



# Моделирование 3-d наносхемотехники

Россия, Москва  
 Московский институт электроники и математики (МИЭМ)  
 Руководитель научного направления  
 д.т.н., профессор  
 Трубочкина Надежда Константиновна  
[nadin@miem.edu.ru](mailto:nadin@miem.edu.ru)  
<http://nadin.miem.edu.ru>

Россия, Москва  
 Московский институт электроники и математики (МИЭМ)  
 8, Пресненский пер., 8/12  
 кафедра "Вычислительные системы и сети"  
 ВКСО  
 Тел. 816-8900

# Актуальность

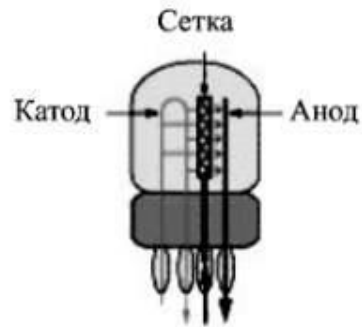
- Нанотехнологии и нанонауки, многофункциональные материалы, основанные на новых знаниях и предназначенные для новых производственных процессов и устройств.
- Промышленность и общество могут извлечь пользу из новых знаний посредством разработки новых продуктов и технологических процессов.
- Необходима согласованность национальных исследовательских программ и инвестиций. Это должно гарантировать обеспечение страны командами и соответствующей инфраструктурой, нацеленными на решение актуальных задач.



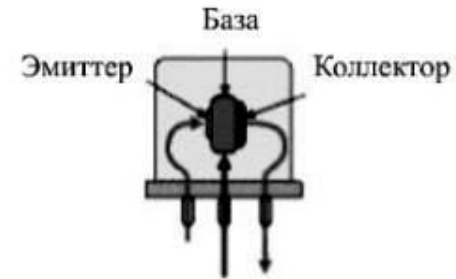
# Прошлое и настоящее схемотехники



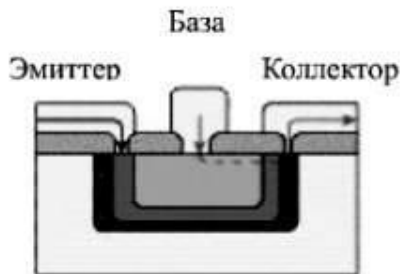
а)



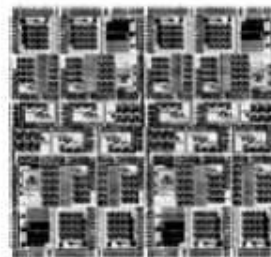
б)



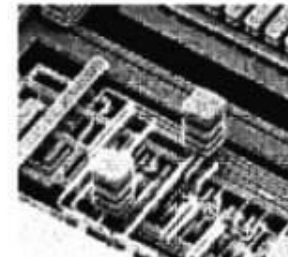
в)



Интегральный  
полупроводниковый  
транзистор

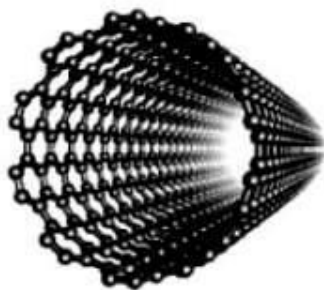


Планарные  
БИС и СБИС

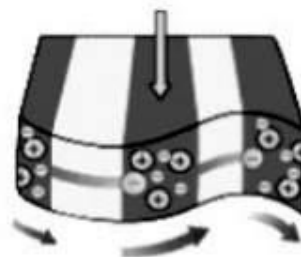


Трехмерные  
СБИС

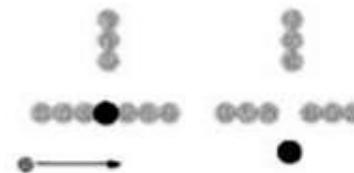
# Настоящее и будущее схемотехники



Нанотрубки  
ж)



Одноэлектронный  
транзистор  
з)



Атомные  
переключающие  
структуры  
и)



ДНК -  
углеродная схема  
к)



Биочипы  
л)



Нанофабрики  
м)

# Новизна

- Представлен новый подход к пониманию и освоению свойств трехмерных интегральных схем.
- Разработана соответствующая подходу схемотехника.
- Разработано программное обеспечение, позволяющее синтезировать новые интегральные структуры, а также «совершать экскурсию» внутрь интеллектуального кристалла и «гулять» там.



# Теория

- Разработана переходная схемотехника для 3-d СБИС.
- Компонент схемотехники - физический переход между материалами с различными свойствами.
- Математические модели интеллектуальных элементов содержат минимальное количество переходов и физических областей с различными свойствами.
- Некоторые модели «совпадают» по структуре с органическими молекулами, имеющими те же логические функции.

# Теоретические основы переходной схемотехники (ТОПС 1)

Математической моделью функционально-интегрированного элемента (ФИЭ) является неориентированный граф

$$G (X, A, \Gamma),$$

где:  $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$  – множество вершин,

$A = (a_1, a_2, \dots, a_M)$  – множество ребер.

Предикат  $\Gamma$  является трехместным предикатом и описывается логическим высказыванием

$$\Gamma (x_i, a_k, x_j),$$

которое означает, что ребро  $a_k$  соединяет вершины  $x_i$  и  $x_j$ .

# ТОПС 2

Элементу множества вершин  $x_i$  соответствует часть интегральной структуры

$$T_i^{F_i},$$

в которой

$T_i$  определяет качественный состав части интегральной структуры,

$F_i$  – элемент функционального множества.

$$T = \{T_i\}_{i=1,n} = (p,n,p+,n+,...SiO_2, Al, Ga...) = П \cup Д \cup М –$$

множество элементов типа частей структуры ( $p$  – полупроводниковая область  $p$ -типа,  $n$  – полупроводниковая область  $n$ -типа,  $SiO_2$  – область двуокиси кремния,  $Al$  – область алюминия,  $Ga$  – область галия и т.д.),

$П$  – подмножество областей полупроводников,  $Д$  – подмножество областей диэлектриков,  $М$  – подмножество проводников.



# ТОПС 3

Функциональное множество

$$F = F_y \cup F_H$$

состоит из двух подмножеств:

$$F_y = \{F_{yi}\} = (E_1, \dots, E_{k1}, I_1, \dots, I_{k2}, \phi_1, \dots, \phi_{k3} \dots)$$

подмножества управляющих воздействий в виде напряжения  $E_i$ , тока  $I_j$ , света  $\phi_k$  и

$$F_H = \{F_{Hi}\} = (v_{x1}, \dots, v_{xm}, v_{y1}, \dots, v_{yn})$$

подмножества назначения, задающего входные и выходные функции областям из подмножества  $T$ , по отношению к которым определяются передаточные характеристики элементов.

$N$  – число областей интегральной структуры, размерность элемента.

# ТОПС 4

Элементам множества ребер  $a_k$ ,  $a_i$  соответствуют переходы между различными частями интегральной структуры, выполняющие определенные функции, причем существуют

$$x_i, x_j \quad (x_i \neq x_j \ \& \ \Gamma(x_i, a_k, x_j) \ \& \ \Gamma(x_j, a_k, x_i)).$$

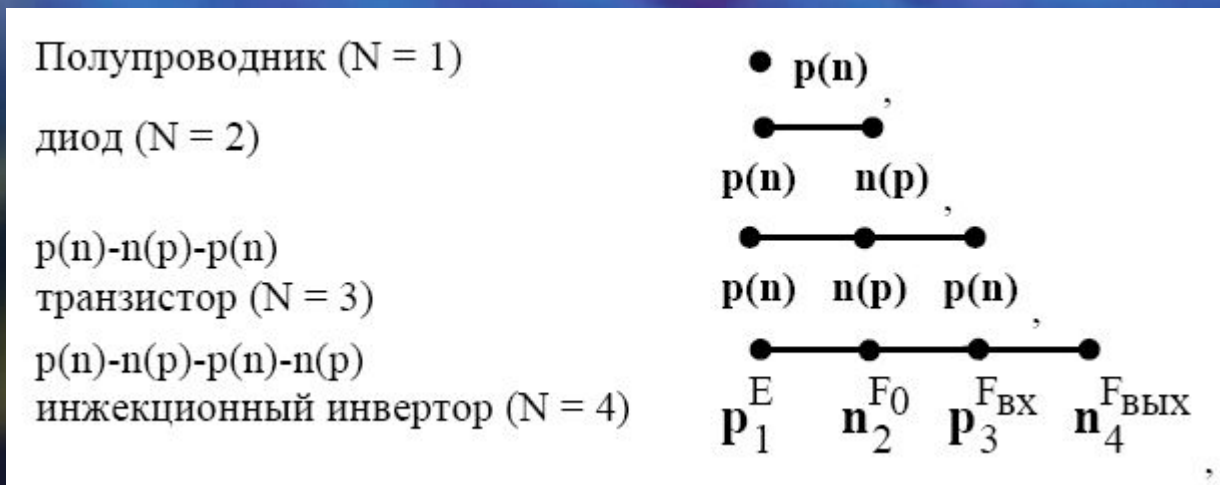
Примерами переходов – компонентов переходной схмотехники – являются:

- $P_i - P_j$  переход - переход между полупроводниками, например,  $p - n$  переход, переход между полупроводниками  $p$  и  $n$  типа, выполняющий диодную функцию,
- $P_i - D_j$  переход - переход между полупроводником и диэлектриком,
- $P_i - M_j$  переход - переход между полупроводником и металлом (диод Шоттки),
- переходы между прозрачными и непрозрачными слоями в оптоэлектронных элементах,
- мембраны в биологических элементах и т.д,

Инцидентор  $\Gamma(x_i, a_k, x_j)$  означает, что область  $x_i$ , имеет с областью  $x_j$  физическую границу – переход  $a_k$ .

# ТОПС 5

Графовые модели интегральных элементов могут представлять собой деревья, а могут содержать и циклы.



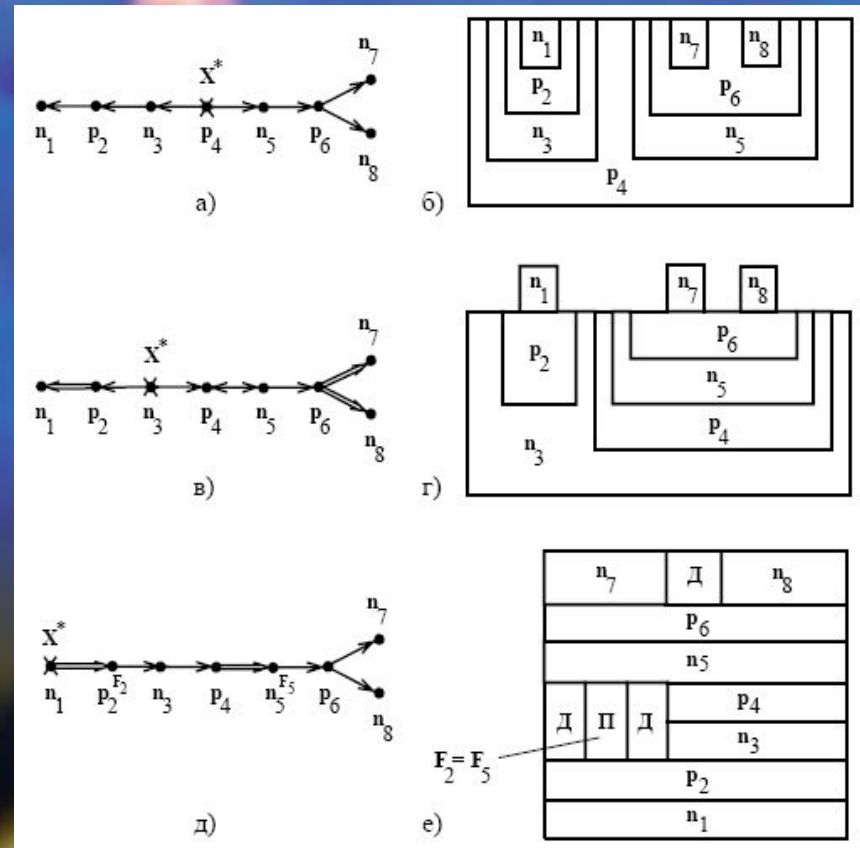
цепь открытий и изобретений, давших три последних поколения вычислительных машин, всего лишь начальные элементы таблицы оптимальных математических моделей элементов переходной (p-n) схемотехники.



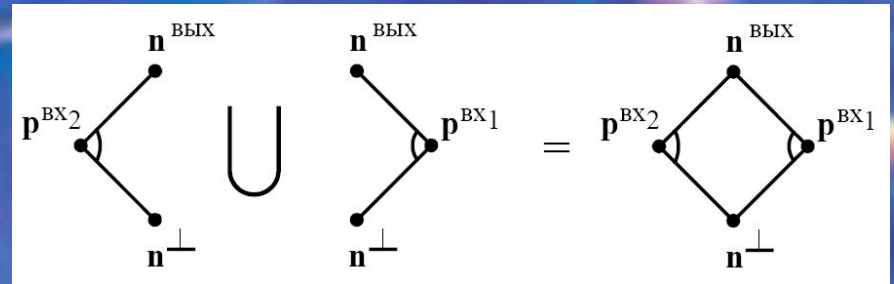
# ТОПС 6. Генерация структур

Процедура генерации структурных формул интегральных структур по математической модели элемента переходной схемотехники:

- а) – структурная формула элемента И-НЕ,
- б) – структура элемента, выполненного по эпитаксиально-планарной технологии,
- в) – структурная формула И-НЕ,
- г) – структура элемента с локальными эпитаксиальными областями,
- д) – структурная формула И-НЕ,
- е) – структура элемента с многослойной (трехмерной) конструкцией

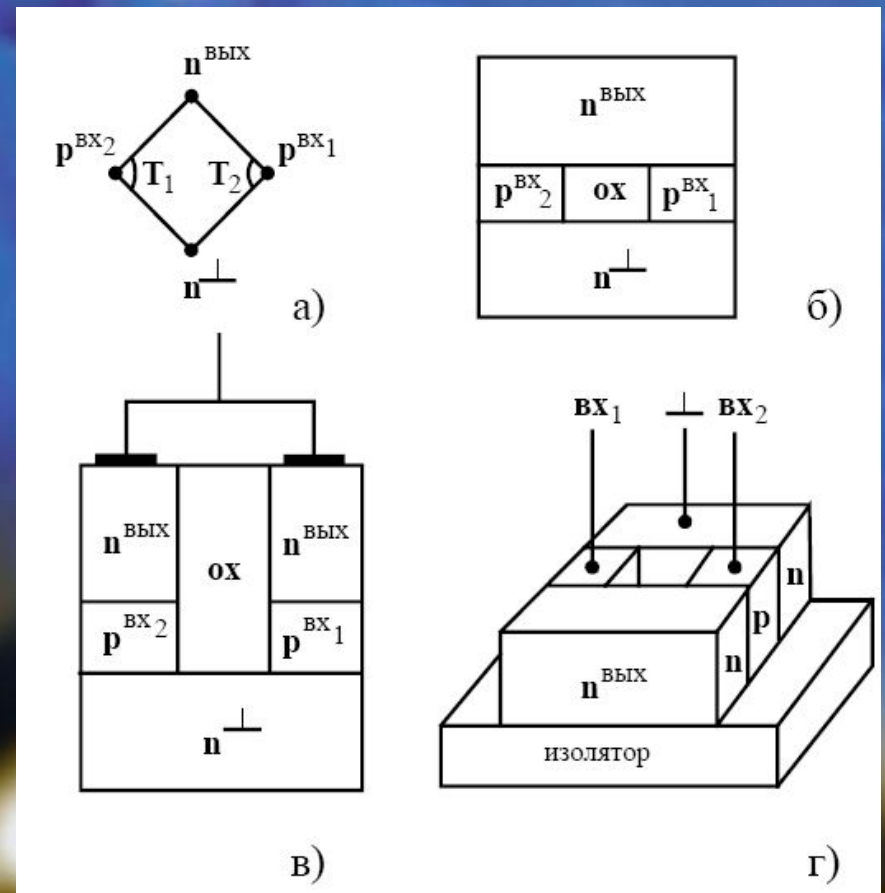


# Пример проектирования ФИЭ



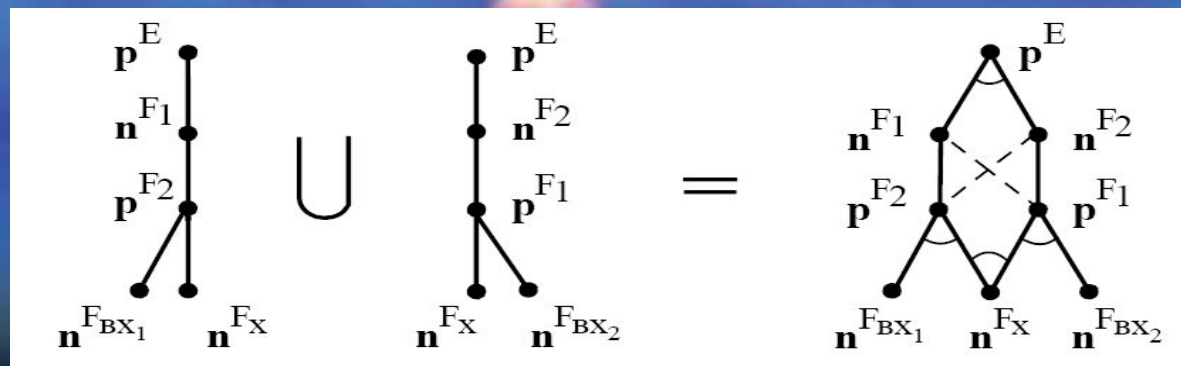
Уравнение синтеза

- а) – математическая модель (объединение двух n-p-n транзисторов по эмиттерам и коллекторам),
- б) – вертикальная оптимальная интегральная структура,
- в) – вертикальная структура с разбиением вершины  $n^{ВЫХ}$ ,
- г) – горизонтальная структура на изоляторе



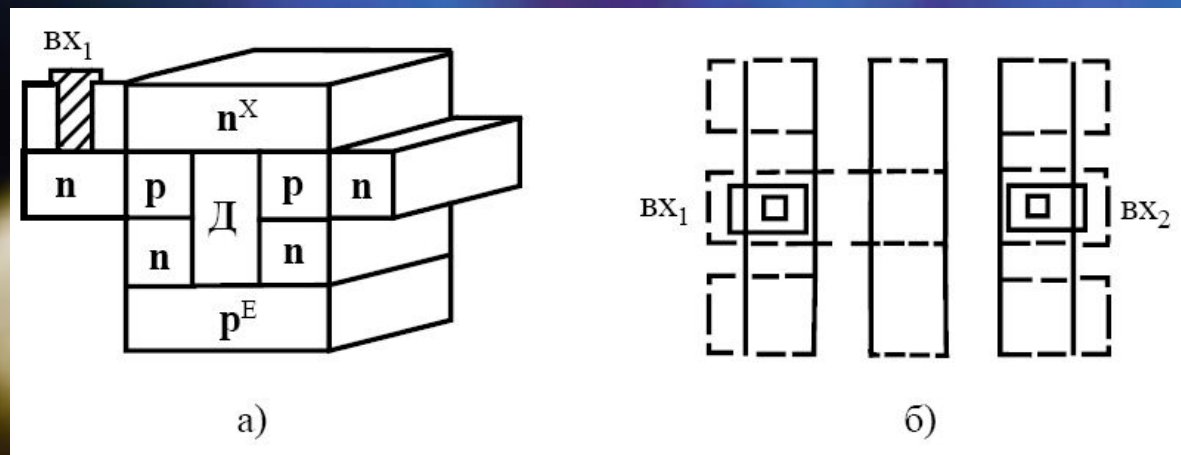
# RS-триггер в переходной схемотехнике

Уравнение синтеза



RS-триггер в переходной схемотехнике:

а) – структура,  
б) – топология

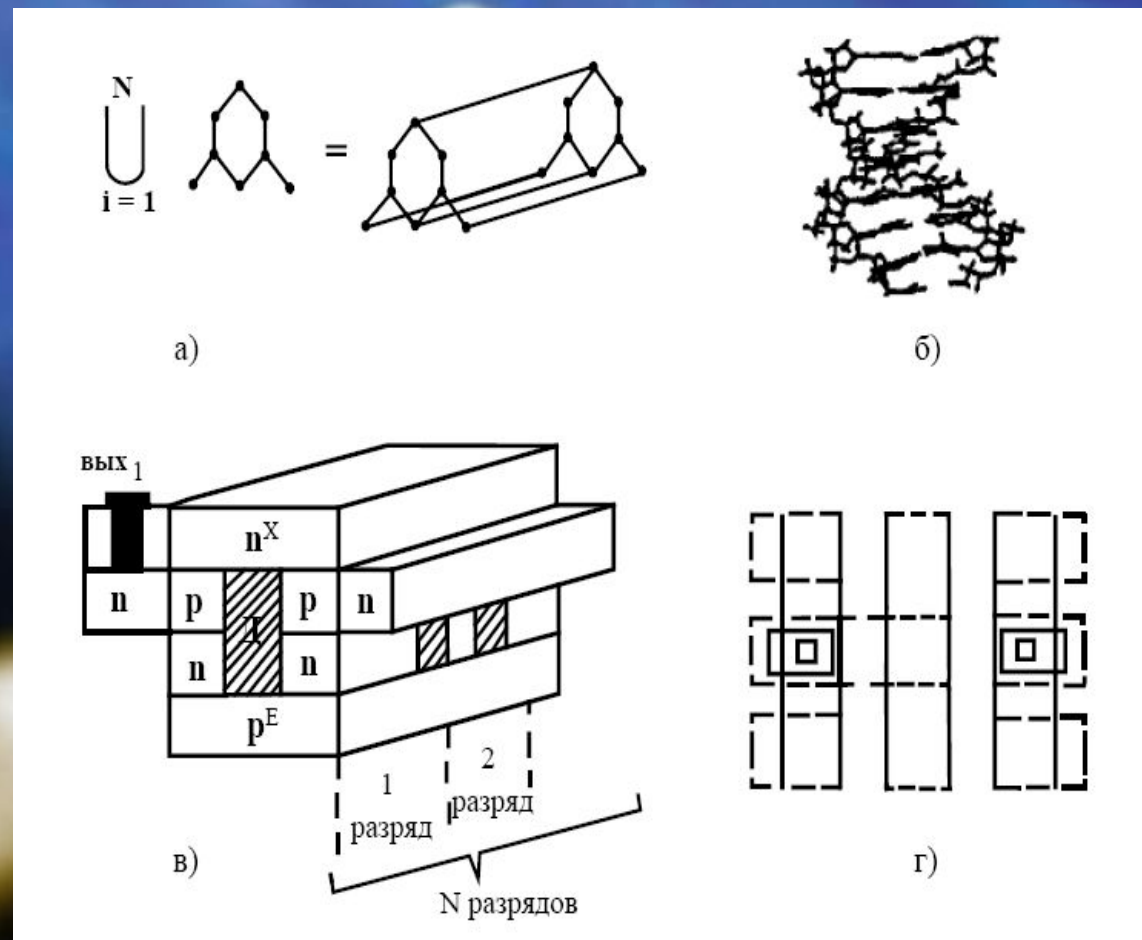




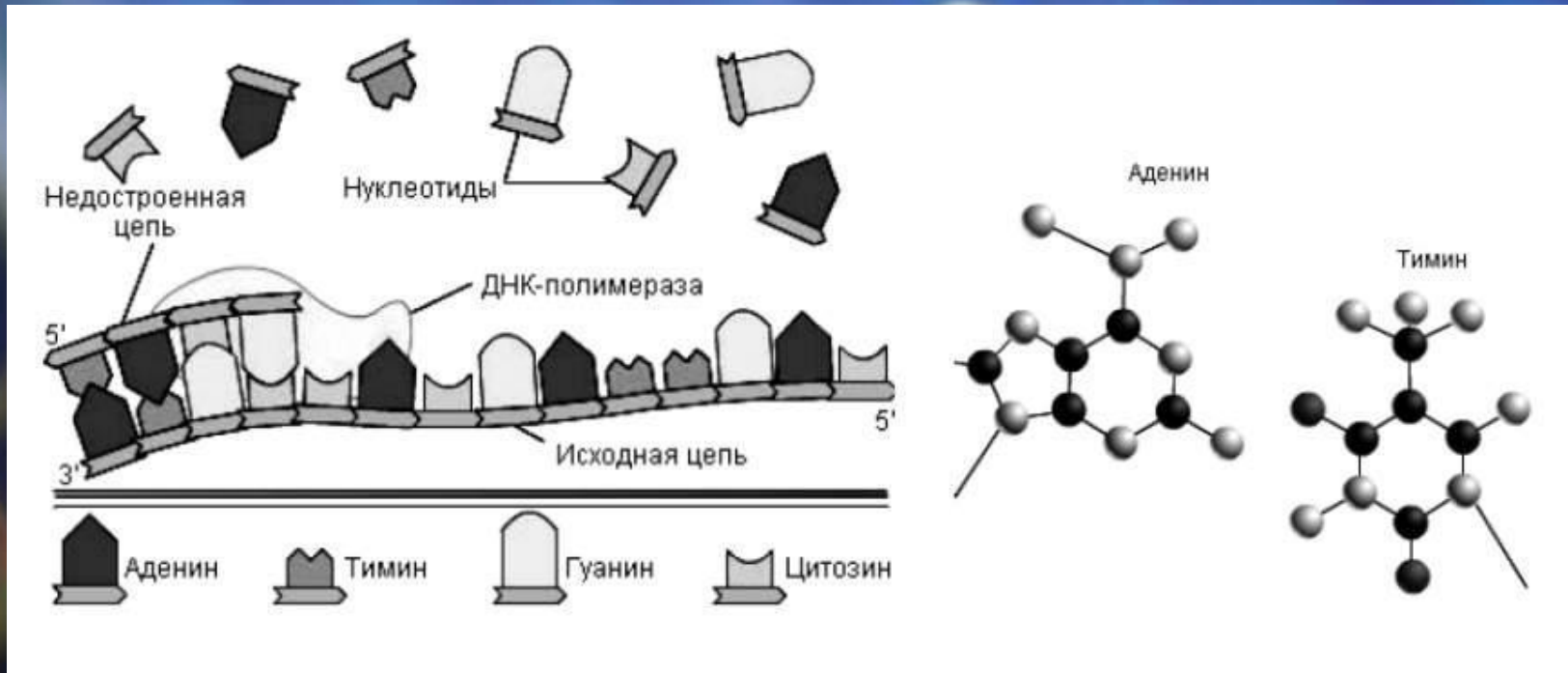
# N-разрядный регистр на RS-триггерах в переходной схемотехнике

- а) – уравнение синтеза,
- б) – ДНК,

- в) – интегральная структура,
- г) – топология одного разряда



# Биочипы (подобие углеродной и кремниевой переходных схмотехник)

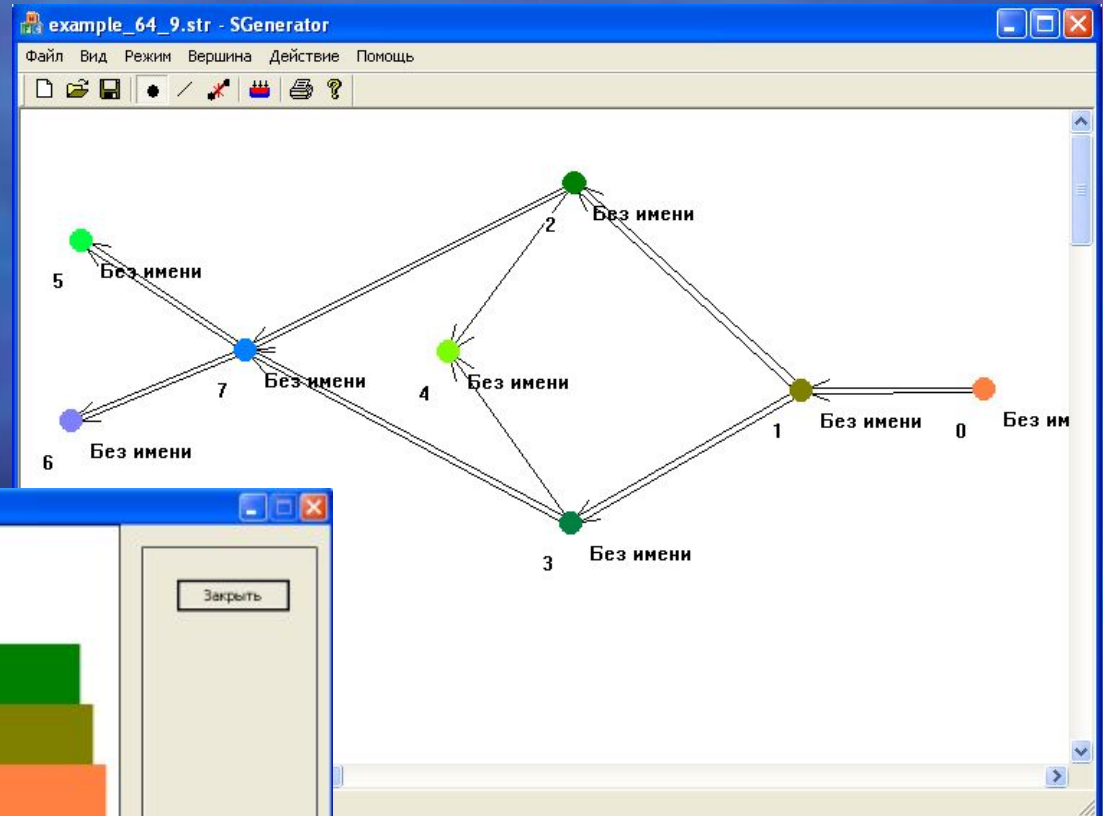


На рисунке показан синтез комплиментарной цепи ДНК из нуклеотидов, модели которых удивительно похожи на математические модели триггеров в переходной схмотехнике.

# Программное обеспечение (ПО 1)

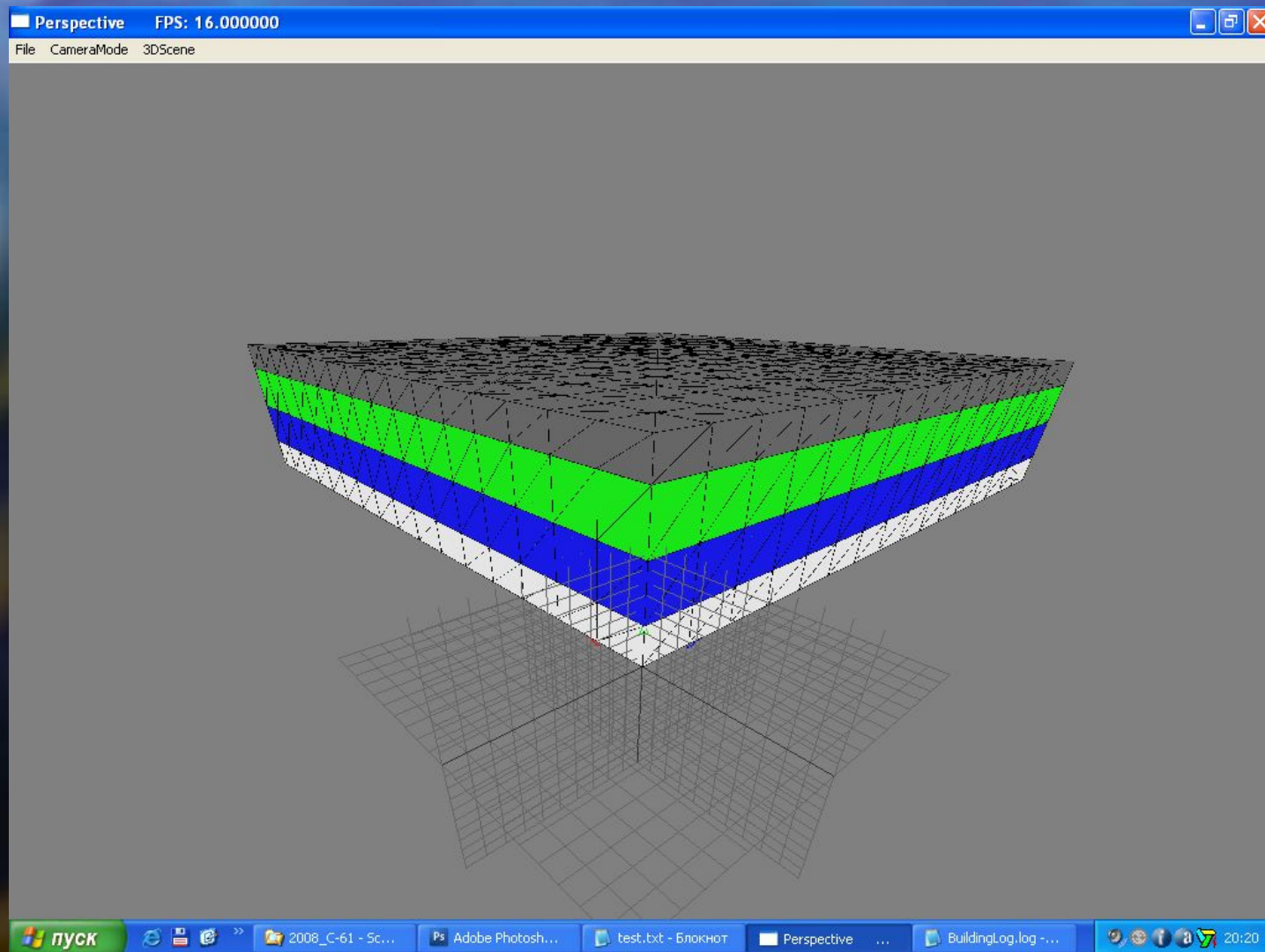
- SGenerator –

генерация 2-d интегральной структуры по математической модели ФИЭ

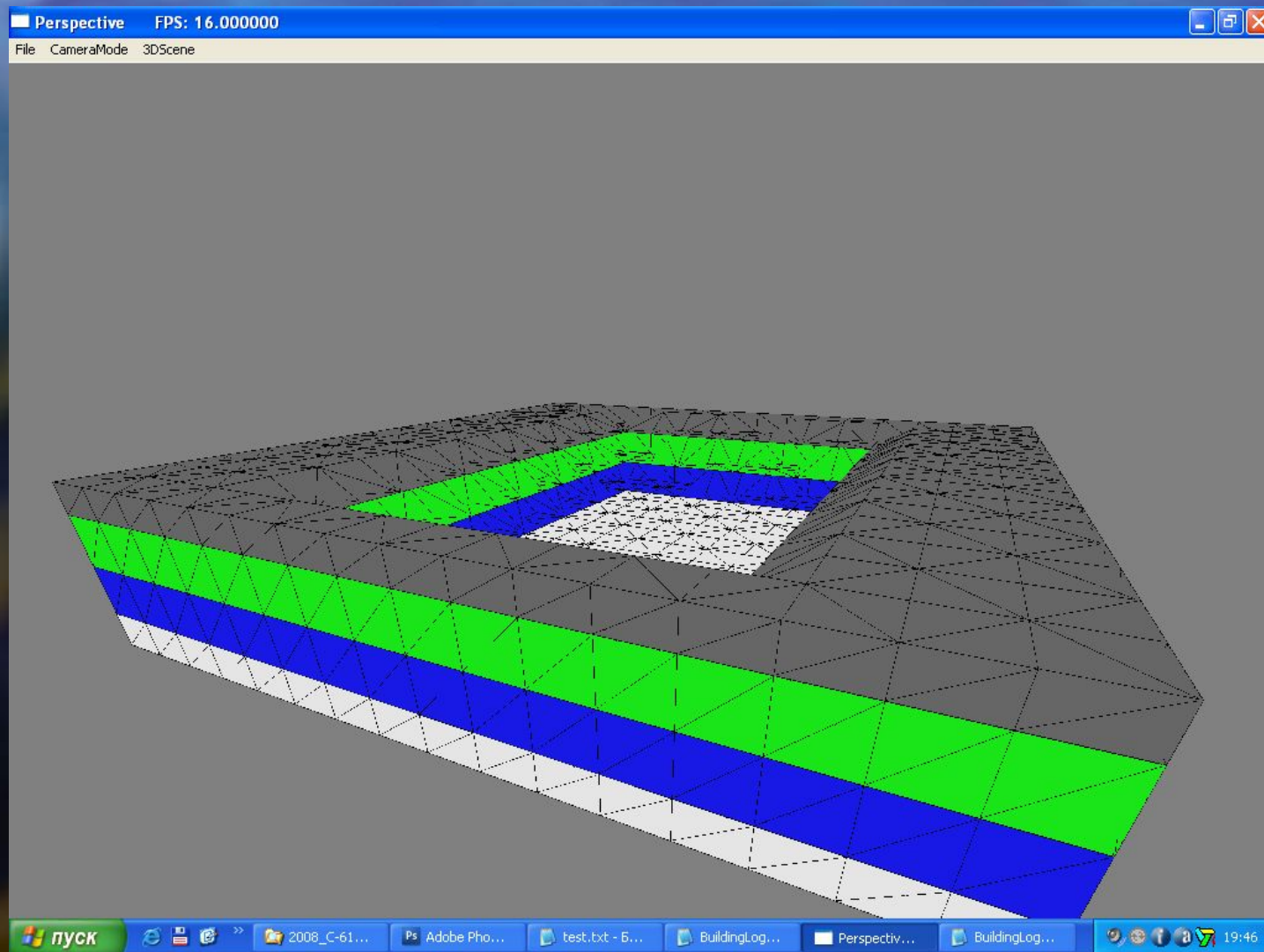




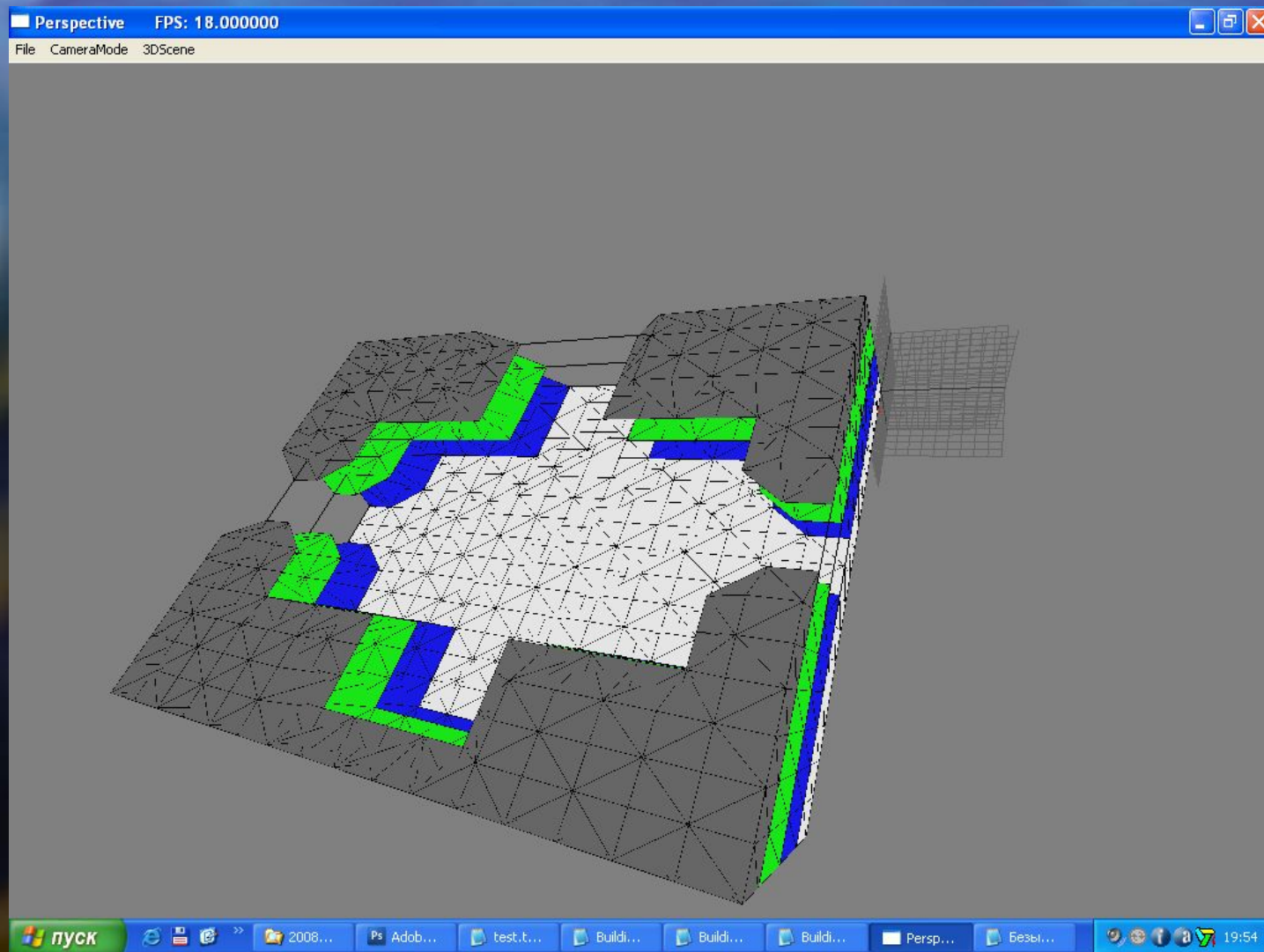
# Программное обеспечение (ПО 2) – Perspective – 3-d визуализация (пример 1)



# Программное обеспечение (ПО 2) – Perspective – 3-d визуализация (пример 2)

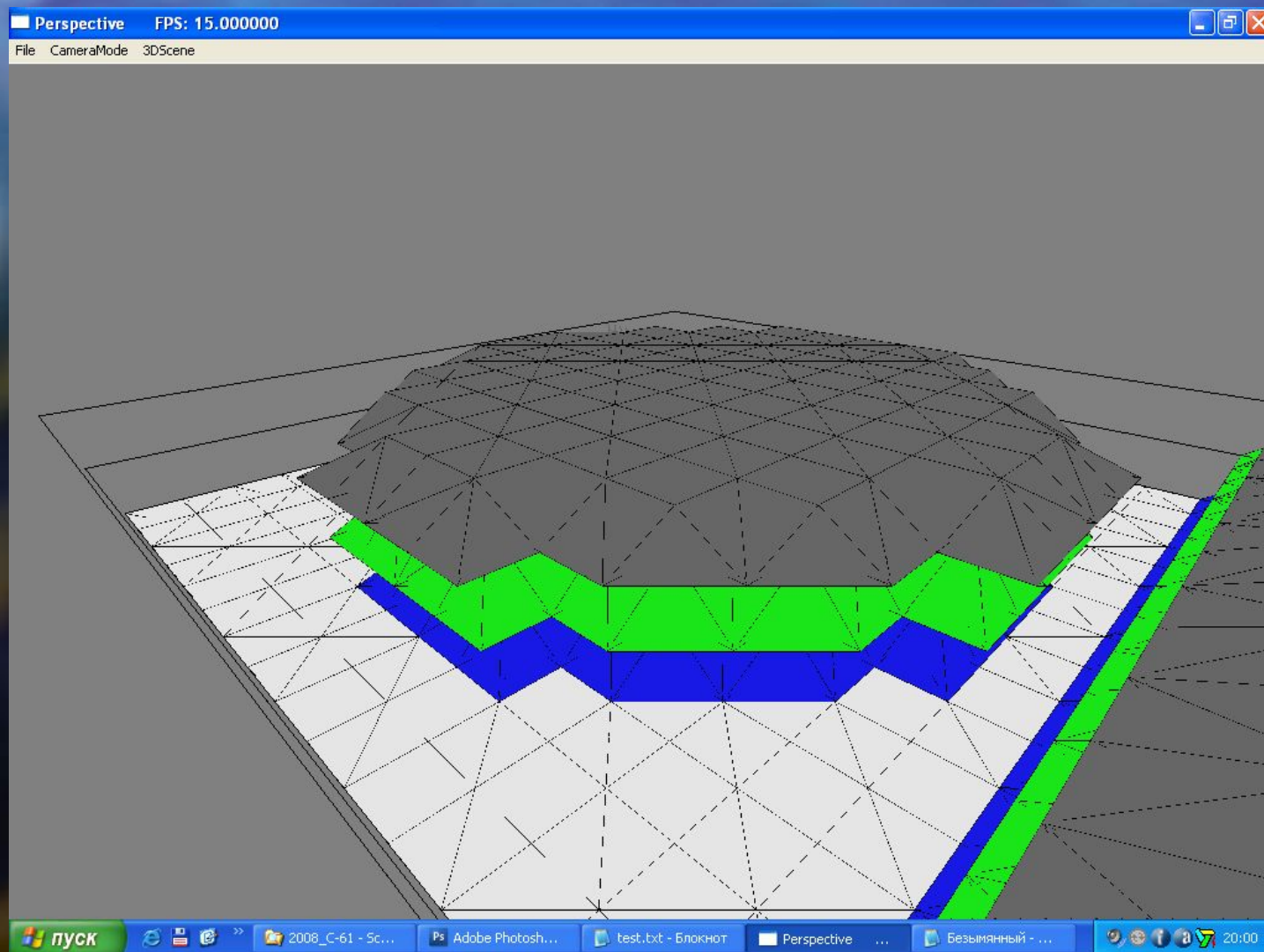


# Программное обеспечение (ПО 2) – Perspective – 3-d визуализация (пример 3)

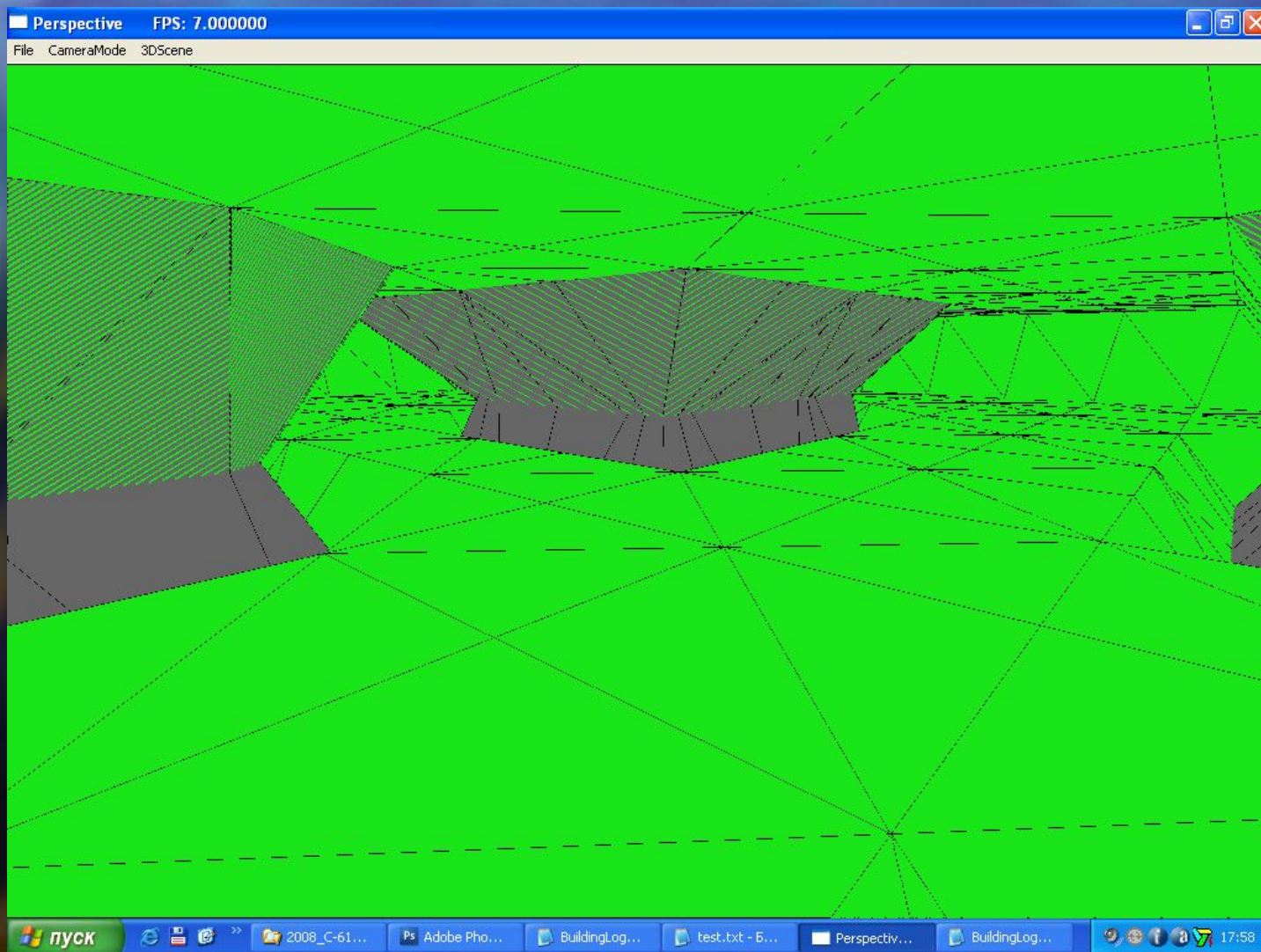




# Программное обеспечение (ПО 2) – Perspective – 3-d визуализация (пример 4)

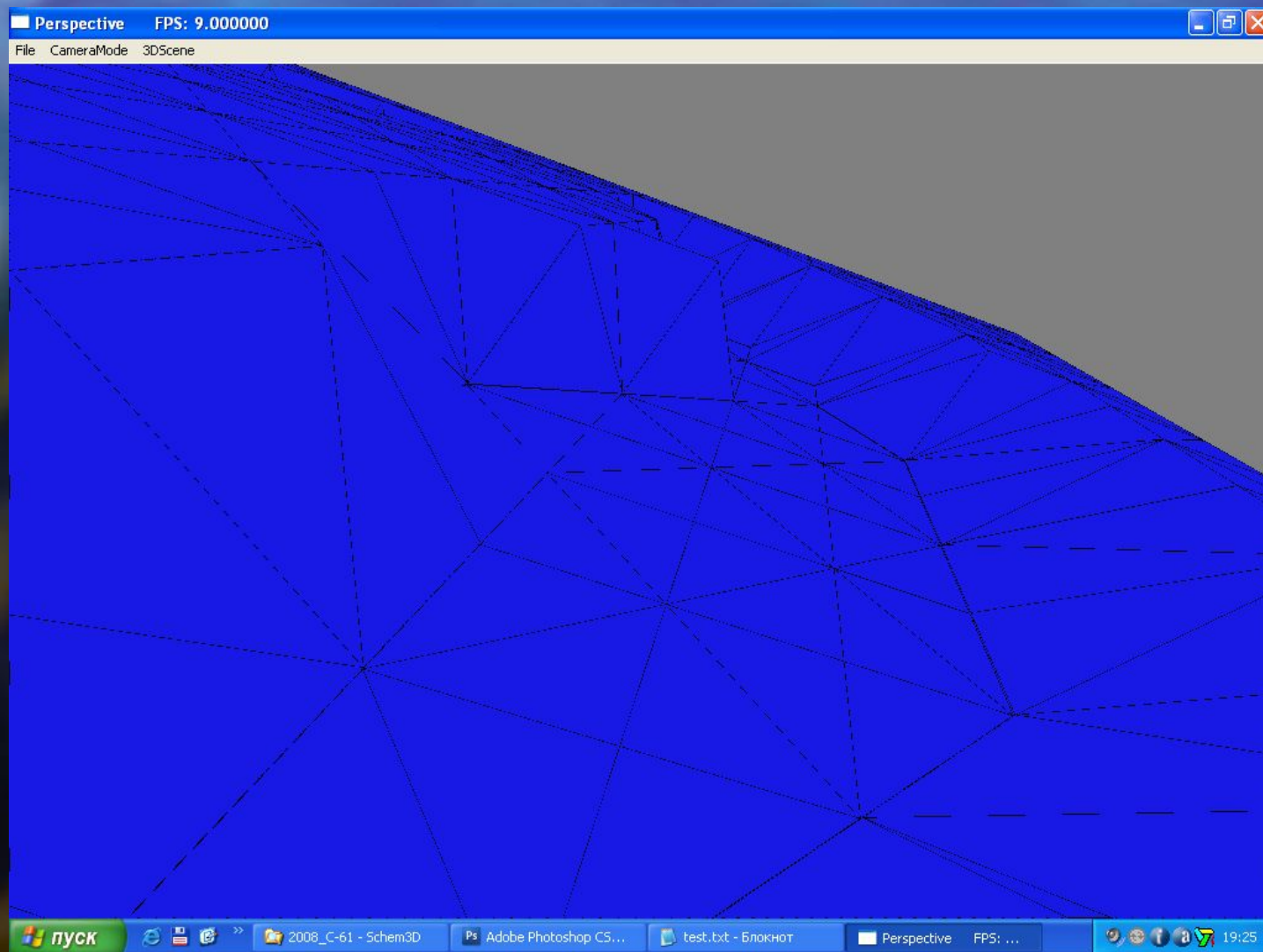


# Программное обеспечение (ПО 2) – Perspective – 3-d визуализация (пример 5)



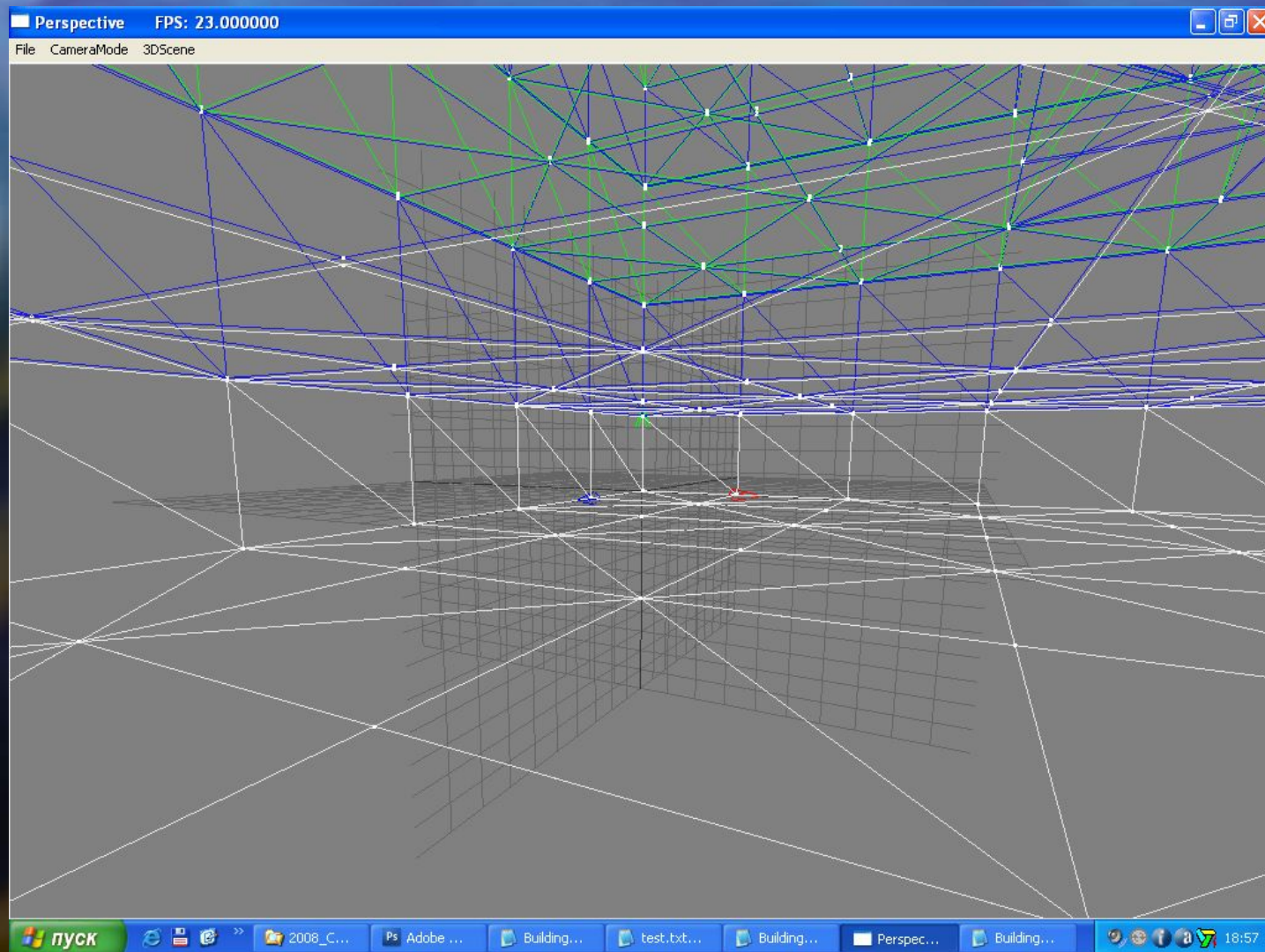


# Программное обеспечение (ПО 2) – Perspective – 3-d визуализация (пример 6)



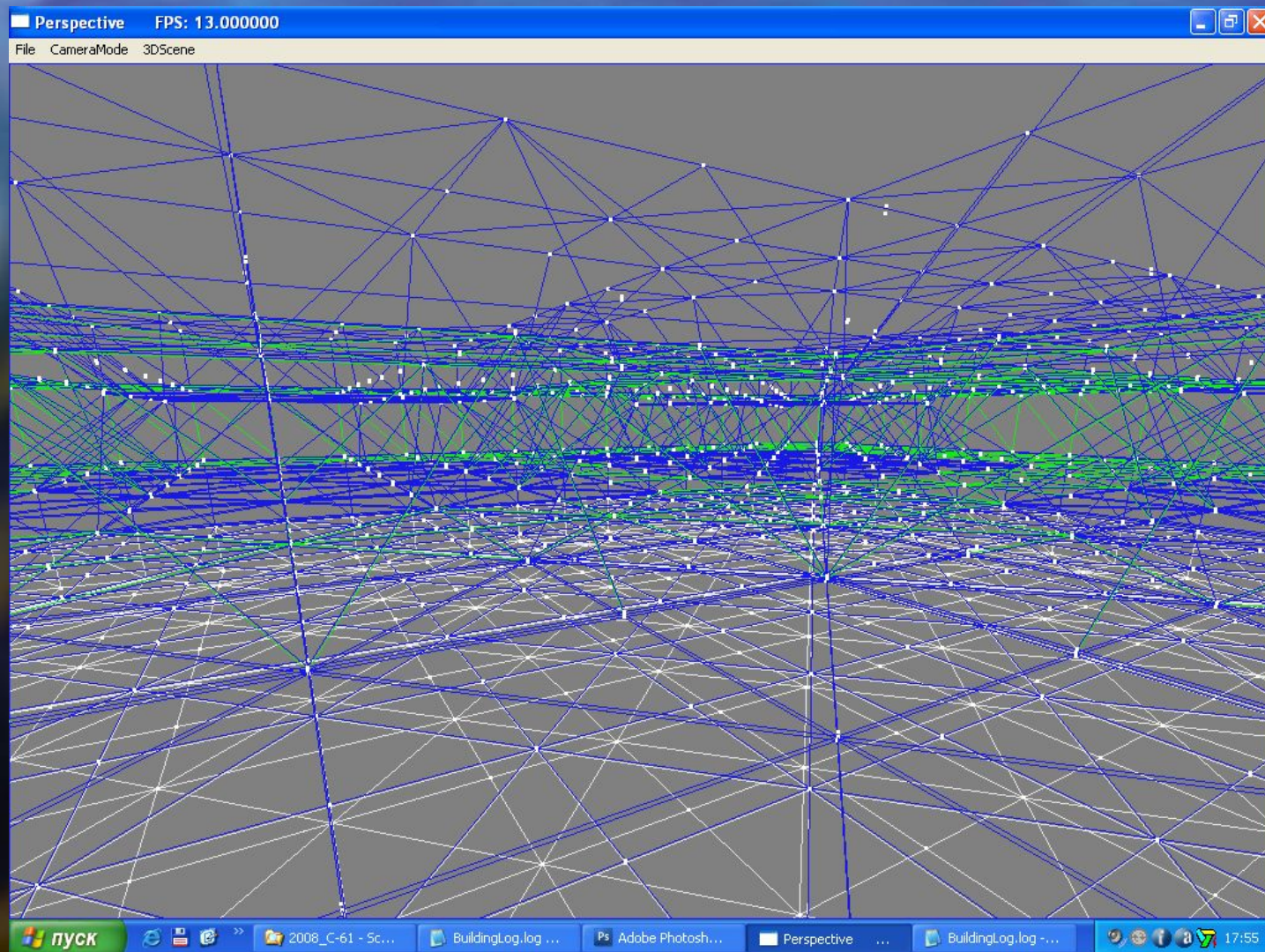


# Программное обеспечение (ПО 2) – Perspective – 3-d визуализация (пример 7)





# Программное обеспечение (ПО 2) – Perspective – 3-d визуализация (пример 8)





# Результаты

- Система оптимальных математических моделей интеллектуальных элементов различной степени сложности для 3-d СБИС.
- Моделирующее программное обеспечение.
- Побочный культурологический эффект:
  - 3-d технологии в интернете (3-d сайты)

[http://nadin.miem.edu.ru/my\\_img/3d\\_room/3d\\_p\\_1\\_1.html](http://nadin.miem.edu.ru/my_img/3d_room/3d_p_1_1.html)



# Обучение

Разработан учебный курс,  
включающий:

- курс лекций,
- практикум по компьютерному моделированию,
- тестирование на сайте <http://testing.miem.edu.ru>
- методические материалы

# Дополнительная литература

- Трубочкина Н.К. Синтез на ЭВМ функционально-интегрированных элементов. Вопросы радиоэлектроники, сер. Технология производства и оборудование, вып.1, 1985, с.20.
- Трубочкина Н.К. Логические элементы статических БИС. М: МИЭМ, 1987.
- Трубочкина Н.К. Машинное моделирование функционально-интегрированных элементов. Учебное пособие. М.: МИЭМ, 1989.
- Трубочкина Н.К., Мурашев В.Н., Петросян Ю.А., Алексеев А.Е. Функциональная интеграция. Концепция. Электронная промышленность, 2000, № 4, с.49-70.
- Трубочкина Н.К., Мурашев В.Н., Петросян Ю.А., Алексеев А.Е. Функциональная интеграция элементов и устройств. Электронная промышленность, 2000, № 4, с.70-88.
- Трубочкина Н.К. Схемотехника ЭВМ. М: МИЭМ, 2008.

# О руководителе научного направления

- Трубочкина Надежда Константиновна - доктор технических наук, профессор, Россия, Москва, МИЭМ, кафедра вычислительных систем и сетей.
- Работает в области информационных, компьютерных и интернет-технологий, занимается теоретическими разработками в области переходной схемотехники для 3-d СБИС.
- Автор более 80 научных работ и изобретений в области создания элементной базы и программного обеспечения для проектирования компьютерных систем.
- Читает лекции в Московском институте электроники и математики по компьютерной схемотехнике и Web-дизайну. Ведет курс в интернете по Flash-технологиям.
- Имеет сайты:
  - <http://nadin.miem.edu.ru>
  - <http://distant.miem.edu.ru>
  - <http://testing.miem.edu.ru>





# Контакты:

- Адрес: Россия, 121109, Москва, Московский институт электроники и математики (МИЭМ), Б.Трехсвятительский пер., 3/12, кафедра «Вычислительные системы и сети» (ВСИС)
- Тел.: 916-8909
- E-mail:

[nadin@miem.edu.ru](mailto:nadin@miem.edu.ru)

[flash@miem.edu.ru](mailto:flash@miem.edu.ru)