

## Главная стадия разряда молнии: механизм и выходные характеристики

© Г.Н. Александров

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: georgiya@mail.ru; alexandrovgn@rambler.ru

(Поступило в Редакцию 22 марта 2006 г.)

Рассмотрены физические процессы разряда молнии. Установлена связь между основными физическими величинами, характеризующими процесс развития разряда молнии, и величиной и формой тока молнии. Показано, что максимальное значение тока молнии пропорционально длине искрового канала, крутизна зависит только от физических постоянных искрового разряда, а длительность — также от плотности объемного заряда лидера.

PACS: 92.60.Pw, 52.80.Mg

В [1,2] была рассмотрена физическая картина развития искрового разряда в длинных воздушных промежутках и показана их аналогия с разрядом молнии. Механизм развития разряда молнии следующий. Разряд развивается в лидерной форме, представляющей собой последовательный ряд стримеров, сдвинутых один по отношению к другому в пространстве и во времени. В результате перемещения электронов вдоль последовательно развивающихся стримеров разогревается канал лидера до нескольких тысяч градусов, что определяет возможность продвижения искрового разряда через гигантские расстояния между грозowymi облаками и Землей (возвышающимися над Землей предметами). Перемещение электронов вдоль стримеров приводит к образованию объемного заряда вокруг разогретого искрового канала, полярность которого соответствует знаку заряда облака. В настоящее время предложенный в [1,2] механизм развития искрового разряда является общепринятым. Однако до настоящего времени не был рассмотрен детально механизм нейтрализации объемного заряда лидера молнии, создающий основной ток молнии, поскольку время нейтрализации объемного заряда лидера молнии на два порядка меньше его образования. Как правило, рассматривается волновой процесс нейтрализации без анализа происходящих при этом физических процессов [3,4]. В настоящей статье предпринята попытка ликвидации этого недостатка современного состояния теории молнии.

При накоплении зарядов (положительных или отрицательных) в облаке возрастает напряженность электрического поля до тех пор, пока не начинают развиваться ионизационные процессы в стримерной форме [1,2]. Продолжающееся разделение зарядов в облаке под воздействием восходящих потоков теплого воздуха приводит к удлинению стримеров. При достижении стримерами длины, минимально необходимой для разогревания части их канала до температуры термической ионизации газа ( $\approx 1.5$  м), начинается развитие искрового канала

в лидерной форме. Соответственно начальная линейная плотность объемного заряда лидера (объемный заряд, отнесенный к единице длины лидера) определяется средней напряженностью электрического поля в стримерах и минимальной длиной стримеров лидера

$$\tau_{l \min} = 2\pi\epsilon_0 E_{str} l_{str \min}, \quad (1)$$

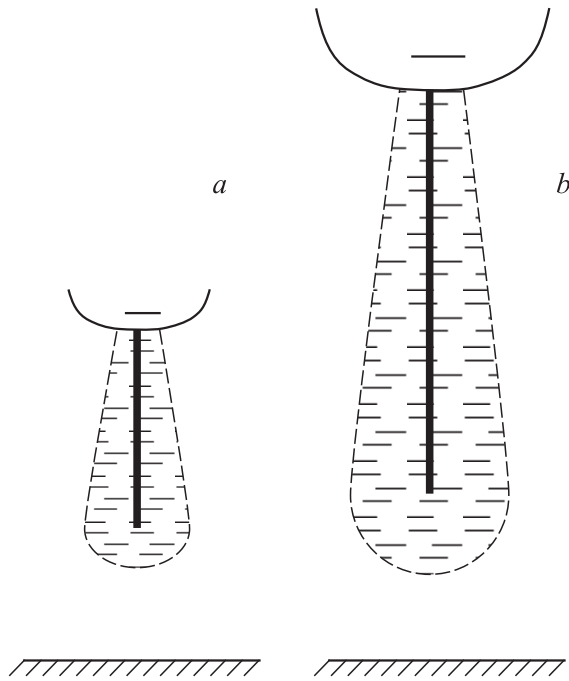
где средняя напряженность поля положительных стримеров  $E_{str}^+ = 500$  кВ/м и в отрицательных стримерах  $E_{str}^- = 800$  кВ/м. Поэтому начальная плотность положительного объемного заряда составляет

$$\tau_{l \min}^+ = \frac{2\pi \cdot 500 \cdot 10^3 \cdot 1.5}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 0.042 \cdot 10^{-3} \text{ C/m.}$$

Для разогревания отрицательных стримеров необходима большая их полная длина, чем для положительных стримеров, поскольку в отрицательных стримерах электроны движутся не по направлению к разогретому каналу лидера, а от него к концу стримеров [2]. Избыток отрицательного заряда вокруг разогретого канала лидера образуется вследствие повышения плотности отрицательных ионов, образуемых в результате перемещения электронов к концу стримера. Поэтому продвижение лидера отрицательного разряда происходит четко выраженными ступенями с паузами, необходимыми для продвижения электронов примерно на 25% длины стримеров [2]. Соответственно длина начальных стримеров разряда отрицательной полярности вчетверо больше, чем положительных, и начальная плотность объемного заряда лидера равна

$$\tau_{l \min}^- = \frac{2\pi \cdot 800 \cdot 10^3 \cdot 6}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 0.27 \cdot 10^{-3} \text{ C/m.}$$

Продвижение лидера молнии по направлению к Земле приводит к сокращению промежутка между концом лидера и Землей и соответственно к увеличению напряженности поля вблизи окончания лидера. Это приводит



**Рис. 1.** Схематическая картина развития лидерного процесса между заряженным центром облака и Землей при различных расстояниях между ЗЦО и Землей: при минимальном расстоянии (a) и при увеличенном (b).

к удлинению стримеров и расширению области объемного заряда лидера, а в конечном счете к увеличению погонной плотности объемного заряда вокруг канала лидера (объемного заряда на единицу длины канала лидера), что иллюстрируется рис. 1. При этом большее количество стримеров, непрерывно развивающихся при положительном лидере один за другим [1], приводит к накоплению большего объемного заряда, чем при отрицательном лидере [2]. Длина положительного разряда молнии, возникающей в верхних областях облака, как правило, больше, чем отрицательного разряда, происходящего из нижних и средних областей грозового облака. В линейном приближении средняя погонная плотность объемного заряда лидера может быть выражена зависимостью

$$\tau_l = \tau_{l \min} + k_\tau H_l, \quad (2)$$

где  $k_\tau$  — коэффициент, зависящий от полярности разряда,  $H_l$  — длина канала лидера (с учетом его извилистости).

Согласно (1), средняя длина стримеров, формирующих объемный заряд лидера молнии, равна

$$l_{str} = \frac{\tau_l}{2\pi\epsilon_0 E_{str}} = \frac{\tau_{l \min} + k_\tau H_l}{2\pi\epsilon_0 E_{str}} \quad (3)$$

и составляет десятки метров.

Резкое понижение потенциала канала лидера при завершении его развития у поверхности Земли приводит к распространению вдоль плазменного искрового канала электромагнитной волны нейтрализации. Как и все

электромагнитные процессы, эта волна нейтрализации распространяется вдоль искрового канала со скоростью света  $\nu$ , достигая заряженного центра облака (ЗЦО) за время

$$T_{em} = \frac{H_l}{\nu}. \quad (4)$$

Нейтрализация объемного заряда завершилась бы за это время, если бы весь нейтрализующий заряд мог разместиться в пределах проводящего канала, диаметр которого на момент начала процесса нейтрализации составляет около 4 см. Поскольку, по данным [5], средняя линейная плотность объемного заряда отрицательного лидера составляет около  $1.5 \cdot 10^{-3}$  C/m, а при положительном разряде еще больше, размещение всего нейтрализующего заряда противоположного знака в проводящем канале невозможно, так как при этом напряженность поля на поверхности канала достигла бы

$$E_{ch} = \frac{\tau_l}{2\pi\epsilon_0 r_{ch}} = \frac{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 1.5 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 0.02} = 1.35 \cdot 10^9 \text{ V/m},$$

что невозможно. Поэтому по мере распространения волны нейтрализации по проводящему каналу от Земли к ЗЦО с поверхности канала начинают развиваться стримеры, полярность которых противоположна полярности разряда молнии (объемного заряда). И чем выше поднимается электромагнитная волна нейтрализации, тем больше стримеров включается в процесс нейтрализации объемного заряда лидера. Максимальное количество стримеров начинает участвовать в процессе нейтрализации объемного заряда лидера при достижении электромагнитной волны нейтрализации ЗЦО [6]. При отрицательном разряде молнии в проводящий канал начинает поступать максимальное количество электронов из положительных стримеров, нейтрализующих отрицательный объемный заряд лидера. Соответственно по проводящему каналу начинает протекать максимальный ток молнии.

При положительном разряде молнии, напротив, по достижении электромагнитной волной нейтрализации ЗЦО максимальное количество электронов начинает поступать в отрицательные стримеры, нейтрализующие положительный заряд лидера молнии, что эквивалентно протеканию положительного тока молнии по проводящему каналу.

Следовательно, время нарастания тока молнии, или длительность фронта импульса тока молнии, определяется временем распространения электромагнитной волны вдоль проводящего канала молнии [6], согласно соотношению (4).

Минимальная высота грозовых облаков над поверхностью Земли составляет 600 м, поэтому минимальная длина фронта тока молнии

$$T_f = T_{em} = \frac{600}{3 \cdot 10^8} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}.$$

С учетом извилистости искрового канала реальная минимальная длина фронта тока молнии —  $2.5\text{--}3 \mu\text{s}$ . Все

опубликованные данные относительно меньших длин фронтов токов молнии следует отнести к ошибкам измерительной техники.

Наиболее вероятная длина разряда молнии — 2–3 км [7–10], что определяет вероятную длительность фронта тока молнии  $T_f = 6.7–10 \mu\text{s}$ . Максимальная высота грозовых облаков — 10 км, поэтому максимальная длительность фронта тока молнии составляет  $33 \mu\text{s}$ , а с учетом извилистости проводящего канала молнии — до  $40 \mu\text{s}$ . Поскольку из верхней части грозовых облаков развиваются, как правило, положительные разряды, такая длительность фронтов токов молнии характерна для этого вида молний.

Ток нейтрализации протекает до тех пор, пока не будет нейтрализован весь объемный заряд лидера молнии. Следовательно, время протекания тока молнии определяется временем перемещения электронов по стримерам, нейтрализующим объемный заряд лидера. Длина стримеров, образующих объемный заряд лидера, определяется соотношением (3). Длина стримеров, нейтрализующих объемный заряд лидера, меньше по той причине, что для развития стримера необходима указанная выше напряженность электрического поля. Следовательно, для создания напряженности поля, достаточной для развития стримеров нейтрализации в области, занятой объемным зарядом противоположного знака, плотность нейтрализующего заряда должна быть больше плотности нейтрализуемого заряда лидера, чтобы напряженность поля в области развития стримеров была достаточной для развития стримеров нейтрализации. Поэтому плотность положительного объемного заряда, образуемого в стадии нейтрализации объемного заряда отрицательного разряда молнии, равна

$$\tau_n^+ = \tau_l^- \frac{E_{str}^- + E_{str}^+}{E_{str}^-}, \quad (5)$$

но так как нейтрализующий заряд должен быть равен нейтрализуемому объемному заряду лидера, длина стримеров, нейтрализующих заряд, должна быть меньше длины стримеров лидера  $l_{str,l}^-$  в отношении

$$l_{str,n}^+ = l_{str,l}^- \frac{\tau_l^-}{\tau_n^+} = l_{str,l}^- \frac{E_{str}^-}{E_{str}^- + E_{str}^+}. \quad (6)$$

Соответственно плотность отрицательного объемного заряда, образуемого в стадии нейтрализации объемного заряда положительного разряда молнии, равна

$$\tau_n^- = \tau_l^+ \frac{E_{str}^- + E_{str}^+}{E_{str}^+}, \quad (7)$$

и длина отрицательных стримеров, нейтрализующих положительный заряд лидера, равна

$$l_{str,n}^- = l_{str,l}^+ \frac{\tau_l^+}{\tau_n^-} = l_{str,l}^+ \frac{E_{str}^+}{E_{str}^- + E_{str}^+}, \quad (8)$$

где  $l_{str,l}^+$  — длина стримеров положительного лидера молнии.

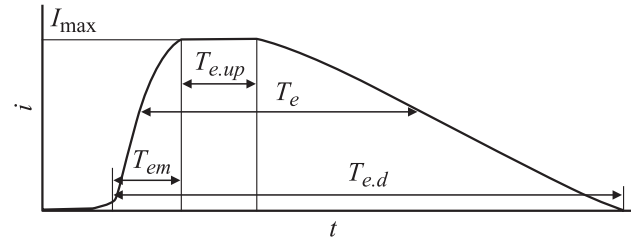


Рис. 2. Типовая форма тока молнии:  $T_{e,up}$ ,  $T_e$  и  $T_{e,d}$  — время перемещения электронов в верхних, средних и нижних стримерах, образованных в стадии нейтрализации объемного заряда лидера.

Время устранения электронов из положительных стримеров, нейтрализующих объемный заряд лидера отрицательного разряда молнии, с учетом соотношения (3) равно

$$T_e^- = \frac{l_{str}^+}{v_e} = \frac{l_{str}^-}{v_e} \frac{E_{str}^-}{E_{str}^- + E_{str}^+} = \frac{\tau_l^-}{2\pi\epsilon_0 v_e (E_{str}^- + E_{str}^+)} = \frac{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9 \tau_l^-}{2\pi \cdot 1.5 \cdot 10^5 \cdot 1300 \cdot 10^3} = 0.092 \tau_l^-, \quad (9)$$

где  $v_e \approx 1.5 \cdot 10^5$  м/с — скорость перемещения электронов в стримерах.

Это время  $T_e^-$  определяет максимальный ток молнии, который нейтрализует объемный заряд лидера молнии (рис. 2):

$$Q_l^- = \tau_l^- H_l = \frac{1}{2} I_{max}^- T_{em} + I_{max}^- T_{e,up} + I_{max}^- \left( T_e^- - T_{e,up} - \frac{1}{2} T_{em} \right) = I_{max}^- T_e^-, \quad (10)$$

откуда максимальное значение тока молнии

$$I_{max}^- = \frac{Q_l^-}{T_e^-} = 2\pi\epsilon_0 v_e (E_{str}^- + E_{str}^+) H_l = \frac{2\pi \cdot 1.5 \cdot 10^5 \cdot 1300 \cdot 10^3}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} H_l = 10.8 H_l. \quad (11)$$

При положительном разряде молнии электроны в отрицательных стримерах не могут продвинуться на полную длину из-за накопления отрицательных ионов в окончании стримеров. Следовательно, для создания избыточного отрицательного заряда по всей длине отрицательных стримеров, соответствующего содержанию электронов в момент окончания развития стримеров, переходящие из проводящего искрового канала в стримеры электроны должны продвинуться только на половину длины стримера. Поэтому время перемещения электронов вдоль стримеров, определяющих время нейтрализации объемного заряда лидера и соответственно длительность протекания тока молнии, определится

соотношением (8):

$$T_e^+ = \frac{I_{str,n}^-}{2v_e} = \frac{I_{str,n}^+}{2v_e} \frac{E_{str}^+}{E_{str}^- + E_{str}^+} = \frac{\tau_l^+}{4\pi\epsilon_0 v_e (E_{str}^- + E_{str}^+)} = 0.046\tau_l^+. \quad (12)$$

Максимальный за время нейтрализации ток положительного разряда молнии при объемном заряде лидера  $Q_l^+ = \tau_l^+ H_l$  составляет

$$I_{\max}^+ = \frac{Q_l^+}{T_e^+} = 4\pi\epsilon_0 v_e (E_{str}^- + E_{str}^+) H_l = 21.7 H_l, \quad (13)$$

следовательно, ток молнии зависит только от длины канала лидера и полярности разряда. При положительном разряде молнии максимальное значение тока в два раза больше, чем в случае отрицательного при одинаковой длине канала лидера.

Крутизна импульсов тока молнии на их фронте определяется соотношениями при отрицательной полярности молнии с учетом (4), (12)

$$a^- = \frac{I_{\max}^-}{T_{em}} = 2\pi\epsilon_0 v_e v (E_{str}^+ + E_{str}^-) = 3.25 \cdot 10^9 \text{ A/s} \quad (14)$$

и при положительной полярности молнии согласно (4), (13),

$$a^+ = \frac{I_{\max}^+}{T_{em}} = 4\pi\epsilon_0 v_e v (E_{str}^+ + E_{str}^-) = 6.5 \cdot 10^9 \text{ A/s}. \quad (15)$$

Как видно из соотношений (14) и (15), крутизна тока молнии определяется только тремя параметрами: скоростью движения электронов в стримерах, скоростью света (скоростью распространения электромагнитной волны вдоль проводящего канала лидера молнии) и суммой напряженностей электрического поля в положительном и отрицательном стримерах. Различие численных коэффициентов в этих формулах для положительного и отрицательного разрядов молнии определяется различием механизма накопления избыточного заряда в положительном и отрицательном стримерах. Измеряемые различные крутизны тока молнии определяются различием сопротивления заземляющих устройств (см. ниже). При этом стоит отметить, что ни максимальный ток молнии, ни крутизна тока на фронте волны тока не зависят от погонной плотности заряда лидера.

Следует подчеркнуть, что регистрируемое всеми наблюдателями распространение яркого свечения широкой области вокруг проводящего канала снизу вверх в течение ограниченного времени после достижения лидером Земли (заземленного возвышающегося предмета) не имеет никакого отношения к длительности импульса тока молнии, поскольку это свечение определяется ионизационными процессами на кончиках стримеров, развивающимися со скоростью около  $1.2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ , почти на порядок большей скорости движения электронов в

стримерах. Поэтому попытки оценки длительности импульсов тока молнии по длительности распространения свечения в главной стадии развития разряда молнии несостоятельны [7–10].

Сопоставление полученных оценок параметров токов молнии положительной и отрицательной полярности позволяет сделать вывод о том, что токи положительной полярности могут быть существенно больше, чем при отрицательной полярности разряда, и при максимальной высоте ЗЦО (10 km) могут достигать 400 kA и более (принимая во внимание извилистость искрового канала). Экспериментальные данные подтверждают этот вывод [5].

При ударе молнии в Землю с высоким сопротивлением грунта либо в заземленные предметы с большим сопротивлением заземления картина развития разряда изменяется. Действительно, при токе молнии порядка десятков килоампер напряжение на сопротивлении заземления может достигать миллионов вольт. Например, при ударе молнии в грозозащитный трос с волновым сопротивлением  $400 \Omega$  при токе молнии 30 kA потенциал троса в месте удара составит  $U_w = 30 \cdot 10^3 \cdot 400 \cdot 0.5 = 6000 \text{ kV}$ . Соответственно увеличивается потенциал проводящего канала молнии и уменьшается разность потенциалов между объемным зарядом лидера и проводящим каналом молнии, что приводит к уменьшению тока молнии. Однако, поскольку нейтрализуемый объемный заряд не зависит от сопротивления заземления, это приводит к увеличению длительности протекания тока молнии. Поэтому связь между током молнии при нулевом сопротивлении заземления и при значительном эквивалентном сопротивлении заземления может быть оценена по формуле

$$I(R_{eq}) = \frac{I_{\max}}{1 + \frac{R_{eq}}{z}}, \quad (16)$$

где  $R_{eq}$  — эквивалентное сопротивление заземления в месте удара молнии,  $z$  — волновое сопротивление канала молнии (примерно  $300 \Omega$ ).

Поскольку длительность фронта тока молнии, определяемая распространением электромагнитной волны по проводящему каналу молнии, не зависит от сопротивления заземления канала молнии, соответственно уменьшается крутизна тока молнии

$$a(R_{eq}) = \frac{a(R_{eq} = 0)}{1 + \frac{R_{eq}}{z}}, \quad (17)$$

а длительность тока молнии увеличивается

$$T_e(R_{eq}) = T_e(R_{eq} = 0) \left(1 + \frac{R_{eq}}{z}\right). \quad (18)$$

Приведенные формулы подтверждают возможность значительных изменений измеряемых параметров токов молнии в зависимости от сопротивления заземления проводящего канала молнии, в частности от проводимости грунтов. Так, например, при ударе молнии в грозозащитный трос с волновым сопротивлением  $400 \Omega$

эквивалентное волновое сопротивление заземления канала молнии составит  $200 \Omega$ . Волновое сопротивление канала молнии  $\approx 300 \Omega$ . При этом

$$1 + \frac{R_{eq}}{z} = 1 + \frac{200}{300} = 1.67,$$

и, следовательно, ток молнии и его крутизна уменьшаются в 1.67 раза по сравнению с током при разряде молнии в Землю при хорошей проводимости грунтов, а длительность протекания тока увеличивается в 1.67 раза.

Обычно после первого разряда молнии по тому же каналу распространяются последующие разряды в результате пробоя воздушных промежутков в облаке между другими заряженными областями и каналом первичного разряда, потенциал которого резко уменьшается в процессе нейтрализации объемного заряда. Если такой пробой происходит через относительно небольшой промежуток времени, когда искровой канал еще не потерял проводимости (вследствие охлаждения канала), то первичный канал пропускает ток повторного разряда, ограниченный размерами канала и начальной напряженностью коронного разряда  $E_c \approx 20 \text{ kV/cm}$  на его поверхности. Необходимо учесть, что к моменту повторного разряда канал успевает расшириться и его радиус достигает  $10 \text{ cm}$ . При этом предельный ток через такой канал определяется соотношением

$$\begin{aligned} I_{\text{lim}} &= q_{\text{lim}} v = 2\pi \varepsilon_0 r_{ch} E_{ch} v \\ &= \frac{2\pi \cdot 10 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^8}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 3300 \text{ A}. \end{aligned}$$

При таком небольшом токе его фронт определяется длиной канала повторного разряда между новым ЗЦО и первичным каналом соотношением (4). При большем токе повторного разряда с поверхности первичного канала возникает стримерный коронный разряд, повторно образующий объемный заряд вокруг первичного канала. Поэтому дальнейшее увеличение тока (свыше  $3300 \text{ A}$ ) происходит согласно тем же закономерностям, что и при первичном разряде. По этой причине более крутые фронты токов молнии, чем при первичном разряде, соответствуют диапазону токов молнии до  $3300 \text{ A}$ .

## Выводы

1. Длина фронта тока молнии определяется временем пробега электромагнитной волны вдоль канала лидера и не зависит от полярности разряда.

2. Полная длительность импульса тока молнии определяется временем перемещения электронов в стримерах, образуемых в стадии нейтрализации объемного заряда лидера.

3. Максимальная величина тока молнии протекает в промежутке времени, когда все стримеры по всей длине проводящего канала молнии участвуют в формировании тока, и поэтому зависит от длины канала лидера, полярности разряда и сопротивления заземления канала.

4. Относительно медленное уменьшение тока после этого промежутка времени определяется различием длины стримеров вдоль проводящего канала, увеличивающейся по мере приближения к Земле и соответственно различием времени перемещения электронов в стримерах на разной высоте над Землей: наименьшее время соответствует самой высокой части канала, наибольшее — самой низкой.

5. Крутизна тока молнии определяется только физическими постоянными газового разряда, полярностью разряда и сопротивлением заземления искрового канала.

## Список литературы

- [1] Александров Г.Н. // ЖТФ. 1965. Т. 35. Вып. 7. С. 1225–1229.
- [2] Александров Г.Н. // ЖТФ. 1967. Т. 37. Вып. 2. С. 288–293.
- [3] Радевиц Д.В. Атмосферные перенапряжения на линиях электропередачи. М.: Госэнергоиздат, 1959.
- [4] Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
- [5] Berger K., Anderson R.B., Kroninger H. // Electra. 1975. N 41. P. 23.
- [6] Александров Г.Н. // Электричество. 2005. № 7. С. 73–81.
- [7] Shonland B.F.J., Collens H. // Proc. Roy. Soc. London (A). 1934. Vol. 143. P. 654.
- [8] Shonland B.F.J., Malan D.J., Collens H. // Proc. Roy. Soc. London (A). 1935. Vol. 152. P. 595.
- [9] Shonland B.F.J. // Proc. Roy. Soc. London (A). 1938. Vol. 164. P. 132.
- [10] Shonland B.F.J., Hodges D.B., Collens H. // Proc. Roy. Soc. London (A). 1938. Vol. 166. P. 56.