла испытала нагрев до температуры размягчения (около 600°C). В противоположность этому край отверстия с наружной стороны стекла (со стороны улицы) остался острым. Кроме двух больших сколов (площадью около 1 см^2) на внутренней поверхности стекла имеется ещё 4–5 неглубоких сколов размером 3×3 мм, примыкающих к краю отверстия. На наружной стороне стекла таких сколов нет. Здесь размеры отверстия вдоль большой и малой осей овала равны, соответственно, 80,5 и 74,7 мм. Это означает, что отверстие имеет форму усечённого конуса с основанием, обращённым внутрь помещения. Угол при основании конуса на большой оси равен 76° , а на перпендикулярной к ней оси — 72° .

Характеристики диска. Диск может быть хорошо вставлен в отверстие. Он представляет собой усечённый конус с расширением со стороны внутренней поверхности стекла. Размеры осей основания диска равны 82,0 и 76,7 мм, а размеры вдоль осей его верхней грани равны, соответственно, 80,5 и 75,4 мм. Угол при основании конуса на большой оси, как и у отверстия, равен 76° , а на малой оси он увеличен до 78° , т.е. угол на малой оси больше угла конусного отверстия. Это можно объяснить

тем, что размер внутренней части отверстия мог увеличиться из-за действия сил поверхностного натяжения на расплавленное стекло. Ребро диска имеет гладкую зеркальную поверхность. К половине окружности внутренней поверхности диска примыкает острая клиновидная кромка толщиной около 50 мкм и высотой от 2 до 6 мм, оторванная от внутренней поверхности стекла рамы. На внешней поверхности диска расположены круглые сколы глубиной около 100 мкм, отстоящие от края диска на 0,5–1 мм. Как отмечено выше, на наружной стороне стекла с отверстием таких сколов нет. В месте, где острая кромка имеет наибольшую высоту, на краю диска имеется большой скол примерно круглой формы диаметром около 20 мм, на котором зеркальную поверхность, ограниченную дугой радиусом 10 мм, окаймляют волнистые дуги радиусом от 12 до 24 мм. Дуги имеют общий центр, находящийся на краю диска. Скол расположен на большой оси овала, наклонённой к горизонту под углом 24° . Он соприкасается с описанным выше сколом площадью около 1 см^2 , находящимся на внутренней стороне стекла с отверстием. Центр дуг скола на поверхности диска совпадает с центром дуг на сколе стекла с отверстием. Через этот центр также проходит окружность, на которой в диске расположены две неразвившиеся трещины длиной около 15 мм.

Анализ результатов воздействия шаровой молнии на стекло. *Общий анализ события.* Хотя свидетельница события не видела процесса образования отверстия в стекле, нет сомнений в том, что это отверстие появилось именно из-за воздействия на стекло ШМ. Середина апреля в Европейской части России — начало грозовой деятельности, а случаи появления ШМ при ясной погоде — не такое уж редкое явление [2–6]. Рассматриваемый случай уникален тем, что в распоряжении исследователей оказались как диск, так и стекло с отверстием, что бывает довольно редко. Необычность изученных образцов состоит в том, что как в стекле с отверстием, так и в выпавшем диске отсутствуют трещины, идущие перпендикулярно контуру основной кольцевой трещины. Такие трещины имелись в большинстве образцов стёкол, подвергшихся воздействию ШМ [7, 8], они также обычно возникают при относительно медленном локальном нагреве поверхности стекла или при ударе по нему твёрдого предмета [9–12]. Наличие гладкого края углового контура отверстия на внутренней стороне стекла указывает на то, что стекло было нагрето до температуры выше 600°C . Заметим, что этот нагрев произошёл на стороне, противоположной той, которой касалась ШМ. На наружной стороне стекла, где находилась ШМ, нагрев стекла был менее значи-

тельным (по крайней мере, температура была не выше 600 °С).

При наличии на одной из сторон стекла источника тепла, нагретого до температуры T , скорость изменения температуры на другой стороне стекла толщиной Δx можно оценить по формуле:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\Delta}{\Delta x} \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right), \quad (1)$$

Здесь λ – удельная теплопроводность материала; c – его теплоёмкость; ρ – его плотность; ΔT – разность температур на противоположных поверхностях стекла.

Подставляя в формулу (1) значения λ , c и ρ для стекла: $\lambda=1,36$ Вт/м·К, $c=0,67 \cdot 10^3$ Дж/кг·К, $\rho=2,4 \cdot 10^3$ кг/м³ и $\Delta T=700$ К, получаем $\Delta T / \Delta t = 65,8$ К/с.

К сожалению, для рассматриваемого случая нет сведений о том, когда и как долго шёл нагрев стекла: или в течение какого-то времени до момента «вспышки» света или в течение двух секунд, прошедших от момента вспышки до падения диска. В аналогичном рассматриваемому случае, описанном в [9], нагрев стекла ШМ происходил в течение 5 с, после чего она ярко вспыхнула и исчезла. Поэтому в качестве средней оценки примем, что ШМ нагревала стекло в течение 3 с (этот процесс женщиной остался незамеченным), после чего она взорвалась, образовав зародыш кольцевой трещины. Через 2 с из-за остывания стекла завершилось формирование трещины и диск выпал из отверстия. За 3 с температура наружной поверхности стекла не могла увеличиться более чем на 200 К, т.е. она могла подняться только до 210 °С. При наличии теплоотвода от поверхности стекла (например оболочкой ШМ) подъём температуры мог оказаться меньше 200 К.

Оценка по формуле (1) показывает, что за те же 3 с слой стекла, отстоящий от нагреваемой поверхности на 1,5 мм, мог успеть прогреться до температуры плавления стекла. Найдём энергию, необходимую для этого нагрева. Для определения минимального значения этой энергии будем считать, что происходит нагрев только кольцевой зоны стекла размерами $d^2=1,5 \times 1,5$ мм², лежащей на контуре отверстия радиусом $R=40$ мм. Объём этого кольца $V_c=2\pi R d^2=1,13 \cdot 10^{-6}$ м³, а масса $m_c=2,7 \cdot 10^{-3}$ кг. Умножив m_c на удельную теплоёмкость стекла $c=0,67 \cdot 10^3$ Дж/кг·К и на $\Delta T=600$ К, находим $Q_{\min}=m_c c \Delta T=1085$ Дж. Отсюда минимальная мощность нагрева $P_{\min}=Q_{\min}/3c=360$ Вт. Если принять, что до температуры плавления на глубину $d=1,5$ мм прогрелся весь поверхностный слой диска радиусом 40 мм, получаем другую оценку значения поглощённого тепла: $Q_{\max}=\pi R^2 d \rho c \Delta T=7,3$ кДж и

$P_{\max}=2,4$ кВт. Полученные оценки согласуются с результатами, полученными в опытах по локальному нагреву стекла [9–11].

Коэффициент линейного расширения оконного стекла равен $\alpha=9 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹ [13]. При нагреве внутренней поверхности стекла на $\Delta T=600$ К диаметр диска $D=80$ мм должен увеличиться по сравнению с непрогретой частью диска (на наружной стороне стекла) на величину $\Delta l=\alpha D \Delta T=0,43$ мм. Примерно такая же разница в размерах должна быть и в коническом отверстии. Однако измеренное различие диаметров отверстия с обеих сторон стекла оказалось несколько больше – 0,8–1 мм. Как уже говорилось выше, это могло произойти из-за размягчения нагретого участка стекла и увеличения диаметра края отверстия из-за действия сил поверхностного натяжения. По-видимому, это в какой-то мере способствовало снятию напряжений в стекле и предотвращению развития радиальных трещин.

Изложенная выше схема процессов, происходящих при нагреве стекла, однако, не даёт ответов на вопросы о механизме образования кольцевой трещины и причинах появления силы, вытолкнувшей диск внутрь помещения. На действие этой силы указывают сколы, расположенные вблизи окружности диска. Эта сила была распределена по окружности неравномерно: основной удар пришёлся на точки диска, лежащие на большой оси овала. Об этом свидетельствуют большие поверхностные сколы, расположенные на наружной поверхности диска и на внутренней поверхности стекла с отверстием. Ориентация осей сколов указывает на то, что сила была приложена под острым углом к поверхности стекла, а центр её приложения находился на краю диска. Как уже говорилось, размер зеркальной поверхности большого скола на диске равен 10 мм. Это позволяет предположить, что значение разрушающего напряжения было не меньше $P_{ds}=0,5$ Н/см² [12]. Умножив P_{ds} на площадь диска $S=50$ см², находим силу, вытолкнувшую диск: $F_d=25$ Н. Вполне возможно, что трещина могла возникнуть в результате быстрого охлаждения кольцевого участка стекла из-за испарения вещества оболочки ШМ, а сила, вытолкнувшая диск из отверстия, появилась благодаря импульсу отдачи струй испарённого вещества. При этом, однако, остаётся непонятной причина отрыва острой кромки от поверхности внутренней части стекла.

Исследование свойств поверхности стекла. Стекланный диск был проверен на радиоактивность с помощью бытового дозиметра «Белла», регистрирующего γ -излучение в области энергий 0,05–1,25 МэВ. При проведении измерений дозиметр лежал на поверхности стекла. Средняя мощность дозы излучения составила $(0,098 \pm 0,024)$ мкЗв/ч, а мощ-

ность дозы излучения фона оказалась равной $(0,109 \pm 0,021)$ мкЗв/ч. Таким образом, можно утверждать, что в исследованном диапазоне энергий γ -радиоактивность стекла отсутствует.

Поверхность диска, а также контрольного образца, отрезанного от угла стекла с отверстием (отстоящего от центра отверстия на 61 см), была исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа FEI «Quanta 200 3D» и рентгеновского энергодисперсионного спектрометра EDAX «Genesis 2000». На изображениях поверхности, полученных при увеличении 200 \times , 400 \times и 800 \times были видны царапины шириной 2–4 мкм, удалённые друг от друга на расстояние 20–50 мкм. Число царапин на единице площади контрольного образца, а также внутренней и внешней поверхности диска оказалось примерно одинаковым.

При исследовании элементного состава тех же образцов стёкол они облучались пучком электронов с энергией 30 кэВ и регистрировалось рентгеновское излучение. В табл. 1 приведены значения содержания элементов в приповерхностном слое стекла толщиной 1 – 3 мкм для контрольного образца и центральных частей внешней и внутренней поверхности диска. Можно видеть, что процентное содержание атомов элементов во всех исследованных участках поверхности примерно одинаково, а отношение атомных содержаний основных компонентов стекла – кислорода и кремния – $[O]/[Si] = 1,72$.

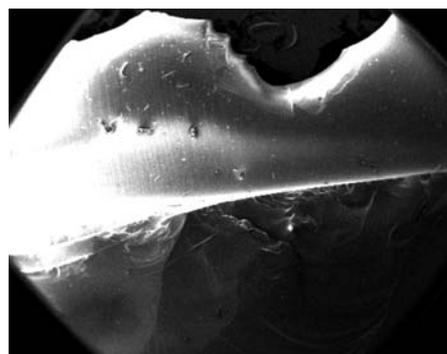
Таблица 1

Элемент	Атомное содержание элементов в образцах стекла (в числителе) и ошибка измерения (в знаменателе), %		
	Контрольный образец	Внешняя сторона диска	Внутренняя сторона диска
C	-/-	2,41/34,71	4,03/12,81
O	53,09/1,19	51,79/1,22	52,12/0,66
Na	8,36/1,69	8,63/1,67	8,87/0,91
Mg	2,55/2,97	2,42/3,14	2,29/1,78
Al	0,76/5,28	0,69/5,92	0,67/3,47
Si	31,67/0,50	30,50/0,52	28,83/0,29
S	0,16/18,13	0,25/12,88	0,11/14,23
Cl	0,13/18,23	0,13/18,78	0,08/15,81
K	0,23/8,62	0,21/9,71	0,20/5,48
Ca	3,05/1,40	2,97/1,44	2,73/0,82
Fe	-/-	-	0,07/12,04

Однако результаты исследования поверхности края диска, особенно его острой кромки, оказались неожиданными. Эта кромка, по всей вероятности, испытала на себе удар ШМ и могла сохранить на

себе следы воздействия её вещества. На рис. 2 показана фотография кромки диска, примыкающей к сколу на его крае (с увеличением 37 \times). В табл. 2 приведены значения содержания элементов в зоне *A*, находящейся на расстоянии 0,3 мм от края стекла (она отмечена крестом), и в зоне *B*, смещённой вниз относительно зоны *A* на 2 мм (расположенной на краю уступа).

Таблица 2

Рис. 2. Фотография края диска; увеличение 37 \times

Элемент	Атомное содержание (%) элементов в поверхностном слое следующих зон стекла (рис. 2–4)				
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
O	68,66	71,25	61,50	54,84	59,51
F	0,92	1,07	0,19	0,26	0,37
Na	8,76	8,57	8,75	10,54	8,93
Mg	2,15	2,14	2,41	2,52	2,48
Al	0,67	0,53	0,52	0,71	0,57
Si	17,91	15,86	24,44	28,46	25,89
Cl	-	-	0,16	0,12	0,09
K	-	-	0,16	0,16	0,12
Ca	0,92	0,58	1,86	2,39	1,97
Fe	-	-	-	-	0,08

На рис. 3 показан участок зеркальной поверхности скола на диске, а в табл. 2 указан элементный состав поверхности зоны *C*, смещённой к центру диска на 1,5 мм относительно зоны *B*, и зоны *D*, смещённой к центру диска относительно *C* ещё на 3 мм.

И, наконец, на рис. 4 показан снимок (с увеличением 39 \times) зоны *E* скола с радиальными дугами, а в последнем столбце табл. 2 приведены значения процентного содержания элементов в этом участке поверхности стекла.

Сравнивая данные табл. 1 и 2, можно заметить, что по мере смещения области анализа от центра диска к его краю (в направлении от *E* к *A*) в стекле практически не меняется содержание натрия (оно сохраняется на уровне среднего значения около 9%), не меняется содержание магния (среднее зна-

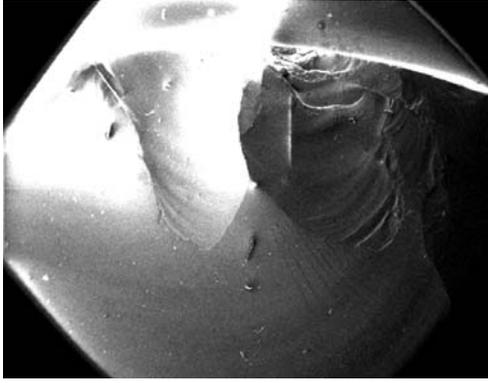


Рис. 3. Фотография зеркальной поверхности стекла; увеличение 37×

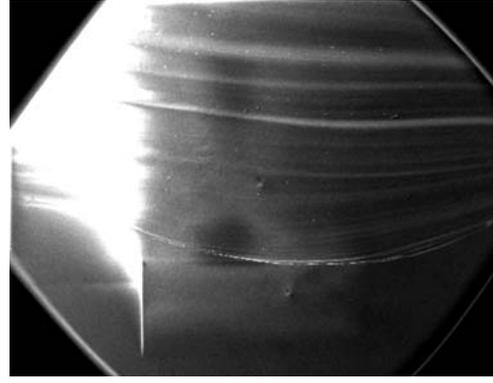
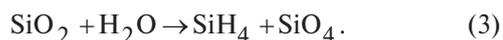
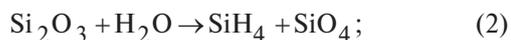


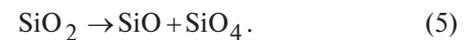
Рис. 4. Фотография области диска с концентрическими дугами; увеличение 39×

чение 2,4%) и алюминия (среднее 0,6%). Однако при этом происходит заметное уменьшение процентного содержания кальция (от 3 до 0,6%) и кремния (от 30,5 до 15,9%), а содержание кислорода увеличивается от «нормы» 52 до 71%.

Наблюдаемые изменения элементного состава исследованных участков поверхности стекла, которые подверглись удару ШМ, не могут быть объяснены неточностью измерений, скорее всего, они обязаны своим появлением каким-то физико-химическим процессам. Как мы видим, в приповерхностном слое стекла наиболее сильно изменяются концентрации кремния (он как бы «уходит» из стекла) и кислорода (он как бы «имплантируется» в состав стекла). Не исключена возможность, что это могло произойти из-за реакции окиси кремния с водой на горячей поверхности стекла. В исходном стекле (см. табл. 1) отношение концентраций атомов кислорода и кремния равно $1,73 \pm 0,05$. Это можно объяснить тем, что в нём находится смесь модификаций Si_2O_3 ($[\text{O}]/[\text{Si}] = 1,5$) и SiO_2 ($[\text{O}]/[\text{Si}] = 2$). В изменённом стекле (см. табл. 2, зоны А и В) отношение $[\text{O}]/[\text{Si}] = 4,16 \pm 0,33$, что можно описать химической формулой SiO_4 . Схемы химических реакций, приводящих к образованию SiO_4 , можно представить как



Появляющийся в этой реакции газообразный силан SiH_4 испаряется, а «переокислённый» кремний SiO_4 остаётся внутри стекла. Вода, участвующая в реакции, может находиться в виде плёнки на поверхности стекла либо содержаться в самой шаровой молнии. Вполне возможно, что в ходе реакций (2) и (3) образуются и другие соединения, в состав которых входят атомы водорода и радикалы гидроксила OH . Не исключена возможность образования SiO_4 и в реакциях:



Образующаяся в этих реакциях газообразная окись кремния удаляется из стекла. Однако упругость паров SiO достигает значений нескольких тор лишь при температуре выше 1700°C . Маловероятно, что стекло было нагрето ШМ до таких высоких температур.

Оптический спектр пропускания центральной части диска в области длины волн от 400 до 1000 нм не отличается от спектра пропускания контрольного образца стекла (при толщине обоих образцов 3 мм). Одинаковым для двух стёкол оказался и вид рассеяния луча гелий-неонового лазера, что указывает на то, что контакт стекла с ШМ не привёл к появлению в нём неоднородностей размером больше 1 мкм.

Закключение. Анализ образцов стекла, находившихся в контакте с шаровой молнией, подтвердил основные выводы, сделанные ранее на основе анализа других стёкол [10, 11], а также позволил обнаружить их новые свойства.

1. Образование кольцевой трещины в стекле было вызвано быстрым (в течение нескольких секунд) нагревом участка поверхности стекла до температуры размягчения, за которым последовало быстрое охлаждение стекла со стороны, противоположной той, на которой находился источник тепла.

2. Минимальное значение энергии, необходимое для нагрева поверхностного слоя стекла до температуры размягчения составляет от 1 до 7 кДж, а мощность источника тепла должна быть не менее 0,4–2,4 кВт.

3. Нагрев стекла происходил на стороне, противоположной той, на которой находилась шаровая молния. Это означает, что передача энергии от ШМ к источнику тепла сквозь стекло происходила практически без потерь. Вероятнее всего, энергия

передавалась в виде электромагнитного излучения на длинах волн в «окнах» прозрачности стекла (400–600 нм, 1–10 см) [14].

4. Наиболее вероятно, что источником нагрева поверхности стекла служила плазма, возникающая под действием высокочастотного разряда в воздухе [10, 11]. Генератором, поддерживающим горение разряда, не могли быть постоянный ток или высокочастотное излучение коронного разряда (из-за небольшой мощности). Источник высокочастотного радиоизлучения, скорее всего, находился внутри шаровой молнии, а его мощность могла значительно увеличиться во время её гибели.

5. Отсутствие следов радиоактивности в исследованных образцах стекла указывает на то, что в составе вещества шаровой молнии не могло быть радиоактивных элементов с периодом полураспада более 10 лет.

6. Наличие в кромке диска только элементов, типичных для состава стекла, означает, что в составе вещества шаровой молнии не могли входить такие элементы как углерод, медь, цинк и железо.

7. Изменение содержания кремния и кислорода в поверхностном слое скола диска может быть связано с реакцией материала стекла с водой, которая может входить в состав оболочки шаровой молнии.

Авторы благодарят за проведение элементного анализа образцов стёкол А.Л. Васильева, С.Н. Хаханова, Н.В. Швындину и Н.А. Архарову.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щелкунов Г.П. Шаровая молния: наблюдение и анализ следов. – Наука и жизнь, 2001, № 10.
2. Сингер С. Природа шаровой молнии. – М.: Мир, 1973.
3. Барри Дж. Шаровая молния и чёточная молния. – М.: Мир, 1983.
4. Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Stenhoff M. Ball lightning. An unsolved problem in atmospheric physics. – N.Y.: Kluwer/Plenum, 1999.
6. Григорьев А.И. Шаровая молния. – Ярославль: Изд-во ЯрГУ, 2006.
7. Имянитов И., Тихий Д. За гранью законов науки. – М.: Атомиздат, 1980.
8. Turner D.J. The interaction of ball lightning with glass window panes. – J. Meteorol., 1997, vol. 22, № 216.
9. Колосовский О.А. Исследование следа шаровой молнии на оконном стекле. – ЖТФ, 1981, т. 51, вып. 4.
10. Nikitin A.I., Bychkov V.L., Nikitina T.F., Velichko A.M. Modeling of ball lightning interaction with window panes. – Proc.

8th Intern. Symp. on Ball Lightning (ISBL04), Chung-li (Taiwan), 2004.

11. Никитин А.И., Бычков В.Л., Никитина Т.Ф., Величко А.М. Моделирование взаимодействия шаровой молнии с оконными стёклами. – Хим. физика, 2006, т. 25, № 4.

12. Солнцев С.С., Морозов Е.М. Разрушение стекла. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008.

13. Физические величины. Справочник/Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

14. Машкович М.Д. Электрические свойства неорганических диэлектриков в диапазоне СВЧ. – М.: Советское радио, 1969.

[21.06.10]

Авторы: Никитин Анатолий Ильич окончил в 1961 г. физический факультет Московского государственного университета (МГУ). В 1989 г. защитил докторскую диссертацию «Индукцированное излучение и химические реакции при неравновесном колебательном возбуждении молекул» в Научно-исследовательском физико-химическом институте им. Л.Я. Карпова. Главный научный сотрудник Института энергетических проблем химической физики РАН.

Бычков Владимир Львович окончил в 1973 г. физико-математический факультет Российского университета дружбы народов. В 2000 г. защитил докторскую диссертацию «Теплофизические процессы в ионизированных газах, созданных электронными пучками, и несамостоятельных газовых разрядах» в Московском государственном областном университете. Ведущий научный сотрудник физического факультета МГУ.

Величко Александр Михайлович окончил в 1982 г. Московский физико-технический институт (МФТИ). В 1987 г. защитил кандидатскую диссертацию «Вторичные химические и фотохимические процессы при лазерном разделении изотопов углерода» в МФТИ. Старший научный сотрудник Института энергетических проблем химической физики РАН.

Никитина Тамара Фёдоровна окончила в 1961 г. физический факультет МГУ. В 1968 г. защитила кандидатскую диссертацию «Исследование инжекционных полупроводниковых квантовых генераторов из GaAs, работающих при комнатной температуре» в Физическом институте АН СССР им. П.Н. Лебедева. Старший научный сотрудник Института энергетических проблем химической физики РАН.

Щелкунов Геннадий Петрович окончил в 1957 г. радиотехнический факультет МФТИ. Ведущий научный сотрудник ЗАО «НПП «Гамма» в г. Фрязино Московской области.