Сибирский математический журнал
Июль—август, 2010. Том 51, № 4

УДК 512.542

СТРОГАЯ ВЕЩЕСТВЕННОСТЬ КОНЕЧНЫХ ПРОСТЫХ ГРУПП

Е. П. Вдовин, А. А. Гальт

Аннотация. Завершается классификация конечных простых строго вещественных групп. Как несложно понять, для каждой конечной простой группы свойство строгой вещественности эквивалентно тому, что каждый элемент представим в виде произведения двух инволюций. Таким образом, как следствие из классификации конечных простых строго вещественных групп получено решение вопроса 14.82 из «Коуровской тетради».

Ключевые слова: конечная группа лиева типа, строго вещественный элемент, класс сопряженности, инволюция.

Введение

В работе получено решение вопроса 14.82 из «Коуровской тетради» [1].

Проблема 1 [1, 14.82]. *Описать конечные простые группы, в которых каждый элемент является произведением двух инволюций.*

Поскольку в любой неабелевой конечной простой группе любая инволюция вкладывается в элементарную абелеву группу порядка 4, т. е. для любой инволюции t существует перестановочная с ней инволюция $s \neq t$, проблема 14.82 эквивалентна проблеме классификации строго вещественных конечных простых групп. Напомним, что элемент x группы G называется *вещественным* (соответственно *строго вещественным*), если элементы x и x^{-1} сопряжены в группе G (соответственно сопряжены инволюцией в группе G). Группа G называется *вещественной* (соответственно *строго вещественной*), если все элементы группы G являются вещественными (соответственно строго вещественными). Таким образом, если элемент x имеет порядок, отличный от 1 и 2, то x представим в виде произведения двух инволюций s, t в том и только в том случае, если x является строго вещественным. Действительно, если t — инволюция, инвертирующая элемент x, и $|x| > 2$, то элементы t, tx являются инволюциями и $x = t \cdot tx$. Обратно, если существуют инволюции s, t, для которых справедливо равенство $x = st$, то $x^t = ts = x^{-1}$, т. е. x является строго вещественным. В конечных простых группах представимость элементов порядка 1 и 2 в виде

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 08–01–00322, 10–01–00391 и 10–01–90007), АВЦП Рособразования «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.1.419), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (гос. контракт № 02.740.11.5191), Совета по грантам президента РФ и государственной поддержке ведущих научных школ (проект НШ–3669.2010.1). Первый автор поддержан также премией фонда Бальзана, присужденной Пьеру Делиню в 2004 г. и Лаврентьевским грантом СО РАН для коллективов молодых ученых (постановление Президиума СО РАН № 43 от 04.02.2010).

произведения двух инволюций следует из теоремы Фейта — Томпсона о разрешимости конечных групп нечетного порядка и замечания, сделанного выше.

Проблема вещественности и строгой вещественности конечных простых групп и конечных групп, в том или ином смысле близких к простым, изучалась различными авторами (см. [2–13]). В частности, в [2] получена классификация конечных простых вещественных групп. Таким образом, для решения вопроса 14.82 достаточно выяснить, какие из конечных простых вещественных групп являются строго вещественными. Вопрос о строгой вещественности знакопеременных и спорадических групп решен в [3, 4] соответственно. В [5–7] доказано, что симплектические группы $\mathrm{PSp}_{2n}(q)$ являются строго вещественными тогда и только тогда, когда $q \not\equiv 3 \pmod 4$. В [8] доказана строгая вещественность групп $\Omega^{\varepsilon}_{4n}(q)$ при четном q. Строгая вещественность групп $\mathrm{P}\Omega^{-}_{4n}(q)$ в случае нечетного q доказана в [9]. Более того, если q нечетно, то [10, теорема 8.5] влечет, что наряду с группами $\mathrm{P}\Omega^{-}_{4n}(q)$ строго вещественными являются группы $\mathrm{P}\Omega^{+}_{4n}(q)$ и $\Omega_{2n+1}(q)$ при $q \equiv 1 \pmod 4$, а также группы $\Omega_9(q)$ при $q \equiv 3 \pmod 4$ и $\mathrm{P}\Omega^{+}_{8}(q)$ при любом q. В настоящей работе доказана

Теорема 1 (основная теорема). *Группа $G = {}^3D_4(q)$ является строго вещественной.*

Из данной теоремы и работ [2–10] вытекают следующие теоремы.

Теорема 2. *Любая конечная простая вещественная группа является строго вещественной.*

Теорема 3. *В конечной простой группе G любой элемент представим в виде произведения двух инволюций в том и только в том случае, если G изоморфна одной из следующих групп:*

(1) $\mathrm{PSp}_{2n}(q)$ *при* $q \not\equiv 3 \pmod 4$, $n \geq 1$;
(2) $\Omega_{2n+1}(q)$ *при* $q \equiv 1 \pmod 4$, $n \geq 3$;
(3) $\Omega_9(q)$ *при* $q \equiv 3 \pmod 4$;
(4) $\mathrm{P}\Omega^{-}_{4n}(q)$ *при* $n \geq 2$;
(5) $\mathrm{P}\Omega^{+}_{4n}(q)$ *при* $q \not\equiv 3 \pmod 4$, $n \geq 3$;
(6) $\mathrm{P}\Omega^{+}_{8}(q)$;
(7) ${}^3D_4(q)$;
(8) A_{10}, A_{14}, J_1, J_2.

Теорема 3 дает исчерпывающее решение вопроса 14.82 из «Коуровской тетради».

1. Предварительные результаты

Наши обозначения для конечных групп согласуются с [14]. Обозначения и основные результаты для конечных групп лиева типа и для линейных алгебраических групп можно найти в [15]. Будем говорить, что группа G является *центральным произведением подгрупп* A и B (обозначается через $A \circ B$), если $G = AB$ и взаимный коммутант $[A, B]$ тривиален. Через $|G|$ и $|g|$ обозначены порядок группы G и элемента $g \in G$ соответственно. Если X — подмножество и H — подгруппа группы G, то через $C_G(X)$ и $N_G(H)$ обозначены централизатор подмножества X и нормализатор подгруппы H в группе G. Для любого подмножества X группы G символом $\langle X\rangle$ обозначена подгруппа, порожденная множеством X. Символом $\mathbb{F}_q$ обозначено конечное поле порядка q, а p всегда обозначает его характеристику, т. е. $q = p^{\alpha}$ для подходящего натурального α.

Единичный элемент группы обозначается символом e, а 1 обозначает единицу поля.

Пусть $\overline{G}$ — простая связная алгебраическая группа над алгебраическим замыканием $\overline{\mathbb{F}}_p$ конечного поля $\mathbb{F}_p$. Сюръективный эндоморфизм σ группы $\overline{G}$ называется *эндоморфизмом Стейнберга* (см. [15, определение 1.15.1]), если множество его неподвижных точек $\overline{G}_\sigma$ конечно. Хорошо известно, что группа $O^{p'}(\overline{G}_\sigma)$ является конечной группой лиева типа и любая конечная группа лиева типа может быть получена таким образом (отметим, что для конечной группы лиева типа соответствующая алгебраическая группа и эндоморфизм Стейнберга, вообще говоря, могут быть выбраны неединственным способом). Более подробно эти и другие определения и результаты можно найти в [15, разд. 1.5, 2.2]. Если группа $\overline{G}$ односвязна, то в силу [15, теорема 2.2.6(f)] справедливо равенство $\overline{G}_\sigma = O^{p'}(\overline{G}_\sigma)$. Более того, [16, предложение 2.10] влечет, что в этом случае централизатор любого полупростого элемента связен и является редуктивной подгруппой максимального ранга группы $\overline{G}$.

Если группа G изоморфна ${}^3D_4(q)$, то соответствующая алгебраическая группа $\overline{G}$ может быть выбрана односвязной и мы всегда будем предполагать, что группа $\overline{G}$ односвязна в этом случае, т. е. что для любой группы $G = {}^3D_4(q)$ выбраны односвязная связная простая линейная алгебраическая группа $\overline{G} = D_4(\overline{\mathbb{F}}_q)$, где $\overline{\mathbb{F}}_q$ — алгебраическое замыкание поля $\mathbb{F}_q$, и эндоморфизм Стейнберга σ так, чтобы выполнялось равенство $G = \overline{G}_\sigma$. В частности, централизатор любого полупростого элемента из $\overline{G}$ связен. Если $\overline{T}$ — σ-инвариантный максимальный тор группы $\overline{G}$, то $T = \overline{T} \cap G$ называется *максимальным тором* группы лиева типа G. Если $\overline{R} \leq \overline{S}$ — σ-инвариантные подгруппы группы $\overline{G}$, $R = \overline{R} \cap G$ и $S = \overline{S} \cap G$, то группа $N_{\overline{S}}(\overline{R}) \cap G$ обозначается через $N(S, R)$. Отметим, что справедливо включение $N(S, R) \leq N_S(R)$, но равенство, вообще говоря, может нарушаться. Для любого элемента $x \in G$ существуют единственные элементы $s, u \in G$ такие, что $x = su = us$, s полупрост и u унипотентен. При этом s — это p'-часть элемента x, а u — это p-часть элемента x. Это разложение называется *разложением Жордана*.

В силу [9, лемма 10] все полупростые элементы группы ${}^3D_4(q)$ являются строго вещественными. Более того, сопрягающая инволюция, построенная в доказательстве [9, лемма 10], обладает следующим свойством.

Лемма 1. *Для любого максимального тора T группы ${}^3D_4(q)$ существует инволюция $x \in N(G, T)$ такая, что $t^x = t^{-1}$ для любого $t \in T$. В частности, для любого $t \in T$ элементы xt и tx являются инволюциями и инвертируют любой элемент из T.*

Утверждения, собранные в следующей лемме, известны и легко вытекают из строения проективных линейных групп степени 2.

Лемма 2. *Справедливы следующие утверждения.*

(1) *Группа $\mathrm{PSL}_2(q)$ является строго вещественной тогда и только тогда, когда $q \not\equiv 3 \pmod 4$.*

(2) *Группа $\mathrm{PGL}_2(q)$ является строго вещественной.*

(3) *Если q нечетно, u — неединичный унипотентный элемент из $\mathrm{PGL}_2(q)$ и элемент $t \in \mathrm{PGL}_2(q)$ выбран так, что справедливо равенство $u^t = u^k$ для некоторого $k \in \mathbb{N}$, то t лежит в подгруппе Картана (являющейся циклической группой порядка $q - 1$) группы $\mathrm{PGL}_2(q)$, нормализующей единственную максимальную унипотентную подгруппу, содержащую элемент u, группы $\mathrm{PGL}_2(q)$.*

2. Доказательство основной теоремы

Пусть $G = {}^3D_4(q)$ и $g \in G$. Если g полупрост, то его строгая вещественность следует из [9, лемма 10]. Если элемент g унипотентен и q четно, то строгая вещественность элемента g вытекает из [12, теорема 1]. Предположим, что элемент g унипотентен, число q нечетно, и $C_G(g)$ не содержит неединичных полупростых элементов, т. е. $C_G(g)$ является p-группой. В силу [2, лемма 5.9] существует элемент $x \in G$ такой, что $g^x = g^{-1}$. Очевидно, можно считать, что $|x| = 2^k$ для некоторого $k \in \mathbb{N}$. Тогда $x^2 \in C_G(g)$ и $|x^2|$ является степенью 2. Значит, элемент x^2 полупрост, откуда $x^2 = e$. Если элемент g унипотентен, число q нечетно и $C_G(g)$ содержит неединичный полупростой элемент s, то можно рассмотреть элемент $g_1 = sg$. Для элемента g_1 разложение sg является разложением Жордана. Если мы покажем, что существует инволюция x, инвертирующая элемент g_1, то в силу единственности разложения Жордана справедливы равенства $s^x = s^{-1}$ и $g^x = g^{-1}$. Таким образом, можно считать, что элемент g имеет «смешанный порядок», т. е. в разложении Жордана $g = su$ элементы s и u оба неединичны.

Пусть $C = C_G(s)$, тогда $u \in C$. Более того, $\overline{C} = C_{\overline{G}}(s)$ — связная редуктивная подгруппа максимального ранга группы $\overline{G}$ и $C = \overline{C}_\sigma$. Ясно, что любой максимальный тор T группы G, включающий s, содержится в C. Строение централизаторов полупростых элементов описано в [17, предложение 2.2]. Основным техническим инструментом в дальнейших рассуждениях являются табл. 2.2a, 2.2b из [17], в которых приведено строение централизаторов неединичных полупростых элементов таких, что порядок централизаторов делится на p. Если q четно, то с точностью до сопряжения в G существует 8 централизаторов, порядок которых делится на p, неединичных полупростых элементов. Если q нечетно, то существует 9 таких централизаторов. Рассмотрим каждый из этих централизаторов отдельно. Отметим, что $\overline{C} = \overline{M} \circ \overline{S}$, где $\overline{M} = [\overline{C}, \overline{C}]$ связна и полупроста, а $\overline{S} = Z(\overline{C})^0$ — тор. При этом C содержит нормальную подгруппу $M \circ S$, где $S = \overline{S}_\sigma \leq Z(C)$, а $M = \overline{M}_\sigma = O^{p'}(C)$, и в [17, табл. 2.2a, 2.2b] приведено строение подгрупп M ($= M_\sigma$ в обозначениях из [17] и S ($= S_\sigma$ в обозначениях из [17]), а также указано строение или порядок фактор-группы $C/(M \circ S)$. Далее индексы в обозначениях элементов у нас будут выбраны так же, как в [17, табл. 2.2a, 2.2b]. Кроме того, подгруппы и фактор-группы группы C естественным образом изоморфны некоторым классическим группам и мы будем отождествлять подгруппы и фактор-группы группы C с соответствующими классическими группами.

Пусть элемент s таков, что его централизатор сопряжен с централизатором элемента s_2 (а значит, s — это инволюция и такой случай возможен лишь для нечетного q). Тогда $M \simeq \mathrm{SL}_2(q^3) \circ \mathrm{SL}_2(q)$, $|Z(M)| = 2$ и $S = \{e\}$. Более того, $|C : M| = 2$, и в силу [18, теорема 2] справедливы изоморфизмы $C/\mathrm{SL}_2(q) \simeq \mathrm{PGL}_2(q^3)$ и $C/\mathrm{SL}_2(q^3) \simeq \mathrm{PGL}_2(q)$. Запишем u в виде $u_1 \cdot u_2$, где $u_1 \in \mathrm{SL}_2(q^3)$, $u_2 \in \mathrm{SL}_2(q)$, и пусть v_1, v_2 — образы элементов u_1, u_2 в группах $C/\mathrm{SL}_2(q)$ и $C/\mathrm{SL}_2(q^3)$ соответственно. Предположим сначала, что $q \equiv 1 \pmod 4$. Тогда группы $\mathrm{PSL}_2(q)$ и $\mathrm{PSL}_2(q^3)$ являются строго вещественными. Следовательно, найдутся инволюции $t_1 \in \mathrm{PSL}_2(q^3)$, $t_2 \in \mathrm{PSL}_2(q)$ такие, что $v_1^{t_1} = v_1^{-1}$ и $v_2^{t_2} = v_2^{-1}$. Пусть z_1, z_2 — прообразы элементов t_1, t_2 в $\mathrm{SL}_2(q^3)$ и $\mathrm{SL}_2(q)$ соответственно. Тогда $|z_1| = 4 = |z_2|$ и $z_1^2 \in Z(\mathrm{SL}_2(q^3))$, $z_2^2 \in Z(\mathrm{SL}_2(q))$. Следовательно, $z_1^2 = z_2^2$ в группе M, откуда $(z_1z_2)^2 = e$. Таким образом, z_1z_2 — инвертирующая инволюция для элемента u. Предположим теперь, что $q \equiv 3$

(mod 4). В этом случае существуют такие инволюции $t_1 \in \mathrm{PGL}_2(q^3) \setminus \mathrm{PSL}_2(q^3)$, $t_2 \in \mathrm{PGL}_2(q) \setminus \mathrm{PSL}_2(q)$, что $v_1^{t_1} = v_1^{-1}$ и $v_2^{t_2} = v_2^{-1}$. Кроме того, t_1 лежит в подгруппе Картана группы $\mathrm{PGL}_2(q^3)$, т. е. в максимальном торе группы $\mathrm{PGL}_2(q^3)$ порядка $q^3 - 1$, а t_2 — в подгруппе Картана группы $\mathrm{PGL}_2(q)$, т. е. в максимальном торе группы $\mathrm{PGL}_2(q)$ порядка $q - 1$. Пусть T — максимальный тор группы C, образы которого относительно естественных гомоморфизмов $C \to C/\mathrm{SL}_2(q)$ и $C/\mathrm{SL}_2(q^3)$ содержат элементы t_1 и t_2 соответственно. Тогда $|T| = (q^3-1)(q-1)$ и в силу [17, табл. 1.1] имеем $T \simeq \mathbb{Z}_{q^3-1} \times \mathbb{Z}_{q-1}$. В частности, T не содержит элементов порядка 4. Пусть z — прообраз для t_1 в T. Можно считать, что z является 2-элементом, следовательно, $z^2 = e$. Кроме того, поскольку t_1 не лежит в $\mathrm{PSL}_2(q^3)$, получаем, что z не лежит в M. Рассмотрим естественный гомоморфизм $\widetilde{\ } : C \to C/\mathrm{SL}_2(q^3)$. Поскольку $z \notin M$, получаем $\tilde{z} \notin \mathrm{PSL}_2(q)$, значит, $t_2 \mathrm{PSL}_2(q) = \tilde{z} \mathrm{PSL}_2(q)$. Кроме того, $t_2, \tilde{z} \in \widetilde{T} \simeq \mathbb{Z}_{q-1}$, следовательно, $t_2 = \tilde{z}$. Таким образом, z является прообразом и для t_2. Стало быть, z является инвертирующей инволюцией для элемента u.

Предположим, что элемент s таков, что его централизатор либо сопряжен с централизатором элемента s_5, либо сопряжен с централизатором элемента s_{10}. Тогда $|C : (M \circ S)| = (2, q-1)$, $M \simeq \mathrm{SL}_2(q)$, $S \simeq \mathbb{Z}_{q^3-\varepsilon}$, где $\varepsilon = 1$, если $C_G(s)$ сопряжен с $C_G(s_5)$, и $\varepsilon = -1$, если $C_G(s)$ сопряжен с $C_G(s_{10})$. Более того, $C/S \simeq \mathrm{PGL}_2(q)$. Выберем максимальный тор T в C таким образом, чтобы подгруппа $T \cap M$ была подгруппой Картана группы M. Поскольку $M \simeq \mathrm{SL}_2(q)$, будем записывать элементы из M матрицами из $\mathrm{SL}_2(q)$, полагая при этом, что $T \cap M$ — группа диагональных матриц. По лемме 1 найдется инволюция $x \in N(G,T)$, инвертирующая любой элемент $t \in T$. В частности, x инвертирует элемент s, следовательно, нормализует $C_{\overline{G}}(s)$, т. е. $x \in N(G, C)$. Тем самым x нормализует $\overline{S}$, а значит, и S. Пусть $C_0 = \langle C, x\rangle$ и $\widetilde{\ } : C_0 \to C_0/S$ — естественный гомоморфизм. Так как $M = O^{p'}(C)$ является характеристической подгруппой в C, элемент x индуцирует автоморфизм порядка 2 на M. В силу [19, лемма 2.3] группа $N(G, C)$ не индуцирует полевых автоморфизмов на M. Кроме того, $x \notin \widehat{M}$, где $\widehat{M}$ — группа внутреннедиагональных автоморфизмов группы M, поскольку $C/S \simeq \mathrm{PGL}_2(q) \simeq \widehat{M}$. Поэтому $C_0/S = \widetilde{C}_0 \simeq \mathrm{PGL}_2(q) \times \mathbb{Z}_2$. Далее элементы из $\widetilde{C}$ будем записывать проективными образами матриц из $\mathrm{GL}_2(q)$. С точностью до сопряжения в $\widetilde{C}_0$ можно считать, что

$$\tilde{u} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

для некоторого $\alpha \in \mathbb{F}_q$. Пусть $\overline{T} \in \overline{G}$ таков, что $T = \overline{T}_\sigma$. Элемент x нормализует $\overline{T}$, следовательно, действуя сопряжением, x оставляет инвариантным множество максимальных унипотентных подгрупп группы $\overline{M}$, нормализуемых тором $\overline{T} \cap \overline{M}$. Кроме того, поскольку x неподвижен относительно σ, элемент x нормализует подгруппы σ-неподвижных точек этих унипотентных подгрупп. Поскольку $\overline{M} = [\overline{C}, \overline{C}] \simeq \mathrm{SL}_2(\overline{\mathbb{F}_q})$, существуют ровно две максимальные унипотентные подгруппы группы $\overline{M}$, нормализуемые тором $\overline{T}$: одна из них состоит из верхнетреугольных матриц, а другая — из нижнетреугольных. Поэтому элемент x либо оставляет их неподвижными, либо переставляет их. Таким образом, для некоторого $\beta \in \mathbb{F}_q$

$$\text{либо } \tilde{u}^{\tilde{x}} = \begin{bmatrix} 1 & \beta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ либо } \tilde{u}^{\tilde{x}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \beta & 1 \end{bmatrix}.$$

Возвращаясь к элементам u, x в C_0 и пользуясь тем, что p взаимно просто с $|S|$, получаем, что

$$u = \begin{pmatrix} 1 & \alpha \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ и либо } u^x = \begin{pmatrix} 1 & \beta \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ либо } u^x = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \beta & 1 \end{pmatrix}.$$

Пусть $u^x = \begin{pmatrix} 1 & \beta \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, тогда существует $\tilde{t} \in \mathrm{PGL}_2(q) \cap \widetilde{T}$ такой, что

$$\begin{bmatrix} 1 & \beta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{\tilde{t}} = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Следовательно, $u^{xt} = \begin{pmatrix} 1 & -\alpha \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = u^{-1}$ и $(xt)^2 = t^x t = t^{-1}t = e$.

Пусть $u^x = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \beta & 1 \end{pmatrix}$, тогда существует $\tilde{t} \in \mathrm{PGL}_2(q) \cap \widetilde{T}$ такой, что

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \beta & 1 \end{bmatrix}^{\tilde{t}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \alpha & 1 \end{bmatrix}.$$

Следовательно, $u^{xt} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \alpha & 1 \end{pmatrix} = (u)^T$, где ^{T} обозначает транспонирование матриц и $(xt)^2 = t^x t = t^{-1}t = e$. Заменяя x на xt, можно считать, что $u^x = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \alpha & 1 \end{pmatrix} = u^T$. Поскольку $|x| = 2$, получаем также, что $(u^T)^x = u$. Положим $z = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \in \mathrm{SL}_2(q) \cap N(C_0, T)$, тогда

$$u^{xz} = u^{-1} = u^{zx}.$$

Так как $|N(C_0, T)/T| = 4$, группа $N(C_0, T)/T$ абелева. Кроме того, элементы x, z лежат в $N(C_0, T)$, и их образы в $N(C_0, T)/T$ являются инволюциями, следовательно, $N(C_0, T)/T \simeq \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$, и x нормализует $z(T \cap M)$, т. е. $z^x = zt$ для некоторого $t \in T \cap M$. Значит, $xzt = zx$. Как отмечалось выше, элементы xz и zx инвертируют u, значит, $t \in Z(M)$. Если q четно, то $Z(M) = \{e\}$, откуда следует, что x централизует $\langle z \rangle$. Поэтому $|xz| = 2$, следовательно, xz — искомая инвертирующая инволюция. Предположим, что q нечетно. Тогда $|z| = 4$, $|Z(M)| = 2$, и для $t \in Z(M) \setminus \{e\}$ справедливо равенство $zt = z^{-1}$. Таким образом, либо $z^x = z$, либо $z^x = z^{-1}$. Покажем, что $z^x = z^{-1}$, откуда $(xz)^2 = z^x z = z^{-1}z = e$ и xz — искомая инволюция. Возьмем максимальный тор Q группы C, содержащий z. Отметим, что $\tilde{x}$, $\widetilde{Q}$ содержатся в $C_{\widetilde{C}_0}(\tilde{z})$ и $C_{\widetilde{C}_0}(\tilde{z}) \leq N(\widetilde{C}_0, \widetilde{Q})$. Кроме того, $\widetilde{C}_0 = \mathrm{PGL}_2(q) \times \langle \tilde{y} \rangle$ и $\tilde{y} \in N(\widetilde{C}_0, \widetilde{Q})$. Рассмотрим два смежных класса $\tilde{y}\widetilde{Q}$ и $\tilde{x}\widetilde{Q}$. Допустим, что они совпадают, тогда $\tilde{x} \in \tilde{y}\widetilde{Q}$. Так как $\widetilde{Q}$ является циклической группой, в ней содержится единственная инволюция $\tilde{z}$. Следовательно, в смежном классе $\tilde{y}\widetilde{Q}$ содержится две инволюции: $\tilde{y}$, $\tilde{y}\tilde{z}$ и либо $\tilde{x} = \tilde{y}$, либо $\tilde{x} = \tilde{y}\tilde{z}$. Но первое равенство невозможно так как $\tilde{y}$ централизует $\mathrm{PGL}_2(q)$, если же $\tilde{x} = \tilde{y}\tilde{z}$, то $\tilde{u}^{-1} = \tilde{u}^{\tilde{x}\tilde{z}} = \tilde{u}^{\tilde{y}\tilde{z}^2} = \tilde{u}^{\tilde{z}^2} = \tilde{u}$, что невозможно. Следовательно, $\tilde{y}\widetilde{Q} \neq \tilde{x}\widetilde{Q}$. По лемме 1 существует инволюция $x' \in N(G, Q)$, инвертирующая любой элемент из Q. Но $s \in Q$, тем самым $x' \in C_0$ и $x, x' \in N(G, Q) \cap C_0$. Поскольку $\tilde{y}\widetilde{Q} \neq \tilde{x}\widetilde{Q}$, $N(C_0, Q)/Q \simeq \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$ и $x, x' \notin C$, получаем что $\tilde{x}'\widetilde{Q} = \tilde{x}\widetilde{Q}$

и $xQ = x'Q$. Следовательно, элемент x инвертирует любой элемент из Q, в частности, $z^x = z^{-1}$.

Предположим, что элемент s таков, что его централизатор либо сопряжен с централизатором элемента s_3, либо сопряжен с централизатором элемента s_7. Тогда $|C : (M \circ S)| = (2, q-1)$, $M \simeq \mathrm{SL}_2(q^3)$, $S \simeq \mathbb{Z}_{q-\varepsilon}$, где $\varepsilon = 1$, если $C_G(s)$ сопряжен с $C_G(s_3)$, и $\varepsilon = -1$, если $C_G(s)$ сопряжен с $C_G(s_7)$. Более того, $C/S \simeq \mathrm{PGL}_2(q)$. Этот случай разбирается точно так же, как только что разобранный выше случай.

Предположим, что $C_G(s)$ сопряжен с $C_G(s_4)$. Тогда $M \simeq \mathrm{SL}_3(q)$, $S \simeq \mathbb{Z}_{q^2+q+1}$. Более того, если 3 делит $q-1$, то $|C : M \circ S| = 3$ и $C/S \simeq \mathrm{PGL}_3(q)$, а если 3 не делит $q-1$, то $C = M \times S$ и $\mathrm{SL}_3(q) \simeq \mathrm{PGL}_3(q)$. Доказательство в обоих случаях одинаково. Выберем такой максимальный тор T в C, что $T \cap M$ — подгруппа Картана группы M. Мы будем отождествлять элементы из M с матрицами из $\mathrm{SL}_3(q)$ и считать, что при таком отождествлении $T \cap M$ — это подгруппа диагональных матриц. По лемме 1 существует элемент $x \in N(G,T)$ такой, что $x^2 = e$ и $t^x = t^{-1}$ для любого $t \in T$. Рассмотрим группу $C_0 = \langle C, x\rangle$. В силу [19, лемма 2.3] группа $N(G,C)$ не индуцирует полевых автоморфизмов на M. Поскольку x инвертирует любой элемент подгруппы Картана $T \cap M$ группы M, получаем, что x индуцирует графовый автоморфизм на M. Пусть ι — графовый автоморфизм группы $\mathrm{SL}_3(q)$, действующий по правилу $y \mapsto (y^{-1})^T$, где ^{T} обозначает транспонирование матриц. Тогда ι нормализует тор $T \cap M$ и инвертирует любой элемент из $T \cap M$, следовательно, умножая элемент x на подходящий элемент из тора $T \cap M$, можно считать, что x действует на M так же, как ι. Элемент u сопряжен со своей жордановой формой в C, поэтому можно считать, что $u = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & \alpha \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, где $\alpha \in \{0,1\}$. Пусть $u = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, положим $z = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \in \mathrm{SL}_3(q)$. Имеем

$$u^{xz} = ((u^{-1})^T)^z = \left(\begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T\right)^z = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix}^z = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = u^{-1}.$$

Следовательно, xz — искомая инволюция, так как $(xz)^2 = z^x z = (z^{-1})^T z = e$. Пусть $u = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, положим $z = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \in \mathrm{SL}_3(q)$. Имеем

$$u^{xz} = ((u^{-1})^T)^z = \left(\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T\right)^z = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^z = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = u^{-1}.$$

Следовательно, xz — искомая инволюция, так как $(xz)^2 = z^x z = (z^{-1})^T z = e$.

Предположим, что $C_G(s)$ сопряжен с $C_G(s_9)$. Тогда $M \simeq \mathrm{SU}_3(q)$, $S \simeq \mathbb{Z}_{q^2-q+1}$. Более того, если 3 делит $(q+1)$, то $|C : M \circ S| = 3$ и $C/S \simeq \mathrm{PGU}_3(q)$, а если 3 не делит $(q+1)$, то $C = M \times S$ и $\mathrm{SU}_3(q) \simeq \mathrm{PGU}_3(q)$. Доказательство в обоих случаях одинаково. Выберем такой максимальный тор T в C, что $T \cap M$ — подгруппа Картана группы M. По лемме 1 существует элемент $x \in N(G,T)$

такой, что $x^2 = e$ и $t^x = t^{-1}$ для любого $t \in T$. Вновь [19, лемма 2.3] влечет, что группа $N(G,C)$ не индуцирует полевых автоморфизмов на M. Пусть $A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ и ι — автоморфизм группы $\mathrm{SL}_3(q^2)$, действующий по правилу $y \mapsto A(y^{-1})^T A$, где ^{T} обозначает транспонирование матриц. Обозначим через f автоморфизм группы $\mathrm{SL}_3(q^2)$, возводящий каждый элемент матрицы из $\mathrm{SL}_3(q^2)$ в степень q. Ввиду [20, с. 268–270] можно считать, что $\mathrm{SU}_3(q)$ совпадает с множеством неподвижных точек автоморфизма $\iota \circ f$. Будем отождествлять элементы из M с множеством неподвижных точек группы $\mathrm{SL}_3(q^2)$ относительно автоморфизма $\iota \circ f$ и считать, что при таком отождествлении $T \cap M$ — это подгруппа диагональных матриц. Обозначим тем же символом ι ограничение ι на $\mathrm{SU}_3(q)$. Тогда ι нормализует $T \cap M$, поэтому, умножая элемент x на подходящий элемент из тора T, можно считать, что x действует на M так же, как ι. С точностью до сопряжения в C любой унипотентный элемент u из M имеет вид $u = \begin{pmatrix} 1 & \alpha & \beta \\ 0 & 1 & \alpha^q \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, где $\alpha, \beta \in F_{q^2}$ и $\beta + \beta^q = \alpha^{q+1}$. Если $\alpha \neq 0$, то найдется элемент $t \in T$ такой, что $u^t = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \gamma \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ для некоторого $\gamma \in F_{q^2}$. Поэтому можно считать, что $u = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \gamma \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ и $u^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & \gamma' \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ для некоторого $\gamma' \in F_{q^2}$. Положим $z = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \in \mathrm{SU}_3(q)$, тогда

$$u^{xz} = (A(u^{-1})^T A)^z = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \gamma' \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^z = \begin{pmatrix} 1 & -1 & \gamma' \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = u^{-1}.$$

При $\alpha = 0$ равенство $u^{xz} = u^{-1}$ также справедливо. Следовательно, xz — искомая инволюция, так как $(xz)^2 = z^x z = (z^{-1})^T z = e$.

Теорема 1, а значит, и теоремы 2 и 3 доказаны.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Коуровская тетрадь.* Нерешенные вопросы теории групп. Изд. 17-е. Новосибирск, 2010. http://math.nsc.ru/~alglog/17kt.pdf.
2. *Tiep P. H., Zalesski A. E.* Real conjugacy classes in algebraic groups and finite groups of Lie type // J. Group Theory. 2005. V. 8, N 3. P. 291–315.
3. *Baginski C.* On sets of elements of the same order in the alternating group A_n // Publ. Math. 1987. V. 34, N 1. P. 13–15.
4. *Kolesnikov S. G., Nuzhin Ja. N.* On strong reality of finite simple groups // Acta Appl. Math. 2005. V. 85, N 1–3. P. 195–203.
5. *Gow R.* Commutators in the symplectic group // Arch. Math. (Basel). 1988. V. 50, N 3. P. 204–209.
6. *Gow R.* Products of two involutions in classical groups of characteristic 2 // J. Algebra. 1981. V. 71, N 2. P. 583–591.
7. *Ellers E. W., Nolte W.* Bireflectionality of orthogonal and symplectic groups // Arch. Math. 1982. V. 39, N 1. P. 113–118.
8. *Rämö J.* Strongly real elements of orthogonal groups in even characteristic //J. Group Theory. (To appear).

9. *Гальт А. А.* Строго вещественные элементы в конечных простых ортогональных группах // Сиб. мат. журн. 2010. Т. 51, № 2. С. 241–248.
10. *Knüppel F., Thomsen G.* Involutions and commutators in orthogonal groups // J. Austral. Math. Soc. 1998. V. 65, N 1. P. 1–36.
11. *Tiep P. H., Zalesski A. E.* Unipotent elements of finite groups of Lie type and realization fields of their complex representations // J. Algebra. 2004. V. 271, N 1. P. 327–390.
12. *Газданова М. А., Нужин Я. Н.* О строгой вещественности унипотентных подгрупп групп лиева типа над полем характеристики 2 // Сиб. мат. журн. 2006. Т. 47, № 5. С. 1031–1051.
13. *Wonenburger M. J.* Transformations which are products of two involutions // J. Math. Mech. 1966. V. 16. P. 327–338.
14. *Conway J. H., Curtis R. T., Norton S. P., Parker R. A., Wilson R. A.* Atlas of Finite Groups. Oxford: Clarendon Press, 1985.
15. *Gorenstein D., Lyons R., Solomon R.* The classification of the finite simple groups. Providence, RI: Amer. Math. Soc., 1998. Number 3. Part I. Chapter A. Almost simple K-groups. (Math. Sur. Monogr.; V. 40).
16. *Humphreys J. E.* Conjugacy classes in semisimple algebraic groups. Providence, RI: Amer. Math. Soc., 1995. (Math. Surv. Monogr.; N 43).
17. *Deriziotis D. I., Michler G. O.* Character table and blocks of finite simple triality groups ${}^3D_4(q)$ // Trans. Amer. Math. Soc. 1987. V. 303, N 1. P. 39–70.
18. *Вдовин Е. П., Гальт А. А.* Нормализаторы подсистемных подгрупп в конечных группах лиева типа // Алгебра и логика. 2008. Т. 47, № 1. С. 3–30.
19. *Tamburini M. C., Vdovin E. P.* Carter subgroups of finite groups // J. Algebra. 2002. V. 255, N 1. P. 148–163.
20. *Carter R.W.* Simple groups of Lie type. New York: Wiley and Sons, 1972.

Статья поступила 25 мая 2010 г.

Вдовин Евгений Петрович
Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН,
пр. Академика Коптюга, 4, Новосибирск 630090
vdovin@math.nsc.ru

Гальт Алексей Альбертович
Новосибирский гос. университет, механико-математический факультет,
ул. Пирогова, 2, Новосибирск 630090
galt84@gmail.com