

# Моделирование освещённости объектов на земной поверхности по данным космической съёмки

*Рихтер А.А., к.т.н., м.н.с. (1), Мурынин А.Б., к.т.н., вед.н.с. (1, 2)*

(1) НИИ "АЭРОКОСМОС", Москва, РФ

(2) ФИЦ ИУ РАН, Москва, РФ

Докладчик – Рихтер Андрей Александрович

Работа поддержана Минобрнауки РФ, проект RFMEF158317X0061.

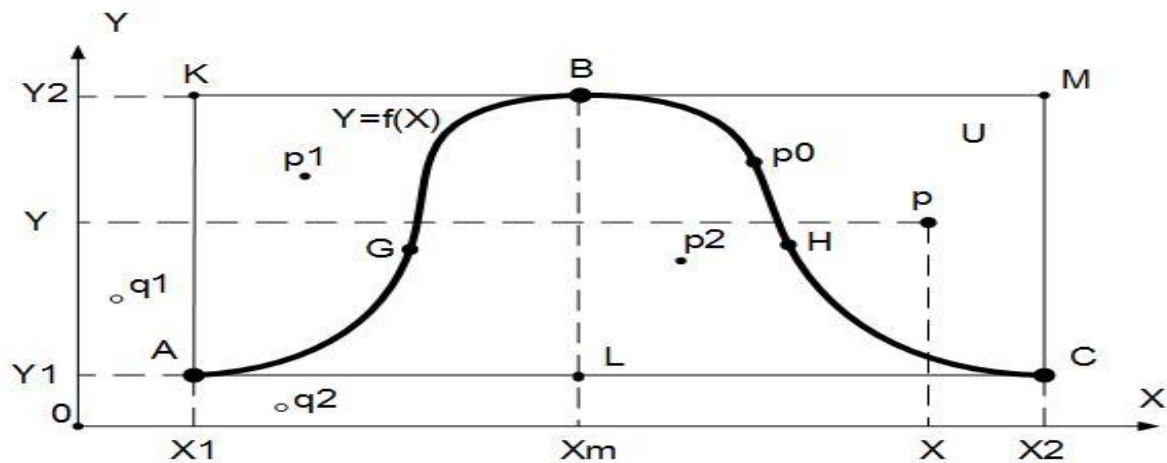
Работа поддержана грантом РФФИ №16-51-55019.

# Индекс реакции растительности на освещённость

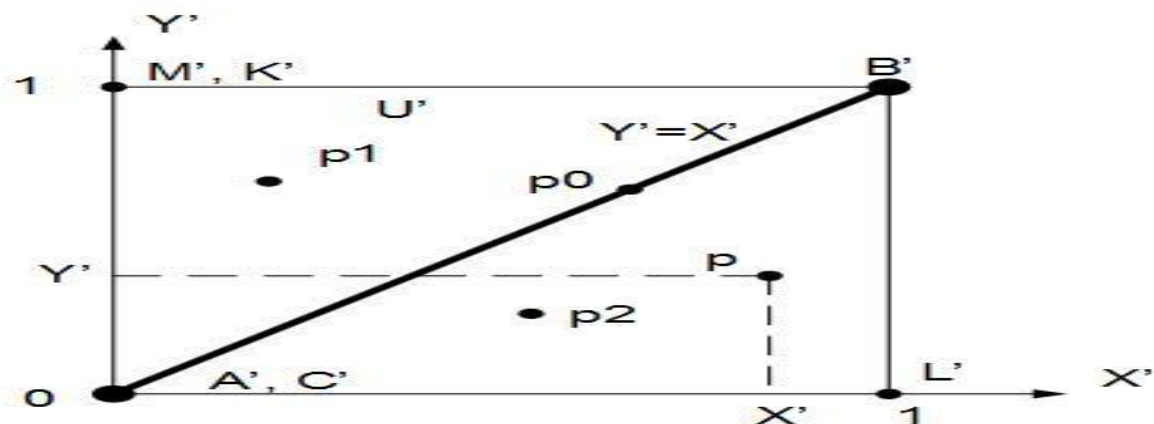
# Постановка задачи

- Освещённость - световой поток, приходящийся на единицу площади некоторой поверхности. С точки зрения космического мониторинга освещённость от Солнца (источника освещения поверхности земли) можно оценить нормальной составляющей вектора светового потока на элементарную площадь поверхности с учётом или без учёта её рельефа в точке (пиксели оптических или радарных изображений) .
- В рамках космического мониторинга рассмотрим следующие аспекты оценки освещённости:
  - Индексы реакции растительности и почвы на освещённость;
  - Освещённость в окрестности крупных свалок;
  - Освещённость в окрестности застройки;
  - Построение 3D-моделей ригидных объектов по косвенным изображениям;
  - Пространственное моделирование и оценка освещённости объектов земной поверхности;
  - Проектно-исследовательские работы в системе общего образования в области 3D-моделирования и оценки освещённости (на примере работы Дементьева И.А. в программной среде 3ds-max, ГБОУ СОШ г. Москвы № 97).

# Факторы и реакции окружающей среды



$X$  и  $Y$  – значения фактора и реакции в некоторой точке поверхности земли, выражаемые в физических или условных единицах,  $X'$  и  $Y'$  – их значения, приведенные к диапазону  $[0, 1]$ .  $X_1$  и  $X_2$  – наименьшее и наибольшее (наихудшие, критические) значения фактора, при которых объект может существовать,  $X_m$  – наилучшее (оптимальное) значение фактора для объекта,  $Y_1$  и  $Y_2$  – минимальная (наихудшая) и максимальная (наилучшая) реакции объекта на фактор. Вне области выживания  $U$ , например, точки  $q_1$  и  $q_2$  не могут принадлежать объекту  $O$ . Точки  $A, B, C, G, H$  – характерные точки на графике  $f(X)$ , точки  $K, L, M$  – характерные точки области  $U$ ,  $[X_1, X_2]$  – границы выживаемости объекта по данному фактору,  $p$  – точки, принадлежащие объекту.



Функция  $f(X)$  возрастает от  $A$  до  $B$ , т.е. рост фактора приводит к росту реакции на этом участке. От  $B$  до  $C$  функция убывает, т.е. рост фактора приводит к снижению реакции. Области увеличения скорости реакции от  $A$  до  $G$  и снижения скорости реакции от  $H$  до  $C$  при росте фактора полагаем областями негативных влияний фактора. Область от  $G$  до  $H$  – благоприятных влияний фактора.  $AC$  – диапазон выживания.

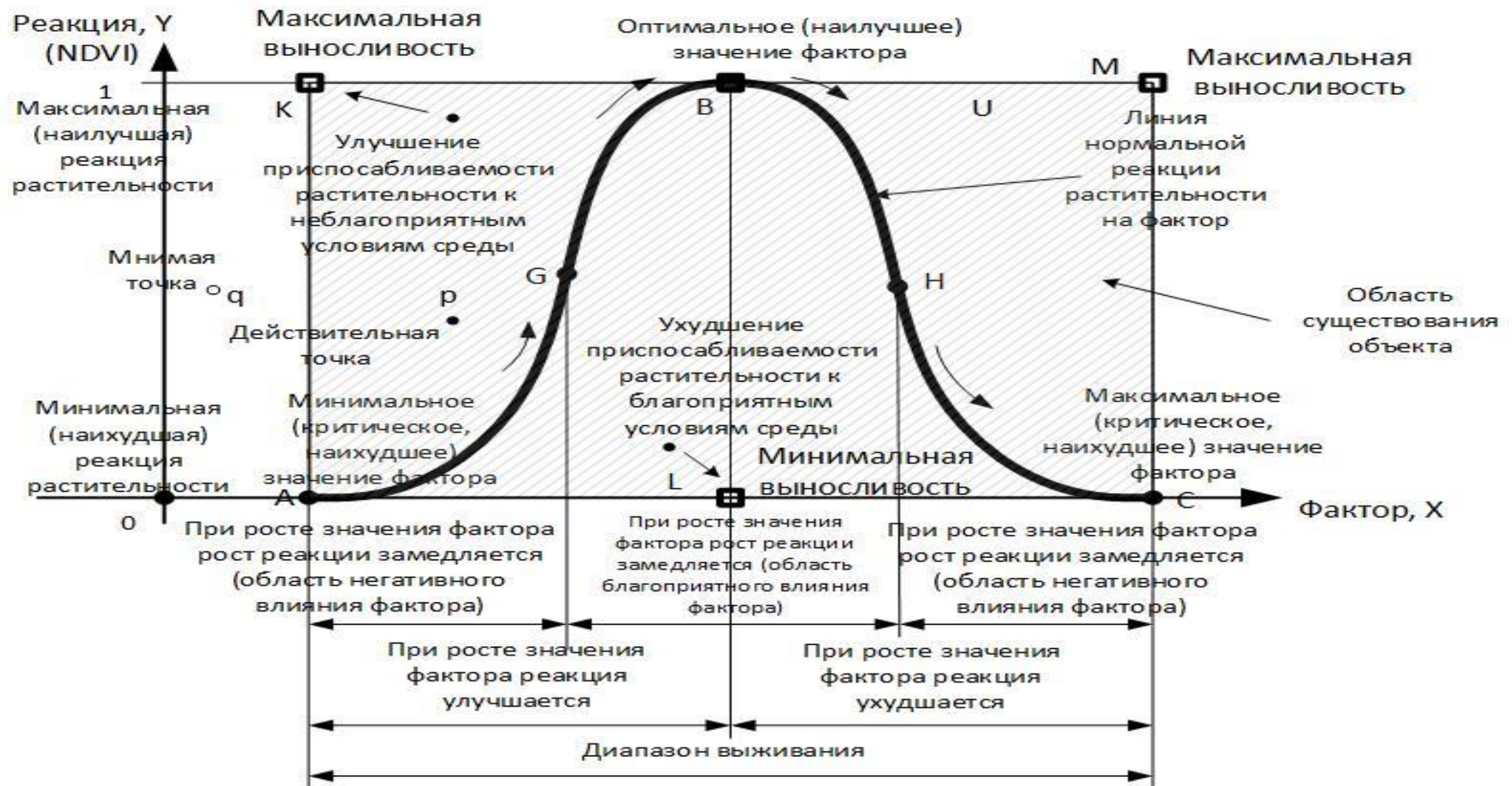
Полагаем, что  $X$  и  $Y$  могут быть выражены в виде каких-либо индексов подстилающей поверхности, полученных обработкой изображений (не только аэрокосмических).

$$D = X' - Y'$$

$$p : (x, y) \sim (X, Y), (X', Y')$$

$$X' = \begin{cases} \frac{X - X_1}{X_m - X_1}, & X < X_m \\ \frac{X_2 - X}{X_2 - X_m}, & X \geq X_m \end{cases}, \quad Y' = \frac{Y - Y_1}{Y_2 - Y_1}$$

# Зависимость между факторами, воздействующими на растительность, и реакцией растительности на эти факторы по космическим изображениям





# Индексы реакции растительности и почвы



## Основные факторы жизнедеятельности для растительности

$$\mathfrak{Z} = X' - Y', \quad NDVI > 0$$

$$\mathfrak{N} = \frac{k}{k_m} \quad R = [\mathfrak{Z}_1 \quad \dots \quad \mathfrak{Z}_m]$$

$$T = [t_1 \quad \dots \quad t_m]$$

### Критерии оценки состояния растительности

- $|\mathfrak{Z}| \leq \varepsilon$  - нормальное состояние растительности
- $\varepsilon < \mathfrak{Z} \leq 1$  - низкая выносливость растительности к внешним факторам
- $-1 \leq \mathfrak{Z} < -\varepsilon$  - высокая выносливость растительности к внешним факторам

### Критерии оценки состояния почвы

- $|\mathfrak{N}| \leq \mu$  - состояние растительности меняется несущественно
- $\mu < \mathfrak{N} \leq 1$  - состояние растительности ухудшается со временем
- $-1 \leq \mathfrak{N} < -\mu$  - состояние растительности улучшается со временем

$\mathfrak{Z}$  – индекс реакции растительности (ИРР),  $\varepsilon \sim 0$

$X$  – фактор, воздействующий на объект (растительность)

$Y$  – реакция объекта на значения фактора

( $X, Y$  – рассчитываются по космическим изображениям)

$X'$  – нормированное значение фактора  $X$

$Y'$  – нормированное значение реакции  $Y$

$X_m$  – оптимальное (наилучшее) значение фактора

$X_1, X_2$  – минимальное и максимальное (наихудшие) критические значения фактора

$Y_1, Y_2$  – минимальное (наихудшее) и максимальное (наилучшее) значения реакции

( $X_1, X_2, X_m, Y_1, Y_2$  – рассчитываются)

$\mathfrak{N}$  – индекс реакции почвы (ИРП),  $\mu \sim 0$

$R$  – временной ряд значений индекса реакции растительности (ИРР)

$T$  – отчеты времени

$k$  – коэффициент наклона линии регрессии

$k_m$  – максимальное по модулю значение  $k$  по эталонной области

# Фактор освещённости

Освещённость в точке зависит от: модели Земли (сфера, геоид, референц-эллипсоид и др.); рельеф и шероховатость поверхности; случайного распределения объектов поверхности; погодных и климатических условий (облачность, видимость и др.); пропускающей способности экранируемой поверхности.

Разные виды растительности имеют разные ареалы распределения, которым соответствуют разные режимы освещения (суточного, сезонного, хронологического), оптимального или допустимого для них. Растительному покрову – среднестатистический режим (как и для других факторов растительности).

Растительность имеет высотное и широтное распределение (модели леса, города, водоёма, горы и др. экосистем).

Для оценки характерных значений фактора освещённости ( $X_1, X_2, X_m$ ) необходимо провести цифровую обработку большого массива изображений и найти распределение NDVI в зависимости от освещённости в каждой точке изображений.

$i$	$N$	Тип яруса	Характеристика
0	1	Внеярусная растительность	Вьющиеся лианы, эпифиты, водоросли
1	1-2	Подземный ярус	Корневая система растений, лесных почв, обитатели почвы (фауна, грибы, микроорганизмы и др.)
2	1-2	Лесная подстилка	Производные растений (опавшие листья, ветки, цветы, плоды, кора и др.) – мертвый покров, производные животных (фекалии, трупы животных, оболочки куколок, личинок и др.) – живой покров
3	1	Моховой	Мхи, лишайники
4	1	Травяной	Трава, кустарнички
5	1-2	Подлесок	Кустарники, низкие деревья
6	1-6	Древостой	Высокие деревья

**Высотная проекция леса:**  $i$  – номер типа,  $N$  – число ярусов (аналогично – для города)



Тимохово



Кучино



Белая Гора



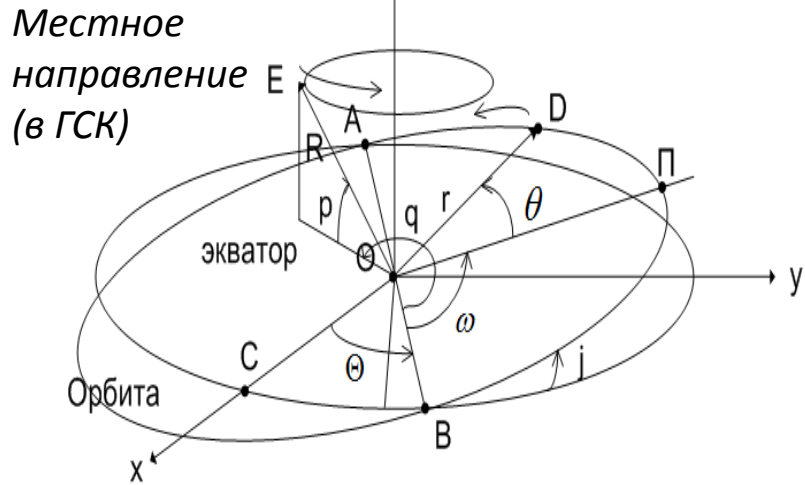
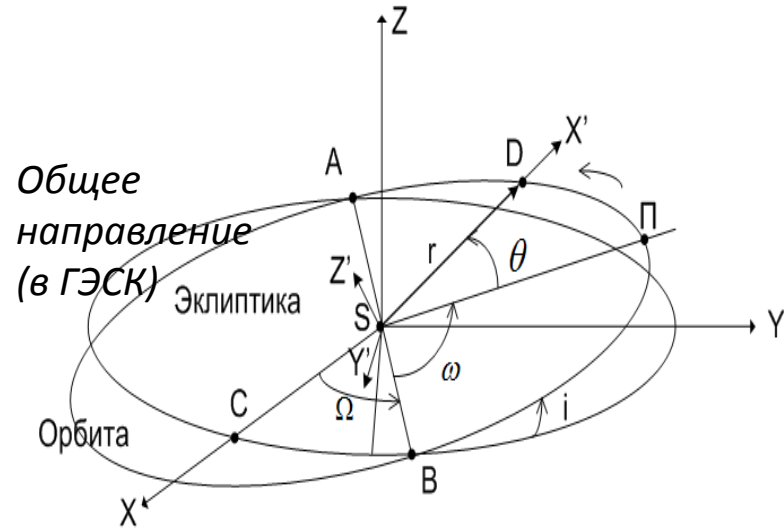
Зелёная Гора

## Распределение растительности на поверхностях свалок (полигонов ТКО Московского региона)

$S$  – освещённость,  $T$  – температура поверхности,  $\rho$  – плотность растительного покрова.

$S$  и  $T$  коррелируют друг с другом и с  $\rho$ . Схемы распределения  $S$ ,  $T$  и  $\rho$  для природных, продолжительных и стабильных во времени (горные, лесистые, озёрные и др. системы) и антропогенных, непродолжительных и нестабильных во времени (застройки, карьеры, свалки и др.) местностей различны. Распределение  $\rho$  меняется с высотой (на разных высотных ландшафтных поясах, уровень высоты которых зависит от широты местности), глубиной (на разных лимнологических зонах озёр, рек, морей и других форм водомассивов), расстоянием от высотного объекта (в зависимости от суточно-сезонной динамики тени от Солнца в окрестности объекта и систем объектов), положением на самом объекте (в зависимости от угла между нормалью к подстилающей поверхности и направлением на Солнце).

# Оценка индекса освещённости



## Расчёт направленности излучения

$$X = \frac{|\bar{r}|}{\max |\bar{r}|} \cos(\bar{r}, \bar{R})$$

Для ровной поверхности: Для неровной поверхности:

$$X = \cos H$$

$$X = \cos(\bar{n}, \bar{s})$$

$X$  – индекс освещённости в точке  $E(x, t)$

$x = [x_1 \ x_2 \ x_3]$  – вектор места ( $x_1$  – абсцисса,  $x_2$  – ордината,  $x_3$  – аппликата)

$t = [t_1 \ t_2 \ t_3]$  – вектор времени ( $t_1$  – хронологическое,  $t_2$  – сезонное,  $t_3$  – суточное)

$r$  – радиус-вектор центра масс Земли

$R$  – радиус-вектор точки  $E$

$n$  – нормаль к поверхности в точке

$s$  – направление на источник освещения (Солнце)

### Критерии оценки:

$X > 0$  – источник виден с точки  $E$  (дневное время суток)

$X < 0$  – не виден (ночное время суток)

$X \sim 0$  – на линии горизонта (сумеречное время, рассвет или закат)

$SXYZ$  – гелиоцентрическая эклиптическая система координат (ГЭСК),  $\{i, \Omega, \omega, e, a, \vartheta\}$  – элементы орбиты,  $D$  – текущее положение притягиваемого тела;

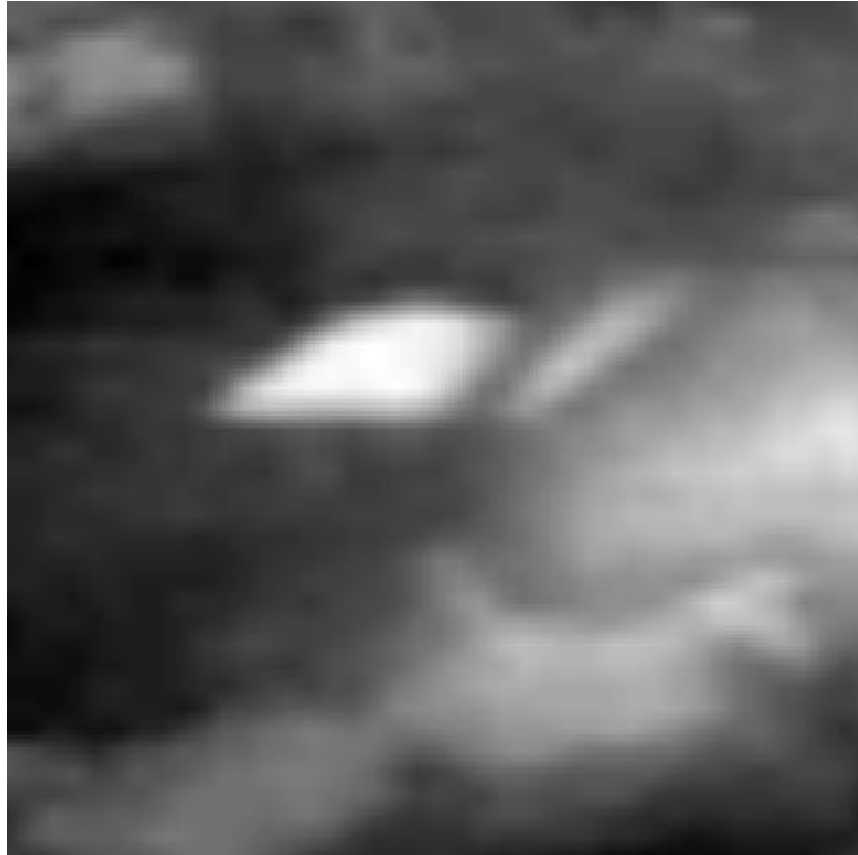
$Oxyz$  – геоцентрическая экваториальная система координат (ГСК),  $\{j, \Theta, \omega, e, a, \vartheta\}$  – элементы орбиты,  $E$  – текущее положение места;

$AB$  – линия узлов,  $\Pi$  – перицентр,  $SP$  ( $OP$ ) – линия аписид,  $C$  – день весеннего равноденствия.

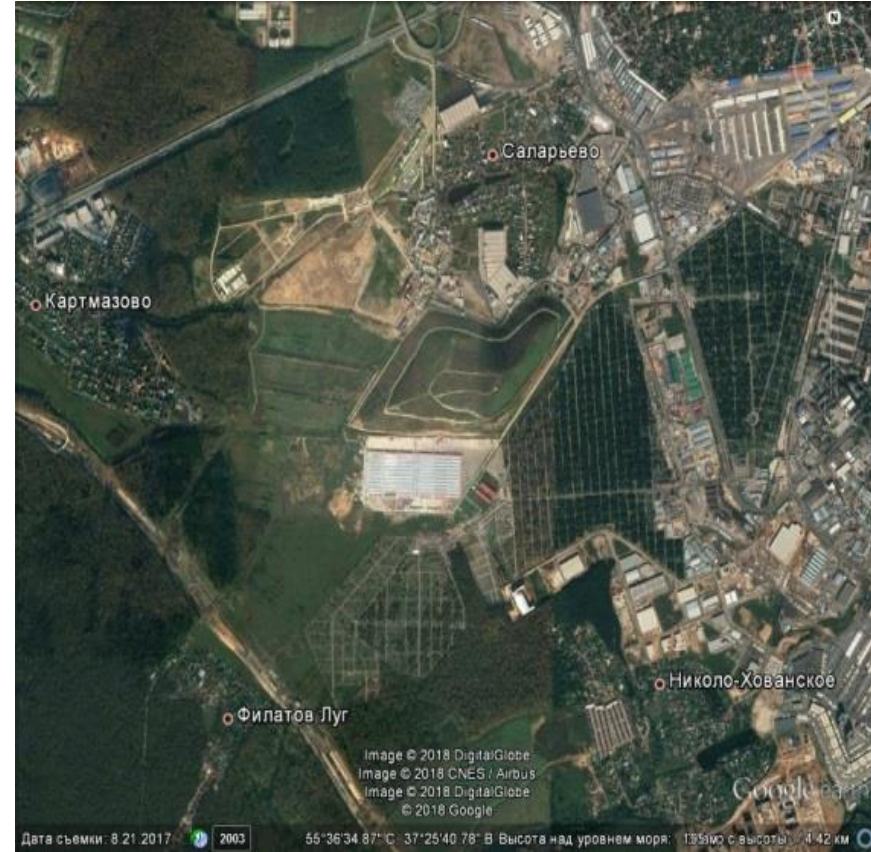


# Оценка освещённости в окрестности свалок

# Область наблюдения



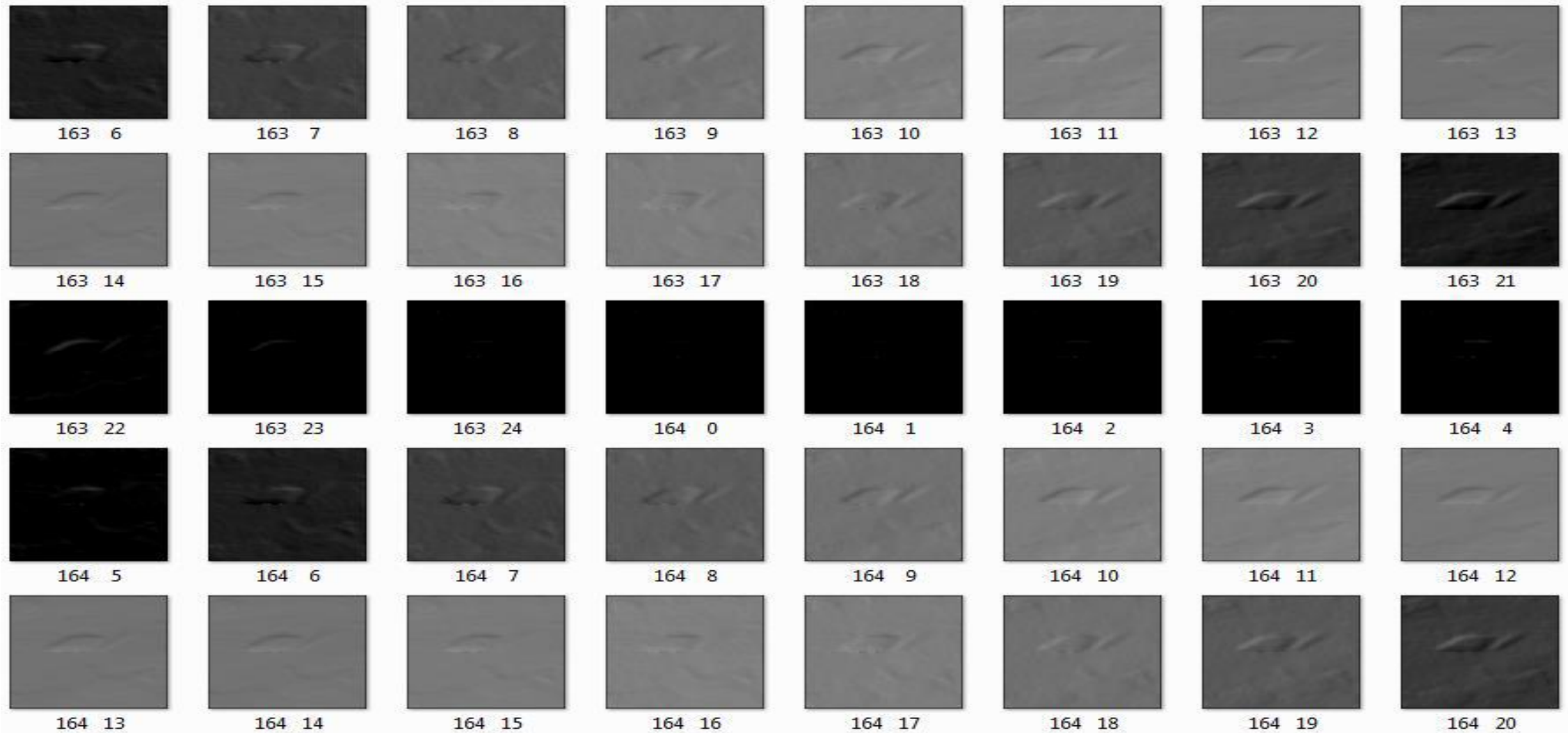
*Радарное изображение (SRTM)*



*Оптическое изображение (Google Earth)*

*Окрестность рекультивируемого полигона твёрдых коммунальных отходов (ТКО)  
Саларьево, Ленинский район Московского региона*

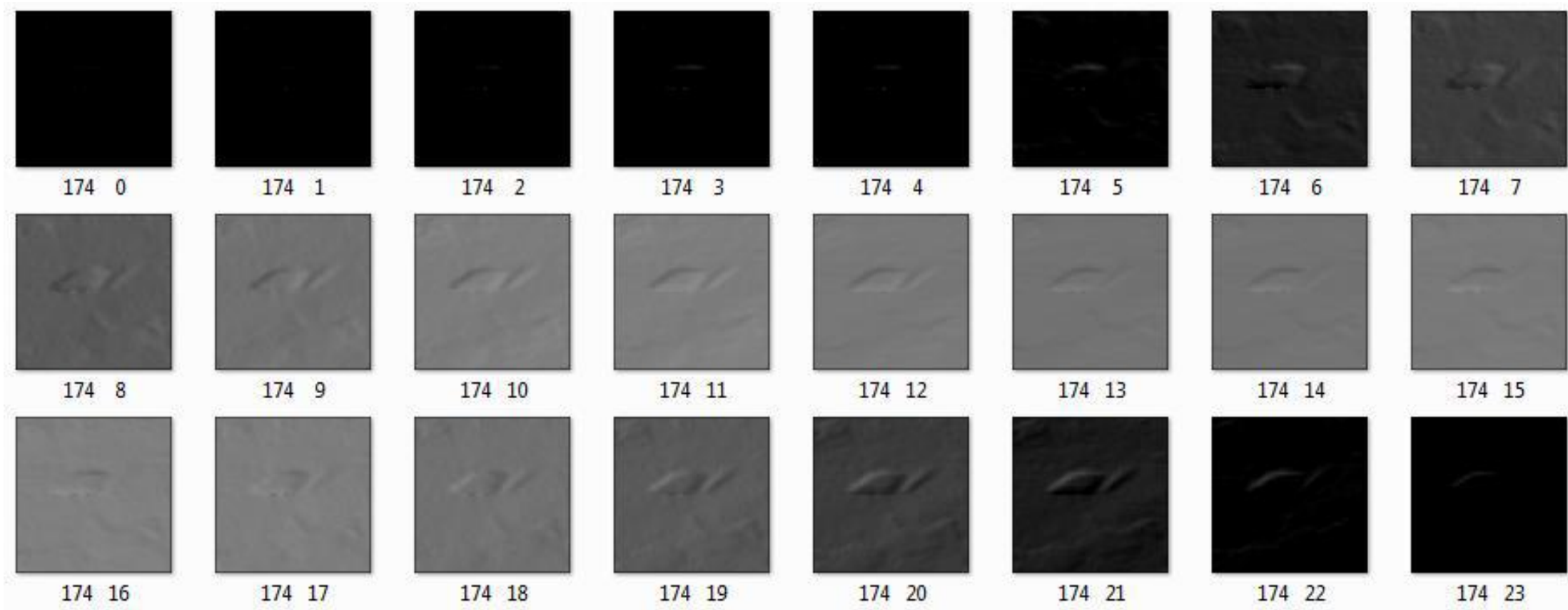
# Изменение освещённости во времени



## *Хронологические изменения*

(фрагмент, временное разрешение – 1 ч; формат файлов – “ $t \tau$ ”,  $t$  – день года,  $\tau$  – время суток)

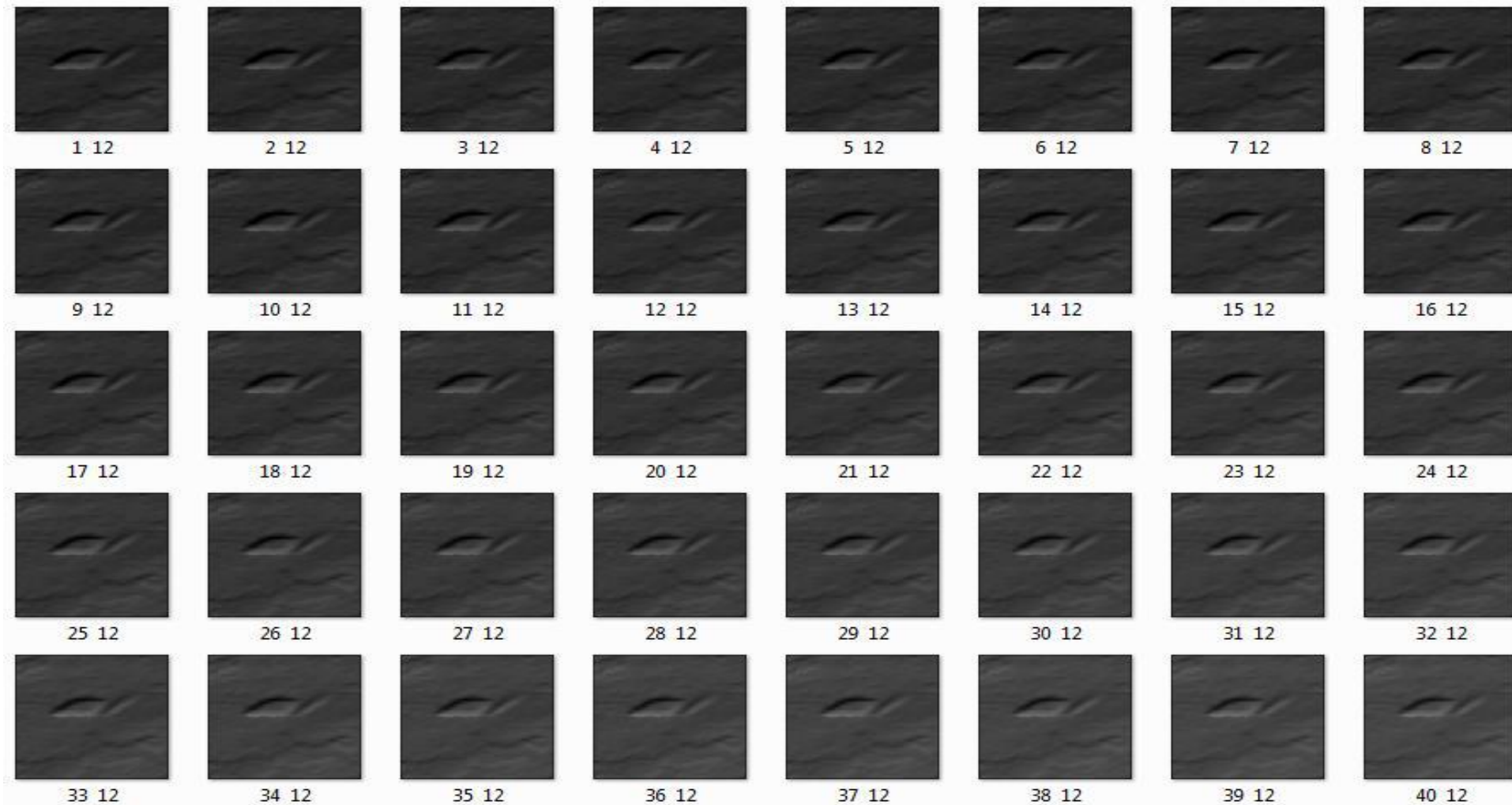
# Изменение освещённости во времени



## ***Суточные изменения***

(22 июня, 0-23 ч., временное разрешение – 1 ч.; формат файлов – “ $t \tau$ ”,  $t$  – день года,  $\tau$  – время суток)

# Изменение освещённости во времени

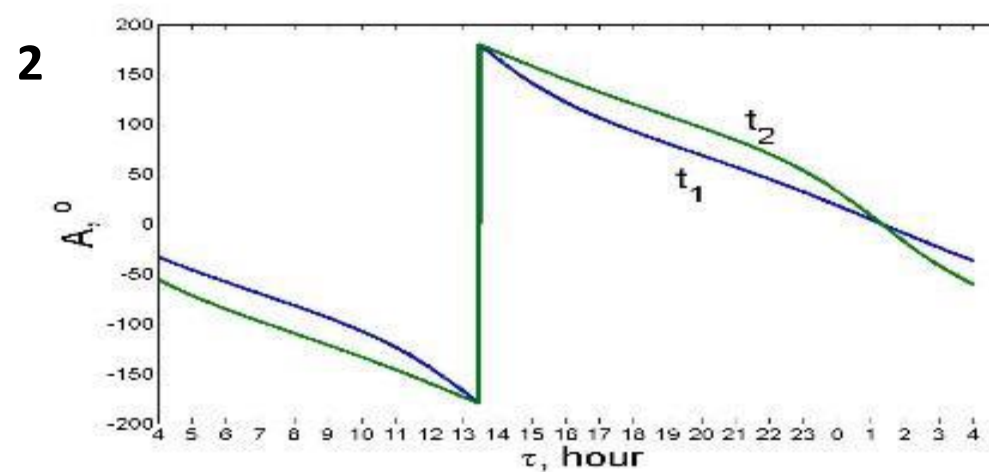
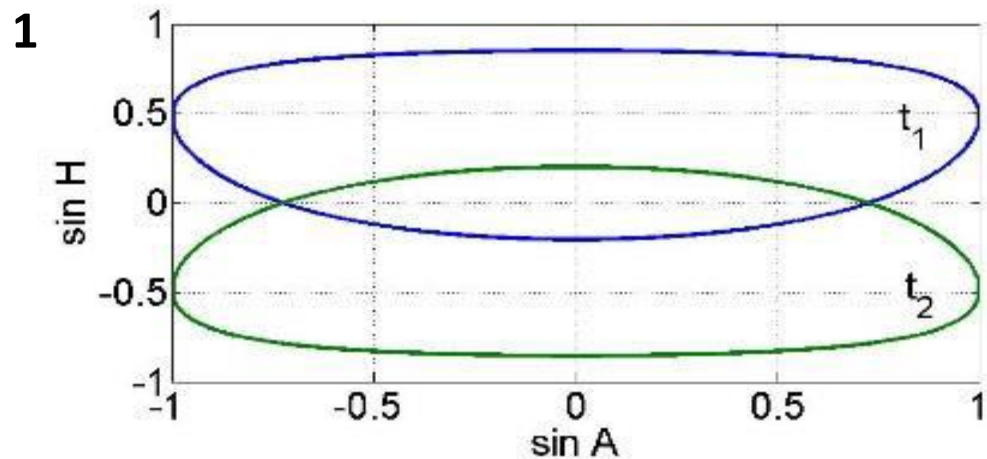


## *Сезонные изменения*

(фрагмент, в 12 часов дня, 1-40 сут., временное разрешение – 1 сут.; формат файлов – “t τ”, t – день года, τ – время суток)



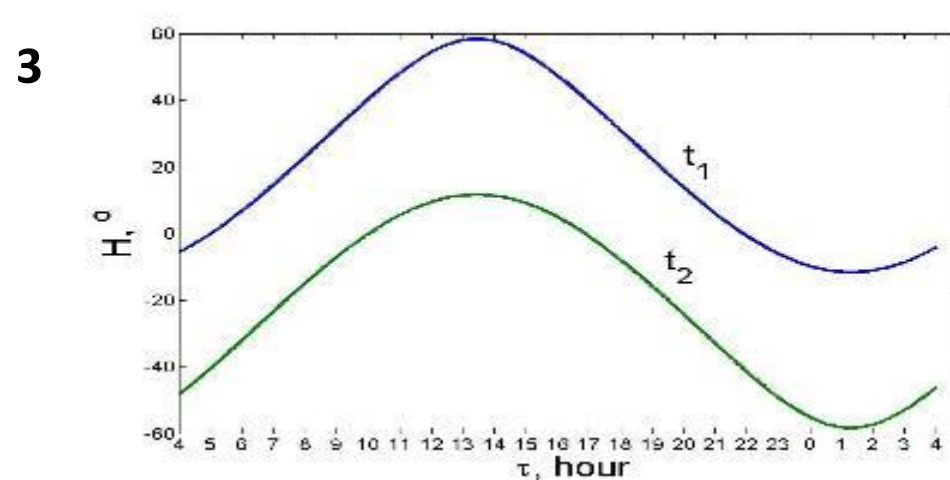
# Характеристики освещённости



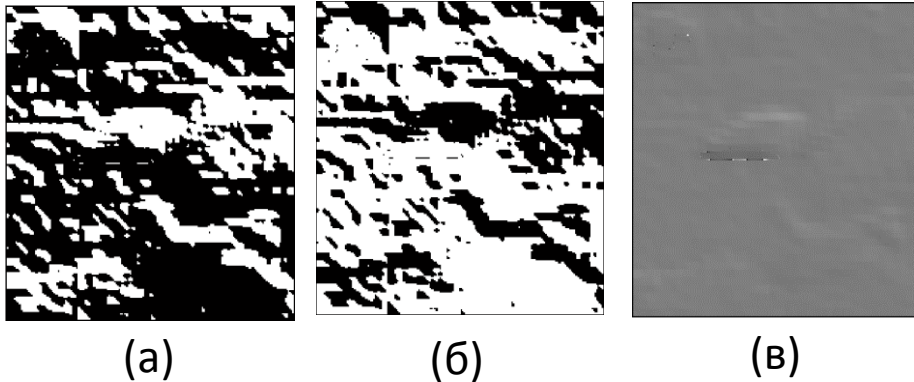
Характеристики освещённости: 1)  $a(h)$ ; 2)  $H(\tau)$ ; 3)  $A(\tau)$   
 $a = \sin A$ ,  $h = \sin H$ ,  $A$  и  $B$  – азимут и высота Солнца,  $\tau$  – время суток.

Изменения показаны для критических моментов сезонного времени:  $t_1=174$  – день летнего солнцестояния (22 июня),  $t_2=357$  – день зимнего солнцестояния (22 декабря).

$\varphi=55^{\circ}36'42.63''C$ ,  $\lambda=37^{\circ}25'48.49''B$  – географические координаты геометрического центра свалки

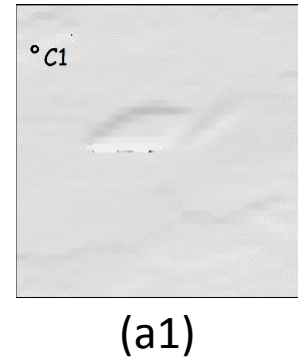


# Интегральные индексы освещённости

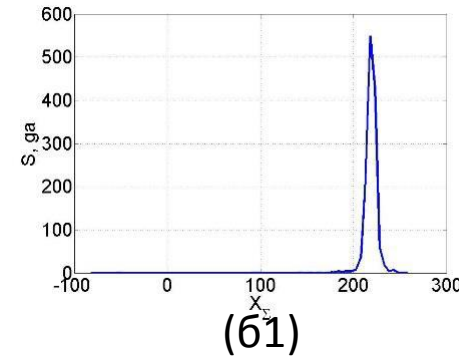


Выделение освещённых (а) и затенённых (б) участков;  
общее изображение освещённости (в) [t=174, τ=5]

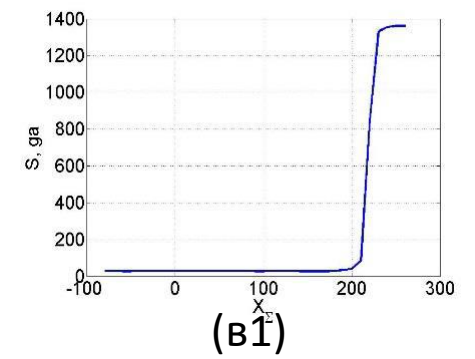
$C_1$  – минимальное, наихудшее значение освещённости (устойчиво низкая плотность растительного покрова, основание свалки),  $C_2$  – максимальное, наилучшее (высокая, лесомассив к северо-западу).



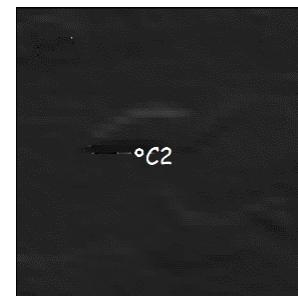
(a1)



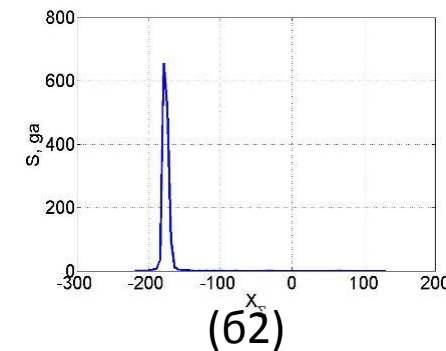
(б1)



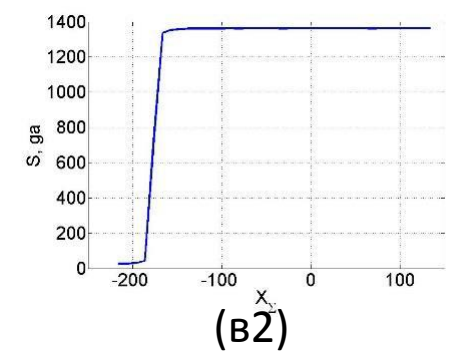
(в1)



(a2)



(б2)



(в2)

Визуальная  
оценка,  
2016, Google  
Earth



$C_1$



$C_2$

## Интегральные характеристики освещённости

Интегральные изображения освещённости (а); гистограммы: распределения (б), кумулятивные (в). (1) – светлое время суток, летний период (τ=11-15 ч, t=150-240 дн), (2) – тёмное время суток, зимний период (τ=0-3 ч, t=335-60 дн) [для Московского региона]

# Оценка индекса реакции растительности и почвы на освещённость



ИРР,  $t_1$



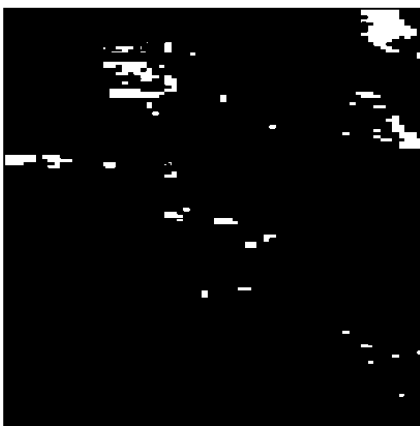
ИРР,  $t_2$



ИРП

$t_1$  – 2001 г., 212 день, ~8.00 утра  
Снимок:  
ID – LT51780212001212MTI00

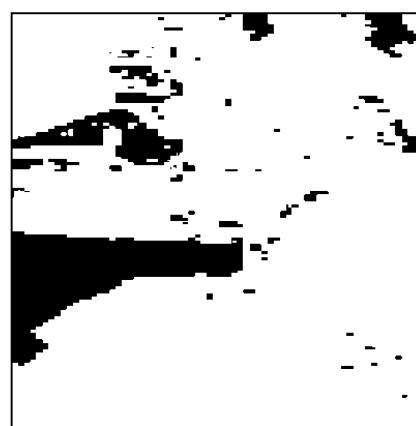
$t_2$  – 2003 г., 209 день, ~8.00 утра  
Снимок:  
ID – LT51790212003209MTI01



ИРР  $\geq 0.1$



ИРР  $\leq -0.1$



$|\text{ИРР}| < 0.1$

Реакция растительности на высотной свалке искажается, прежде всего, за счёт неровности (отклонения от абсолютно ровного «состояния») поверхности, которая влияет на освещённость. Со временем реакция изменилась структурно (лесомассивы, дороги, откос свалки и др.).

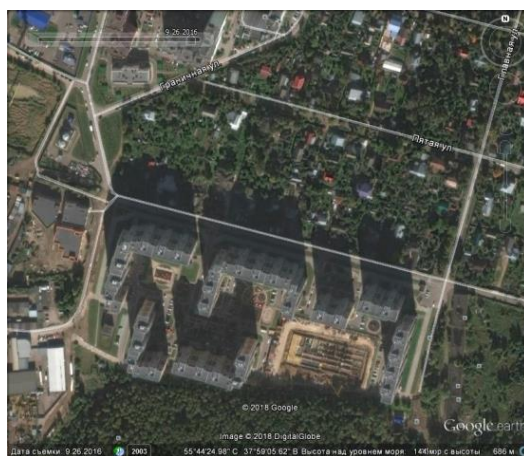
# Оценка освещённости в окрестности застройки



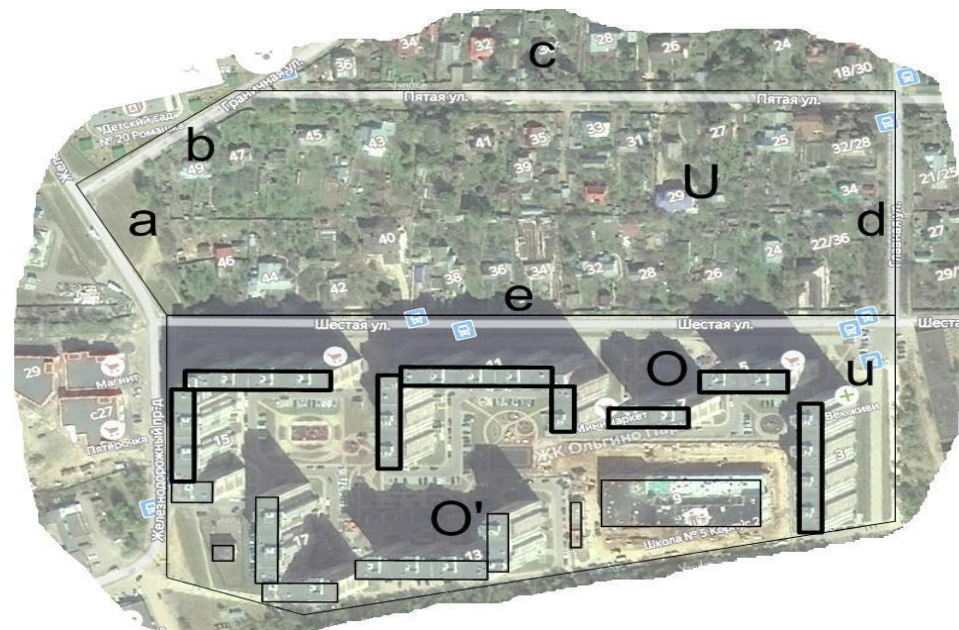
# Область наблюдения



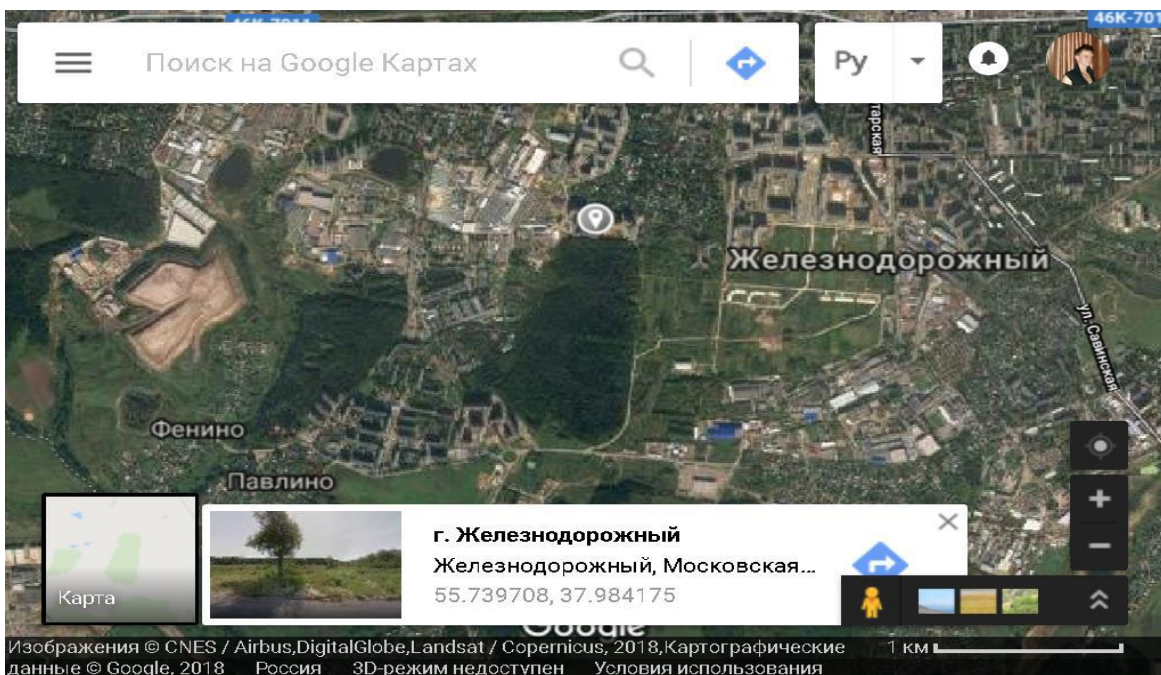
июнь 2003 г. ( $t_1$ )



сентябрь 2016 г. ( $t_2$ )



Разметка элементов сцены, изображение повернуто относительно utm (г. Железнодорожный, Шестая ул.,  $55^{\circ}44'25''\text{C}$ ,  $37^{\circ}59'05''\text{B}$ , карты Google)



Положение области наблюдения на карте

$u$  – источник воздействия (*высокоэтажная застройка*)  
 $U$  – объект воздействия (*квартал, низкоэтажная застройка*)  
 $\{a,b,c,d,e\}$  - дороги, ограничивающие область  $U$   
 источником воздействия), с момента  $t_1$  – 2003 г. до момента  $t_2$  – 2016 г. возникновения комплекса .  
 $O$  ( $O'$ ) – объекты в области  $u$ , формирующие (не формирующие) тень в области  $U$ . Модели  $O$  и  $O'$  – коробки  $R=\{x_i, y_i, z\}$ ,  $i=1..4$  одинаковой высоты  $z=51$  м,  $(x_i, y_i)$  – вершины основания

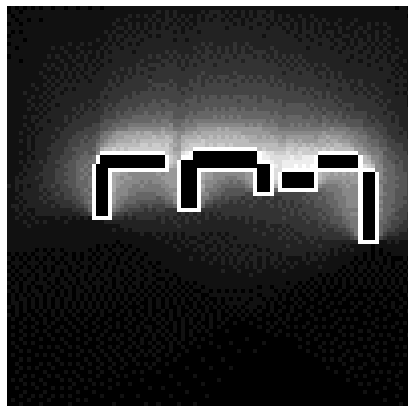


# Изменение тени во времени



Фрагмент бинарного видеоизображения изменения тени  
Формат файлов – " $t \tau$ ",  $t$  – день года,  $\tau$  – время суток

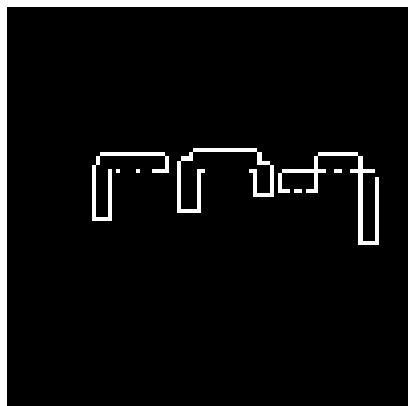
# Интегральные индексы тени



Матрица индекса тени



Выделение источника  
воздействия  $u$

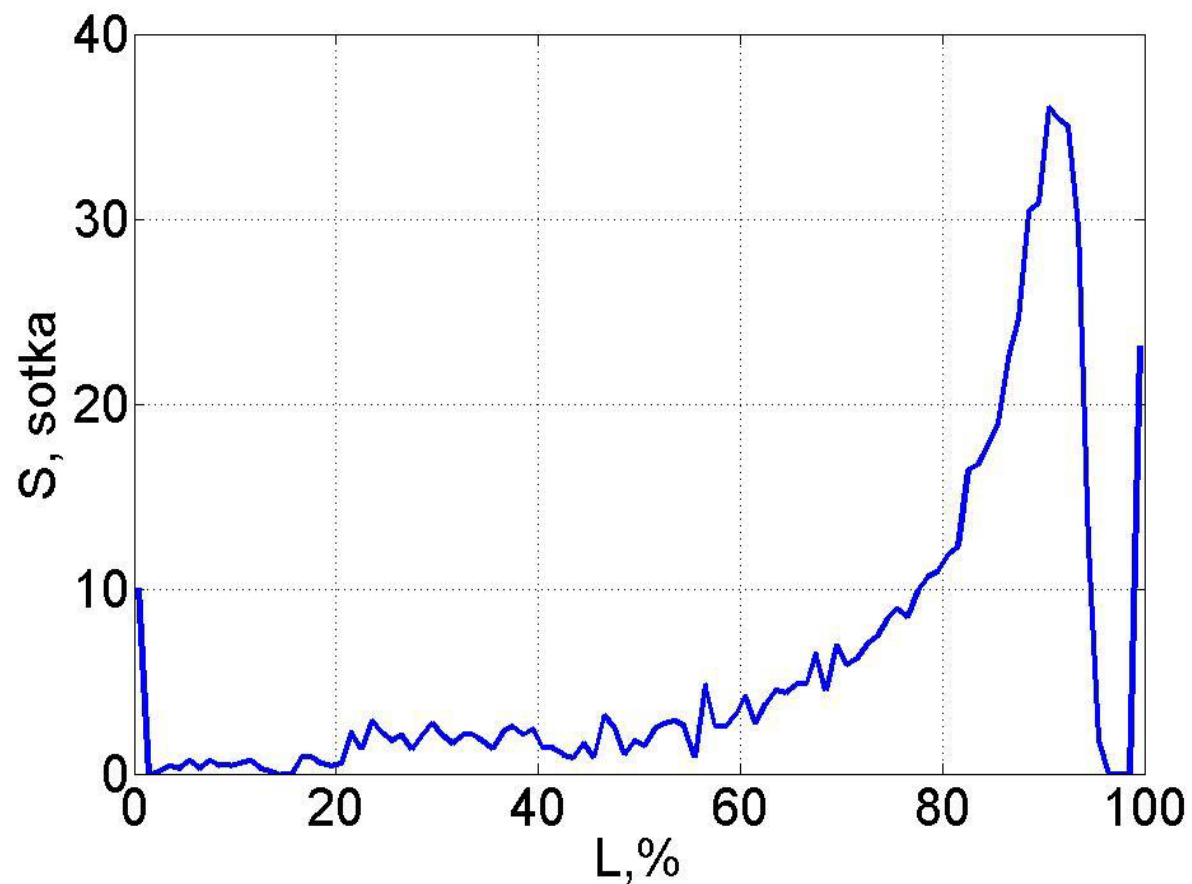


Область  $u_1$   
максимальной тени



Область  $u_2$   
минимальной тени

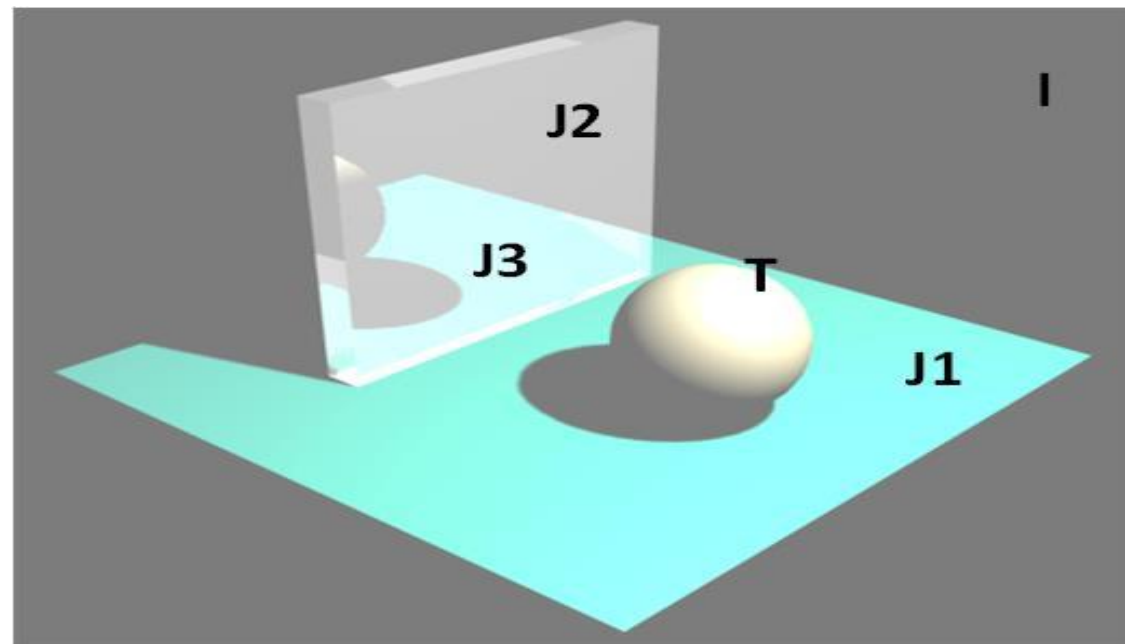
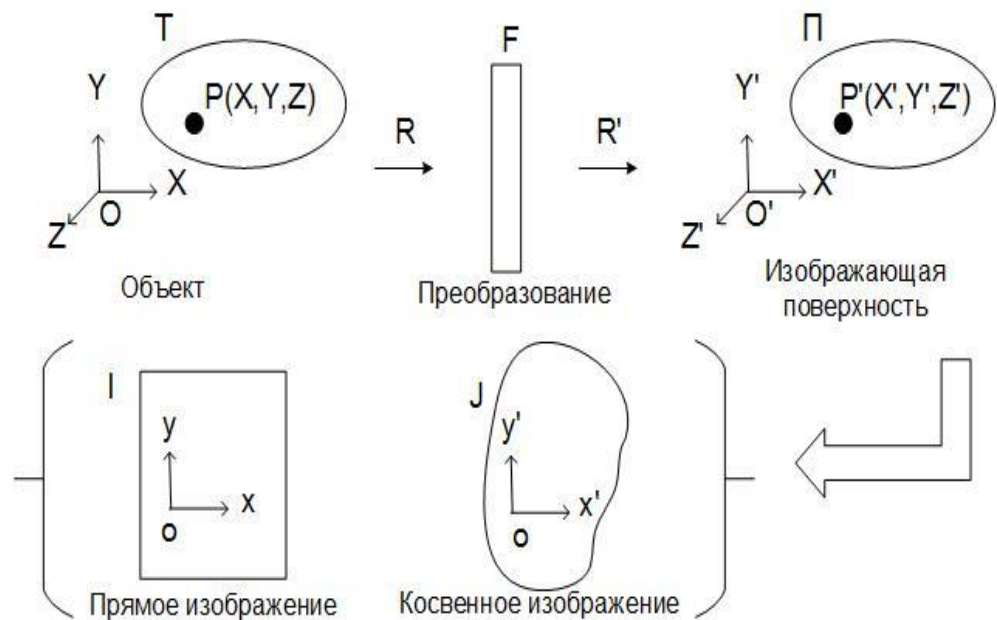
*Расчёты индекса тени*



*Зависимость площади  $S$  поверхности земли от потери  $L$  освещённости в области воздействия  $U$*

**Методика построения  
трёхмерных моделей  
ригидных объектов по  
косвенным изображениям**

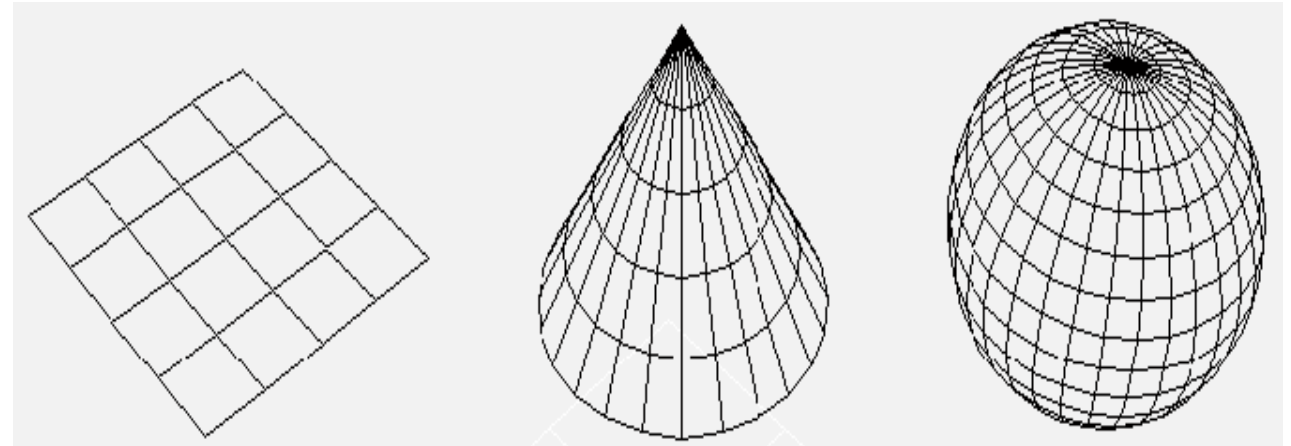
# Прямые и косвенные изображения



Съёмка изображающей поверхности с некоторой камеры  $C$  даёт прямое изображение  $I$ ,  $J$  — изображение, формируемое на этой поверхности.  $OXYZ$  — СК объекта  $T$  и изображающей поверхности  $\Pi$ ,  $oxy$  — СК изображения  $I$ ,  $o'x'y'$  — СК изображения  $J$

Пример оптических преобразований, выполненных в программе 3ds-max.  $T$  — объект (шар),  $I$  — прямое изображение (съёмка с камеры  $C$ ),  $J$  — варианты косвенных изображений ( $J1$  — тень объекта,  $J2$  — отражение объекта,  $J3$  — отражение тени объекта)

# Общая схема методики



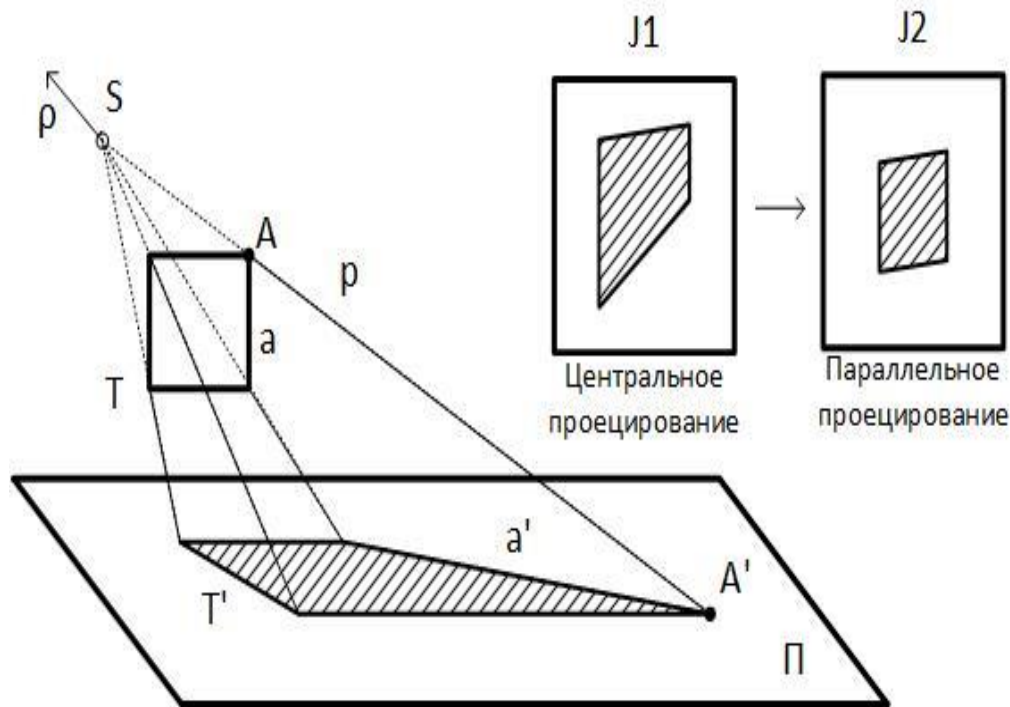
**Примеры координатных сеток, наносимых на прямые или косвенные изображения**

Оптические преобразования: образование тени, отражение, преломление, трансляция, оптическое увеличение или уменьшение, aberrации света и др.

$$X = F_x(Z, R'), Y = F_y(Z, R')$$



# Оптическое преобразование изображений тени



**Формирование изображений тени**

Тень – след от предмета, оставленный на поверхности при подведении источника светового излучения. Сцена состоит из объекта  $O$ , изображающей поверхности  $F$  и источника  $S$ , отнесённого на расстояние  $\rho$  от точки  $A$  объекта  $O$ . Точка  $A$  даёт след  $A'$  на поверхности  $F$ . Изображение  $J$  тени бинарное (считаем область фигуры  $T$  тени имеет яркость 1, фон – 0).

При конечном значении  $\rho$  (для искусственных источников освещения) тень формируется как центральная проекция. В этом случае  $F$  имеет вид (по правилам центрального проектирования):

$$p: \frac{X - X'}{Z - Z'} = \frac{X - \alpha}{Z - \gamma}, \frac{Y - Y'}{Z - Z'} = \frac{Y - \beta}{Z - \gamma} \quad (1)$$

$p$  – проектирующая прямая из источника  $S$ , дающая проекцию  $A'$  точки  $A$  на зеркальной поверхности  $\Pi$ ,  $(\alpha, \beta, \gamma)$  – координаты точки  $S$  в СК  $OXYZ$ .

При  $\rho \rightarrow \infty$  (для естественных источников, как Солнце (первичный) или Луна (вторичный)). В этом случае  $F$  имеет вид (по правилам параллельного проектирования):

$$p: \frac{X - X'}{\alpha} = \frac{Y - Y'}{\beta} = \frac{Z - Z'}{\gamma} \quad (2)$$

$p$  – проектирующие прямые из точек  $A$  в точки  $A'$  поверхности  $\Pi$ ,  $\alpha, \beta, \gamma$  – параметры прямых.

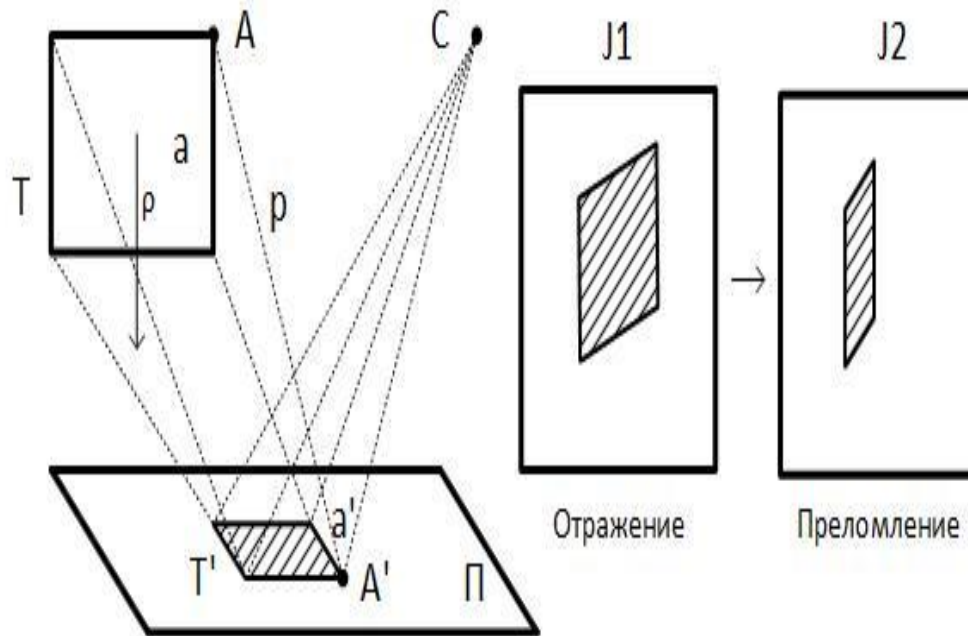
# Оптические преобразования изображений отражения и преломления

По векторному закону зеркального отражения света  $F$  имеет вид

$$\omega: \bar{v}_2 = \bar{v}_1 - 2(\bar{v}_1 \cdot \bar{n})\bar{n}$$

$$\bar{v}_1 = \bar{V}_1/V_1, \bar{v}_2 = \bar{V}_2/V_2, \bar{n} = \bar{N}/N, G' = g'(X', Y') - Z'$$

$$\bar{V}_1 = [X' - X \quad Y' - Y \quad Z' - Z], \bar{V}_2 = [X' - \alpha \quad Y' - \beta \quad Z' - \gamma], \bar{N} = \begin{bmatrix} \frac{\partial G'}{\partial X'} & \frac{\partial G'}{\partial Y'} & \frac{\partial G'}{\partial Z'} \end{bmatrix}$$



**Формирование изображений отражения и преломления**

$\omega$  – проецирующая плоскость из камеры  $C$ , дающая точку  $A'$  на поверхности  $F$ ,  $(\alpha, \beta, \gamma)$  – координаты точки  $C$  в СК  $OXYZ$ .

По векторному закону преломления света:

$$\omega: \eta \bar{v}_2 = \bar{v}_1 + \left( \sqrt{\frac{\eta^2 - 1}{(\bar{v}_1 \cdot \bar{n})^2} + 1} - 1 \right) (\bar{v}_1 \cdot \bar{n})\bar{n}$$

$\eta$  – относительный показатель преломления,  $\eta = \varphi_2 / \varphi_1$ , где  $\varphi_1, \varphi_2$  – показатели преломления среды поступающего и преломлённого излучения,  $\Pi$  – граница раздела двух сред (при  $\eta=1$  преобразование преломления вырождается в преобразование отражения).

# Восстановление 3D-модели объекта по изображениям тени

Изображение I, рендер

Изображение J, рендер

Разметка объектов и теней

Размеры объектов

Разметка точек

Скриншот модели

V1 – Вид сверху, V2 – Вид спереди, V3 – Вид слева, V – перспектива

- Точки, видимые на изображениях теней (и объектов)
- Точки, невидимые на изображениях теней (объектов), но восстанавливаемые геометрическими построениями

Восстановим 3D-модели двух ригидных объектов  $T^q$ ,  $q=1..2$  (коробки) по «стереопаре» их теней, заданных в СК  $o'x'y'$ . Считаем поверхность  $\Pi$  плоской, плоскость  $XY$  совпадает с плоскостью  $X'Y'$ , т.е. для любых точек, размечаемых на изображении  $J$ ,  $Z'=0$ . Тени падают на одну поверхность  $\Pi$  от двух источников  $S_1$  и  $S_2$ .  $T_1^1$  и  $T_1^2$  – тени объектов  $T^1$  и  $T^2$  от источника  $S_1$ ,  $T_2^1$  и  $T_2^2$  – тени объектов  $T^1$  и  $T^2$  от источника  $S_2$ .  $T^1$  лежит на плоскости  $\Pi$ ,  $T^2$  висит в воздухе.

При формировании тени в общем случае имеется  $k$  опорных точек, заданных на  $m$  поверхностях, на которые падают тени от  $n_1$  бесконечно удалённых источников и  $n_2$  источников, удалённых на конечное расстояние. Всего  $N_1=2mk(n_1+n_2)$  уравнений вида (1) и (2),  $N_2=2mn_1+3mn_2$  переменных, описывающих преобразование объекта. Критерий расчёта параметров преобразования:  $N_1 \geq N_2$ . В нашем случае:  $n_1=2$ ,  $n_2=0$ ,  $m=1$ , отсюда для определения параметров преобразования необходимо  $k=1$  опорная точка.

# Опорные точки и результаты восстановления 3D-модели

$i$	$(x_1^{i1}, y_1^{i1})$	$(x_2^{i1}, y_2^{i1})$	$i$	$(x_2^{i2}, y_2^{i2})$	$(x_1^{i1}, y_1^{i1})$
1	192 359	192 359	1	273 253	152 265
2	215 359	215 359	2	306 253	185 265
3	259 322	154 331	3	294 242	140 256
4	282 322	177 331	4	325 242	171 256
5	192 326	192 326	5	273 226	152 237
6	215 326	215 326	6	306 226	185 237
7	259 289	154 299	7	294 215	140 229
8	282 289	177 299	8	325 215	171 229

$i$	$(X^{i1}, Y^{i1}, Z^{i1})$	$(X^{i2}, Y^{i2}, Z^{i2})$
1	105.6000 197.4500 0	107.6848 162.6010 60.0333
2	118.2500 197.4500 0	125.8348 162.6010 60.0333
3	105.6000 197.4500 52.0950	107.6533 162.9467 76.4060
4	118.2500 197.4500 52.0950	124.7033 162.9467 76.4060
5	105.6000 179.3000 0	107.6848 147.7510 60.0333
6	118.2500 179.3000 0	125.8348 147.7510 60.0333
7	105.6000 179.3000 52.0950	107.6533 148.0967 76.4060
8	118.2500 179.3000 52.0950	124.7033 148.0967 76.4060

Оценка размеров объекта:

$$\tilde{l}_1 = |X^{81} - X^{71}| = 12.65\text{cm}$$

$$\tilde{w}_1 = |Y^{41} - Y^{51}| = 18.15\text{cm}$$

$$\tilde{h}_1 = |Z^{31} - Z^{21}| = 52.095\text{cm}$$

$$\tilde{l}_2 = |X^{82} - X^{72}| = 17.05\text{cm}$$

$$\tilde{w}_2 = |Y^{42} - Y^{52}| = 15.1957\text{cm}$$

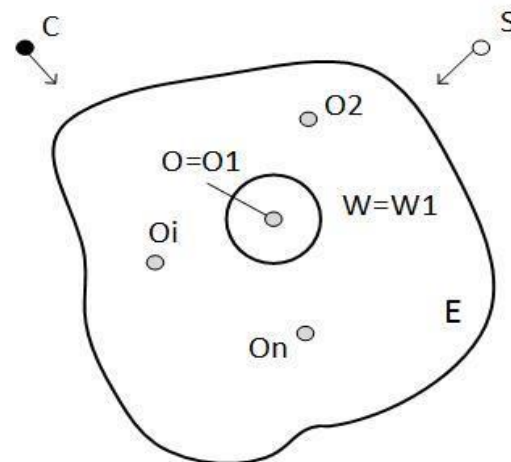
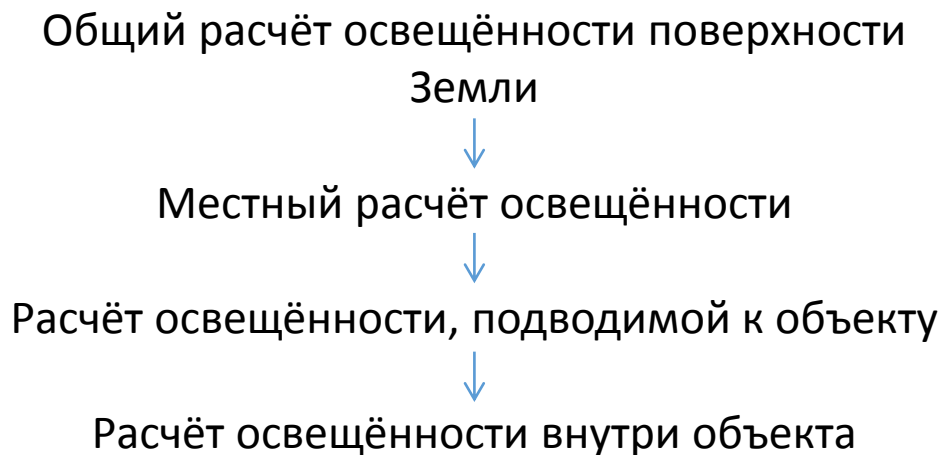
$$\tilde{h}_2 = |Z^{32} - Z^{22}| = 16.3727\text{cm}$$

$$\tilde{l}_{12} \approx l_{12}, \tilde{w}_{12} \approx w_{12}, \tilde{h}_{12} \approx h_{12}$$

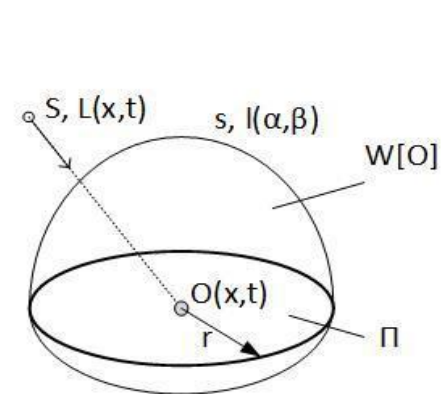
# Методика пространственного моделирования и оценки освещённости объектов земной поверхности



# Общая схема методики



Привязка источника к местности

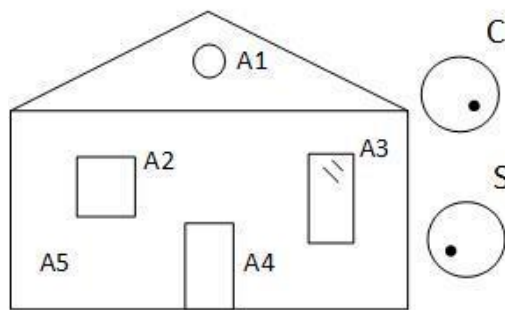


Привязка источника к объекту

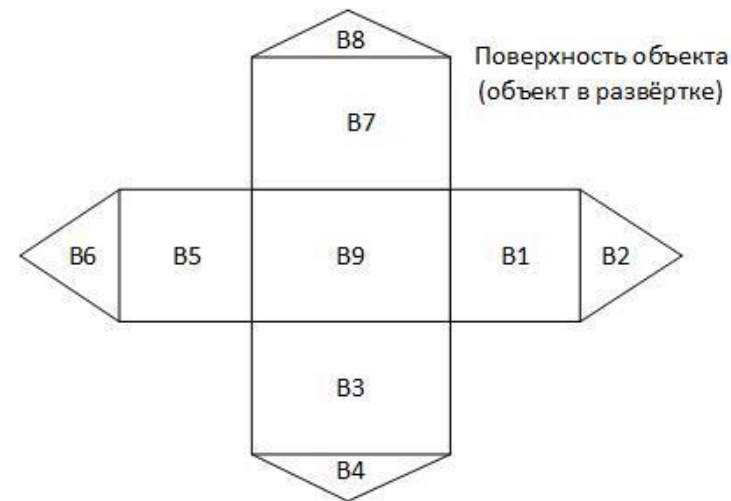
## Привязка внешнего источника освещения к местности и ригидному объекту

Источники освещения: естественный и искусственный; дневной и ночной; точечный, линейный, полигональный, объёмный; направленный и фоновый; внутренний и внешний; первичный и вторичный и др.

Объекты освещения: нестандартными и стандартными; постоянными, переменными, случайными; видимые и невидимые и др.



Участки поверхности объекта R различной световой «проводимости»

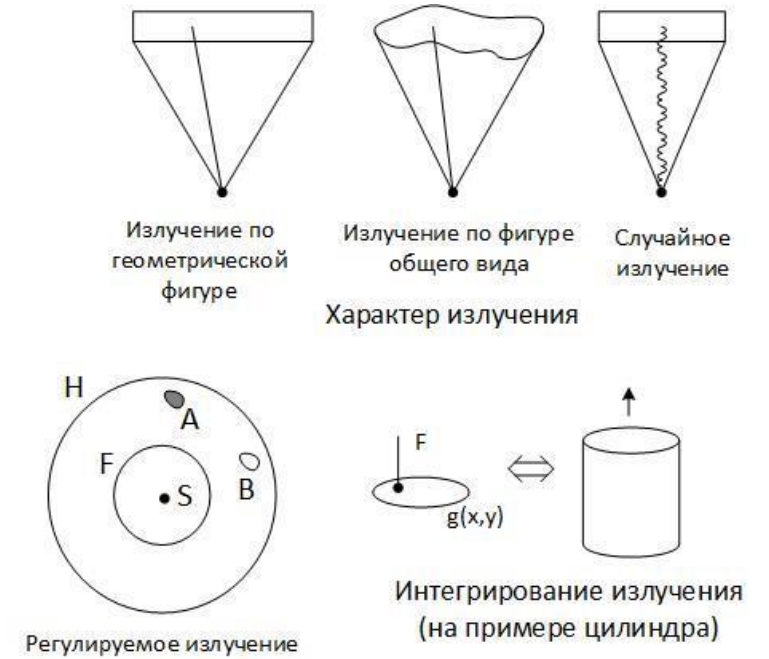
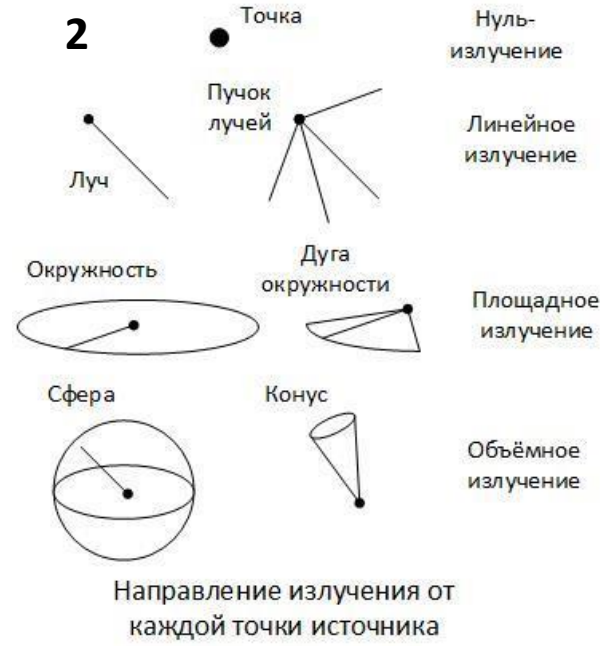
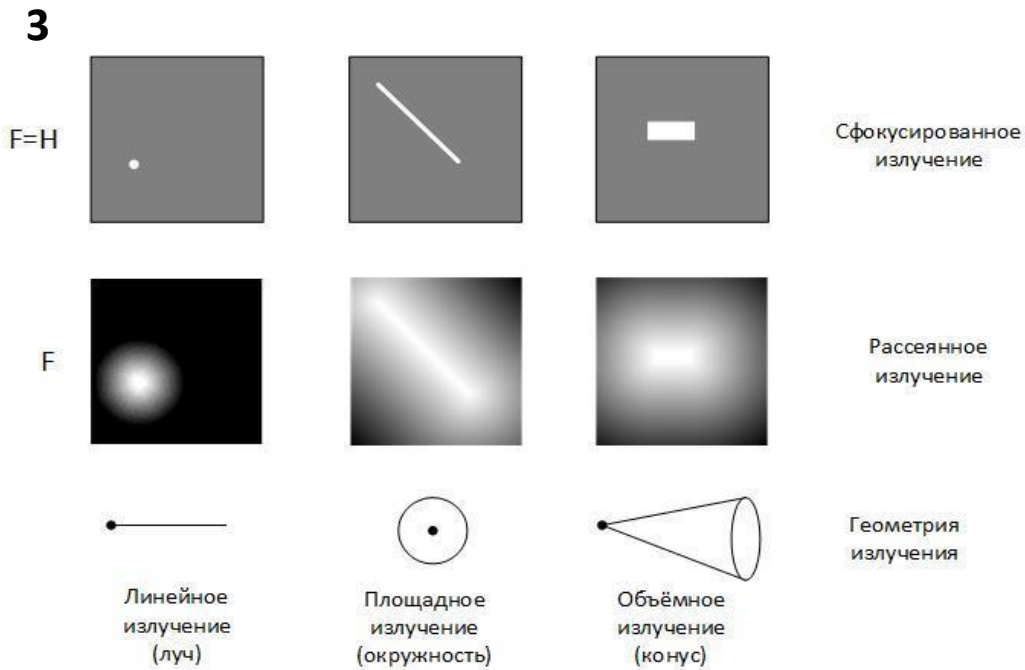
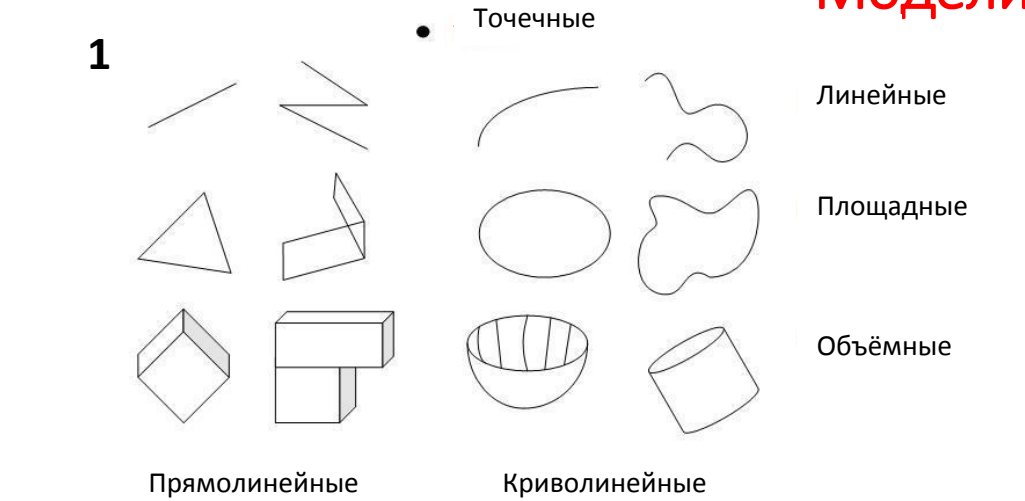


Участки поверхности объекта различного характера освещённости S и видимости C

## Поверхность ригидного объекта (на примере простейшего здания)

# Методика пространственного моделирования и оценки освещённости ригидных объектов:

## Модели источников освещения



1 – геометрия источников освещения

2 – геометрия излучения источников освещения

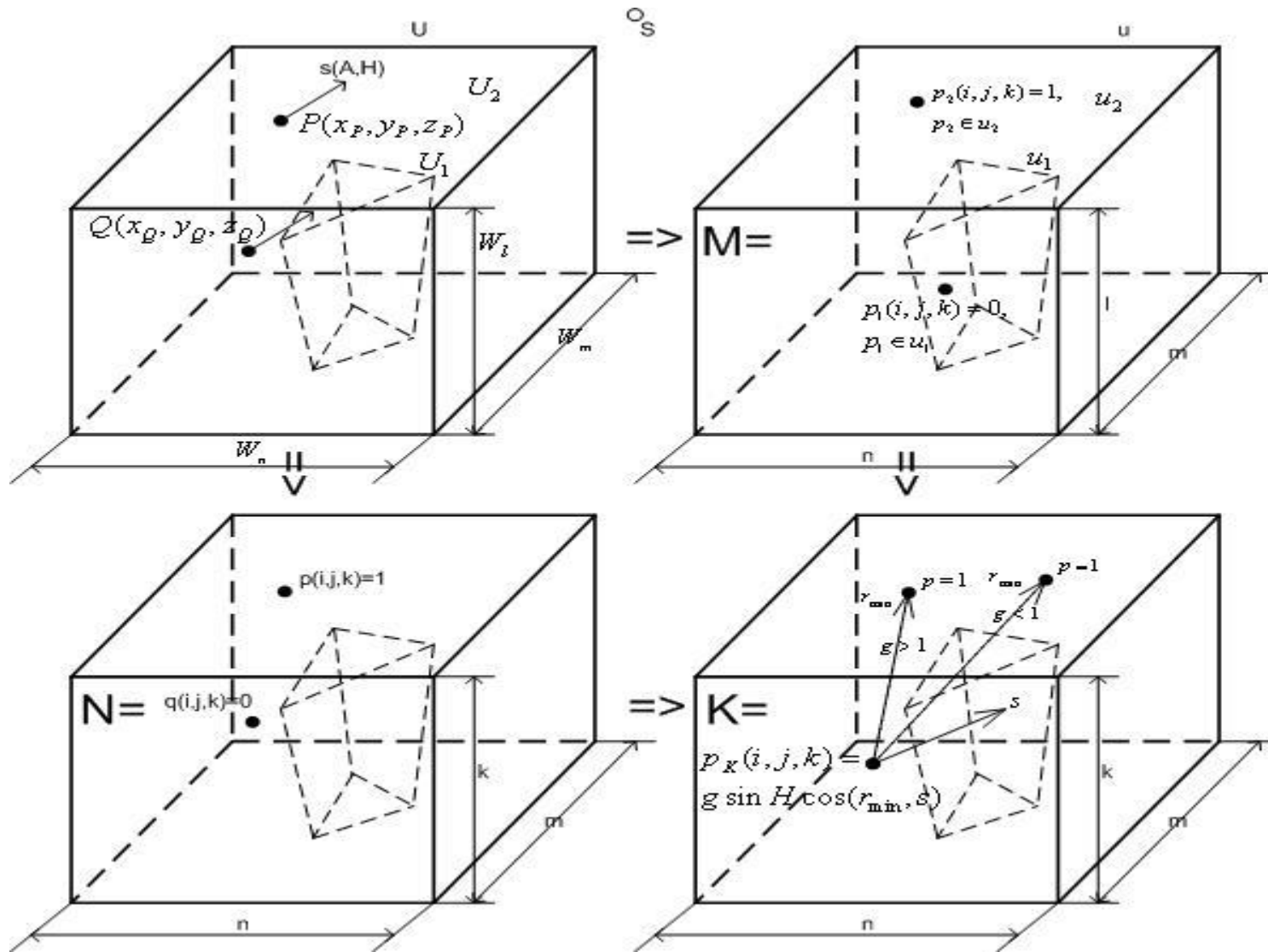
3 – матрицы излучения (на примере луча, окружности и конуса)

$$f(i, j) = \frac{1}{F_m} F(\alpha, \beta), \quad F_m = \max F, \quad i = \left[ \frac{m(\alpha + \pi)}{2\pi} \right], \quad j = \left[ \frac{n(\beta + \pi)}{2\pi} \right], \quad \alpha, \beta \in [-\pi, \pi]$$

$F$  – матрица излучения, задающая интенсивность излучения от точки  $p$  в направлении  $(\alpha, \beta)$  в СК  $ox_1x_2x_3$ ,  $f$  – изображение визуализации ( $i$  – номер строки,  $j$  – номер столбца);  $F_m$  – максимальное значение интенсивности,  $m \times n$  – размер матрицы, дающая точность модели излучения.

Направление задаётся углами  $\alpha$  – долгота, отсчитываемая от оси  $x_1$ ,  $\beta$  – широта, отсчитываемая от плоскости  $x_1x_2$ , в СК  $ox_1x_2x_3$ .

# Трёхмерные изображения освещённости



$U$  – “прямоугольная” область наблюдения,  $(W_m, W_n, W_l)$  – размеры области  $U$ ,  $U_1$  – область «материи», экранирующей излучение объектов (здание),  $U_2$  – область «антиматерии», пропускающей излучение объектов (воздушное пространство);  $u, u_1, u_2$  – оцифрованные области,  $\{m, n, l\}$  – размеры области  $u$ .

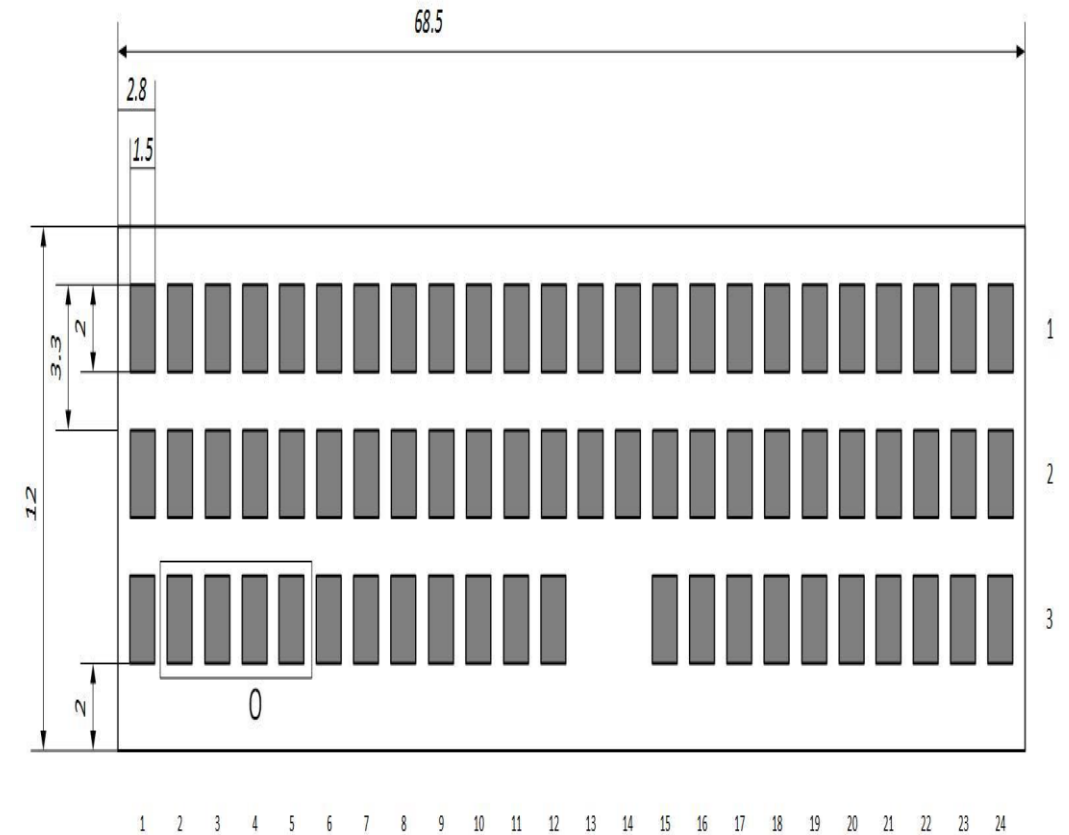
$A$  и  $H$  – азимут и высота источника освещения (Солнце),  $(m, n, l)$  – размеры матриц  $M, N, K$ ;  $M$  – бинарная матрица «материи» и «антиматерии»,  $N$  – бинарная матрица затенённых и освещённых областей,  $K$  – полутоновая матрица интенсивности освещения ( $p_K > 0$  – точка освещена,  $p_K < 0$  – точка в тени)

Проектно-исследовательская  
работа Дементьева И.А. (11  
класс, ГБОУ СОШ г. Москвы № 97,  
программа 3Ds-max, ноябрь-  
декабрь, 2017 г.)

# Моделирование освещённости на примере помещения здания



*Космическое изображение*

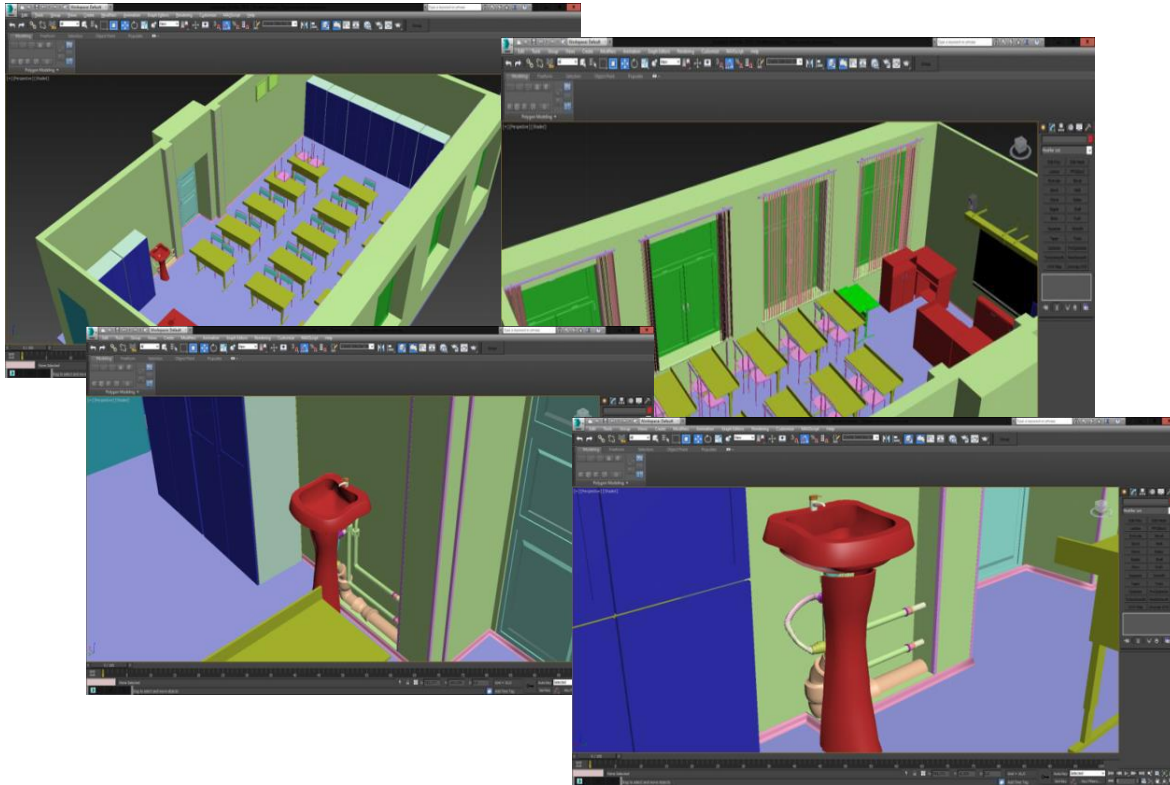


*Модель (матрица окон)*

*Пример здания, снятого с определённого ракурса С  
(ГБОУ СОШ г. Москвы № 97)*



# 3D-модель помещения здания и его освещения



*Скриншоты 3D-модели ригидного объекта (общий вид модели)*

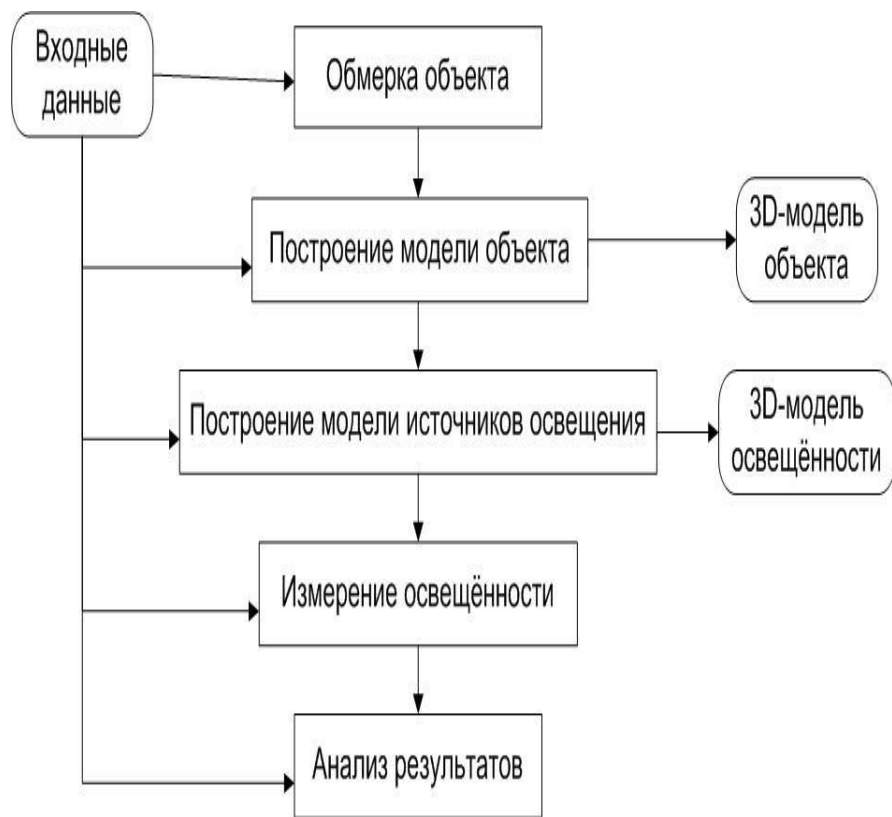


*Рендер 3D-модели объекта с камеры  $S'$  и разметка расчётных точек  $P_i$*

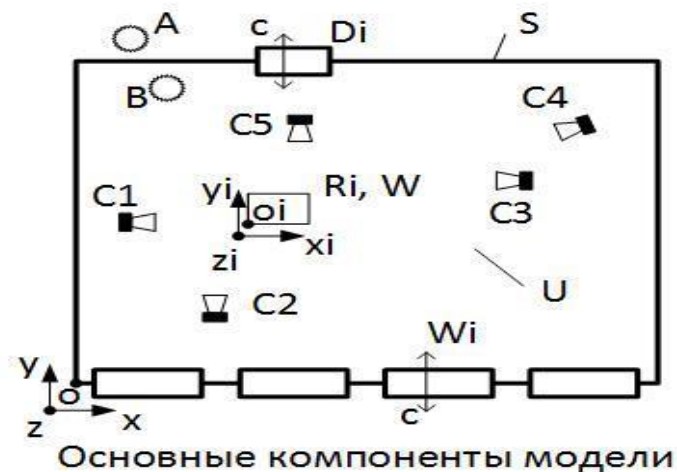
## Измерение освещённости 3D-модели

Оценка освещённости выполнена в характерных точках  $\{P_i\}$ :  $P_1$  – на подоконнике наиболее освещённого окна,  $P_2$  – между тумбой и столом на углу в основании помещения,  $P_3$  – на углу наиболее удалённой школьной парты.  $Ox_1x_2x_3$  – местная СК, привязанная к объекту (координаты – в метрах): правая СК:  $o$  – в углу помещения в основании,  $x_1$  – параллельно освещённой стене (с окнами) помещения,  $x_2$  – параллельно «глухой» стенке помещения,  $x_3$  – по углу помещения. По расчётам в пространственной области  $U$  помещения освещённость меняется в диапазоне от 0 до  $\sim 750$  Лк, в точке  $P_1$ , координаты  $\sim (650, 0, 70)$  – максимальное значение освещённости  $\sim 750$  Лк, в точке  $P_2$ , координаты  $\sim (240, 680, 70)$  – среднее значение освещённости  $\sim 250$  Лк, в точке  $P_3$ , координаты  $\sim (60, 0, 0)$  – минимальное значение освещённости  $\sim 0$  Лк. В областях  $v$  поверхностей школьных парт освещённость лежит в диапазоне  $\sim (250-600)$  Лк, что соответствует нормам СНиП. Подоконники засвечены, а парты, прилегающие к окнам, имеют избыточное значение освещённости. Благоприятное значение в соответствии со стандартами СНиП для рабочих и учебных помещений составляет  $\sim (200-500)$  Лк.

# Пространственное моделирование реальных сцен и освещённости в программе 3ds-max в проектной деятельности школьников



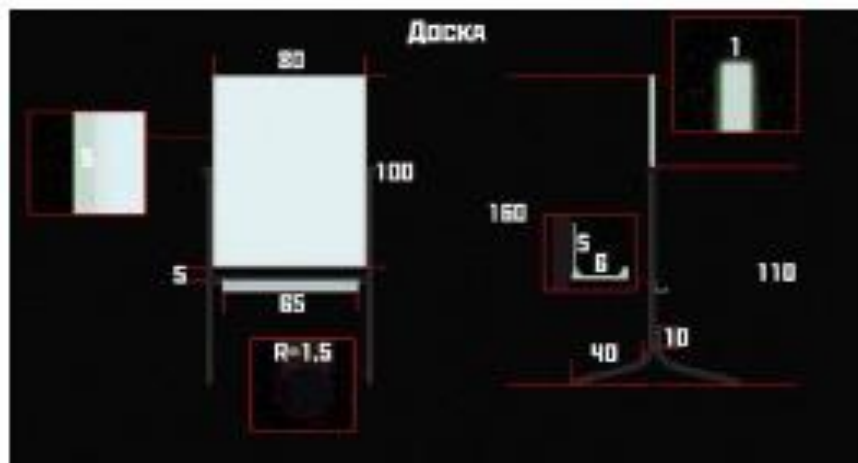
**Общая схема исполнения проектной работы по 3D-моделированию освещённости ригидного объекта**



**Общая схема модели**

Помещение имеет определённый спектр  $k(q)$  внутренних объектов, всего ~50 классов и ~1000 объектов

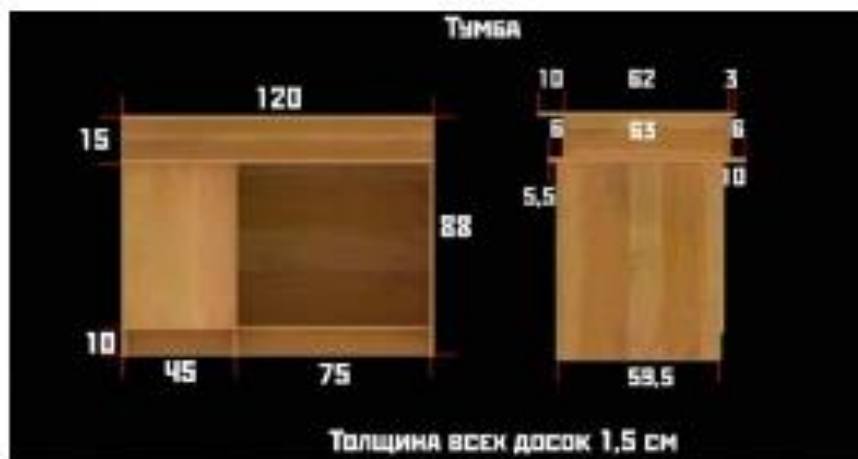
# Чертежи внутренних объектов



Доска



Парта учителя



Тумбы



Несущие стены



# Моделирование текстур поверхностей



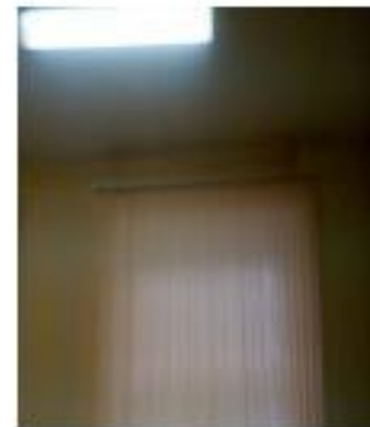
(a1)



(a2)



(a3)



(a4)



(b1)



(b2)



(b3)



(b4)

*Примеры фотографий (а) и выделенных на базе них текстур поверхностей (б), накладываемых на объекты: 1) «дерево», 2) «линолеум», 3) «кафель», 4) «жалюзи»*



# Точность визуализации



(a)



(a)



(б)



(1)



(2)



(3)



(4)

Точность визуализации модели освещённости: а) фотография ( $\sim C_5$ ), б) рендер ( $C_5$ )

Точность визуализации модели области наблюдения: а) модель помещения (рендер, камера  $C_1$ ); б) фотографии внутренних объектов (на примере текстуры «бумаги»)

## Снимки модели заданного режима с разных камер



(a)



(б)



(в)

Снимки 3D-модели помещения для установленного режима  
источника В с камер: а)  $C_1$ ; б)  $C_2$ ; в)  $C_3$



# Снимки модели при различных режимах освещения



(1)



(2)



(3)



(4)



(5)



(6)

С камеры  $C_4$ , источники  $B$

## Снимки модели при подключении и отключении источников освещения



(a1)



(a2)



(a3)



(б1)



(б2)



(б3)

Снимки 3D-модели помещения при подключении (а) и отключении (б) источника освещения с камер: 1)  $C_4$ ; 2)  $C_1$ ; 3)  $C_2$  (источник В)



# Снимки модели при подключении и отключении внутреннего и внешнего источника освещения



(a1)



(a2)



(б1)



(б2)

Снимки 3D-модели помещения: при подключении *B* и отключении *A*, б) при отключении *B* и подключении *A*; 1) с камеры  $C_1$ , 2) с камеры  $C_5$



# Выводы

- С точки зрения цифровой обработки освещённость представляется 2D-индексом (индекс подстилающей поверхности) или 3D-индексом (в каждой точке трёхмерного пространства), изменяемый во времени. В этой связи освещённость рассматривается в общем как пространственный параметр, для которого решается одна из прикладных задач цифровой обработки трёхмерных изображений (растровых и векторных).
- Предложен ряд методик моделирования освещённости, в частности: оценка реакции растительности и её изменения во времени на плотность светового потока; построение 3D-моделей ригидных объектов с помощью координатных сеток по косвенным изображениям; моделирование излучения, источников и объектов освещения в области наблюдения с применением методов космического мониторинга и программных средств по 3D-моделированию (Sketch Up, 3Ds-max и др.); оценка освещённости и её распределения внутри полых объектов (зданий, сооружений) по данным их трёхмерных моделей.
- Методики были применены в ряде задач, в частности, при оценке индекса реакции растительности на освещённость в окрестности крупных свалок, при оценке освещённости внутри помещений зданий при заданной подведённой естественной и искусственной освещённости, при оценке изменения освещённости, вызванной застройкой территории.