

# Расчёт температуры нагрева биологического объекта под действием СВЧ-мощности

Александр Курушин (Москва)

Статья посвящена моделированию эффекта поглощения мощности в биологическом объекте – голове человека – при пользовании сотовым телефоном с современной антенной системой. На основе численного анализа электромагнитного поля и расчёта поглощаемой мощности рассчитано соответствующее повышение температуры внутри головы пользователя. Рассмотрено влияние близко расположенного биологического объекта на характеристики сотового телефона. Численным методом получены динамические характеристики нарастания и падения температуры при включении и выключении источника СВЧ-мощности.

## ВВЕДЕНИЕ

Широкое распространение сотовой телефонии усилило беспокойство, связанное с облучением головы человека радиоволнами, излучаемыми антенной телефона при его использовании. Комплексные исследования физиологических изменений, происходящих в биологической ткани во время разговора по сотовому телефону, установили, что через десять минут разговора температура кожи человека в непосредственной близости от телефона возрастает на 0,5...2°C [1]. В соответствии с требованиями американского стандарта [2], мощность, излучаемая антенной сотового телефона, не должна превосходить некоторого предельного уровня, при котором поглощаемая мощность внутри головы человека не превышает 1,6 мВт на 1 г веса биологической ткани.

Удельная поглощаемая мощность 1,6 мВт/г – это характерная величина, которая имеет место при мощностях, излучаемых антеннами современных сотовых телефонов. Стремление увеличить чувствительность, дальность и устойчивость связи входят в противоречие с необходимостью уменьшать поглощаемую в голове мощность. Чтобы

этого достичь, можно идти двумя путями: уменьшить мощность передатчика телефона, что может привести к увеличению вероятности сбоя связи, или разработать антенную структуру телефона так, чтобы уменьшить облучение головы, не уменьшая при этом эффективности излучения антенны в дальней зоне.

В работе [3] решается задача воздействия электромагнитных волн на кожу человека с использованием теории линий передачи. Однако в работе [4] было показано, что при анализе более сложной формы биологического объекта (БО), например головы человека, и при более сложном характере облучения, подобную задачу можно решить только численным методом. В работе [4] задача решалась с использованием упрощённой модели антенной системы со спиральной антенной. В настоящей работе рассматривается антенна типа PIFA, которая, будучи реализованной в системе сотового телефона, имеет меньший размер и проще интегрируется в схему (см. рис. 1).

Для выполнения расчётов, определяющих влияние головы пользователя на характеристики сотового телефона, используем так называемый фантом –

трёхслойную модель головы человека. Усреднённые значения основных параметров этой модели представлены в таблице [4, 5].

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ АНТЕННЫ PIFA

В настоящее время при проектировании СВЧ-устройств наиболее часто используются программные комплексы HFSS, CST STUDIO SUITE и FEKO. В системе CST STUDIO SUITE [5] в рамках одного интерфейса можно решать большой спектр мультифизических задач, включающих динамические, тепловые, электростатические, магнитостатические, а также задачи, связанные с распространением частиц в пространстве, и многие другие. Поскольку в эту систему входит программа CST MWS, позволяющая решать задачи электродинамики, включая расчёт антенн, используем её для моделирования антенной системы сотового телефона с учётом влияния головы пользователя сотового телефона (см. рис. 2).

Антенна типа PIFA, изображённая на рисунке 1, представляет собой вариант планарной антенны в виде свёрнутого четвертьволнового вибратора, подключённой к схеме в смещённой от середины точке питания. Это позволяет создать многочастотную PIFA-антенну. Один из вибраторов влияет на одну частоту, длина другого – на другую частоту, и так далее. Источником сигнала излучения может быть дискретный порт, к которому подключается микросхема или дуплексный фильтр, разделяющий каналы приёма и передачи сотового телефона.

С помощью CST рассчитаем частотные характеристики реальной и мнимой части входного импеданса PIFA-антенны. Результаты расчётов, представленные на рисунке 3, показывают, что реактивная составляющая PIFA-антенны имеет индуктивный характер на обеих рабочих частотах, поэтому для компенсации реактивной части входного импеданса антенны последовательно с портом PIFA-антенны нужно поставить ёмкость величиной 3...10 пФ.

Оптимизация PIFA-антенны сосредотачивается на изменении размера вибраторов (чем длиннее вибратор,

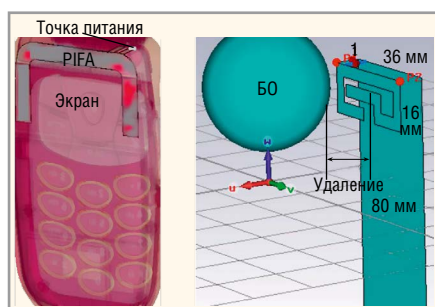


Рис. 1. Антенна PIFA в корпусе сотового телефона

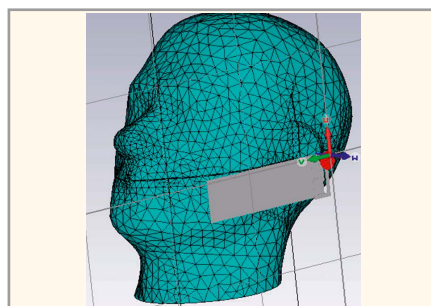


Рис. 2. Положение телефона у головы пользователя

тем меньше резонансная частота) и на подстройке положения порта относительно центральной точки (соединённой с поверхностью Ground). Частотные характеристики коэффициента отражения антенной системы с учётом влияния головы пользователя сотового телефона, показаны на рисунке 4.

Внесение БО в пространство анализа PIFA-антенны изменяет резонансную частоту и рабочую полосу частот, в которой  $|S_{11}| < 0,5$ . Если голова находится ближе к телефону, то вносятся большие потери, и полоса расширяется от 100 до 200 МГц.

Если сравнить результаты анализа излучения PIFA с излучением сотового телефона со спиральной антенной, диаграмма направленности (ДН) которой искажается в сторону головы [3], то можно сказать, что отражательная поверхность PIFA-антенны играет положительную роль. В настоящее время проводятся интенсивные исследования характеристик антенн сотовых телефонов, работающих с отражательной частотно-селективной стенкой и ферритовыми пластинами [8] между антенной и головой.

Сечение диаграммы направленности сотового телефона с PIFA-антенной показано на рисунке 5. Максимальный коэффициент направленного действия (КНД) равен 2,4 дБ. Хотя излучение антенны сотового телефона направлено от головы пользователя, нужно иметь в виду, что вредное воздействие оказывает не дальнее, а ближнее поле сотового телефона.

При внесении в ближнее поле сотового телефона биологического объекта (головы пользователя) максимальный КНД уменьшается вплоть до -2 дБ.

Из расчётов, результаты которых показаны на рисунках 4 и 5, можно сделать вывод, что БО в большей степени влияет на диаграмму направленности, и в меньшей – на согласование антенны. Действительно, современные настроенные сотовые телефоны обычно не обладают чувствительностью согласования к положению телефона относительно головы пользователя.

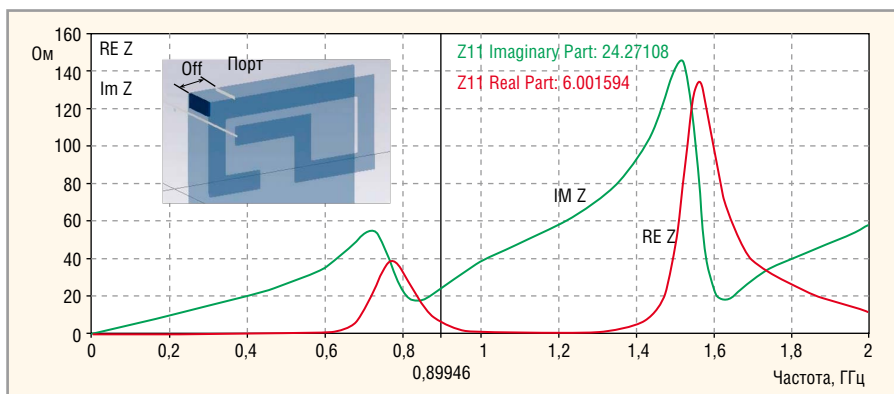


Рис. 3. Реальная и мнимая части входного импеданса антенны

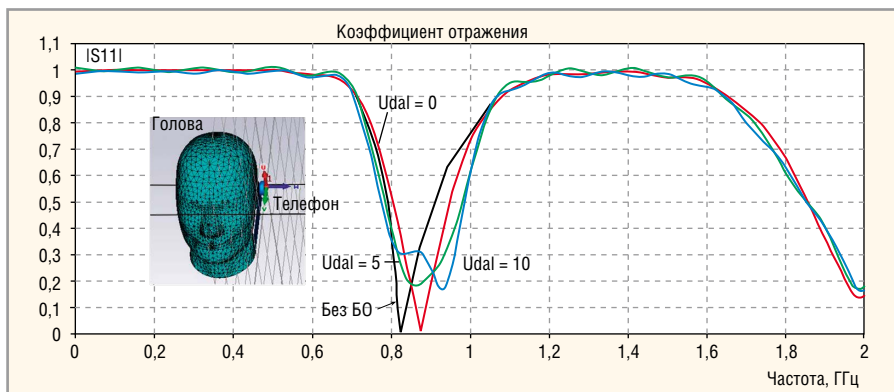


Рис. 4. Рассогласование антенны сотового телефона при изменении удаления от БО

Распределение ближнего поля в сечении головы пользователя, а также вдоль линии, идущей поперёк головы, изображено на рисунке 6. Расчёты показывают, что земляная плата антенны PIFA экранирует излучение ближнего поля в сторону головы и снижает уровень напряжённости поля. В точках наибольшей напряжённости электрического поля поглощается наибольшая мощность, излучаемая антенной системой сотового телефона, оценка которой даётся в статье далее.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОЛОГИЧЕСКОЕ ТЕЛО

Для оценки воздействия радиоизлучения на организм человека можно применить, по крайней мере, два критерия: первый – увеличение температуры тела при длительном воздействии облучения, второй – величину поглощённой мощности на единицу веса.

Повышение температуры тела зависит от мощности, поглощаемой и рассеиваемой в виде тепла в теле, поэтому второй параметр – величина удельной поглощённой мощности SAR (Specific Absorption Rate) – получил более широкое распространение [1, 6, 7]. Величина SAR в ячейке анализируемого пространства определяется как отношение мощности, поглощаемой в данной ячейке, к весу биологической ткани в ней:

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – проводимость биологической ткани, заполняющей ячейку [См/м],  $E$  – напряжённость электрического поля внутри ячейки [В/м],  $\rho$  – плотность ткани внутри ячейки [кг/м<sup>3</sup>].

Что касается первого критерия – температуры, то для решения задачи нахождения поля в пространстве БО нужно решить уравнение теплопроводности. Если распространение волн приводит

#### Параметры трёхслойной модели головы человека (в скобках указаны параметры для частоты 1,9 ГГц)

Вещество	Толщина, мм	Радиус границы сферы, мм	Относительная диэлектрическая проницаемость	Проводимость $\sigma$ , См/м	$\text{tg } \delta$ (расчёт)	Теплопроводность $S_t$ , Вт/град/м	Теплоёмкость $H$ , кДж/град/кг	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Мозг		48	53 (для 0,9 ГГц) (46 для 1,9 ГГц)	1,1 (1,7)	0,415 (0,369)	0,46	3,6	1030
Кость	3		9 (8)	0,06 (0,1)	0,133 (0,125)	0,41	1,3	1800
Кожа	1		59 (46)	1,3 (1,9)	0,44 (0,41)	0,293	3,5	1100

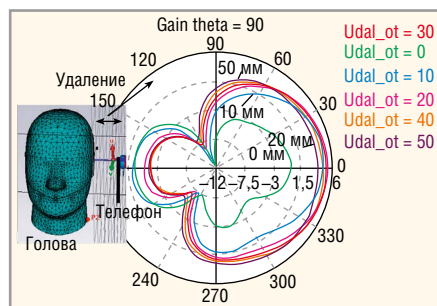


Рис. 5. Диаграммы направленности антенны в меридиональной плоскости для различных удалений телефона от головы

к гармоническому решению, то решение уравнения теплопроводности (уравнения параболического типа) приводит к экспоненциальному закону изменения температуры вдоль координат БО.

В 1948 г. Пеннес (Pennes) [8] предложил математическую модель для передачи тепла в биологическом теле, обусловленной диффузией крови. Хотя для моделирования процесса теплопередачи были разработаны и более сложные модели, этот подход был уточнен и продолжает использоваться в настоящее время. Модель описывает влияние потока крови на температуру ткани в стационарном состоянии. Поэтому в уравнении теплопроводности введены источник тепла и канал передачи:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + MR + \rho \times SAR + \xi \rho_b C_b (T_a - T), \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность массы биологического материала,  $C_p$  – теплоёмкость биологического материала,  $\lambda$  – теплопроводность материала,  $MR$  – скорость генерации тепла в соответствии с метаболическими процессами,  $\xi$  – скорость диффузии тепла,  $\rho_b$  – плотность массы крови,  $C_b$  – теплоёмкость биологического материала,  $T_a$  – артериальная температура,  $SAR$  – удельная мощность поглощения. Каждое слагаемое в выражении (2) имеет смысл и размерность мощности.  $T$  – поле температуры в пространстве БО.

Если все механизмы теплопроводности свести к потерям в простейшей диэлектрической модели головы, то из выражения (2) можно получить упрощенное уравнение, в котором увеличение температуры связано с величиной  $SAR$  [2]:

$$SAR C = \frac{dT}{dt} = \frac{C \times \Delta T}{\Delta t}, \quad (3)$$

где  $C$  – коэффициент теплоёмкости [Дж/кг/град],  $\Delta T$  – увеличение темпе-

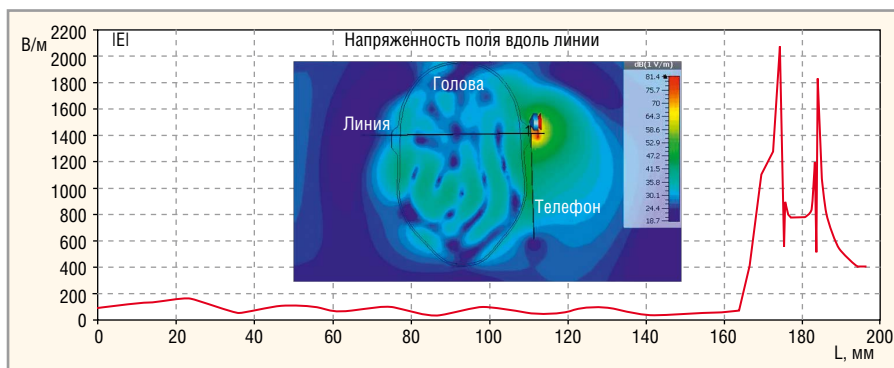


Рис. 6. Ближнее поле в сечении головы с максимальными значениями в районе антенны

ратуры в заданной точке тела в °С,  $\Delta t$  – время действия облучения в минутах.

Таким образом, есть два способа определения SAR, основанные:

- на измерении (или расчёте) увеличения температуры тела на заданном отрезке времени температурным пробником,
- на определении параметров электрического поля в заданной точке внутри фантома головы детектором Е-поля.

Погрешность в расчёте величины SAR зависит от погрешности в расчёте поля и от точности задания параметров модели головы. Важным фактором является также степень упрощения модели корпуса и конструкции телефона, от чего зависит точность расчёта его ближнего поля. Очевидно, что смоделировать подробно корпус телефона нелегко. Однако основные детали корпуса, особенно близкие к антенне и к голове человека, желательно описать как можно точнее.

Необходимо также учитывать, что мощность источника, включённого на входе антенны, динамически изменяется во времени. В связи с этим для каждого временного шага необходимо рассчитывать значения электрического и магнитного полей во всех точках анализируемого пространства в соответствии с методом расчёта во временной области (метод FDTD) [5].

Голова человека, как биологическое тело, имеет достаточно сложную структуру и состоит из нескольких видов биологической ткани, в которых из-за разницы в проводимости мощность поглощается неравномерно. Таким образом, важным условием точности расчётов внутреннего поля является достаточно точное построение модели головы. Следует отметить, что электромагнитное моделирование тела человека – это, в настоящее время, одна из научных областей, выделившихся на стыке радиотехники и медицины. В данной работе численное исследование взаи-

модействия электромагнитного излучения телефона и головы пользователя было проведено с помощью программы CST Microwave Studio (CST MWS). Эта программа основана на методе FDTD и позволяет найти все требуемые характеристики как ближнего, так и дальнего поля. Кроме этого, она позволяет рассчитать величину SAR в соответствии со стандартом [2], а также установившуюся и динамически изменяющуюся температуру внутри биологического объекта. Методы оптимизации, а также описание материалов в виде сложных частотных зависимостей, как сделано в работе Штыкова и Кальщикова [3], позволяют решить задачу уменьшения мощности поглощения и повышения температуры в излучающей системе в соответствии с задачами, поставленными в научных работах [7–8].

### Расчёт поглощаемой мощности и температуры нагрева внутри головы пользователя сотового телефона

Комплекс CST STUDIO SUITE решает уравнение теплопроводности для трёхмерных объектов и находит температуру внутри моделируемой среды при условии, что задаются её температурные характеристики. Решение выполняется итерационным методом, используя алгоритм, аналогичный методу FDTD (конечных разностей во временной области), который является базовым для вычисления электромагнитного поля и поля распределения потерь. Электрические потери являются источником тепла, распространяющегося в БО. Рассчитанное трёхмерное поле SAR, а также максимальное значение SAR в БО при изменении положения источника СВЧ-облучения, можно вывести в любой точке пространства по отношению к весу ткани (1 и 10 г) или как локальное значение [5].

Зависимость величины SAR от удаления телефона позволяет сделать вывод,

что при удалении на 7 мм уровень поглощаемой мощности уменьшается до допустимого порога. Однако более ценным результатом является распределение температуры в среде БО, представленное на рисунке 7. Поле рассчитанной в точках БО величины SAR, а также температуры, можно вывести вдоль линии, пересекающей БО в предполагаемой максимальной области прогрева.

Рисунок 7 демонстрирует, что максимальная температура нагрева БО достигается при удалении телефона от головы на 2 мм, а не при его соприкосновении с головой. Повышение температуры, по сравнению с начальной температурой тела человека (36,6°C), при мощности излучения сотового телефона на 500 мВт составляет почти 2°C. Нужно заметить, что эти результаты получены без учёта таких важных тепловых характеристик, как протекание крови по поверхности живого БО, и поэтому значение 2°C несколько завышено [1].

### Расчёт динамического, изменяющегося во времени, распределения температуры внутри головы

Для того чтобы выполнить расчёт динамического процесса (повышение и понижение температуры в определённых точках БО), нужно задать мониторы в этих точках, а также вид процесса теплового действия, пропорционального мощности поглощения в голове пользователя сотового телефона в стационарном режиме.

Зададим этот временной сигнал в виде двухэкспоненциального импульса, который моделирует ситуацию падения мощности при подносе телефона к голове. Сигнал длится 50 секунд, в течение которых модуль Thermal Solver программы CST рассчитывает переходной процесс в нескольких точках БО.

Из расчёта переходного теплового процесса, результат которого показан на рисунке 8, видно, что в точках БО, удалённых от места приложения ЭМ-поля, температура может расти даже после снятия ЭМ-поля. В точках 2 и 4 имеет место увеличение температуры после снятия СВЧ-излучения, поскольку при снятии мощности тепловые потоки движутся из областей с более высокими температурами к холодным областям.

Отметим одно из перспективных приложений данной технологии моделирования электромагнитных и тепловых процессов в биологическом теле.

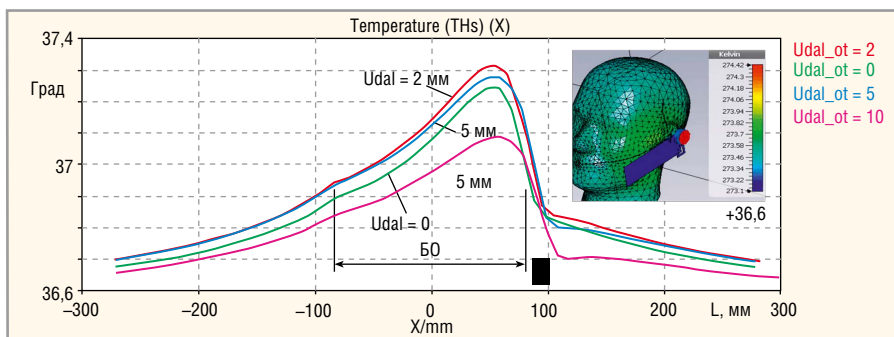


Рис. 7. Установившееся распределение температуры вдоль линии через БО для нескольких положений телефона относительно головы

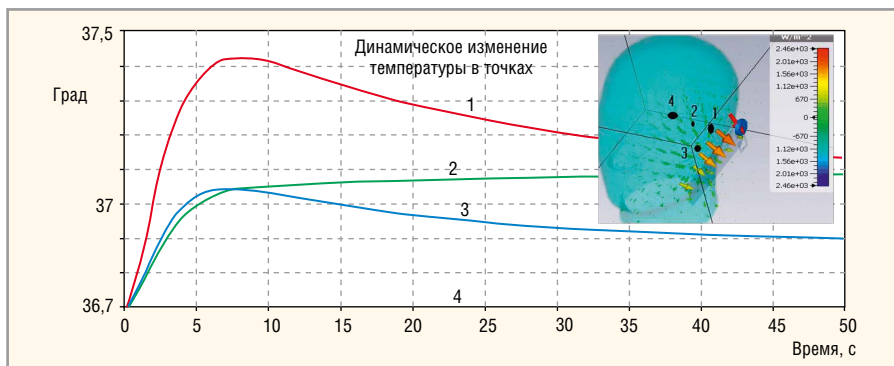


Рис. 8. Изменение температуры во времени при воздействии импульса мощности

Известно, что в ряде современных медицинских приборов в области лечебной гипертермии нагрев биологического тела используется для достижения положительного эффекта. Программа CST MWS позволяет моделировать сложные тепловые эффекты нагрева и рассчитывать распределения напряжённости электрического поля, плотности потерь мощности внутри тела и соответствующие им распределения температуры.

### Вывод

Теплопередача биологического материала играет важную роль при моделировании эффекта поглощения мощности в голове человека при пользовании сотовым телефоном. Расчёты показали превышение температуры до 1°C по сравнению с окружающей средой при установившемся значении излучаемой мощности 200 мВт.

Данный подход является перспективным для проектирования современных медицинских приборов, например, в гипертермии (медицинская терапия), которая использует сфокусированное СВЧ-излучение для локального нагрева ткани внутри тела до определённой температуры. Компьютерное моделирование и медицинское исследование в комплексе позволяют перевести лечение СВЧ-излучением на качественно новый уровень.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Gustrau F., Babr A.* Final Report: Biological Effects in the cm/mm Wave Range Part II/III Determination of Material Parameters and Analysis of Field Strengths in Human Tissue By Institute of Mobile and Satellite Communication Techniques GmbH. Germany. 1998.
2. IEEE C95.1-1991. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. New York. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1992. April.
3. *Штыков В.В., Кальщиков А.А.* Тепловое воздействие электромагнитных волн на кожу человека. Журнал Радиоэлектроники ИРЭ АН. 2013. №9.А
4. *Курюшин А.А.* Вычисление температуры нагрева головы человека при пользовании сотовым телефоном. Журнал Радиоэлектроники ИРЭ АН. 2011. №11.
5. Сайт разработчика CST STUDIO SUITE компании Computer System Techniques. www.cst.com.
6. *Bernardi Paolo, etc.* Specific Absorption Rate and Temperature Increases in the Head of a Cellular-Phone User. IEEE Trans. on MTT. 2000. July. Vol. 48. №7.
7. *Pennes H.H.* Analysis of Tissue and Arterial Blood Temperatures in the Resting Forearm. J. Appl. Physiol. 1948. 1. Pp. 93-122.
8. *Wang J. and Fujiwara O.* Reduction of Electromagnetic Absorption in the Human Head for Portable Telephones by a Ferrite Sheet Attachment. IEICE Trans. Commun. 1997. Dec. Vol. E80-B. №12. Pp.1810-1815.