

Numerical Simulation of Axisymmetric Abnormal Glow Discharge between Two Flat Disc Shaped Electrodes

Sergey T. Surzhikov

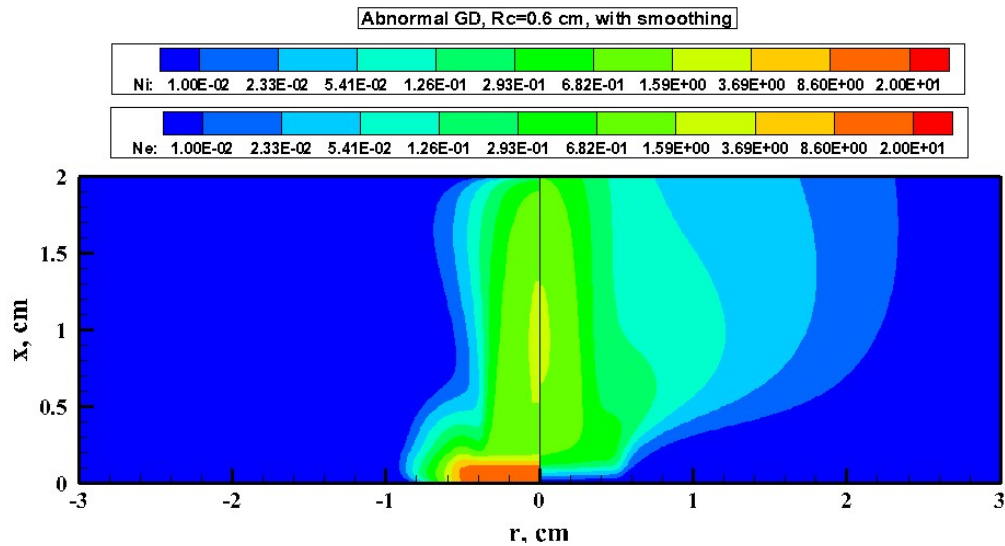
*Ishlinskiy Institute for Problems in Mechanics Russian Academy of Sciences (IPMech RAS),
Moscow, 119526, Russia*

surg@ipmnet.ru

Abstract

The results of a systematic numerical study of the parameters of an abnormal DC glow discharge between two flat disk electrodes are presented. A two-dimensional axisymmetric diffusion-drift model of a glow discharge was used, which included the equations for the transfer of electrons and ions of molecular nitrogen, as well as the Poisson equation for finding the electric potential in the discharge gap, taking into account the regions of the space charge and the positive column. The parameters of normal and anomalous glow discharges, which were obtained by decreasing the radius of the cathode section, are compared.

Keywords: anomalous glow discharge, normal glow discharge, diffusion-drift model.



Distributions of the ion (left) and electron (right) concentrations in a normal glow discharge, $\varepsilon=1000$ V, $R_0=300$ k Ω , $p=5$ Torr. Radius of the cathode section $R_c=0.6$ cm. Calculation with smoothing of the electric field near the cathode

УДК 537.525

Численное моделирование осесимметричного аномального тлеющего разряда между двумя плоскими дискообразными электродами

С. Т. Суржиков

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
Россия, Москва, 119526, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1
surg@ipmnet.ru*

Аннотация

Представлены результаты систематического численного исследования параметров аномального тлеющего разряда постоянного тока между двумя плоскими дисковыми электродами. Использовалась двухмерная осесимметричная диффузионно-дрейфовая модель тлеющего разряда, включающая уравнения переноса электронов и ионов молекулярного азота, а также уравнение Пуассона для нахождения электрического потенциала в разрядном промежутке с учетом областей пространственного заряда и положительного столба. Выполнено сравнение параметров нормального и аномального тлеющих разрядов, которые получались при уменьшении радиуса катодной секции.

Ключевые слова: аномальный тлеющий разряд, нормальный тлеющий разряд, диффузионно-дрейфовая модель

1. Введение

В данной работе представлены результаты систематического численного исследования параметров нормального и аномального тлеющих разрядов постоянного тока между двумя плоскими дисковыми электродами. Здесь представлены подробные расчетные данные, которые не вошли в первую работу на указанную тему [1], где основное внимание уделялось мотивации и обоснованию основных положений данного исследования.

С использованием численного моделирования изучаются изменения в структуре нормального тлеющего разряда при постепенном его переходе в аномальный разряд вследствие искусственного уменьшения радиуса катодного электрода, окруженного диэлектрической поверхностью. Для этих целей используется диффузионно-дрейфовая модели разряда в осесимметричной постановке. Расчётная схема показана на рис. 1, а реальная физическая реализация данной задачи показана на рис. 2.

Рассматривается тлеющий разряд постоянного тока между двумя плоскими дисковыми электродами (см. рис. 1) с радиусом электродов $R = 3$ см и расстоянием между ними $H = 1.0$ см и 2.0 см. Давление газа задавалось постоянным $p = 5$ Тор. После получения решения задачи в режиме нормального тлеющего разряда, выполнялись расчеты для постепенно уменьшаемого радиуса катодной секции, $R_c = 1.0$ см, 0.6 см, 0.4 см и 0.2 см (остальная часть катодной поверхности полагалась диэлектрической), что приводило к переходу нормального тлеющего разряда в аномальный.

Для каждого из рассчитанных вариантов изучалась электродинамическая структура разряда и распределение его характеристик вблизи границы катодного электрода. Дополнительная серия расчётов выполнена с использованием предложенной в [1] процедуры численного сглаживания напряжённости электрического поля вблизи границы катодного электрода.

2. Математическая постановка задачи

Система уравнений расчетной диффузионно-дрейфовой модели тлеющего разряда формулируется в следующем виде [1, 3]:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \operatorname{div} \Gamma_e = \alpha \left(\frac{E}{p} \right) p |\Gamma_e| - \beta n_i n_e, \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \operatorname{div} \Gamma_i = \alpha \left(\frac{E}{p} \right) p |\Gamma_i| - \beta n_i n_e, \quad (2)$$

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad} \varphi) = 4\pi e(n_i - n_e), \quad (3)$$

где $\Gamma_e = -D_e \operatorname{grad} n_e - n_e \mu_e \mathbf{E}$; $\Gamma_i = -D_i \operatorname{grad} n_i + n_i \mu_i \mathbf{E}$; $\mathbf{j} = e(\Gamma_i - \Gamma_e)$; $\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi$; n_e, n_i – концентрации электронов и ионов в 1 см^3 ; e – заряд электрона, \mathbf{E} и φ – вектор напряженности электрического поля и его потенциал; Γ_e, Γ_i – векторы плотностей потоков электронов и ионов; D_e, D_i – коэффициенты диффузии электронов и ионов; μ_e, μ_i – подвижности электронов и ионов; $\alpha = \alpha(E/p)$ – коэффициент ударной ионизации молекул электронами (первый коэффициент Таунсенда), $E = |\mathbf{E}|$; β – коэффициент ион-электронной рекомбинации; p – давление газа.

Граничные условия для уравнений (1)–(3) при использовании ортогональной цилиндрической системы координат, имеют вид

$$x = 0, \quad \Gamma_{e,x} = \gamma \Gamma_{i,x}, \quad \frac{\partial n_i}{\partial x} = 0, \quad \varphi = 0; \quad (4)$$

$$x = H, \quad \frac{\partial n_e}{\partial x} = 0, \quad n_i = 0, \quad \varphi = V_d; \quad (5)$$

$$r = 0, \quad \frac{\partial n_e}{\partial r} = \frac{\partial n_i}{\partial r} = \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0; \quad (6)$$

$$r = R, \quad n_e = n_i = 0, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0 \quad (7)$$

Здесь γ – коэффициент вторичной ион-электронной эмиссии с поверхности катода; V_d – падение напряжения на разрядном промежутке, $\Gamma_{e,x}, \Gamma_{i,x}$ – проекции потоков электронов и ионов на ось x ; R, H – координаты границы расчетной области по направлениям r и x .

Величина падения напряжения на разрядном промежутке V_d , куда входят составными частями падения напряжения на катодном и анодном слоях, определяется с привлечением уравнения внешней цепи (см. рис. 1). В условиях установившегося процесса горения тлеющего разряда можно записать очевидное соотношение

$$\frac{E - V_d}{eR_0} = 2\pi \int_0^R \Gamma_e(r, x=0) x dx, \quad (8)$$

которое постулирует равенство суммы падений напряжений на сопротивлении R_0 и разрядном промежутке электродвижущей силе E .

Задавались следующие значения коэффициентов, входящих в математическую постановку задачи

$$\mu_e p = 4.4 \times 10^5, \quad \mu_i p = 1.45 \times 10^3, \quad (\text{Торр} \cdot \text{см}^2)/(\text{В} \cdot \text{с}),$$

$$\beta = 2 \times 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с},$$

$$\frac{\alpha}{p} = A \cdot \exp\left(-\frac{B}{E/p}\right), (\text{см} \cdot \text{Торр})^{-1}, \quad (9)$$

где $A = 12 (\text{см} \cdot \text{Торр})^{-1}$, $B = 342 \text{ В}/(\text{см} \cdot \text{Торр})$.

Коэффициенты диффузии определялись по соотношениям Эйнштейна

$$D_e = \mu_e T_e, \quad D_i = \mu_i T_i,$$

где T_e, T_i – температуры электронов и ионов, эВ.

Подробности численного решения системы уравнений диффузионно-дрейфовой модели тлеющего разряда даны в [3].

3. Результаты численного моделирования

Исходные данные во всех расчетных вариантах были одинаковы: $p = 5 \text{ Торр}$, $\varepsilon = 1000 \text{ В}$, $R_0 = 300 \text{ к}\Omega$. На рис. 3 показана электродинамическая структура нормального тлеющего разряда в электроразрядном промежутке высотой $H = 1 \text{ см}$ и радиусом $R = 3 \text{ см}$, а на рис. 4 в разрядном промежутке высотой $H = 2 \text{ см}$. На распределениях концентраций ионов и электронов (рис. 3, *a* и 4, *a*) хорошо видны главные структурные элементы разряда: катодный слой с повышенной концентрацией ионов и положительный столб – область почти квазинейтральной плазмы. Здесь и далее концентрации заряженных частиц отнесены к величине $n_0 = 10^9 \text{ см}^{-3}$. В непосредственной близости от анода располагается анодный слой, в котором концентрация ионов стремится к нулю. Это область отрицательного объемного заряда. Поперечные размеры токового столба в разрядных промежутках высотой $H = 1 \text{ см}$ и 2 см весьма близки.

На рис. 3, *б* и 4, *б* показаны распределения осевой и радиальной компонент напряженности электрического поля, а на рис. 4, *в* (слева) – распределение электрического потенциала. В катодном слое, то есть в области положительного объемного заряда, наблюдается резкий рост электрического потенциала.

Заметим, что распределение электрического потенциала, показанное на рис. 3, *в* и 4, *в* (слева) наглядно иллюстрируют наличие потенциальной ямы, в которой существует токовый слой нормального тлеющего разряда. Сопоставление данных на рис. 3, *в* (слева) и 3, *б* (справа) объясняет наличие локального максимума радиальной компоненты напряженности электрического поля у верхней правой границы катодного слоя. Здесь в радиальном направлении падает электрический потенциал. Обратим внимание на этот факт, поскольку, ниже будет показано, что в аномальном разряде ситуация изменяется на противоположную.

Сравнение структуры разряда на рис. 3 и 4 демонстрирует важный факт близости размеров катодного слоя, в котором сосредоточена основная доля объемных скорости генерации электронов. На рис. 3, *в* и 4, *в* (справа) дано распределение скорости ионизации в нормальном тлеющем разряде. Отсюда видно, что ионизация газа протекает также в анодном слое и, в гораздо меньшей степени – в положительном столбе. В работе [5] было показано, что во многом существование токового столба в нормальном тлеющем разряде обязано конкуренцией процессов ионизации и диффузии в радиальном направлении. Видимая граница токового столба на рис. 3, *a* и 4, *a* (справа) примерно соответствует той линии электронного тока, правее которой диффузионные процессы делают невозможными потери электронов, а левее – ионизационные и дрейфовый процессы позволяют электронам замкнуть электрическую цепь.

На рис. 5 показано распределение концентрации электронов и ионов вдоль оси симметрии разряда для двух расстояний между электродами. На этих рисунках хорошо видны области катодного и анодного слоев, где концентрация ионов и электронов достигает величин $n_i = (20 \div 25) \times 10^9 \text{ см}^{-3}$ и $n_e = (2 \div 3) \times 10^9 \text{ см}^{-3}$ соответственно В положительном столбе концентрации заряженных частиц $n_e \approx n_i \sim 5.0 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$.

На рис. 6 показано распределение модуля напряженности электрического поля вдоль оси симметрии разряда и электрического потенциала при $H = 1$ см и 2 см. В катодном слое наблюдается наибольшая напряженность электрического поля. Значительно меньшей рост напряженности электрического поля наблюдается в анодном слое, однако и этого повышения оказывается достаточным для заметного возрастания скорости ионизации в этом слое. Примечательно также, что в квазинейтральном положительном столбе напряженность электрического поля составляет $E_x \sim 50$ В/см, что достаточно для восполнения потерь электронов диффузией за счет ударной ионизации и движения электронов вдоль поля между катодом и анодом.

На рис. 7 показаны радиальные распределения плотностей тока на катоде и аноде в нормальном и аномальном тлеющих разрядах для двух межэлектродных расстояний, которые различаются весьма значительно. Для нормального тлеющего разряда (кривые 1) плотность тока на катоде (пунктир) примерно в 4 раза ниже плотности тока на аноде. Заметим, что именно плотность тока на катоде является консервативной величиной по отношению к изменениям параметров нормального тлеющего разряда. Плотность тока на аноде может изменяться заметно [3].

На последующих рисунках представлены результаты исследования структуры аномального тлеющего разряда. Здесь также изучалась структура разряда при двух межэлектродных расстояний. Матрица результатов расчётов построена следующим образом. Расчёты выполнены для последовательно уменьшаемых радиусов катодного электрода $R_c = 1.0$ см, 0.6 см, 0.4 см и 0.2 см. Радиус анодного электрода оставался прежним – $R_a = 3$ см. На рис. 8, а и 9, а показаны результаты расчетов концентрации заряженных частиц, на рис. 8, б и 9, б поля компонент напряженности электрического поля, а на рис. 8, в и 9, в – электрического потенциала и скорости ионизационных процессов для двух радиусов катодных электродов: $R_c = 0.6$ см и 0.2 см.

Как уже отмечалось, особенностью аномальных тлеющих разрядов является повышенная напряженность электрического поля вблизи границ электродов. Это иллюстрируется на рис. 10, а, где показаны распределения осевых компонент модуля напряженности электрического поля вдоль радиуса катодной секции разряда для разных размеров катодных электродов. Локальные максимумы напряженности отвечают границам катодных секций. На рис. 11, а даны аналогичное распределение электродинамических функций в разрядном промежутке увеличенной высоты, $H = 2$ см. На этих же рисунках показано распределение электрического потенциала на катодной секции тлеющего разряда. Очевидно, что на катодном электроде $\varphi = 0$. Но на диэлектрической поверхности, в силу используемых граничных условий, $\varphi \neq 0$.

В аномальном тлеющем разряде с радиусом катода $R_c = 0.6$ см плотность тока на катоде и аноде упала соответственно в 2 и 4 раза (рис. 7). При этом плотность тока на катоде становится более однородной по радиусу. Для аномального тлеющего разряда с радиусом катода $R_c = 0.2$ см наблюдается резкое возрастание плотности тока на катоде. Это связано с сильной локализацией катодного пятна при необходимости поддержания тока почти на прежнем уровне.

Отметим также особенности в распределениях электрического потенциала и радиальной составляющей напряженности электрического поля для аномального тлеющего разряда, о которых говорилось выше. Из рис. 8, б, в и 9, б, в видно, что потенциал в радиальном направлении возрастает, а не падает, как в нормальном тлеющем разряде. Как следствие, радиальная компонента напряженности электрического поля направлена к центру. Впрочем, принципиально это не меняет характеристики разряда.

Уже обсуждалось, что наблюдаемые скачки напряженности электрического поля приводят к резкому увеличению скорости ионизации в соответствующих зонах. Физическим аналогом этого эффекта является улучшение условий для электрического пробоя газа. При численном моделировании существенно усложняется процедура получения решения.

В данной работе апробирована процедура сглаживания напряженности электрического поля вблизи границ электродов.

Если не использовать сглаживание, то для электрического потенциала на катодной секции задавались следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} r \leq R_c : \quad \varphi &= 0; \\ r > R_c : \quad \frac{\partial \varphi}{\partial x} &= 0, \end{aligned}$$

что в конечно-разностном виде имело следующие выражения:

$$\begin{aligned} r_i \leq R_c : \quad \alpha_i &= 0, \quad \beta_i = 0; \\ r_i > R_c : \quad \alpha_i &= 1, \quad \beta_i = 0 \end{aligned}$$

Здесь предполагается, что граничное условие на поверхности катода в точках r_i задается в следующем виде:

$$\varphi_{i,1} = \alpha_i \varphi_{i,2} + \beta_i,$$

где $\varphi_{i,1}$ – потенциал на поверхности, а $\varphi_{i,2}$ – потенциал в ближайшем к поверхности слое конечно-разностной сетки.

При использовании процедуры сглаживания применялись следующие формулы:

$$\begin{aligned} r_i < R_\delta : \quad \alpha_i &= 0, \quad \beta_i = 0; \\ r_i \geq R_\delta : \quad \alpha_i &= 1 - \exp\left[-\frac{(r_i - R_\delta)^4}{\delta^4}\right], \quad \beta_i = 0; \\ r_i > R_c : \quad \alpha_i &= 1, \quad \beta_i = 0, \end{aligned}$$

где $R_\delta = R_c - \delta$, $\delta = 0.25$ см или 0.05 см.

На рис. 12 показаны результаты расчётов электродинамической структуры разряда при использовании процедуры сглаживания осевой составляющей напряженности электрического поля вблизи катода радиусом $R_c = 0.2$ см при высоте электроразрядного промежутка $H = 1$ см.

Сравнение приведённых данных со сглаживанием и без сглаживания (рис. 10, 11) показывает, что использованное сглаживание оказывает слабое влияние на распределение всех функций кроме, конечно, напряженности электрического поля в непосредственной близости от границы катодного электрода.

На рис. 13 показаны распределения электрического потенциала вдоль оси симметрии токового столба для разных радиусов катодных электродов, полученных без использования и с использованием процедуры сглаживания. Обращает на себя внимание близость этих распределений, кроме параметров аномального тлеющего разряда при $R_c = 0.2$ см. Это не удивительно, поскольку при очень малых радиусах катода структура разряда изменяется уже весьма значительно (см. рис. 9). Дальнейшее уменьшение радиуса катода в еще большей степени обостряет режим горения.

На рис. 14 и 15 показаны осевые распределения концентрации электронов и ионов, которые также подтверждают выводы о том, что до определенных пределов уменьшение радиуса катода параметры аномального тлеющего разряда изменяются незначительно, но при наименьшем радиусе катода практически наступает новый режим горения, характеризующийся резким возрастанием электрического потенциала в катодном слое и, как следствие, скорости ионизационных процессов (см. рис. 8 и 9).

Представленные распределения свидетельствуют о слабом влиянии процедуры сглаживания на основные характеристики разряда. На рис. 10, 11 показаны осевые распределения модуля x -й составляющей электрического поля и потенциала вдоль поверхности катодной секции для разных радиусов электродов при двух высотах разрядных промежутков $H = 1$ см и

2 см. Здесь хорошо видно, что используемая процедура сглаживания весьма эффективно срезаёт локальные скачки напряжённости электрического поля вблизи границы катода, при этом изменяя средние значения на поверхности катода не очень сильно.

Для завершения анализа аномального разряда в таблице 1 приведены такие его интегральные характеристики, как напряжение на электроразрядном промежутке и полный ток через разрядный канал. Отмечается уменьшение полного тока и возрастание падения напряжения между электродами при уменьшении радиуса катода.

Таблица 1

Интегральные характеристики нормального и аномального тлеющих разрядов с радиусом разрядной камеры $R=3$ см

Радиус катодного электрода, см	I , мА	V_d , В	I , мА	V_d , В
	Без сглаживания потенциала		Со сглаживанием потенциала	
$H=1$ см				
3.0	2.10	370.		
1.0	2.10	367.	2.12	265.
0.6	2.20	349.	2.14	359.
0.4	2.17	365.	2.09	374.
0.2	2.03	428.	1.82	441.
$H=2$ см				
3.0	1.31	6.05		
0.6	1.61	542.	1.56	538.
0.4	1.58	562.	1.49	564.
0.2	1.46	620.	1.22	639.

4. Заключение

Выполнено сравнительное численное исследование параметров нормального и аномального тлеющих разрядов непрерывного тока между двумя плоскими дисковыми электродами радиусом 3 см в электроразрядном промежутке высотой 1 и 2 см. Аномальные разряды получались при уменьшении радиуса катодного электрода, при этом остальная часть катодной поверхности заполнялась диэлектриком.

Для численного моделирования применялась диффузионно-дрейфовая модель тлеющего разряда совместно с уравнением для внешней электрической цепи, включающей омическое сопротивление и источник питания тлеющего разряда постоянного тока. Учет внешней электрической цепи обеспечивал положительную обратную связь по отношению к определению падения напряжения на электродах после вычисления суммарного электрического тока через разрядный промежуток.

Показано, что в аномальном тлеющем разряде постоянного тока вблизи границ катода возникают локальные максимумы напряженности электрического поля, которые приводят к пробойным явлениям (лавинной ионизации газа) и к неустойчивости численного решения уравнений диффузионно-дрейфовой модели.

С целью расширения диапазона исходных данных, для которых получается установившееся решение, предложена процедура сглаживания напряженности электрического поля у границ катода, физическим аналогом которой может являться скругление границ электродов в реальном эксперименте. Показана высокая устойчивость результатов численного моделирования разряда к использованию процедуры сглаживания и отсутствие ее сильного влияния на рассчитываемые электродинамические параметры.

При численном моделировании аномальных тлеющих разрядов установлены условия, при которых начинается сильное отличие параметров аномального разряда от нормального.

Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №22-11-00062).

Литература

1. Суржиков С.Т. Сравнительный анализ параметров нормального и аномального тлеющих разрядов постоянного тока// Физика плазмы. 2022. Т. 48. Вып. 11.
2. Суржиков С.Т., Козлов П.В., Котов М.А., Рулева Л.Б., Солодовников С.И. //Доклады Академии наук. 2019. Т. 485. № 4. С. 422.
3. Суржиков С.Т. Физическая механика газовых разрядов. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006. 640 с.
4. Суржиков С.Т., Райзер Ю.П. Еще раз о природе эффекта нормальной плотности тока на катоде тлеющего разряда//Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. № 8. С. 452–456.
5. Сторожев Д.А., Куратов С.Е., Суржиков С.Т. Численное моделирование 2D структуры тлеющего разряда в молекулярном водороде с учетом кинетики ионизации и диссоциации//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2015. Т. 16, вып. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-4/articles/566/>

References

1. Surzhikov S. T., Comparative analysis of the parameters of normal and anomalous DC glow discharges, *Plasma Physics Report*, 2022, vol. 48, no. 11. [in Russian].
2. Surzhikov S.T., Kozlov P.V., Kotov M.A., Ruleva L.B., Solodovnikov S.I., *Reports of the Academy of Sciences*, 2019, vol. 485, no. 4, p. 422. [in Russian].
3. Surzhikov S.T., *Physical mechanics of gas discharges*, Publishing house of Bauman Moscow State University. 2006, 640 p. [in Russian].
4. Surzhikov S.T., Raiser Yu.P., Once again about the nature of the effect of normal current density on the glow discharge cathode, *Letters to ZhTF*, 1987, vol. 13, no. 8, pp. 452–456. [in Russian].
5. Storozhev D.A., Kuratov S.E., Surzhikov S.T., Numerical simulation of 2D structure of the glow discharge in molecular hydrogen in view of ionization and dissociation kinetics, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2015, vol. 16, no. 4. [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-4/articles/566/>

Статья поступила в редакцию 11 октября 2022 г.

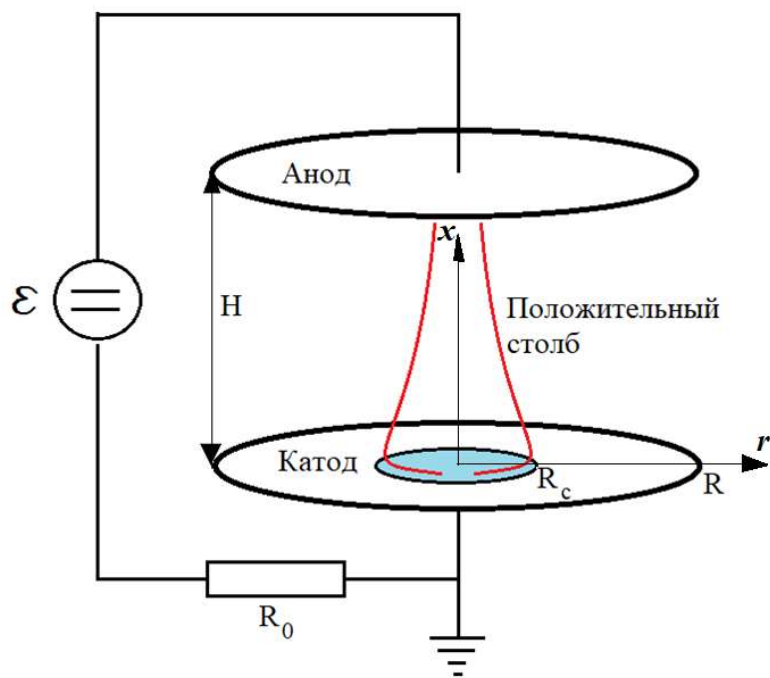


Рис. 1. Расчетная схема аномального тлеющего разряда

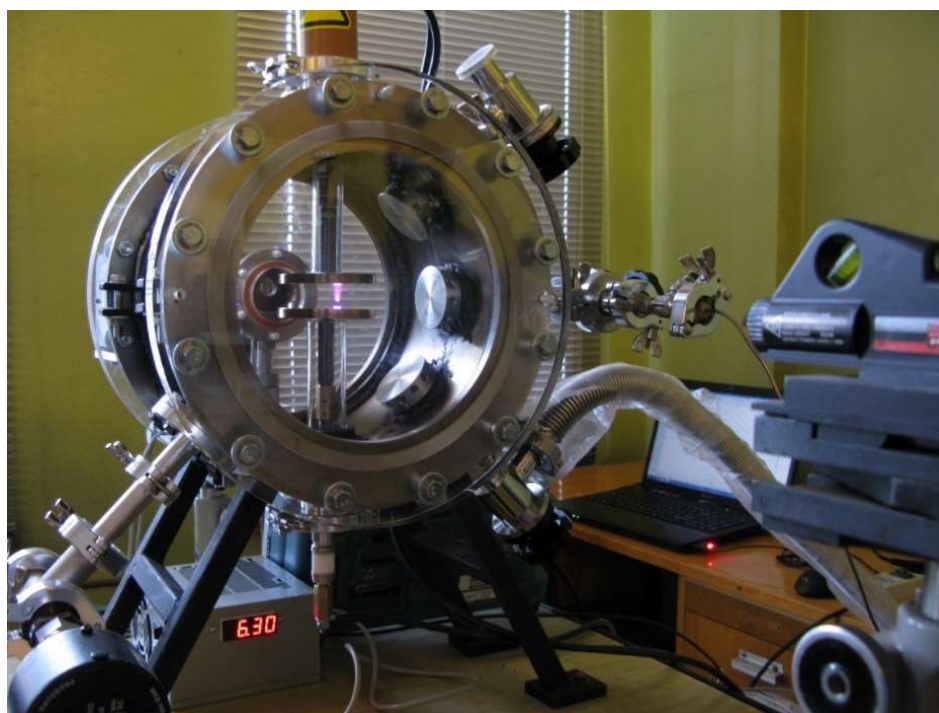


Рис. 2. Нормальный тлеющий разряд в физическом эксперименте [2]

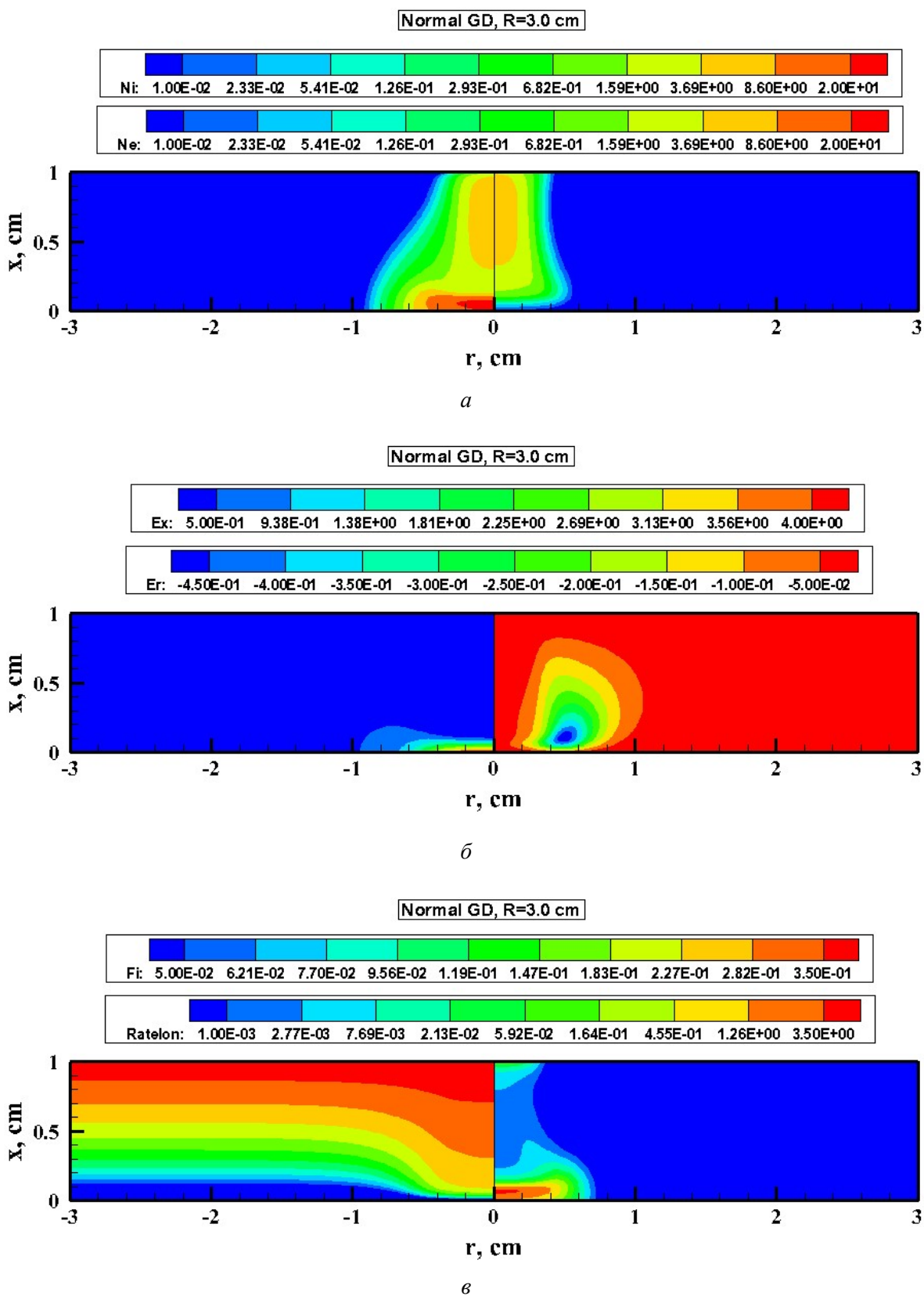


Рис. 3. Распределения концентраций ионов (слева) и электронов (справа) (а), нормальной (слева) и радиальной (справа) компонент электрического поля (б), электрического потенциала (слева) и скорости ионизации (справа) (в) в нормальном тлеющем разряде, $\varepsilon = 1000$ В, $R_0 = 300$ к Ω , $p = 5$ Торр

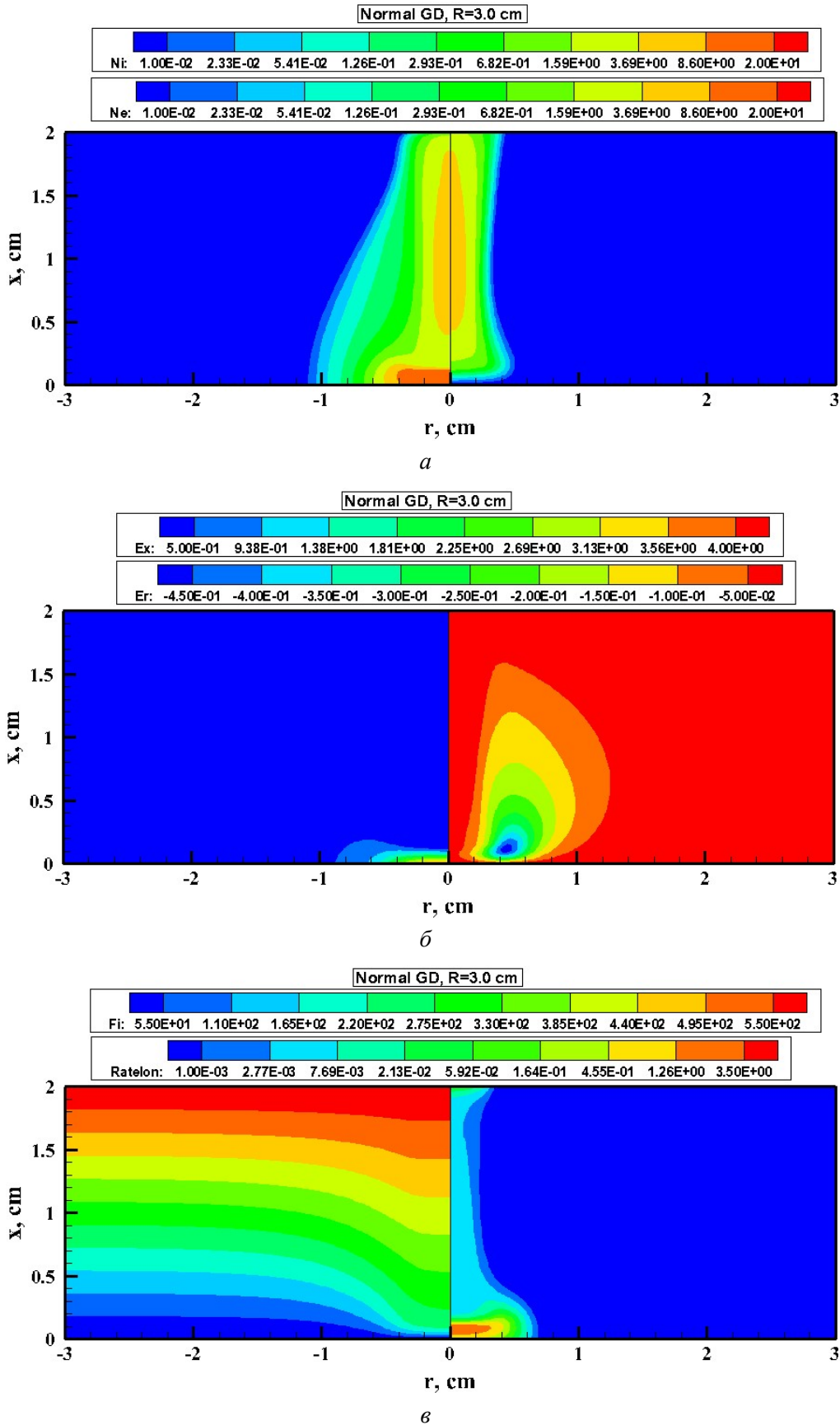


Рис. 4. Распределения нормальной (слева) и радиальной (справа) компонент электрического поля (а), электрического потенциала (слева) и скорости ионизации (справа) (б), концентраций ионов (слева) и электронов (справа) (в) в нормальном тлеющем разряде в электроразрядном промежутке высотой $H=2$ см и радиусом $R_c=3$ см; $\varepsilon=1000$ В, $R_0=300$ к Ω , $p=5$ Торр

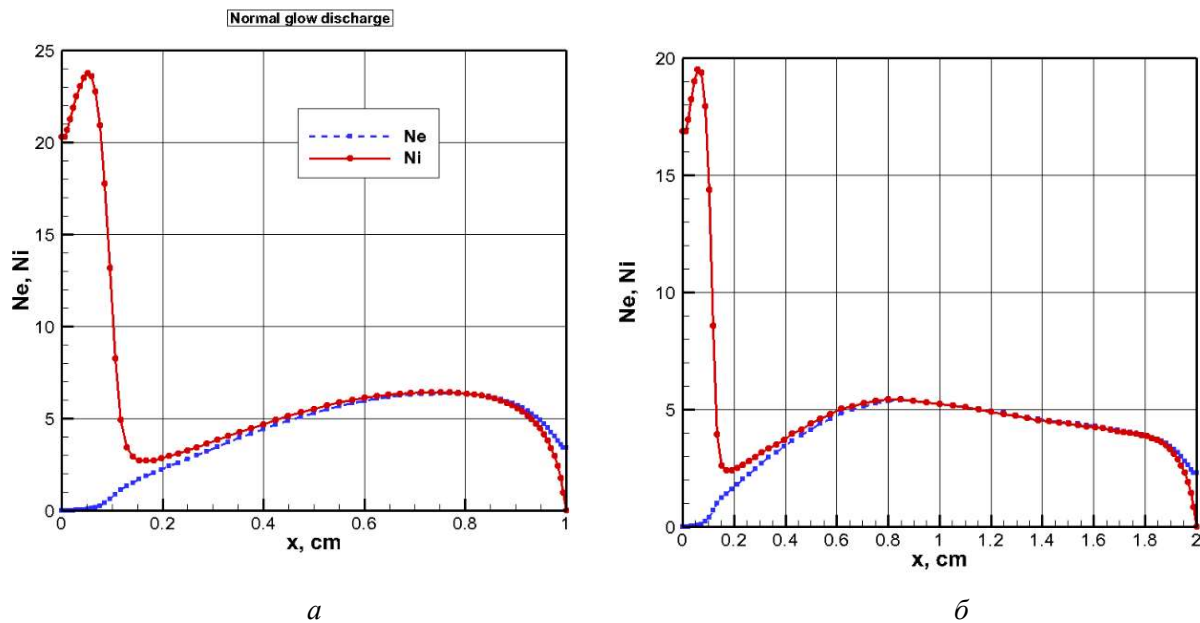


Рис. 5. Распределение концентраций ионов и электронов вдоль оси симметрии нормального тлеющего разряда, $\varepsilon = 1000$ В, $R_0 = 300$ к Ω , $p = 5$ Торр при $H = 1$ см (а) и 2 см (б)

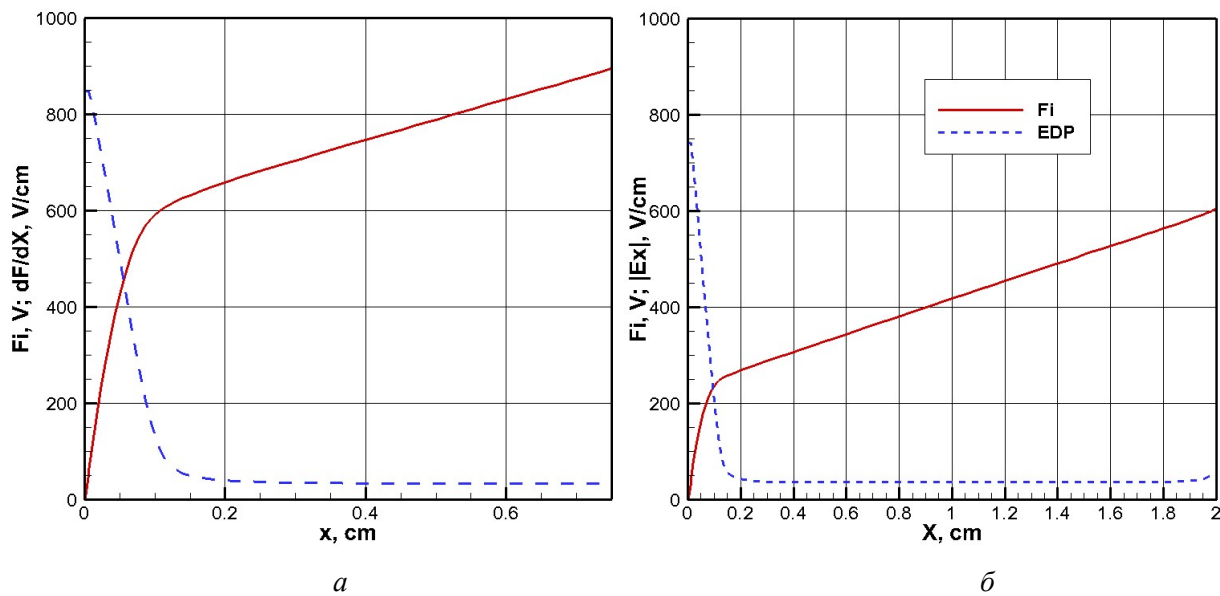


Рис. 6. Распределение электрического потенциала и модуля осевой составляющей электрического поля вдоль оси симметрии нормальных тлеющих разрядов в газоразрядном промежутке высотой $H = 1$ см (а) и 2 см (б)

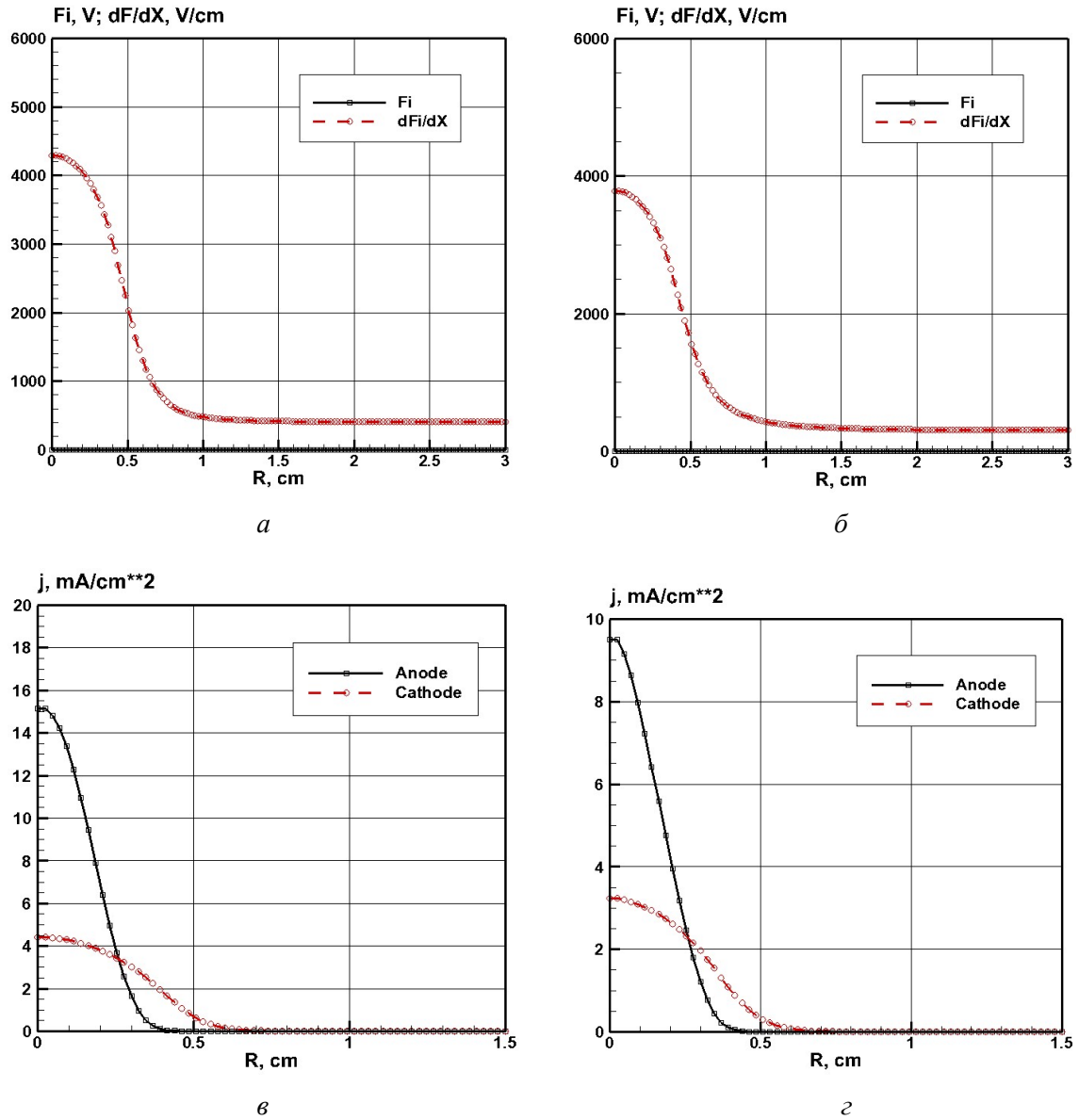


Рис. 7. Распределение электрического потенциала и модуля осевой составляющей электрического поля (*a, б*), а также плотностей тока на катоде и аноде вдоль радиуса катода (*в, г*) нормальных тлеющих разрядов в газоразрядном промежутке высотой $H=1$ и 2 см

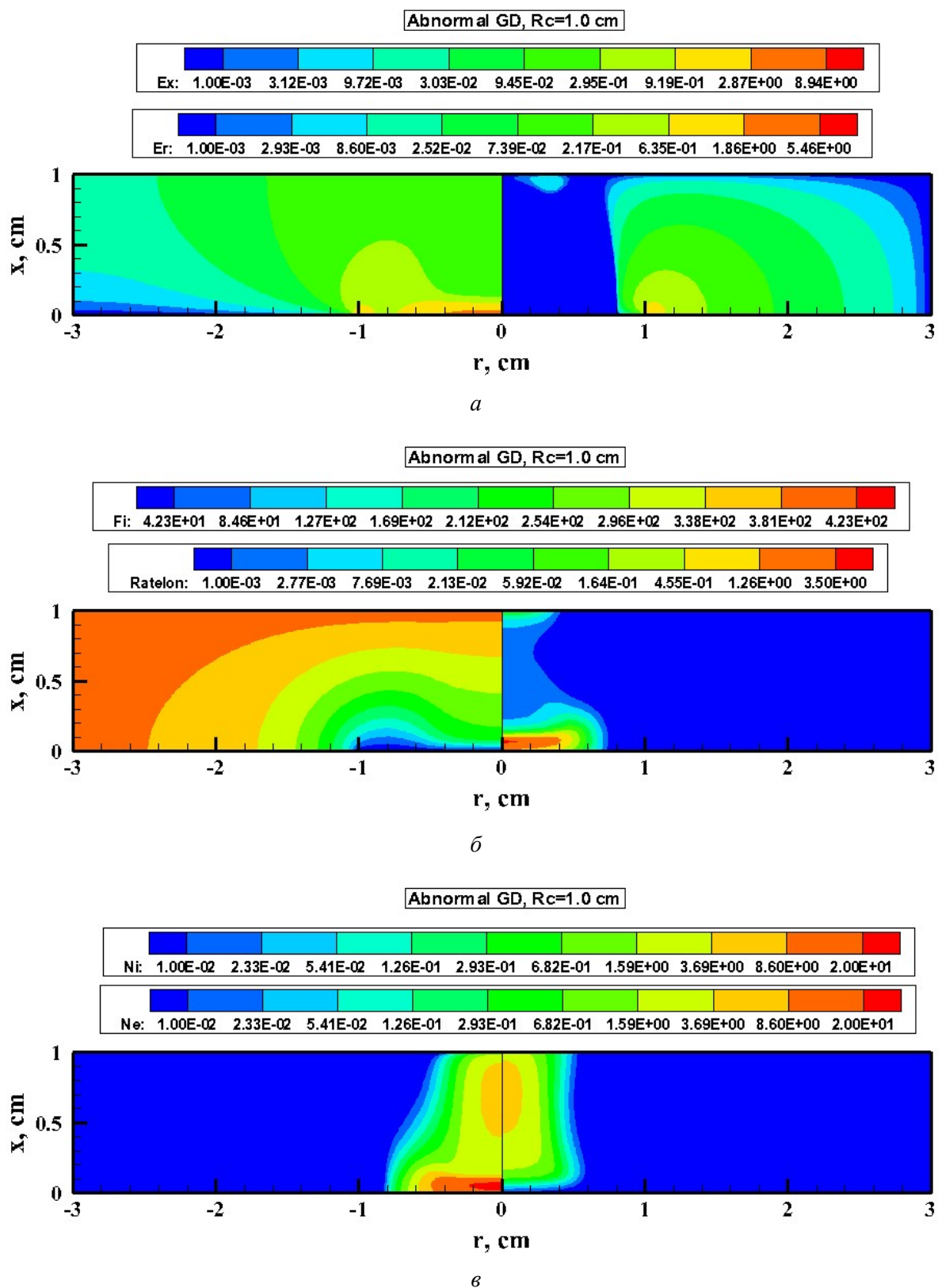


Рис. 8. Распределения нормальной (слева) и радиальной (справа) компонент электрического поля (а), электрического потенциала (слева) и скорости ионизации (справа) (б), концентраций ионов (слева) и электронов (справа) (в) в нормальном тлеющем разряде, $\varepsilon=1000$ В, $R_0=300$ к Ω , $p=5$ Торр. Радиус катодной секции $R_c=1.0$ см

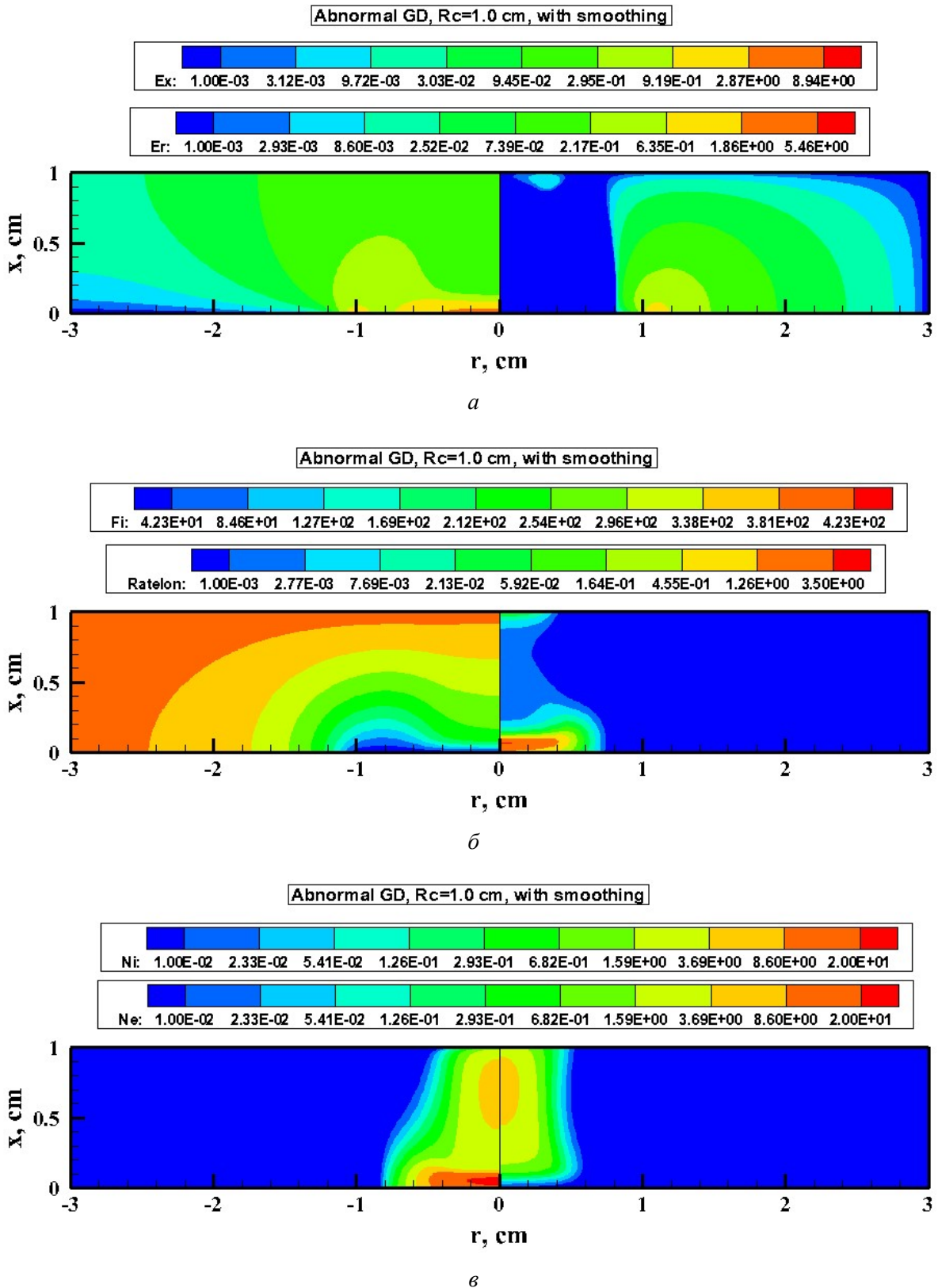


Рис. 9. Распределения нормальной (слева) и радиальной (справа) компонент электрического поля (*a*), электрического потенциала (слева) и скорости ионизации (справа) (*b*), концентраций ионов (слева) и электронов (справа) (*c*) в нормальном тлеющем разряде, $\varepsilon = 1000$ В, $R_0 = 300$ к Ω , $p = 5$ Торр. Радиус катодной секции $R_c = 1.0$ см. Сглаживание напряженности электрического поля вблизи катода

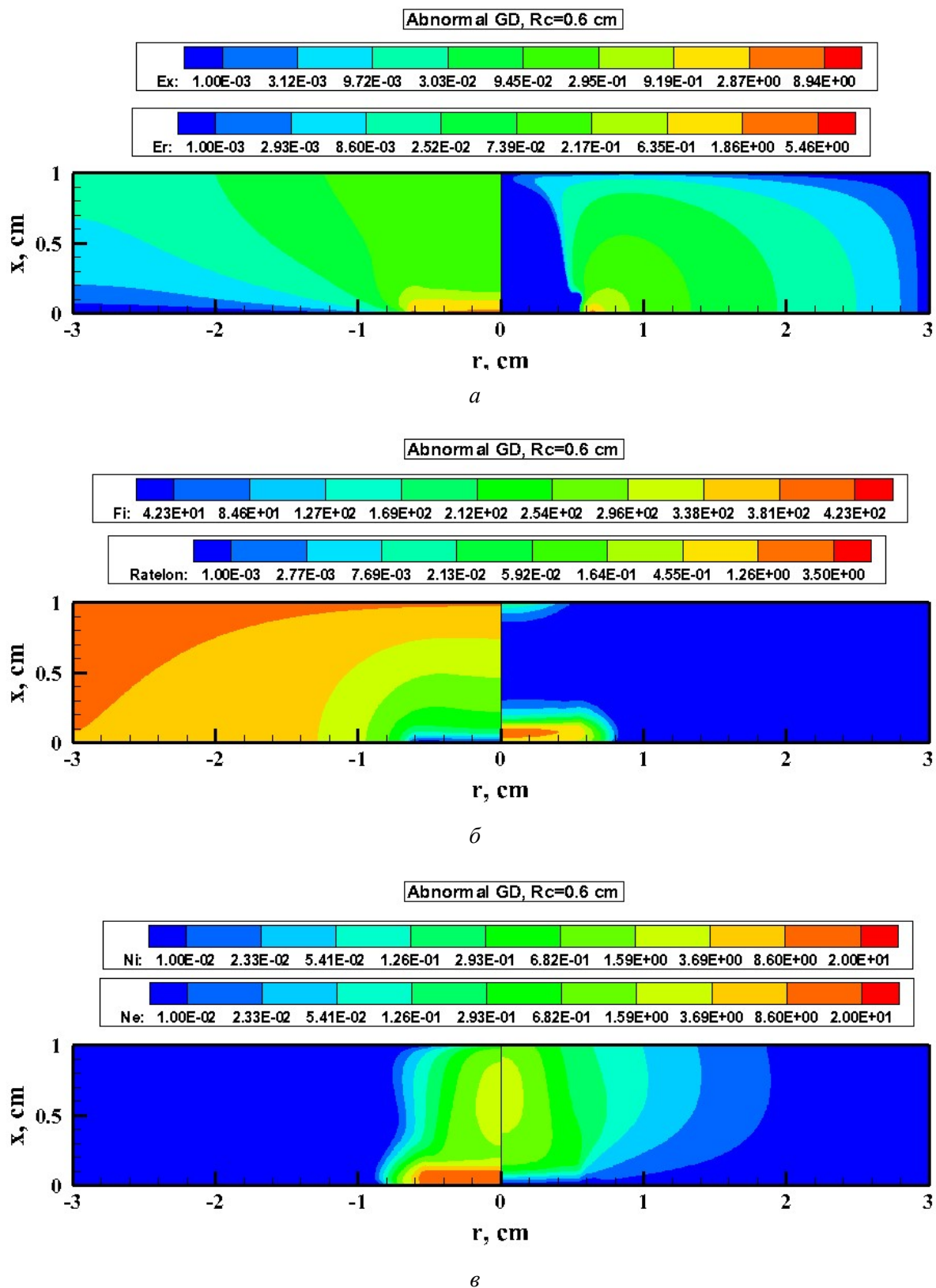


Рис. 10. Распределения нормальной (слева) и радиальной (справа) компонент электрического поля (а), электрического потенциала (слева) и скорости ионизации (справа) (б), концентраций ионов (слева) и электронов (справа) (в) в нормальном тлеющем разряде, $\varepsilon=1000$ В, $R_0=300$ к Ω , $p=5$ Торр. Радиус катодной секции $R_c=0.6$ см

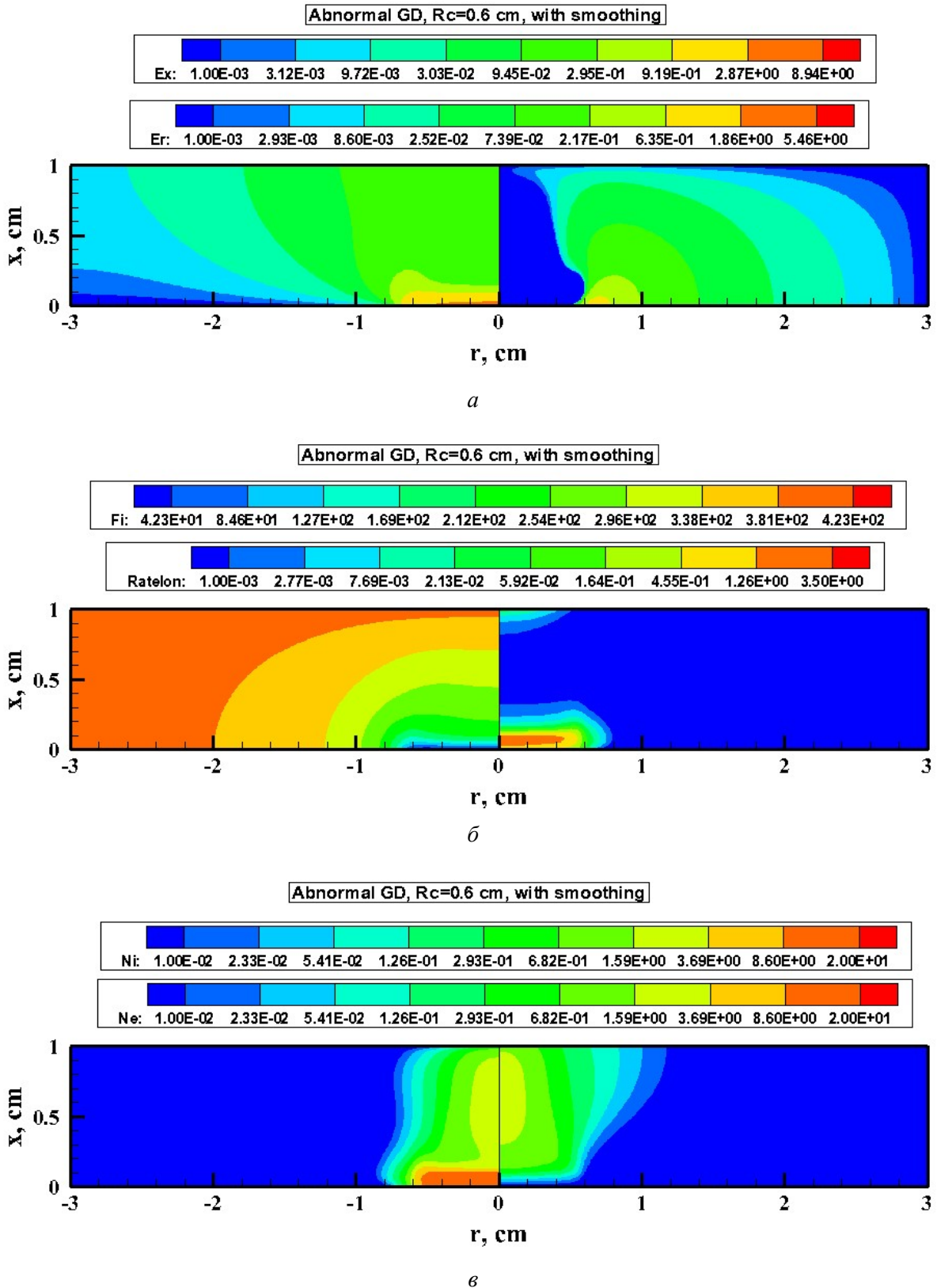


Рис. 11. Распределения нормальной (слева) и радиальной (справа) компонент электрического поля (a), электрического потенциала (слева) и скорости ионизации (справа) (b), концентраций ионов (слева) и электронов (справа) (c) в нормальном тлеющем разряде, $\varepsilon=1000$ В, $R_0=300$ к Ω , $p=5$ Торр. Радиус катодной секции $R_c=0.6$ см. Сглаживание напряженности электрического поля вблизи катода

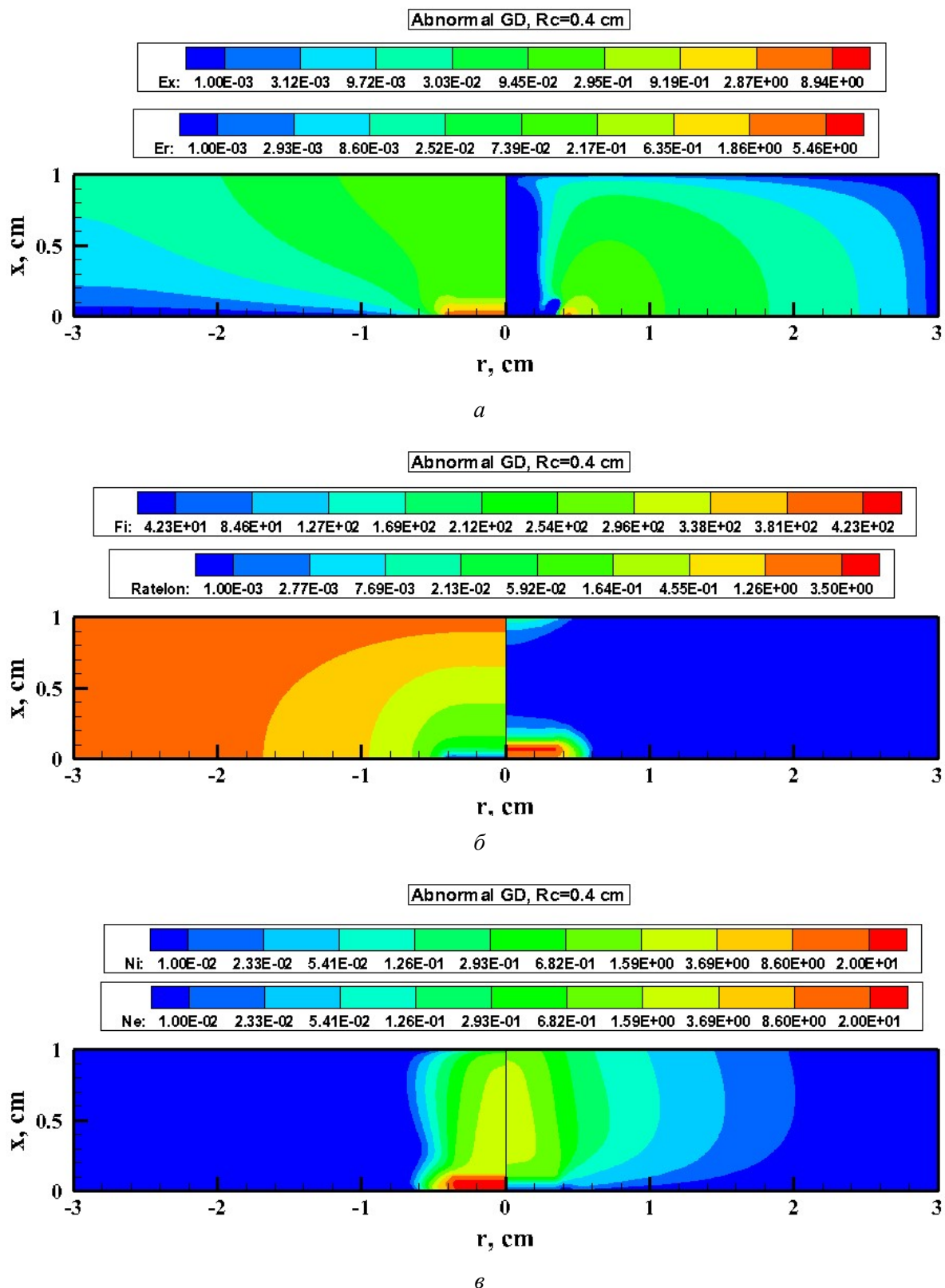


Рис. 12. Распределения нормальной (слева) и радиальной (справа) компонент электрического поля (а), электрического потенциала (слева) и скорости ионизации (справа) (б), концентраций ионов (слева) и электронов (справа) (е) в нормальном тлеющем разряде, $\varepsilon = 1000$ В, $R_0 = 300$ к Ω , $p = 5$ Торр. Радиус катодной секции $R_c = 0.4$ см

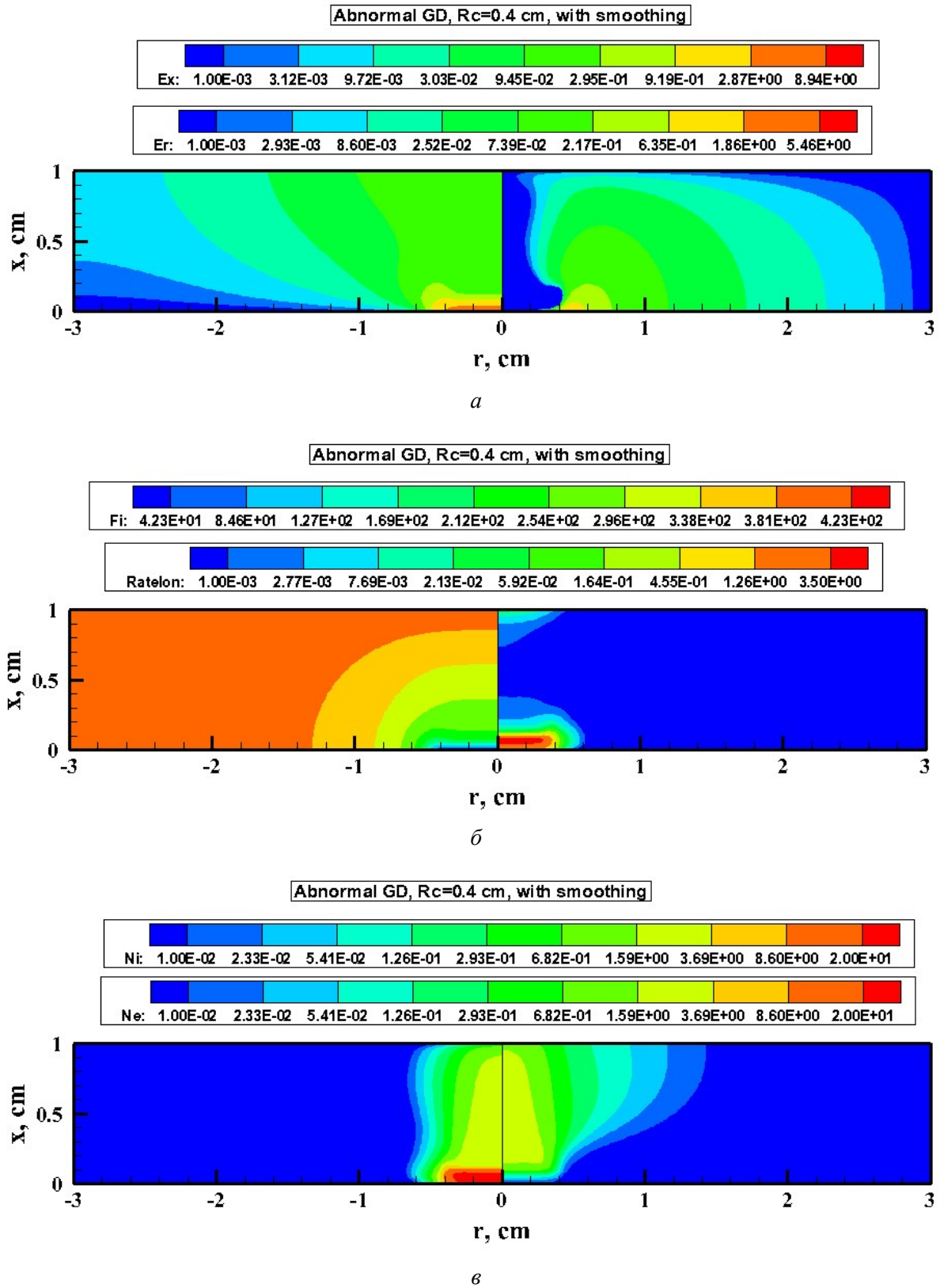


Рис. 13. Распределения нормальной (слева) и радиальной (справа) компонент электрического поля (а), электрического потенциала (слева) и скорости ионизации (справа) (б), концентраций ионов (слева) и электронов (справа) (в) в нормальном тлеющем разряде, $\varepsilon = 1000$ В, $R_0 = 300$ к Ω , $p = 5$ Торр. Радиус катодной секции $R_c = 0.4$ см. Сглаживание напряженности электрического поля вблизи катода

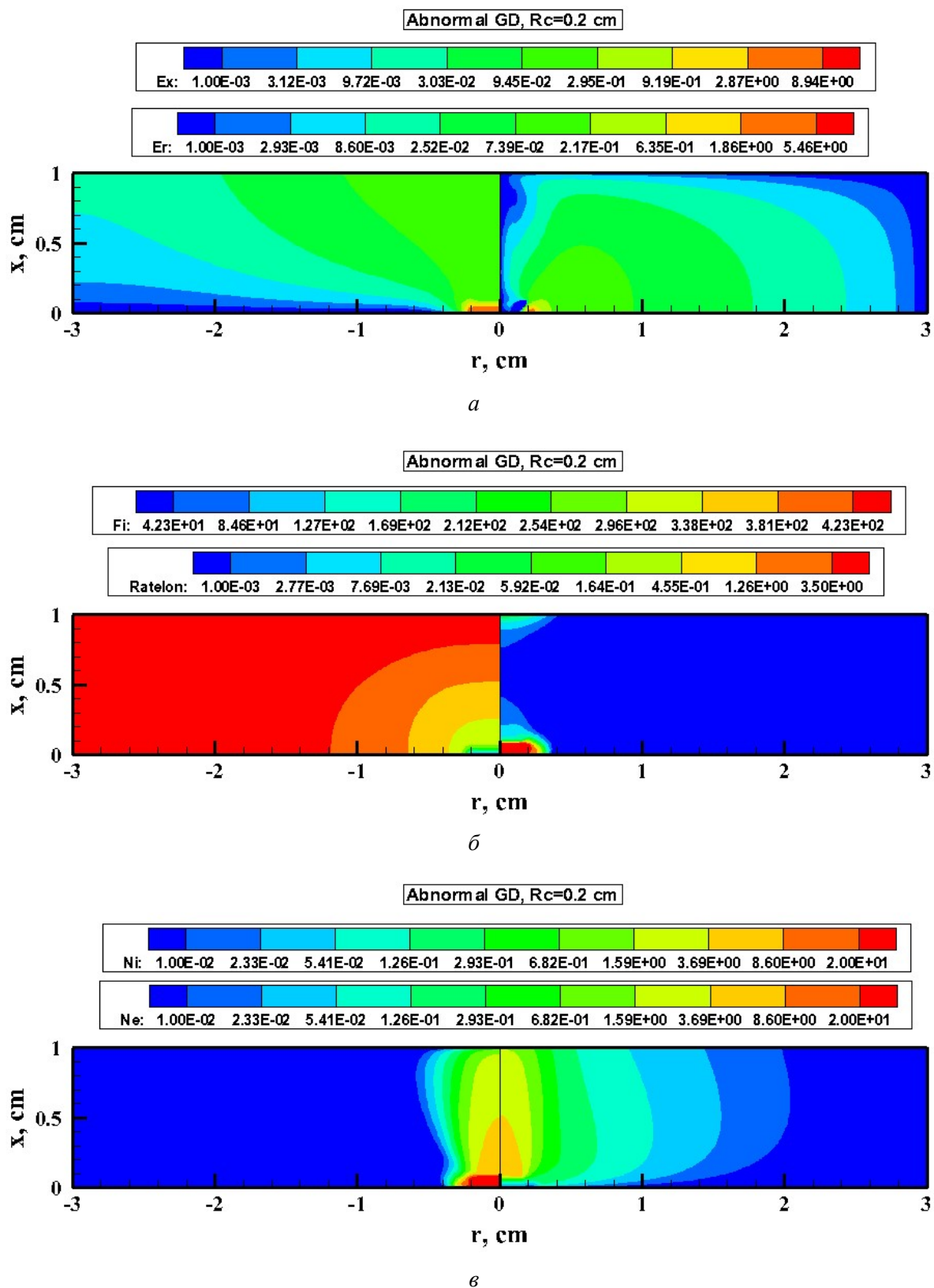


Рис. 14. Распределения нормальной (слева) и радиальной (справа) компонент электрического поля (a), электрического потенциала (слева) и скорости ионизации (справа) ($\bar{\phi}$), концентраций ионов (слева) и электронов (справа) ($\bar{\phi}$) в нормальном тлеющем разряде, $\varepsilon = 1000$ В, $R_0 = 300$ к Ω , $p = 5$ Торр. Радиус катодной секции $R_c = 0.2$ см

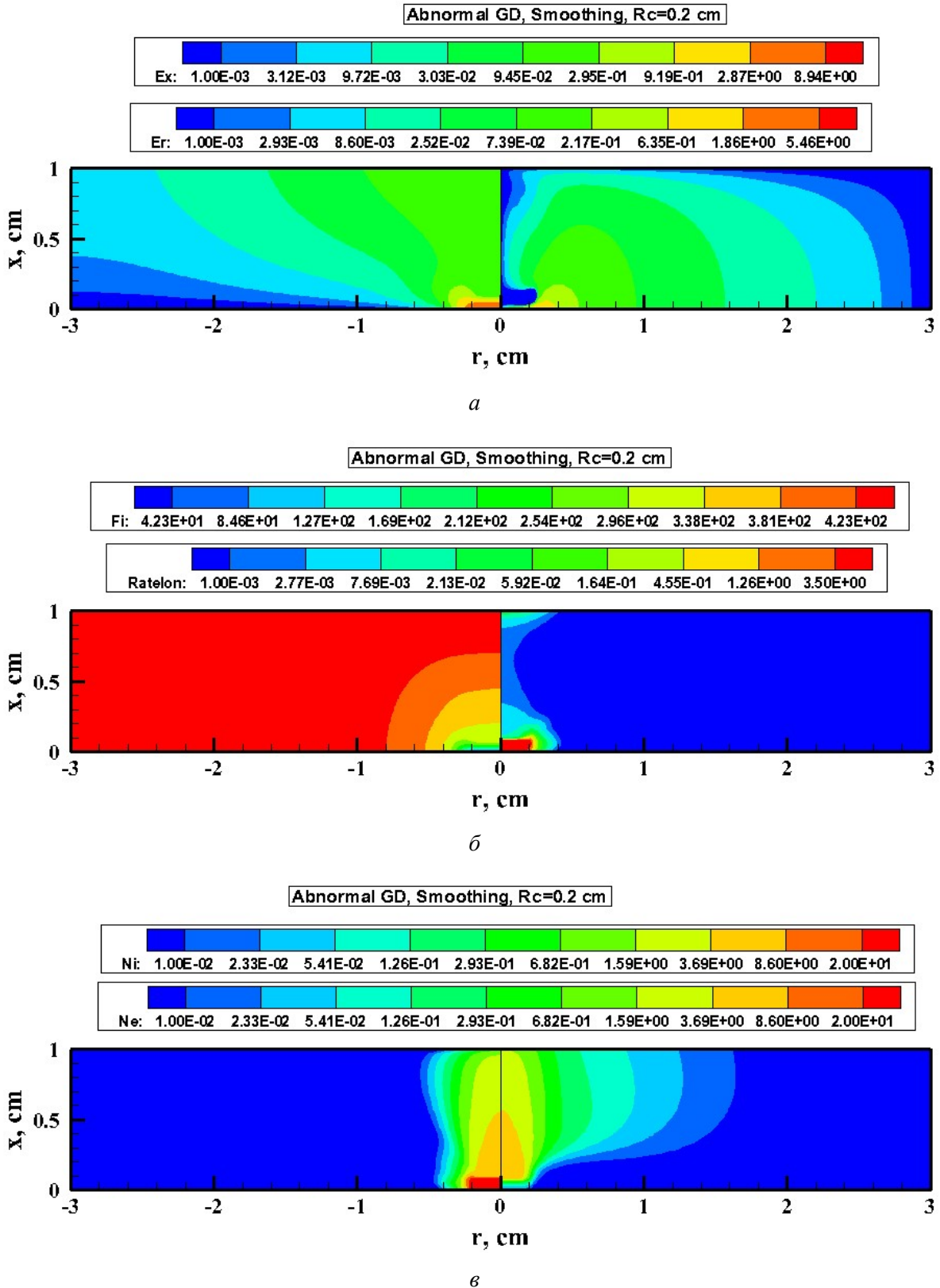


Рис. 15. Распределения нормальной (слева) и радиальной (справа) компонент электрического поля (а), электрического потенциала (слева) и скорости ионизации (справа) (б), концентраций ионов (слева) и электронов (справа) (е) в нормальном тлеющем разряде, $\varepsilon = 1000$ В, $R_0 = 300$ к Ω , $p = 5$ Торр. Радиус катодной секции $R_c = 0.2$ см. Сглаживание напряженности электрического поля вблизи катода

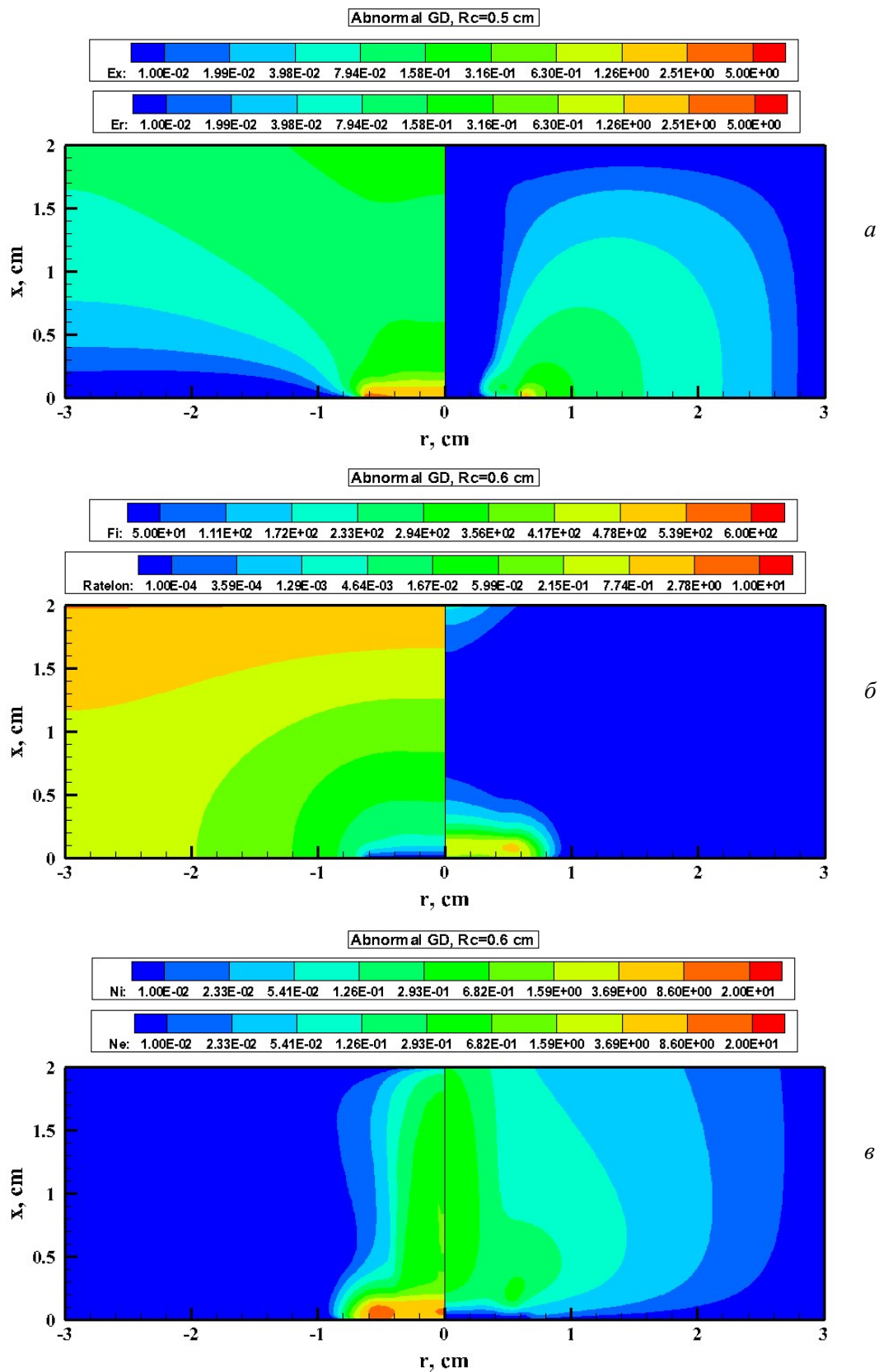


Рис. 16. Распределения нормальной (слева) и радиальной (справа) компонент электрического поля (а), электрического потенциала (слева) и скорости ионизации (справа) (б), концентраций ионов (слева) и электронов (справа) (в) в нормальном тлеющем разряде, $\varepsilon=1000$ В, $R_0=300$ к Ω , $p=5$ Торр. Радиус катодной секции $R_c=0.6$ см

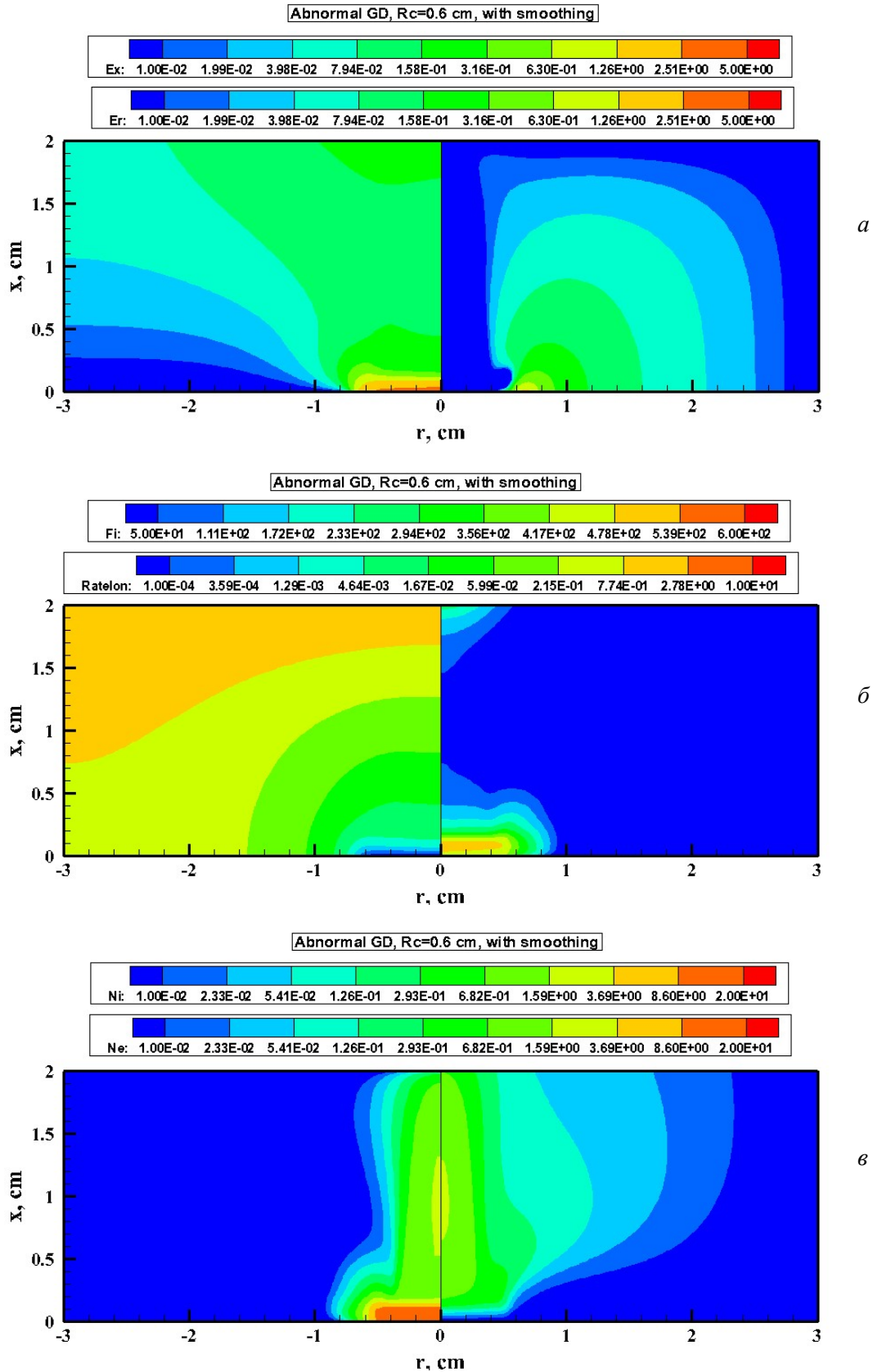


Рис. 17. Распределения нормальной (слева) и радиальной (справа) компонент электрического поля (а), электрического потенциала (слева) и скорости ионизации (справа) (б), концентраций ионов (слева) и электронов (справа) (в) в нормальном тлеющем разряде, $\varepsilon = 1000$ В, $R_0 = 300$ к Ω , $p = 5$ Торр. Радиус катодной секции $R_c = 0.6$ см. Сглаживание напряженности электрического поля вблизи катода

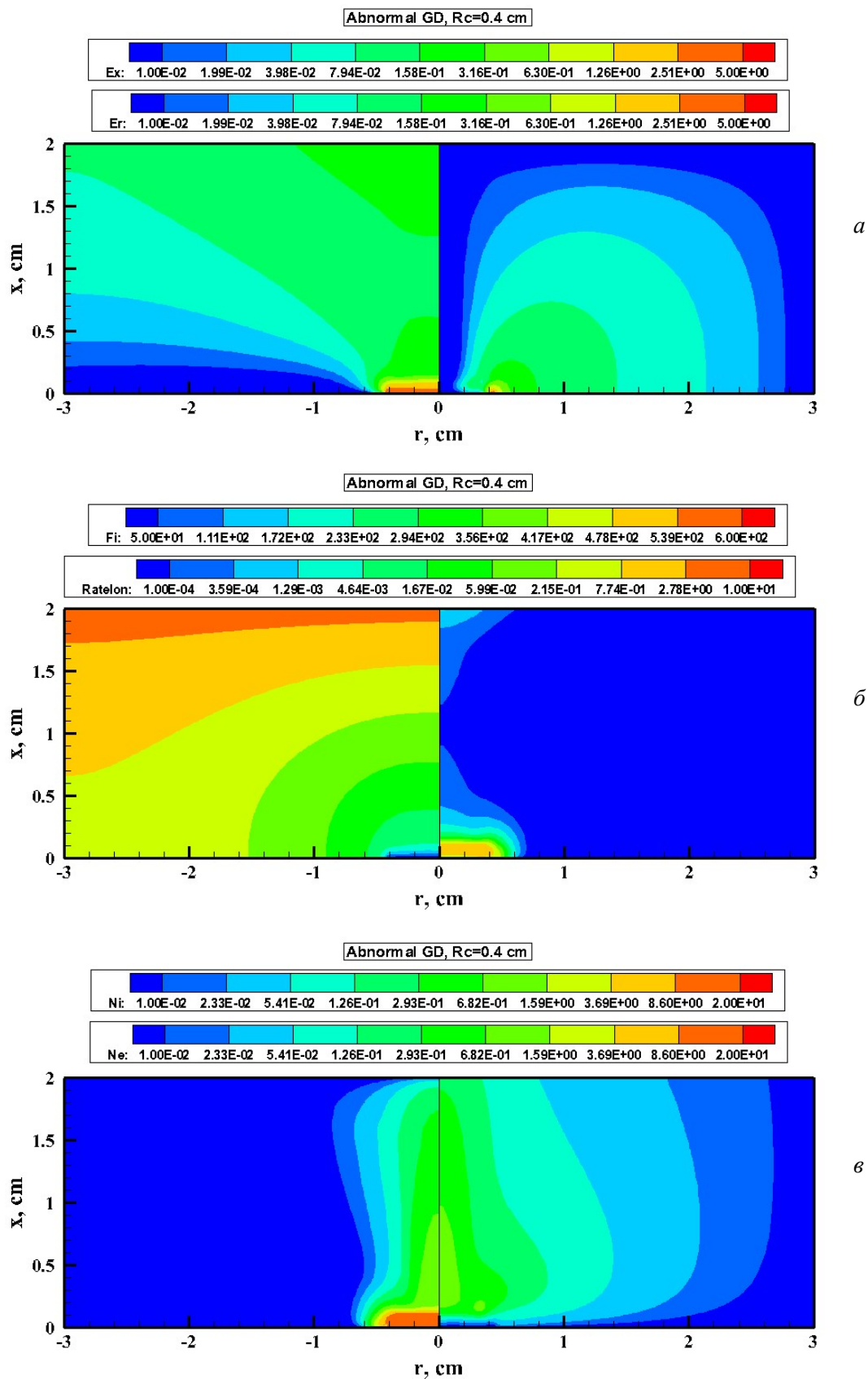


Рис. 18. Распределения нормальной (слева) и радиальной (справа) компонент электрического поля (а), электрического потенциала (слева) и скорости ионизации (справа) (б), концентраций ионов (слева) и электронов (справа) (в) в нормальном тлеющем разряде, $\varepsilon = 1000$ В, $R_0 = 300$ к Ω , $p = 5$ Торр. Радиус катодной секции $R_c = 0.4$ см

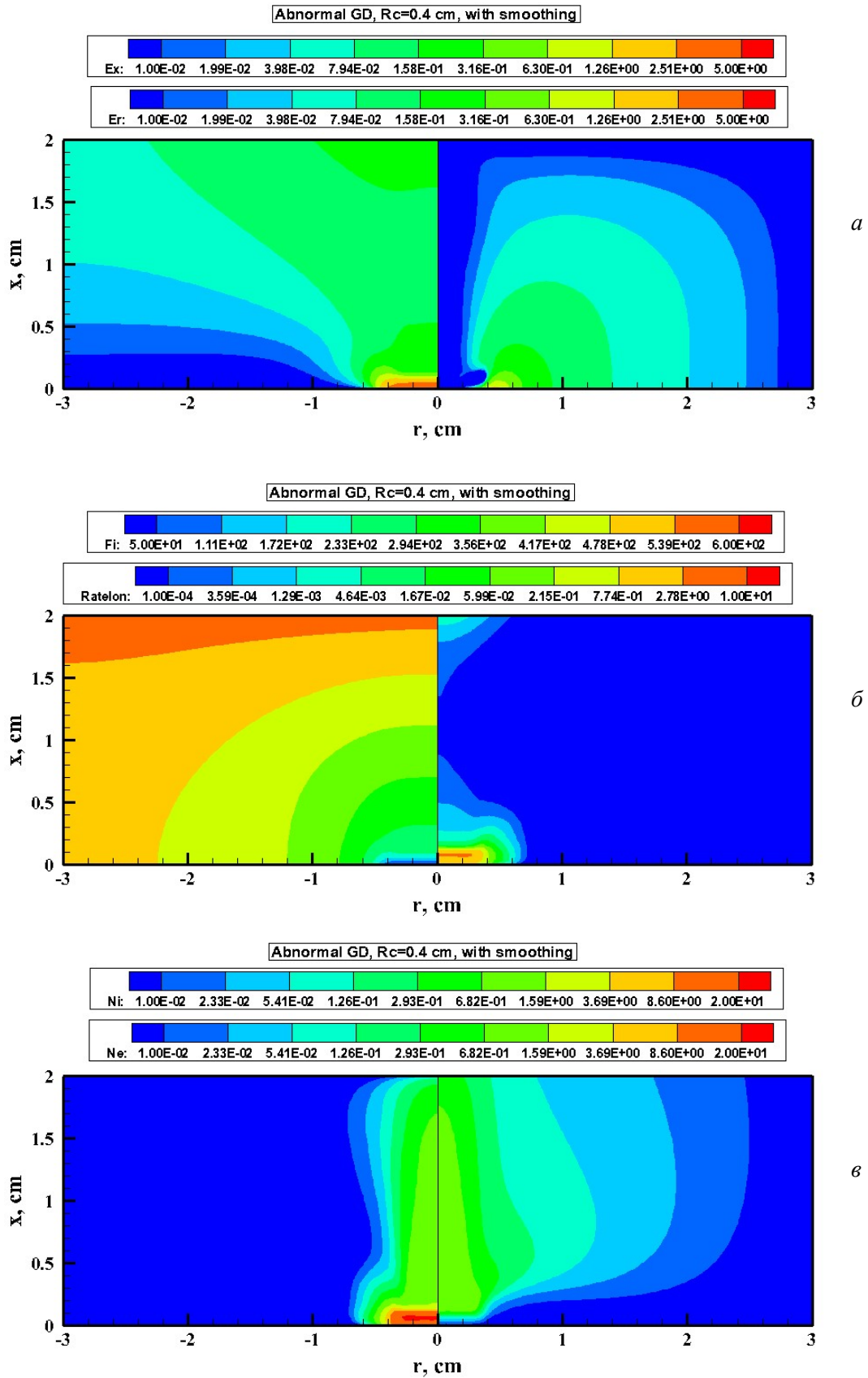


Рис. 19. Распределения нормальной (слева) и радиальной (справа) компонент электрического поля (*a*), электрического потенциала (слева) и скорости ионизации (справа) (*б*), концентраций ионов (слева) и электронов (справа) (*в*) в нормальном тлеющем разряде, $\varepsilon = 1000$ В, $R_0 = 300$ к Ω , $p = 5$ Торр. Радиус катодной секции $R_c = 0.4$ см. Сглаживание напряженности электрического поля вблизи катода

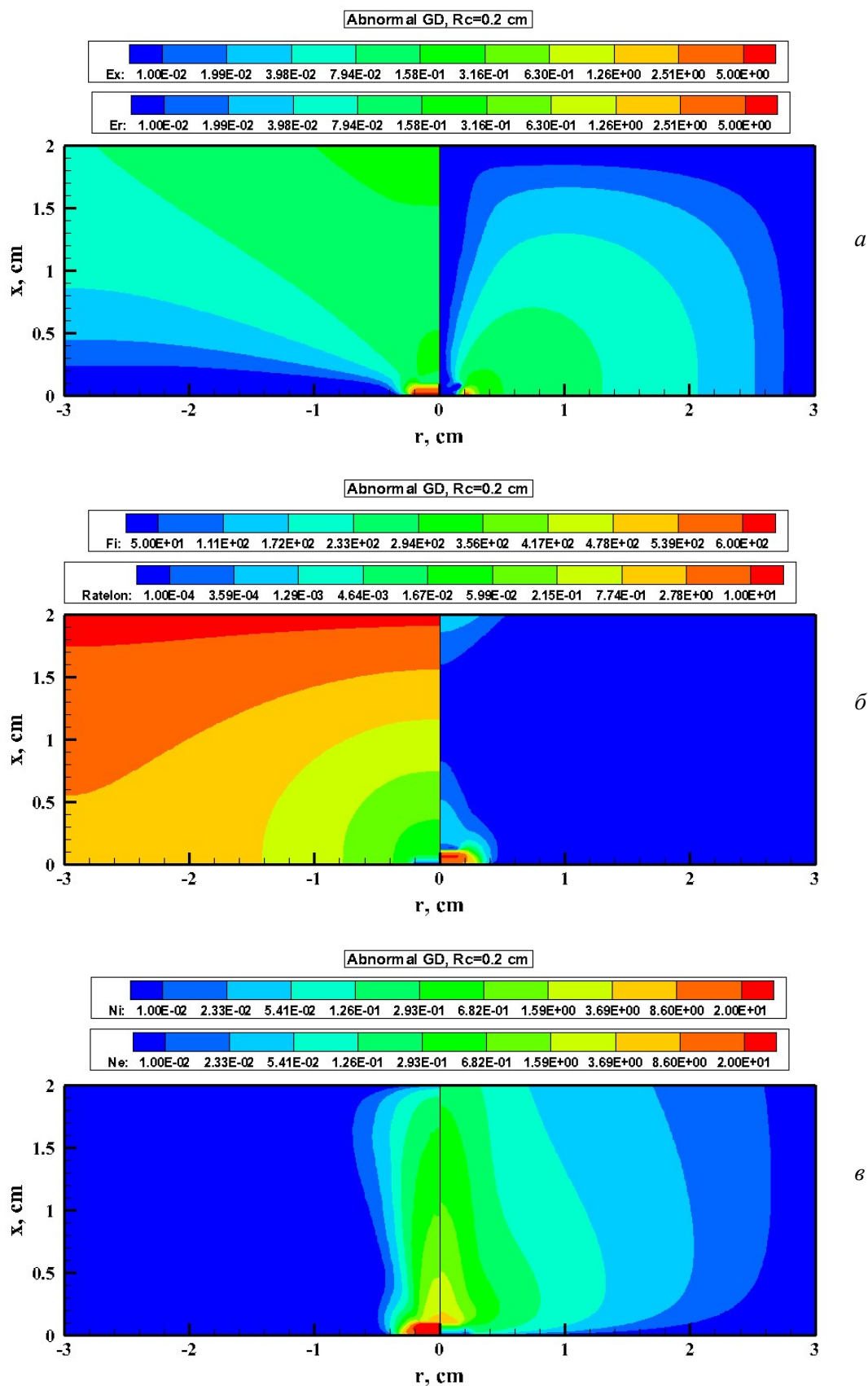


Рис. 20. Распределения нормальной (слева) и радиальной (справа) компонент электрического поля (а), электрического потенциала (слева) и скорости ионизации (справа) (б), концентраций ионов (слева) и электронов (справа) (в) в нормальном тлеющем разряде, $\varepsilon=1000$ В, $R_0=300$ к Ω , $p=5$ Торр. Радиус катодной секции $R_c=0.2$ см

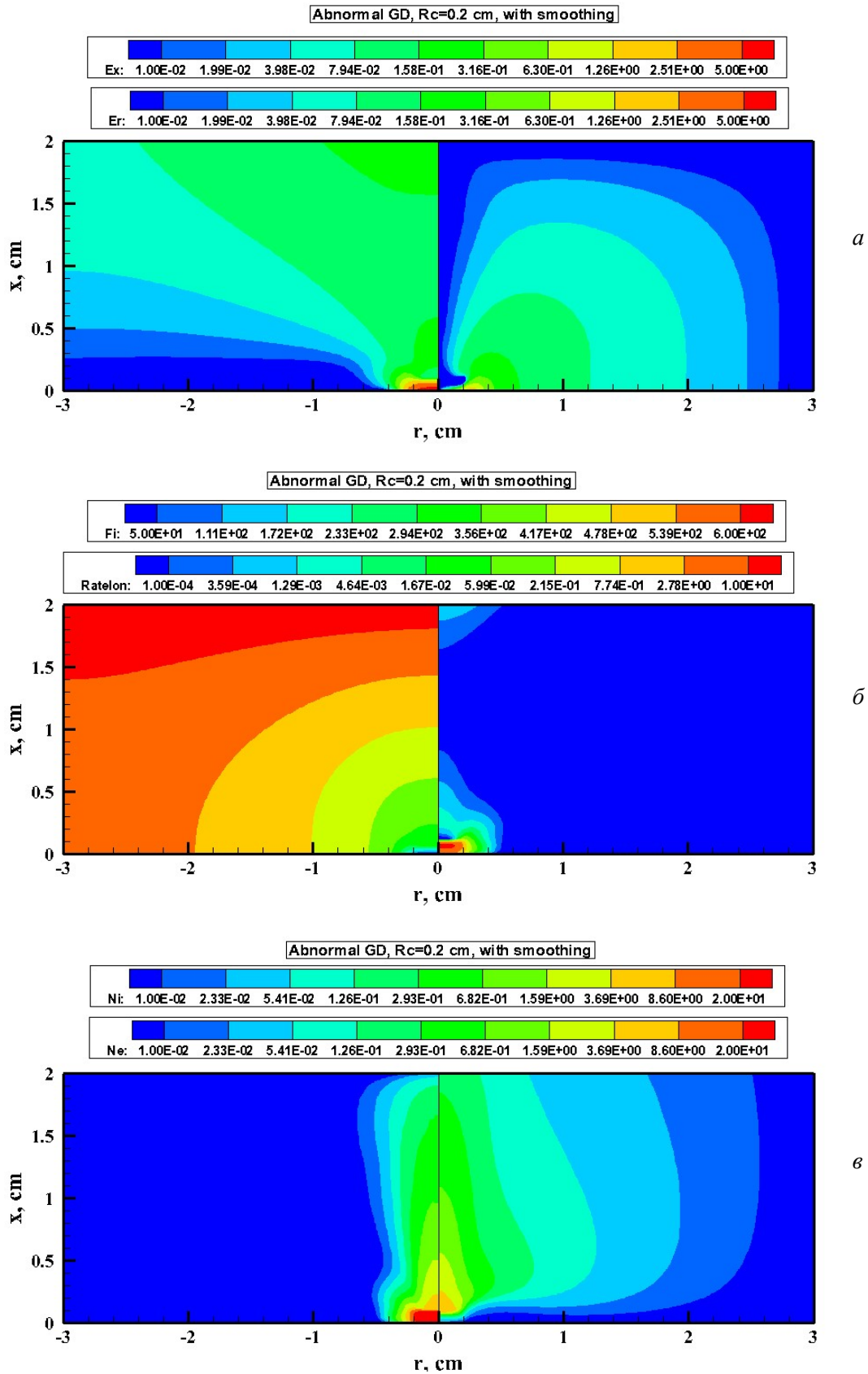


Рис. 21. Распределения нормальной (слева) и радиальной (справа) компонент электрического поля (а), электрического потенциала (слева) и скорости ионизации (справа) (б), концентраций ионов (слева) и электронов (справа) (в) в нормальном тлеющем разряде, $\varepsilon = 1000$ В, $R_0 = 300$ к Ω , $p = 5$ Торр. Радиус катодной секции $R_c = 0.2$ см. Сглаживание напряженности электрического поля вблизи катода

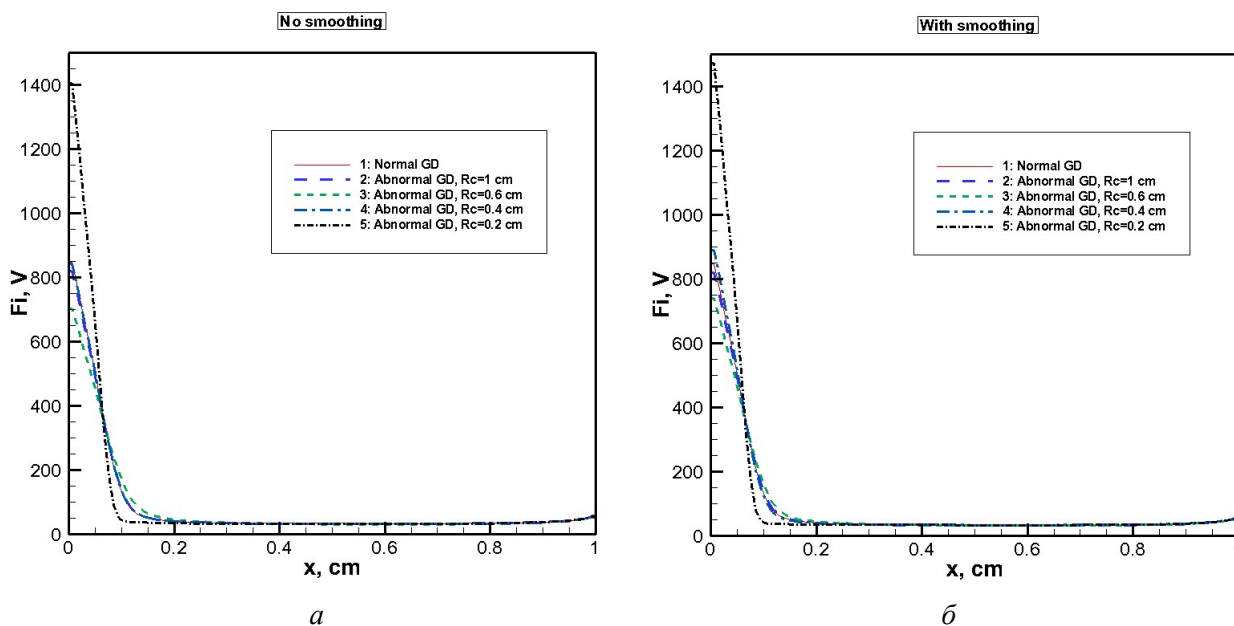


Рис. 22. Распределение напряженности электрического поля вдоль оси симметрии нормального и аномального тлеющего разряда без сглаживания (*a*) и со сглаживанием (*б*) распределения электрического потенциала вблизи катода, $\varepsilon = 1000$ В, $R_0 = 300$ к Ω , $p = 5$ Торр

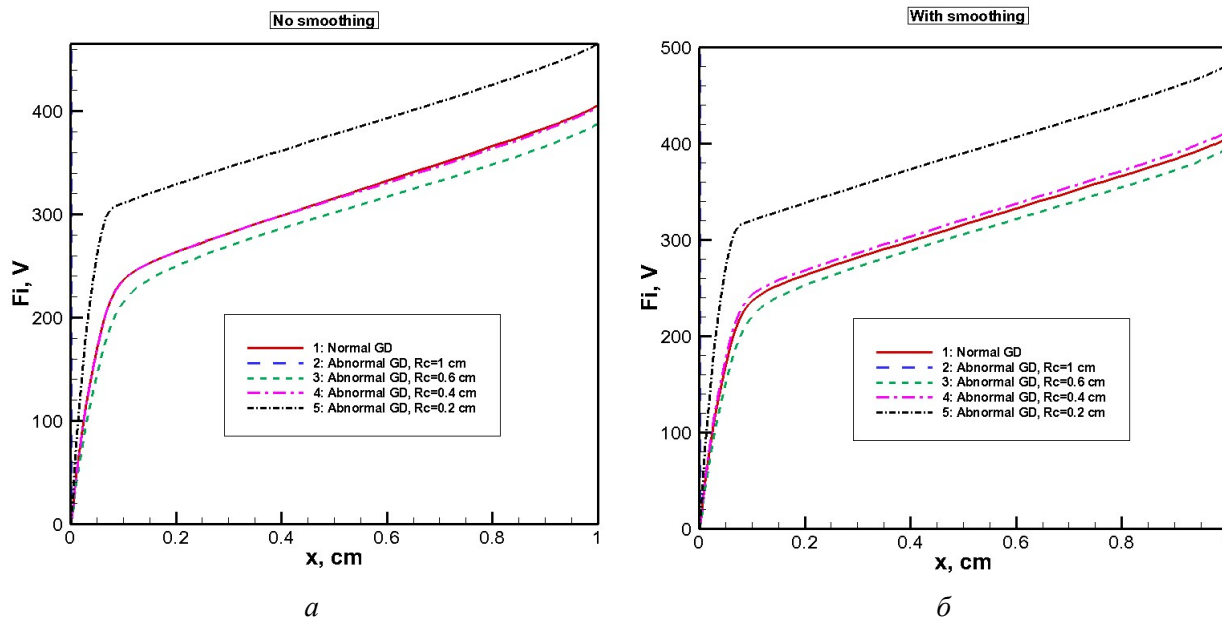


Рис. 23. Распределение электрического потенциала вдоль оси симметрии нормального и аномального тлеющего разряда без сглаживания (*a*) и со сглаживанием (*б*) распределения электрического потенциала вблизи катода, $\varepsilon = 1000$ В, $R_0 = 300$ к Ω , $p = 5$ Торр

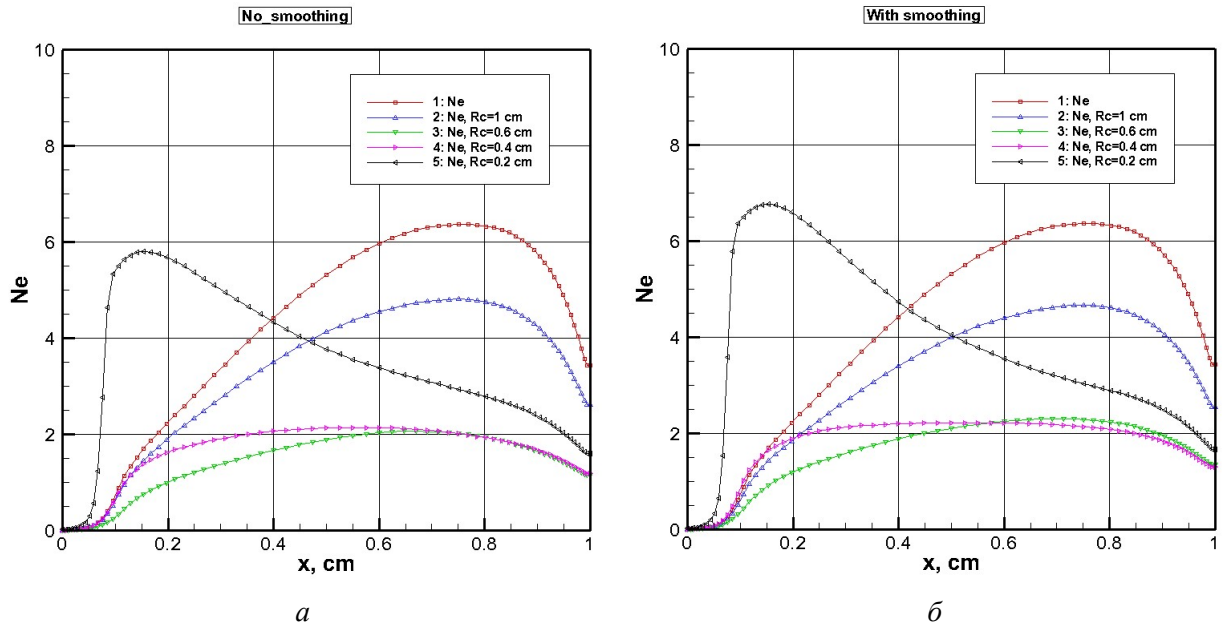


Рис. 24. Распределение электронных концентраций вдоль оси симметрии нормального и аномального тлеющего разряда без сглаживания (а) и со сглаживанием (б) распределения электрического потенциала вблизи катода, $\varepsilon = 1000$ В, $R_0 = 300$ к Ω , $p = 5$ Торр

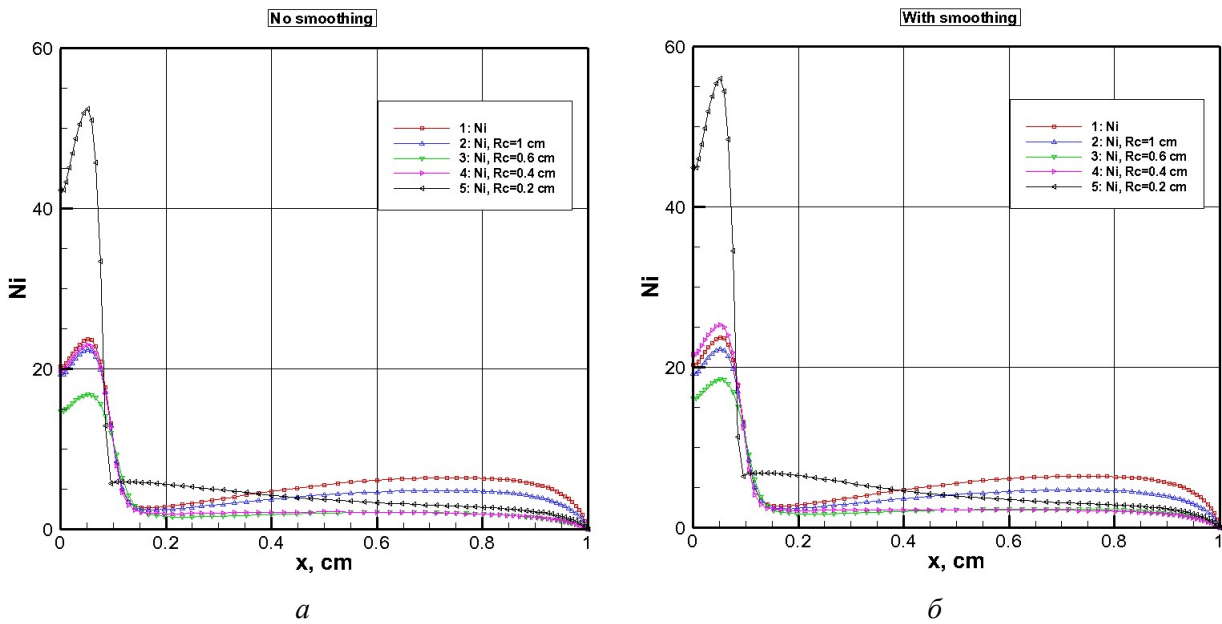


Рис. 25. Распределение концентраций ионов вдоль оси симметрии нормального и аномального тлеющего разряда без сглаживания (а) и со сглаживанием (б) распределения электрического потенциала вблизи катода, $\varepsilon = 1000$ В, $R_0 = 300$ к Ω , $p = 5$ Торр

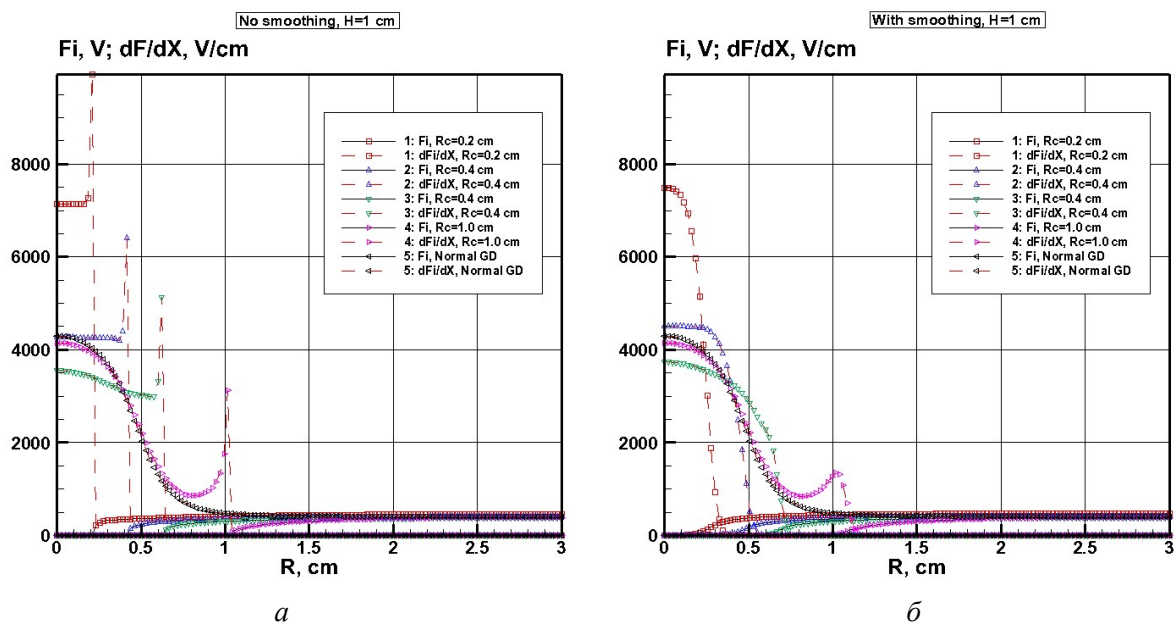


Рис. 26. Распределения напряженности электрического поля и электрического потенциала вдоль поверхности катода без использования сглаживания (а) и со сглаживанием (б) электрического поля вблизи поверхности катода, $\varepsilon = 1000$ В, $R_0 = 300$ к Ω , $p = 5$ Торр

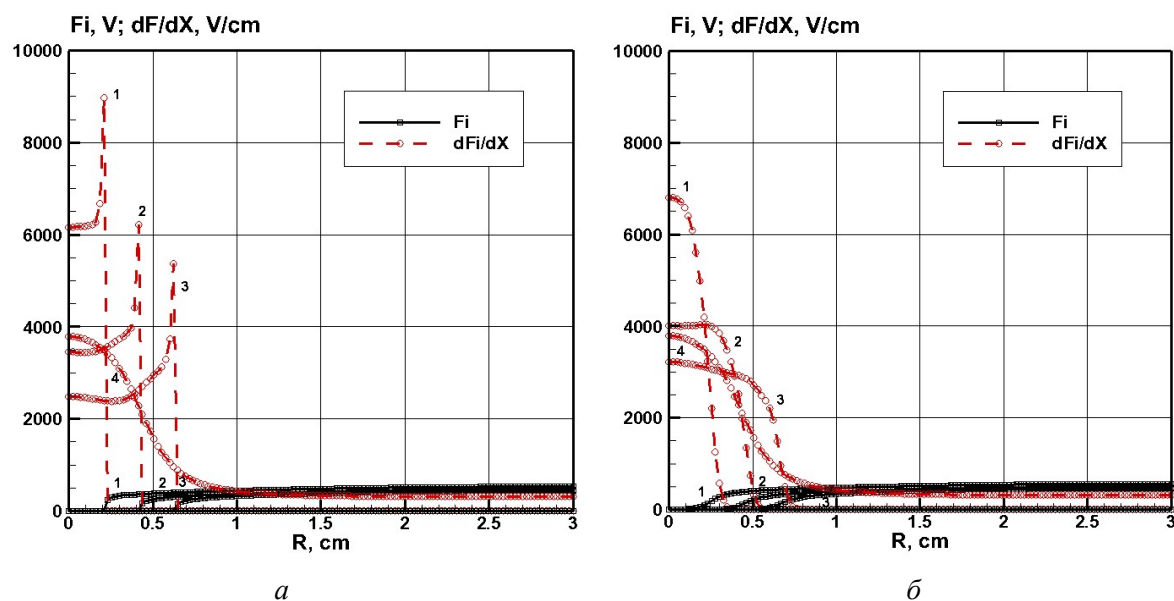


Рис. 27. Распределения напряженности электрического поля и электрического потенциала вдоль поверхности катода без использования сглаживания (а) и со сглаживанием (б) электрического поля вблизи поверхности катода, $\varepsilon = 1000$ В, $R_0 = 300$ к Ω , $p = 5$ Торр. $H = 2$ см