

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ СИЛЬНОТОЧНОГО ПЛАЗМЕННОГО КАНАЛА В ЦЕПИ РАЗРЯДА МОЩНОГО ГЕНЕРАТОРА ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

*Досвідченим шляхом отримано наближені чисельні значення погонного активного електричного опору і питомій електропровідності сильноточного плазмового каналу повітряного іскрового розряду в колі потужного ємнісного накопичувача енергії, який використовується при формуванні повторною імпульсною компонентою струму штучної блискавки з нормованою амплітудою до 100 кА.*

*Опытным путем получены приближенные численные значения погонного активного электрического сопротивления и удельной электропроводности сильноточного плазменного канала воздушного искрового разряда в цепи мощного емкостного накопителя энергии, используемого при формировании повторной импульсной компоненты тока искусственной молнии с нормированной амплитудой до 100 кА.*

### ВВЕДЕНИЕ

Для физического моделирования электромагнитных, электротермических и электромеханических процессов в различных технических объектах (например, в выключателях, элементах линий электропередачи, средствах электросвязи и летательных аппаратах), испытывающих в нештатных (как правило, в аварийных) режимах работы воздействие больших импульсных токов (БИТ) линейной молнии, требуются мощные высоковольтные генераторы, воспроизводящие основные компоненты БИТ молнии с соответствующими амплитудно-временными параметрами (АВП) [1-3]. Для этих целей в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" не так давно был разработан и сооружен на исследовательско-испытательном полигоне института мощный генератор тока искусственной молнии с суммарной запасаемой электрической энергией до 1 МДж [4-7]. При реальной работе с таким генератором импульсных токов (ГИТ), базирующемся на пяти отдельных параллельно работающих на общую электрическую нагрузку мощных емкостных накопителей энергии (ЕНЭ), обслуживающему его персоналу при выполнении испытаний объектов на молниестойкость требуется знать электрические параметры сильноточного плазменного канала (СПК) воздушного искрового разряда, имитируемого над испытываемыми объектами и входящего в разрядные цепи ГИТ молнии. Прежде всего, это касается активного электрического сопротивления  $R_k$  и удельной электропроводности  $\sigma_k$  СПК искрового разряда, длина которого в указанном ГИТ молнии может составлять от 1 до 100 мм. Имеющиеся в области высоковольтной импульсной техники расчетные соотношения для  $R_k$ , записанные в [8, 9] в обобщенном виде, не позволяют в полевых условиях испытаний технических объектов на ГИТ молнии оперативно осуществлять достоверную оценку этого сопротивления для СПК при воздушном разряде с его различными длинами и АВП тока.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПО ОЦЕНКЕ В ЦЕПИ ГИТ МОЛНИИ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СПК ВОЗДУШНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА

Рассмотрим приведенную на рис. 1 двухэлектродную систему (ДЭС) рабочего стола ГИТ молнии и принципиальную электрическую схему ГИТ-Д

(рис. 2), предназначенного для формирования на электрической нагрузке (испытываемом объекте) повторной импульсной D-компоненты тока искусственной молнии. В соответствии с международными требованиями [1-3] данная компонента тока молнии (обычно отрицательной полярности) характеризуется следующими основными нормированными АВП: амплитудой тока  $I_{mD} = 100$  кА с допуском  $\pm 10\%$ ; интегралом действия  $J_D = 0,25 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с при допуске  $\pm 20\%$ ; временем амплитуды тока  $t_{mD} \leq 25$  мкс; длительностью протекания  $\tau_{II} \leq 500$  мкс. Принимаем, что в проводимых экспериментах длина  $d_B$  воздушного промежутка между верхним 1 и нижним 2 массивными металлическими электродами ДЭС рабочего стола ГИТ молнии, в котором формируется СПК искрового разряда, может варьироваться в пределах от 0,5 до 25 мм. Считаем, что указанная выше ДЭС выполняет роль эквивалента электрической нагрузки для цепи ГИТ-Д.

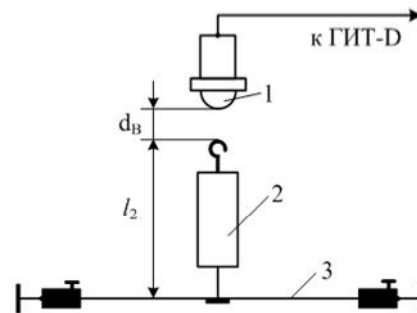


Рис. 1. Схематическое изображение ДЭС эквивалента нагрузки мощного генератора ГИТ-Д для получения повторной импульсной D-компоненты тока искусственной молнии (1 – верхний стальной электрод; 2 – нижний медный электрод; 3 – алюминиевая пластина рабочего стола генератора)

Пусть отрицательное зарядное напряжение  $U_{D3}$  для ГИТ-Д не превышает значения  $-30$  кВ. Согласно данным схемы на рис. 2 основные электрические параметры разрядной цепи ГИТ-Д имеют следующие значения:  $C_D = 90$  мкФ;  $L_D = 1,1$  мкГн;  $R_D = 0,15$  Ом;  $L_2 = 0,3$  мкГн;  $R_2 = 0,03$  Ом. С учетом того, что длина  $l_2$  нижнего 2 медного электрода ДЭС составляет 0,346 м, то его индуктивность  $L_D$  будет примерно равной 0,346 мкГн. Выполненная расчетная оценка активного сопротивления  $R_{D2}$  нижнего 2 медного электрода

ДЭС, изготовленного на основе радиочастотного кабеля марки РК 75-44-15 без медной оплетки (с диаметром круглой жилы, равным 6,6 мм), показывает, что оно не превышает значения  $2 \cdot 10^{-4}$  Ом. Это дает основание для его неучета в разрядной цепи генератора ГИТ-Д при анализе влияния активного сопротивления  $R_k$  исследуемого СПК на АВП рассматриваемой нами D-компоненты тока искусственной молнии. Отметим, что алюминиевая пластина 3 в воздушной ДЭС рабочего стола генератора молнии была выполнена из листа (алюминиевый сплав марки АМц) толщиной 2 мм с размерами в плане  $0,5 \times 0,5$  м<sup>2</sup>. В соответствии со схемой (рис. 2) полагаем, что активное сопротивление  $R_d = R_k$  обусловлено высокоионизированным СПК, возникающим в воздушном промежутке описанной выше ДЭС длиной  $d_B$  и имеющим цилиндрическую форму. Принимаем, что данный СПК в воздушном промежутке ДЭС длиной  $d_B = 24,5$  мм над нижним медным электродом 2 инициируется при помощи закрепленного на верхнем стальном электроде 1 электрически взрывающегося тонкого прямолинейного медного провода без изоляции диаметром 0,2 мм и длиной 50 мм. При  $d_B = 0,5$  мм происходит самопробой воздушного промежутка ДЭС.

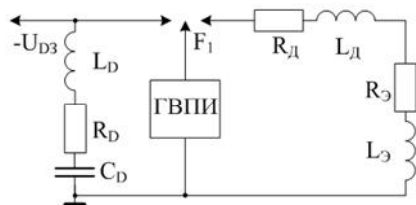


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема разрядной цепи мощного генератора ГИТ-Д для формирования повторной импульсной D-компоненты тока искусственной молнии

Требуется по результатам осциллографирования и численного расчета с помощью электрической схемы на рис. 2 и стандартной программы EWB 5.12 (*Electronics Workbench*) [10] повторной импульсной D-компоненты тока молнии, получаемой в разрядной цепи генератора ГИТ-Д с СПК атмосферного воздушного искрового разряда длиной от 0,5 до 24,5 мм, определить активное электрическое сопротивление  $R_k$ , электропроводность  $\sigma_k$  и напряженность продольного  $E$  – поля для данного плазменного канала с амплитудой импульсного тока  $I_{mD}$  в нем до 100 кА.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ СПК ВОЗДУШНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА НА АВП D-КОМПОНЕНТЫ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

Согласно рис. 2 при подаче от генератора высоковольтных поджигающих импульсов (ГВПИ) на управляющий электрод трехэлектродного воздушного разрядника  $F_1$  каскадного типа импульса микросекундной длительности положительной полярности амплитудой до 100 кВ [4, 5] предварительно заряженный до отрицательного напряжения  $U_{D3} = -27$  кВ ЕНЭ генератора ГИТ-Д разряжается на описанный в разделе 1 эквивалент нагрузки и формирует на нем требуемую в соответствии с [1-3] импульсную D-компоненту тока молнии. На рис. 3 приведена ос-

циллограмма такого тока, полученная с помощью измерительного коаксиального шунта ШК-300 [4, 5] практически при  $R_d = R_k = 0$  (масштаб по вертикали – 2 В/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка).

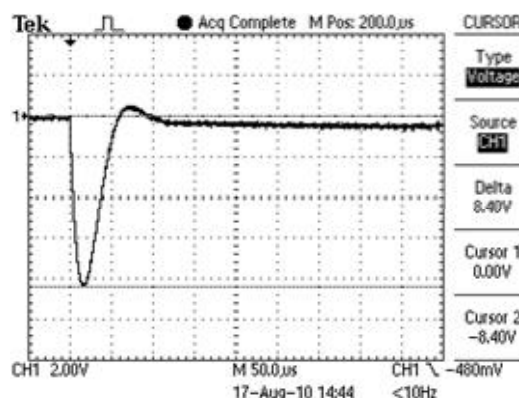


Рис. 3. Осциллограмма D-компоненты тока искусственной молнии при разряде мощного генератора ГИТ-Д на эквивалент нагрузки с воздушным зазором 0,5 мм ( $U_{D3} = -27$  кВ)

Из приведенной на рис. 3 осциллограммы D-компоненты импульсного тока молнии видно, что при коэффициенте преобразования метрологически поверенного шунта ШК-300, численно равном для рассматриваемой составляющей грозового тока  $K_D = 11261$  А/В [4, 5], ее первая амплитуда  $I_{mD}$  будет примерно равной  $8,4 \text{ В} \times 11261 \text{ А/В} = 94,6$  кА. Данной амплитуде импульсного тока  $I_{mD}$  соответствует время, равное  $t_{mD} = 15$  мкс. Переход через ось абсцисс первой отрицательной полуволны D-компоненты тока молнии происходит при времени  $t_{D1} = 56$  мкс, а ее второй положительной полуволны – при времени  $t_{D2} = 100$  мкс. Амплитуда второй полуволны рассматриваемого тока не превышает 5 кА. D-компонента тока искусственной молнии, генерируемая ГИТ-Д на принятом эквиваленте нагрузки, даже при  $d_B = 0,5$  мм характеризуется сильным затуханием (логарифмический декремент колебаний составляет около 3,16).

На рис. 4 представлена осциллограмма исследуемой нами D-компоненты тока искусственной молнии, полученной в рассматриваемой согласно рис. 2 схеме при  $d_B = 24,5$  мм и  $U_{D3} = -28$  кВ. Приведение данной токовой осциллограммы как и рис. 3 к  $U_{D3} = -27$  кВ (с помощью сомножителя  $27/28 = 0,964$ ) показывает, что в этом случае амплитуда первой отрицательной полуволны повторной импульсной D-составляющей имитированного в лабораторных полевых условиях тока молнии оказывается равной около 88,6 кА. Сравнение токовых осциллограмм, приведенных на рис. 3 и 4, показывает, что из-за использования вместо массивной стальной цилиндрической вставки диаметром 20 мм и длиной 24,0 мм в сильноточной цепи разряда генератора ГИТ-Д эквивалента нагрузки с суммарной длиной воздушного промежутка  $d_B = 24,5$  мм других иных заметных изменений для АВП данного тока молнии не наблюдается. В этой связи можно говорить о том, что введение в разрядную цепь генератора ГИТ-Д искрового воздушного промежутка с цилиндрическим СПК дли-

ной  $d_B = 24,0$  мм вызывает уменьшение амплитуды  $I_{mD}$  первой полуволны D-компоненты тока искусственной молнии примерно на 6 кА, т.е. практически на 6,5 %.

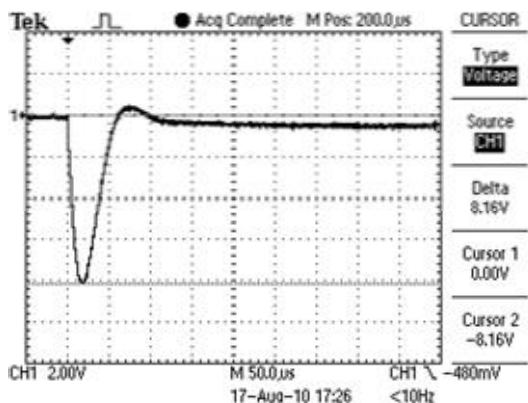


Рис. 4. Осциллограмма D-компоненты тока искусственной молнии при разряде мощного генератора ГИТ-D на эквивалент нагрузки с воздушным зазором 24,5 мм ( $U_{D3} = -28$  кВ)

Численное моделирование на основе стандартной программы EWB 5.12 линейных электромагнитных процессов в электрической схеме согласно рис. 2 показывает, что данному уменьшению значения первой амплитуды  $I_{mD}$  исследуемой компоненты тока молнии соответствует дополнительное введение в разрядную цепь генератора ГИТ-D сосредоточенного активного сопротивления  $R_L$ , численно равного  $R_k = 0,022$  Ом. Тогда при  $d_B = 24$  мм для погонного активного сопротивления  $R_{k0}$  высокоионизированного СПК воздушного искрового разряда в сильноточной цепи генератора ГИТ-D, формирующего D-компоненту тока искусственной молнии с практически нормированной первой амплитудой  $I_{mD} = 88,6$  кА, получаем следующее численное значение:

$$R_{k0} = R_k / d_B = 0,92 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/мм} = 0,92 \text{ Ом/м}. \quad (1)$$

### 3. ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПЛАЗМЫ В СПК ВОЗДУШНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА ДЛЯ D-КОМПОНЕНТЫ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

Величину удельной электропроводности  $\sigma_k$  высокоионизированной низкотемпературной металлической плазмы СПК воздушного искрового разряда в цепи D-компоненты тока молнии (с максимальной электронной температурой в цилиндрическом канале сильноточного разряда около  $12 \cdot 10^3$  К [11]) с учетом изложенного выше расчетно-экспериментального определения активного сопротивления  $R_k$  данного СПК находим из следующего классического соотношения:

$$\sigma_k = d_B / (\pi r_{0m}^2 R_k), \quad (2)$$

где  $r_{0m}$  – максимальный радиус СПК воздушного искрового разряда в цепи генератора ГИТ-D.

Величину радиуса  $r_{0m}$ , входящую в выражение (2), определяем по известной формуле Брагинского, имеющей на поверхности Земли (вблизи уровня моря) в системе СИ следующий аналитический вид [5, 12]:

$$r_{0m} = 0,093 \cdot I_{mD}^{1/3} \cdot t_{mD}^{1/2}, \quad (3)$$

где  $t_{mD}$  – время, соответствующее амплитуде  $I_{mD}$  пер-

вой полуволны D-компоненты тока искусственной молнии.

Из (3) при амплитуде  $I_{mD} = 88,6 \cdot 10^3$  А и времени  $t_{mD} = 15 \cdot 10^{-6}$  с находим, что максимальный радиус  $r_{0m}$  высокоионизированного низкотемпературного СПК искрового разряда в атмосферном воздухе для цепи мощного генератора ГИТ-D принимает значение 16,06 мм. В результате из (2) следует, что в рассматриваемом случае при  $d_B = 24 \cdot 10^{-3}$  м,  $R_k = 0,022$  Ом и  $r_{0m} = 16,06 \cdot 10^{-3}$  м для удельной электропроводности  $\sigma_k$  исследуемого в атмосферном воздухе СПК искрового разряда, имитирующего в полевых условиях на эквиваленте нагрузки с ДЭС D-компоненту тока молнии, на основании примененного здесь расчетно-экспериментального подхода получаем количественное значение, приближенно равное  $1346$  (Ом·м)<sup>-1</sup>. Полученное нами численное значение для удельной электропроводности  $\sigma_k$  плазмы сильноточного канала воздушного искрового разряда примерно в 37 раз меньше соответствующего значения для  $\sigma_k$ , характерного для низкотемпературной плазмы при инициировании искрового разряда подводным электрическим взрывом (ЭВ) металлического провода [9]. Связано это с тем, что согласно данным табл. 2 из [9] при подводном ЭВ тонкого провода максимальный радиус канала разряда составляет лишь 2,1 мм (при амплитуде разрядного тока ЕНЭ в 88 кА и импульсном давлении внутри канала разряда до 365 МПа), а активное сопротивление плазменного канала длиной 40 мм принимает значение, равное примерно  $R_k = 0,057$  Ом. Подстановка этих данных в (2) при длине канала подводного разряда в 40 мм и обуславливает электропроводность  $\sigma_k$  его весьма плотной высокоионизированной плазмы, приближенно равную  $50652$  (Ом·м)<sup>-1</sup>. Это оценочное по (2) значение для  $\sigma_k$  при подводном ЭВ металлического проводника хорошо согласуется с соответствующими экспериментальными данными, приведенными в [9] при изучении сильноточных разрядных каналов в конденсированных средах.

### 4. ОЦЕНКА ПРОДОЛЬНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В СПК ВОЗДУШНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА ДЛЯ D-КОМПОНЕНТЫ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

Приведенные выше в разделах 2 и 3 результаты для сопротивления  $R_k$  и электропроводности  $\sigma_k$  позволяют осуществлять приближенную расчетную оценку максимальной напряженности  $E_{mk}$  продольного электрического поля в СПК воздушного искрового разряда при атмосферном давлении для цепи D-компоненты тока искусственной молнии по следующим равнозначным выражениям:

$$E_{mk} = I_{mD} / (\pi r_{0m}^2 \sigma_k) = I_{mD} \cdot R_k / d_B. \quad (4)$$

После подстановки в (4) полученных расчетно-экспериментальным путем значений  $I_{mD}$  и  $R_k$  или  $r_{0m}$  и  $\sigma_k$  для искомой величины  $E_{mk}$  в высокоионизированной плазме сильноточного воздушного искрового разряда при  $d_B = 24 \cdot 10^{-3}$  м и  $I_{mD} = 88,6$  кА находим, что она имеет численное значение, примерно равное  $81,2$  кВ/м =  $81,2$  В/мм. В этой связи на искровом воздушном промежутке ДЭС длиной  $d_B = 24$  мм рабочего

стола генератора ГИТ-D падает импульсное электрическое напряжение отрицательной полярности с амплитудой, равной около 1,95 кВ. Данное напряжение составляет примерно 7 % от зарядного напряжения  $U_{D3} = -27$  кВ мощного генератора ГИТ-D.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании проведенных экспериментов и выполненных на ПЭВМ расчетов определены значения активного сопротивления  $R_k$ , удельной электропроводности  $\sigma_k$  и продольной напряженности  $E_{mk}$  электрического поля для высокоионизированной низкотемпературной металлической плазмы сильноточного воздушного искрового разряда в цепи мощного генератора с ЕНЭ, предназначенного для формирования на активно-индуктивной нагрузке нормированной D-компоненты тока искусственной молнии.

2. Полученные результаты могут быть использованы в качестве вспомогательного для инженерно-технического персонала научно-методического материала при выполнении им испытаний технических объектов на стойкость к воздействию больших импульсных токов молнии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SAE ARP 5412/ED-84. Нормативный документ "Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Идеализированные составляющие внешнего тока" (США). – 1985. – С. 30-39.
2. SAE ARP 5416/ED-84. Нормативный документ "Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Условия воздействия молнии на летательные аппараты и соответствующие формы испытательных сигналов" (США). – 1997. – 145 с.
3. КТР-ВВФ/ДО-160D/ED-14D. Квалификационные требования "Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний". Раздел 23.0. "Прямое воздействие молнии". – М.: Изд-во госстандартов Российской Федерации, 2004. – С. 258-273.
4. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 3. – С. 81-85.
5. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Высоковольтные сильноточные воздушные разрядники генератора тока искусственной молнии // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 6. – С. 58-62.
6. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Мощная высоковольтная электрофизическая установка для имитации полного тока молнии и ее применение в области молниезащиты технических объектов // Электротехника і електромеханіка. – 2008. – № 3. – С. 69-75.
7. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Мощный импульсный генератор тока молнии: разработка и примеры применения / Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы Международной научной конференции (17-21 августа 2009 г.). – Николаев: КП "Миколаївська обласна друкарня", 2009. – С. 113-115.

8. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
9. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. – Киев: Наукова думка, 1990. – 208 с.
10. Баранов М.И., Носенко М.А. Применение программы EWB для численного расчета электромагнитных процессов в разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2005. – № 49. – С. 71-84.
11. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2009. – 384 с.
12. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2010. – 407 с.

Поступила 09.09.2010

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.,  
 Колиушко Георгий Михайлович, к.т.н., с.н.с.,  
 Лысенко Виталия Олеговна  
 Носенко Марина Александровна  
 НИПКИ "Молния"  
 Национального технического университета  
 "Харьковский политехнический институт".  
 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47  
 тел. (057) 707-68-41  
 e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov, G.M. Koliushko, V.O. Lysenko, M.A. Nosenko

#### An experimental estimation of electric resistance and conductivity of heavy-current plasma channel is in the chain of discharge of powerful generator of current of artificial lightning.

Experimental a way the close numeral values of linear active electric resistance and specific conductivity of heavy-current plasma channel of an air heavy-current of discharge are got in the chain of powerful capacity store of energy, in-use at forming repeated impulsive components of current of artificial lightning with the rationed amplitude to 100 kA.

**Key words** – heavy-current of discharge, plasma channel, electric resistance, conductivity, current of artificial lightning.

#### От редакции

В предыдущем номере журнала (№6 за 2010 г.) в статье М.И. Баранова "Приближенный расчет магнитного момента Земли" произошла опечатка, в связи с чем окончательно формулу 3 на стр. 47 следует читать как:

$$P_M = \frac{4\pi^2 e_0 R_p (1-\lambda^2)^{1/2} (1-\lambda^2)^{-1/2}}{a_p^2 T_3} \sum_{k=1} (R_p^2 - z_k^2)^{3/2}, \quad (3)$$

где  $z_k = kR_p(1-\lambda^2)^{1/2}$ ;  $k = 1, 2, 3, \dots, (1-\lambda^2)^{-1/2}$ .

Редакция журнала приносит автору свои извинения.