Сравнения изображений производились при помощи программы 'The Compressonator' [1]. Представленная в таблицах разница MSE соответствует значению квадратичной ошибки в указанной программе [1]. Все измерения производились на машине с процессором Inter Core i7-3770 (3.4 Ghz), 16-ю GB оперативной памяти, видеокартой GTX680 (2 GB видеопамяти) и 64 битной ОС Windows 7.

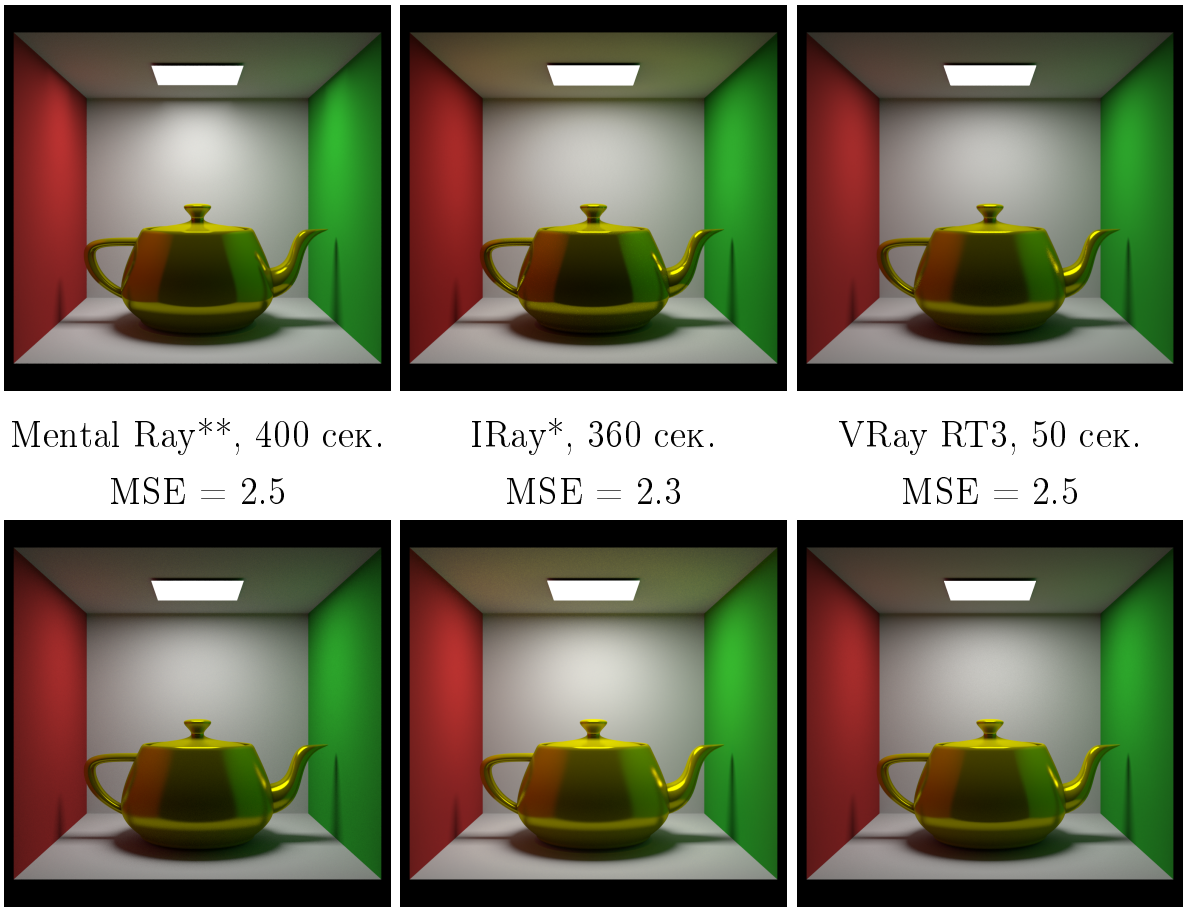
Были использованы следующие версии программ:

1. Mental Ray входящий в поставку 3ds Max 2014
2. IRay входящий в поставку 3ds Max 2014
3. VRay RT 3.0
4. VRay 3.0
5. Corona Alpha v7
6. Octane 2.0
7. Hydra v1.9d

1. Teapot Cornell Box

Несмотря на свою простоту в данном сценарии присутствуют практически все основные эффекты трехмерной компьютерной графики: шумное первичное освещение и мягкие тени, зеркальные блики от источника освещения, отраженные каустики. Являясь геометрически простой, сцена в некоторой степени амортизирует стандартные потери производительности GPU трассировщиков лучей на ветвлениях, а CPU трассировщиков лучей на кэш промахах.

1.1. Монте-Карло трассировка, без каустиков



Mental Ray**, 400 сек. MSE = 2.5 | IRay*, 360 сек. MSE = 2.3 | VRay RT3, 50 сек. MSE = 2.5

VRay3, 600 сек MSE = 2.5 | Corona*, 300 сек MSE = 2.5 | Hydra, 60 сек. MSE = 2.5

Рис. 1. Сравнение на сцене 'Cornell Box'. MSE $\approx$ 2.5. Каустики отключены в тех системах, где предусмотрена такая возможность (системы где такая возможность не предусмотрена помечены '*'). Пояснение к '**': Mental Ray не считает каустики от источника типа 'Sky Portal', но у источника отличается распределение энергии, вследствии чего форма освещения на картинке не совпадает.

Mental Ray, 40 сек.
MSE = 11.34

IRay*, 40 сек.
MSE = 5.9

VRay RT3, 40 сек.
MSE = 3.12

VRay3, 40 сек
MSE = 6.6

Corona*, 40 сек
MSE = 7.5

Hydra, 40 сек.
MSE = 3.7

Рис. 2. Сравнение на сцене 'Cornell Box' для фиксированного времени (40 секунд). Расчет выполнен при помощи трассировки путей. Каустики отключены в тех системах, где предусмотрена такая возможность (системы где такая возможность не предусмотрена помечены '*'). Пояснение к "**": Mental Ray не считает каустики от источника типа 'Sky Portal', но у такого источника отличается распределение энергии, вследствии чего форма освещения на картинке не совпадает.

1.2. Монте-Карло трассировка, с каустиками (разл. методами)

Каустики вычислялись различными методами. Для IRay и Corona это Монте-Карло трассировка. Для VRay3, Mental Ray и Hydra это фотонные карты. Выбор метода основан на возможностей системы (например в IRay и Corona не реализован алгоритм фотонных карт, а VRay наоборот может вычислять каустики только фотонными картами) и на основе наилучших настроек для нее. В системе Corona для вычисления каустиков был использован алгоритм Vertex Connection Merging или VCM [2].

Mental Ray, 1150 сек.
MSE = 2.5

IRay, 360 сек.
MSE = 2.3

VRay RT3*, 240 сек.
MSE = 2.5

VRay3, 900 сек
MSE = 2.5

Corona (VCM), 180 сек
MSE = 2.5

Hydra, 120 сек.
MSE = 2.5

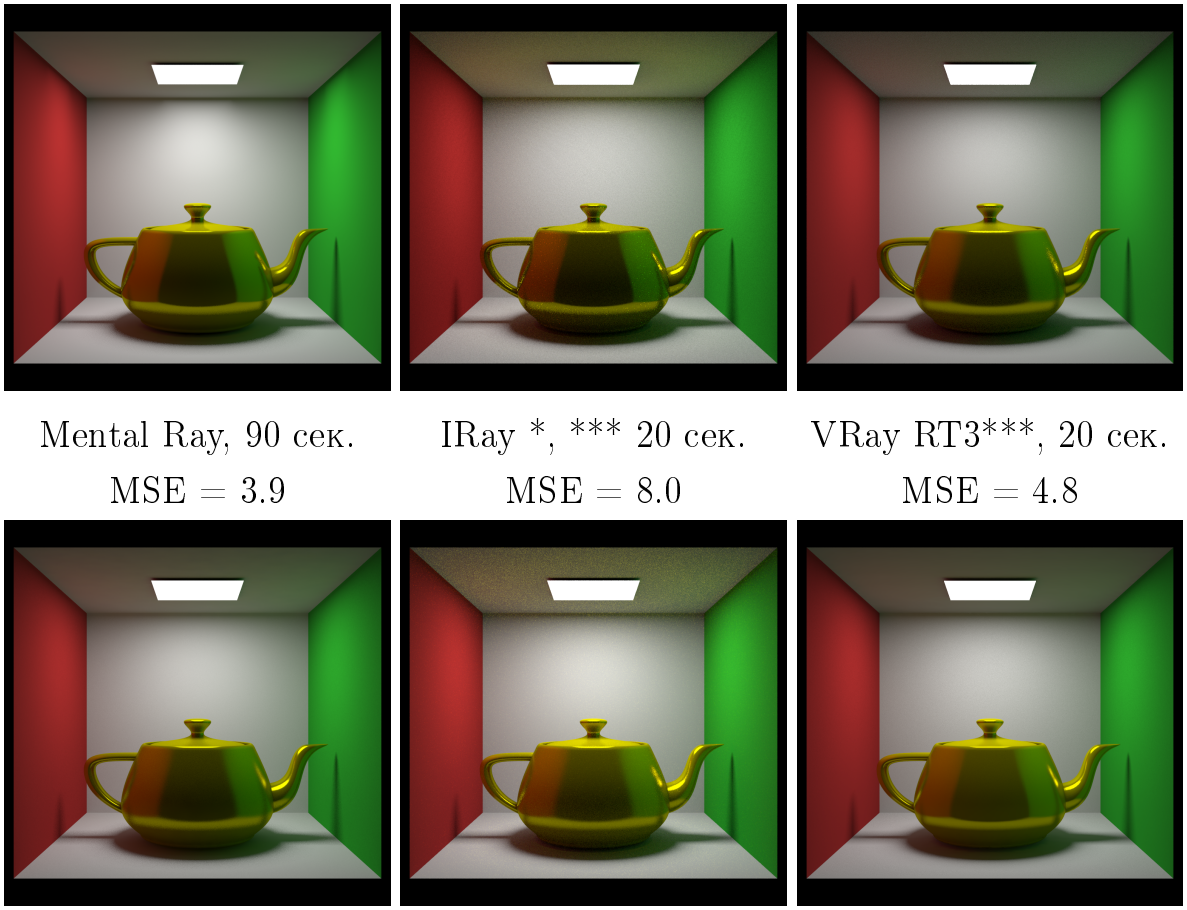
Рис. 3. Сравнение на сцене 'Cornell Box'. MSE $\approx$ 2.5 Каустики включены. * - система VRayRT не способна рассчитывать каустики. Расчет выполнен при помощи трассировки путей и фотонных карт для каустиков (для систем Mental Ray, VRay, Hydra).

Mental Ray, 40 сек. MSE = 10.8 | IRay, 40 сек. MSE = 6.0 | VRay RT3*, 40 сек. MSE = 10.6*

VRay3, 40 сек MSE = 17.3 | Corona (VCM), 40 сек MSE = 6.7 | Hydra, 40 сек. MSE = 4.3

Рис. 4. Сравнение на сцене 'Cornell Box' для фиксированного времени (40 сек). * - система VRayRT не способна рассчитывать каустики. Отсутствие каустика засчитано за ошибку. Расчет выполнен при помощи трассировки путей. Каустики включены.

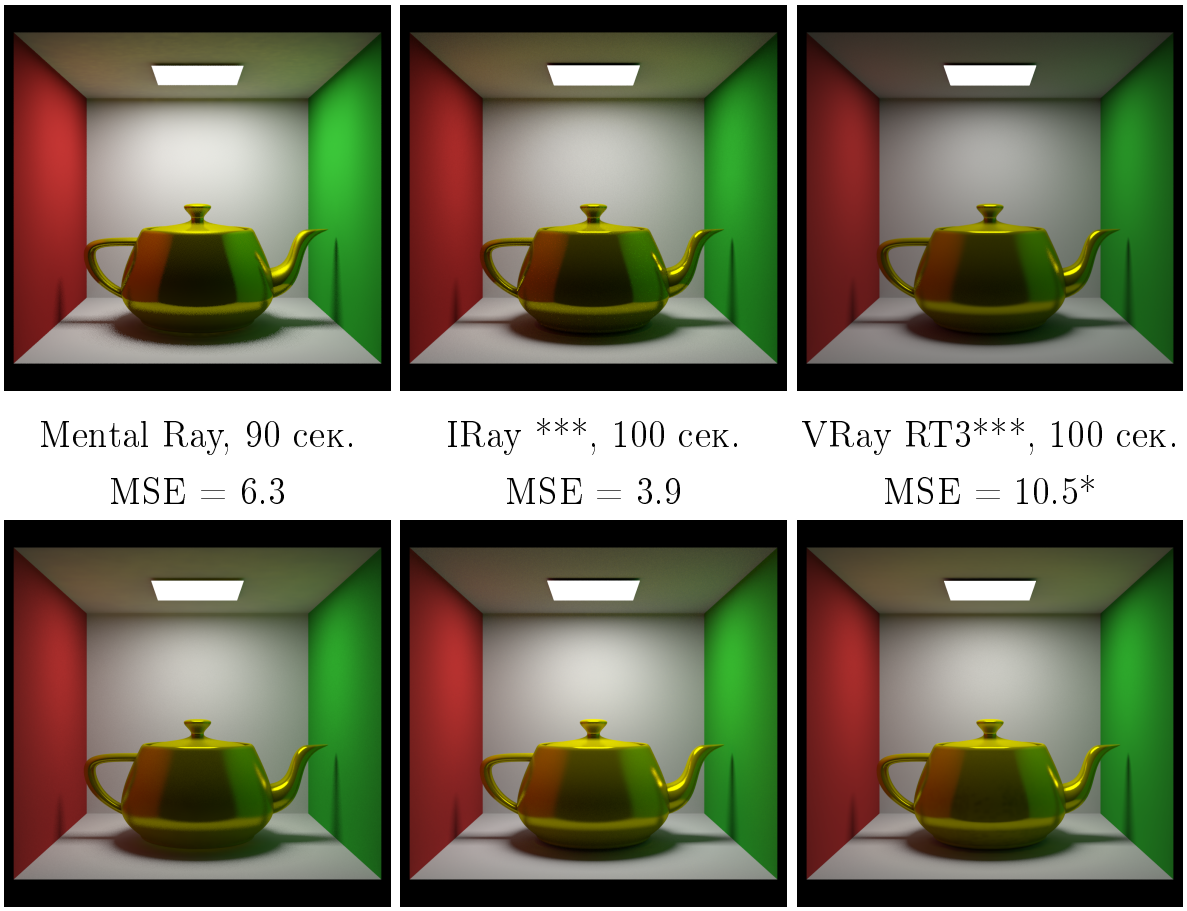
1.3. Кэш освещенности, без каустиков



Mental Ray, 90 сек.	IRay *, *** 20 сек.	VRay RT3***, 20 сек.
MSE = 3.9	MSE = 8.0	MSE = 4.8
VRay3, 73 сек	Corona*, 20 сек	Hydra, 20 сек.
MSE = 8.5	MSE = 9.22	MSE = 3.0

Рис. 5. Сравнение на сцене 'Cornell Box'. MSE $\approx$ 4.0. Расчет выполнен при помощи кэша освещенности и трассировки путей. Каустики отключены в тех системах, где предусмотрена такая возможность (системы где такая возможность не предусмотрена помечены '*'). ** - Mental Ray не считает каустики от источника типа 'Sky Portal', но у источника отличается распределение энергии, вследствии чего форма освещения на картинке не совпадает. *** - в системе не реализован метод кэширования освещенности или аналогичные методы, вследствии чего использовалась Монте-Карло трассировка.

1.4. Кэш освещенности, каустики



Mental Ray, 90 сек. MSE = 6.3 | IRay ***, 100 сек. MSE = 3.9 | VRay RT3***, 100 сек. MSE = 10.5*

VRay3, 240 сек MSE = 5.8 | Corona (VCM), 100 сек MSE = 3.9 | Hydra, 100 сек. MSE = 3.4

Рис. 6. Сравнение на сцене 'Cornell Box'. Время рендера ≈ 100 секунд. Расчет выполнен при помощи кэша освещенности и трассировки путей. Каустики Включены. * - система VRayRT не способна рассчитывать каустики. Отсутствие каустика засчитано за ошибку. *** - в системе не реализован метод кэширования освещенности или аналогичные методы, вследствии чего использовалась Монте-Карло трассировка.

2. Открытая сцена ('Outdoor')

Данная сцена, являясь геометрически сложной (из-за травы), тем не менее, с точки зрения освещения достаточно проста - однородная панорама и один относительно неяркий источник освещения. Время синтеза изображения на такой сцене должно в основном быть обусловлено скоростью трассировки лучей.

Mental Ray, 360 сек. MSE = 3.3 | IRay*, 120 сек. MSE = 2.5 | VRay RT3, 60 сек. MSE = 2.5

VRay3, 240 сек MSE = 5.5 | Corona, 60 сек MSE = 2.7 | Hydra, 60 сек. MSE = 2.7

Рис. 7. Сравнение на сцене 'Outdoor'. MSE $\approx$ 2.5.

Mental Ray, 145 сек.
MSE = 7.7

IRay, 120 сек.
MSE = 2.52

VRay RT3, 120 сек.
MSE = 1.76

VRay3, 127 сек
MSE = 7.0

Corona, 120 сек
MSE = 2.3

Hydra, 120 сек.
MSE = 2.0

Рис. 8. Сравнение на сцене 'Outdoor'. Время рендера ≈ 2 минуты.

3. Crytek Sponza

Оригинальная сцена 'Crytek Sponza' содержит текстуры в различных каналах материалов. Для того чтобы форма освещения и возникающие артефакты были лучше заметны (как для человеческого глаза так и для численного сравнения), текстуры были удалены. В данном сценарии практически все видимое освещение вторичное. В данном сценарии силен вклад от второго и третьего диффузных переотражений, поэтому финальный сбор должен давать значительное ускорение. Данный сценарий наиболее точно отражает скорость расчета вторичного освещения. Сценарий нельзя назвать 'сложным для расчета' (hard sampling), поскольку яркость солнца относительно невелика и солнцем освещена значительная часть поверхности сцены.

3.1. Кэш освещенности + FG (где возможно)

Mental Ray, 960 сек.
MSE = 3.3

IRay, 1400 сек*
MSE = 3.8

VRay RT3, 600 сек*
MSE = 3.8

VRay3, 180 сек
MSE = 3.8

Corona, 600 сек**
MSE = 3.8

Hydra, 60 сек.
MSE = 3.8

Рис. 9. Сравнение на сцене 'Crytek Sponza'. 1024x1024. MSE $\approx$ 4.0. ** Кэш освещенности в системе Corona расчитывал освещение, вызванное лишь третьим переотражением. Метод VCM для системы Corona не улучшил результат. * - в системе не реализован метод кэширования освещенности или аналогичные методы, вследствии чего использовалась Монте-Карло трассировка.

Mental Ray, 60 сек.
MSE = 16.4

IRay, 60 сек*
MSE = 27.7

VRay RT3, 60 сек*
MSE = 21.6

VRay3, 60 сек
MSE = 7.3

Corona, 60 сек**
MSE = 12.6

Hydra, 60 сек.
MSE = 3.78

Рис. 10. Сравнение на сцене 'Crytek Sponza'. 1024x1024. Время расчета ≈ 60 секунд. ** Кэш освещенности в системе Corona расчитывал освещение, вызванное лишь третьим переотражением. Метод VCM для системы Corona не улучшил результат. * - в системе не реализован метод кэширования освещенности или аналогичные методы, вследствии чего использовалась Монте-Карло трассировка.

4. Конференц-зал

Сложность расчета освещения в данной сцене заключается в большом числе источников освещения. Под потолком находится 20 источников прожекторного типа. Тем не менее, каждый из источников светит на относительно небольшой участок сцены, поэтому, если в рендер-системе реализована эффективная схема сэмплирования источников, в каждой конкретной точке сцены большинство источников должны быть эффективно отброшены или учитываться относительно нечасто.

4.1. Монте-Карло трассировка

Mental Ray, 3000 сек.
MSE = 4.8

IRay, 600 сек
MSE = 4.8

VRay RT3, 600 сек
MSE = 5.0

VRay3, 1000 сек
MSE = 4.8

Corona, 180 сек
MSE = 5.0

Hydra, 100 сек.
MSE = 4.8

Рис. 11. Сравнение на сцене 'Конференц-зал'. 1024x1024. MSE $\approx$ 5.0.

Mental Ray, 90 сек.
MSE = 24.2

IRay, 60 сек
MSE = 16.0

VRay RT3, 60 сек
MSE = 18.0

VRay3, 60 сек
MSE = 30.0

Corona, 60 сек
MSE = 9.52

Hydra, 60 сек.
MSE = 6.3

Рис. 12. Сравнение на сцене 'Конференц-зал'. 1024x1024. Время рендера $\approx$ 60 сек.

4.2. Кэш освещенности

Mental Ray, 540 сек.
MSE = 7.6

IRay, 600 сек*
MSE = 4.8

VRay RT3, 600 сек*
MSE = 4.5

VRay3, 300 сек
MSE = 6.3

Corona, 180 сек**
MSE = 5.0

Hydra, 60 сек.
MSE = 4.5

Рис. 13. Сравнение на сцене 'Конференц-зал'. 1024x1024. MSE $\approx$ 5.0. ** - кэш освещенности в короне используется для апроксимации светимости (как карта светимости). * - в системе не реализован метод кэширования освещенности или аналогичные методы, вследствии чего использовалась Монте-Карло трассировка.

Mental Ray, 120 сек.
MSE = 18.9

IRay, 60 сек*
MSE = 16.0

VRay RT3, 60 сек*
MSE = 18.0

VRay3, 120 сек
MSE = 8.5

Corona, 60 сек**
MSE = 15.1

Hydra, 60 сек.
MSE = 4.5

Рис. 14. Сравнение на сцене 'Конференц-зал'. 1024x1024. Время рендера ≈ 60 сек. ** - кэш освещенности в короне используется для апроксимации светимости (как карта светимости). * - в системе не реализован метод кэширования освещенности или аналогичные методы, вследствии чего использовалась Монте-Карло трассировка.

5. Освещение 'Небесными Порталами' (Sky Portals)

Данная сцена демонстрирует достаточно типичный сценарий расчета дневного освещения в помещении. При таком сценарии напротив окон ставятся источники света, имитирующие свет от внешнего окружения, проникающий через окно. Такой источник называется 'Небесным Порталом' (Sky Portal). При правильной реализации 'Небесный Портал' является полностью корректным решением. Такой источник света является средством расчета освещения от окружения при помощи явной стратегии (стратегии сэмплирования источников света). Иными словами, 'Небесный Портал' является не самостоятельным источник света, а всего лишь подсказкой для Монте-Карло трассировки лучей, позволяющей вычислять освещение от окружения более эффективно в тех случаях когда изнутри помещения видима относительно-небольшая часть окружения. Тем не менее, при использовании небесных порталов расчет первичного освещения в определенной степени осложняется по 2 причинам:

1. Небесные порталы могут иметь значительные размеры, в результате чего замедляется расчет мягких теней.

2. Число источников этого типа может быть достаточно большим (5-10), что еще более осложняет вычисление первичного освещения.

На данной сцене были использованы различные комбинации методов для различных систем, наилучшим образом показавшие себя. Например, интересно отметить, что поскольку первичное освещение досточно шумное, метод финального сбора, использующий апроксимацию первичного освещения из фотонной карты в системе Hydra на данной сцене работает в 5 раз быстрее стандартной Монте-Карло трассировки. Интересно дополнительно отметить что для системы Corona карта светимости и финальный сбор дают выигрыш всего лишь в 2 раза. Учитывая время рендера, это можно объяснить более эффективной схемой сэмплирования источников типа 'Небесный портал', что позволяет выиграть время на любой глубине Монте-Карло трассировки пути. Также подобная разница может быть вызвана падением производительности

трассировки лучей на GPU в системе Hydra на глубоких уровнях Монте-Карло трассировки.

Таким Образом:

- Для системы Hydra был использован финальный сбор без кэша освещенности (т.е. попиксельный финальный сбор).
- Для системы Mental Ray был использован метод финального сбора в сочетании с кэшем освещенности.
- Для VRay - карты светимости (называемые в VRay термином 'Light Cache') в сочетании с кэшем освещенности.
- Для Corona - кэш освещенности для 3 переотражения и выше (как карта светимости), попиксельный финальный сбор для 2 переотражения. Такой метод аналогичен попиксельному финальному сбору, который был использован в системе Hydra.
- Для VRayRT и IRay - Монте-Карло трассировка, поскольку другие методы в них не реализованы.

Mental Ray, 330 сек.
MSE = 5.5

IRay, 480 сек
MSE = 5.3

VRay RT3, 900 сек
MSE = 5.0

VRay3, 240 сек
MSE = 5.8

Corona, 80 сек.
MSE = 4.8

Hydra, 120 сек.
MSE = 5.0

Рис. 15. Сравнение для источников типа 'Sky-Portal'. 1024x1024. MSE $\approx$ 5.0.

Mental Ray, 110 сек.
MSE = 11.6

IRay, 120 сек
MSE = 11.1

VRay RT3, 120 сек
MSE = 15.1

VRay3, 180 сек
MSE = 7.3

Corona, 120 сек.
MSE = 4.0

Hydra, 120 сек.
MSE = 5.0

Рис. 16. Сравнение для источников типа 'Sky-Portal'. 1024x1024. Время рендера ≈ 2 минуты.

6. Тест на MLT

В данном сценарии небольшой участок сцены освещается исключительно ярким направленным источником света, имитирующим солнце. Вторичное освещение, вызванное таким освещением является трудным для рассчета. Фотонные карты в сочетании с финальным сбором (как и карты светимости) амортизируют увеличение времени расчета только за счет ускорения вычисления компоненты от третьего и более переотражений. Однако, вычисление компоненты от второго переотражения света данным методом не ускоряется (в системе Hydra финальный сбор дал ускорение в 3 раза по сравнению с обыкновенной Монте-Карло трассировкой). С другой стороны, алгоритм переноса света Метрополиса (MLT) и аналогичные алгоритмы при условии реализации их в той или иной системе должны давать на данной сцене значительное ускорение по сравнению с традиционным методом Монте-Карло и финальным сбором. Интересно отметить, что алгоритм соединения вершин в системе Corona, аналогичный двунаправленной трассировке путей на данном сценарии не дал выигрыша в скорости, а напротив, в 10 раз проиграл стандартному режиму с финальным сбором. Это можно объяснить тем фактом, что большое число световых путей сохраняет вершины на невидимых участках сцены - на крыше и наружных стенах здания. Такие вершины вынуждают трассировщик соединять множество путей заведомо не вносящих вклад в изображение, что приводит к избыточным вычислениям. Существующие методы решени данной проблемы в системе Corona по-видимому не реализованы. Что касается системы IRay, то по-видимому корректно алгоритм MLT в ней не реализован, т.к. при его явном включении (architectural sampler) время расчета не уменьшилось.

Mental Ray, 900 сек.
MSE = 15.1

IRay, 3600 сек
MSE = 5.0

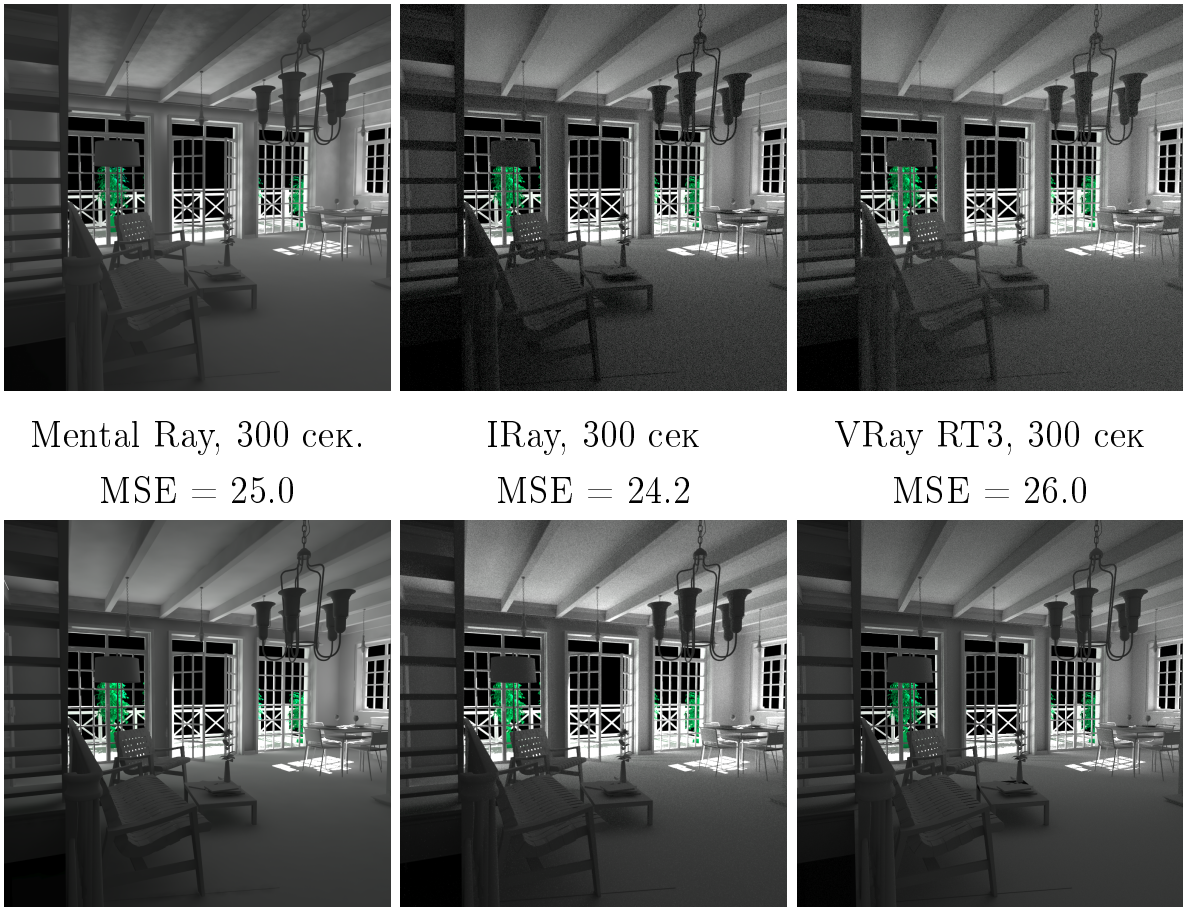
VRay RT3, 4800 сек
MSE = 4.8

VRay3, 1000 сек
MSE = 5.5

Corona, 600 сек.
MSE = 5.0

Hydra, 720 сек.
MSE = 5.0

Рис. 17. Сравнение в условиях сложного диффузного освещения. 1024x1024. MSE $\approx$ 5.0.



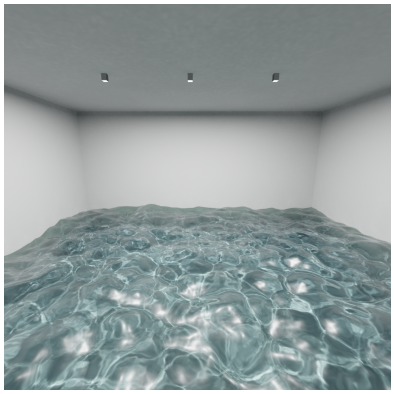
Mental Ray, 300 сек. MSE = 25.0 | IRay, 300 сек MSE = 24.2 | VRay RT3, 300 сек MSE = 26.0

VRay3, 480 сек MSE = 8.3 | Corona, 300 сек MSE = 8.6 | Hydra, 300 сек MSE = 8.3

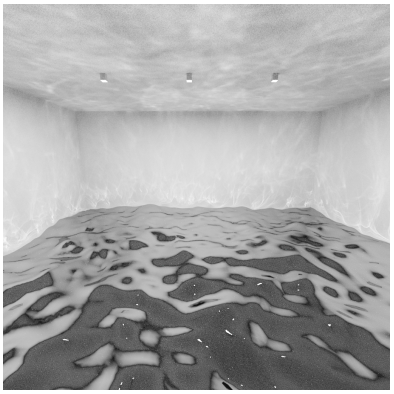
Рис. 18. Сравнение в условиях сложного диффузного освещения. 1024x1024. Время рендера $\approx$ 5 минут.

7. Каустики

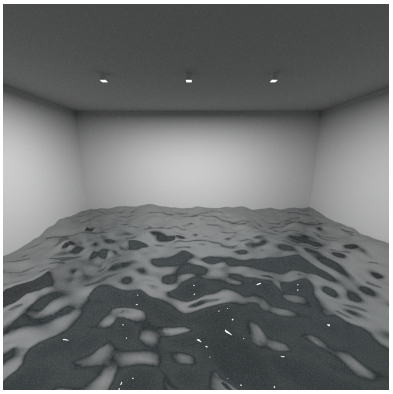
В данной сцене присутствуют отраженные каустики и подводные каустики SDS типа (Specular Diffuse Specular), являющиеся сложными для расчета (hard sampling). Свойства поверхности воды были настроены таким образом, чтобы создавать как подводные так и надводные каустики. К сожалению, для систем Octane и Mental Ray не удалось добиться совпадения яркости отраженных каустик с целевым (по выше описанному плану) изображением. Сделаем послабление для этих систем и будем считать, что сложность всех изображений приблизительно одинакова. Для системы IRay напротив, пришлось сделать поверхность воды зеркальной, поскольку IRay не может эффективно вычислять каустики SDS типа. Это подтверждается наличием импульсного шума на поверхности воды, который представляет из себя каустики, видимые в отражениях. В графиках сравнения индекс производительности системы IRay был разделен на 2 в качестве штрафа за невозможность вычисления корректного изображения. Система VRayRT, не способная к эффективному вычислению каустиков получила 0 баллов на данной сцене.



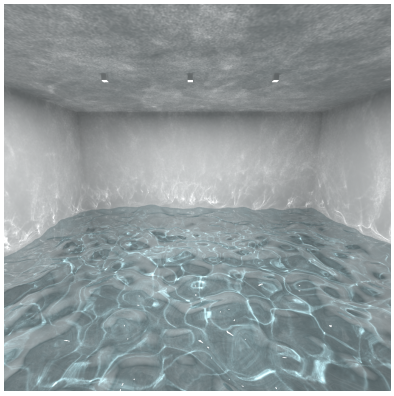
Mental Ray, 180 сек.
MSE = 8.0



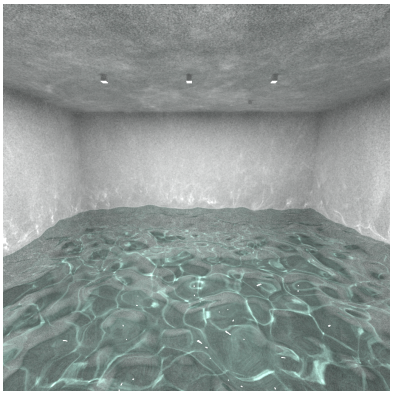
IRay, 60 сек
MSE = 11.6



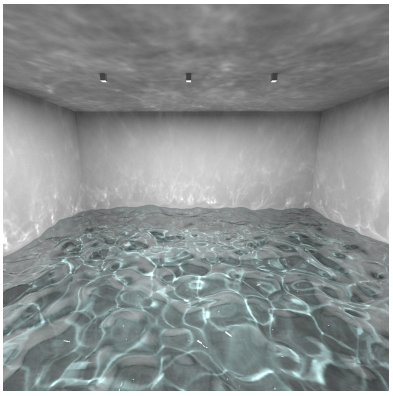
VRay RT3, 60 сек
MSE = 100.0



VRay3, 120 сек
MSE = 7.8



Corona, 60 сек
MSE = 10.5



Hydra, 60 сек
MSE = 5.6

Рис. 19. Сравнение на каустиках. 1024x1024. Время рендера ≈ 1 минута.

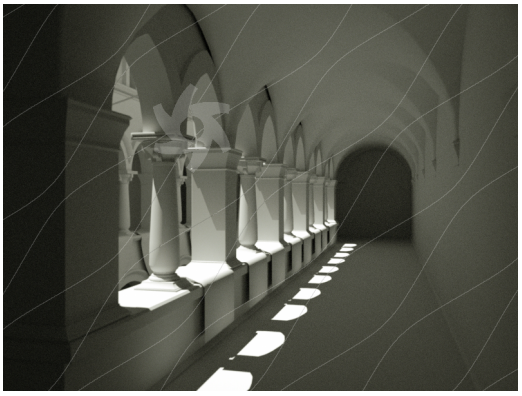
8. Сравнение с Octane

Из-за наличия ограничения на максимальное разрешение и водяных знаков в демо-версии системы Octane, сравнение с ней проводилось отдельно. Результаты (время) были позже отмасштабированы исходя из соотношений разрешений 800x600 и 1024x1024 и добавлены в общие графики сравнения. На рисунке 21 в скобках указано отмасштабированное время.

Интересно отметить, что метод PMC в системе Octane на сценарии Cry Sponza не дал ускорения по сравнению с традиционной Монте-Карло трассировкой путей. На сценарии 'MLT Like' PMC также не дал ускорения, а напротив был в 3.3 раза медленне стандартной Монте-Карло трассировки. Однако на каустиках метод PMC дает значительный выигрыш по сравнению с традиционной Монте-Карло трассировкой путей.

Cornell Box (PMC), 60 сек (130 сек)
MSE = 5.3

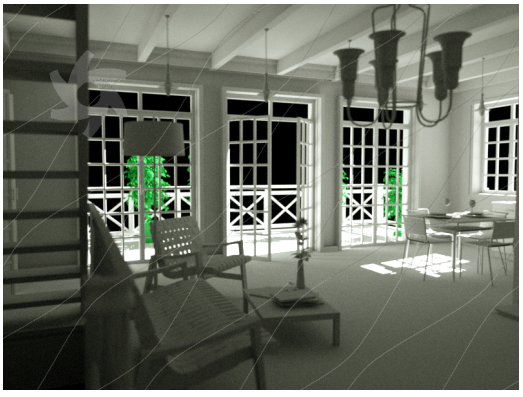
Outdoor, 120 сек (260 сек)
MSE = 2.8



Cry Sponza, 600 сек (1300 сек)
MSE = 5.3

Conference, 600 сек (1300 сек)
MSE = 5.45

Sky Portal, 300 сек (650 сек)
MSE = 4.4



MLT Like, 600 сек (1300 сек)
MSE = 6.6

Рис. 20. Синтезированные в системе Octane изображения. MSE ≈ 4.0. 800x600. В скобках указано время для разрешения 1024x1024.

Рис. 21. Синтезированные в системе Octane изображение с каустиками. MSE $\approx$ 15.0. Время рендера - 5 минут (11 минут). В скобках указано время для разрешения 1024x1024.

9. Анализ производительности

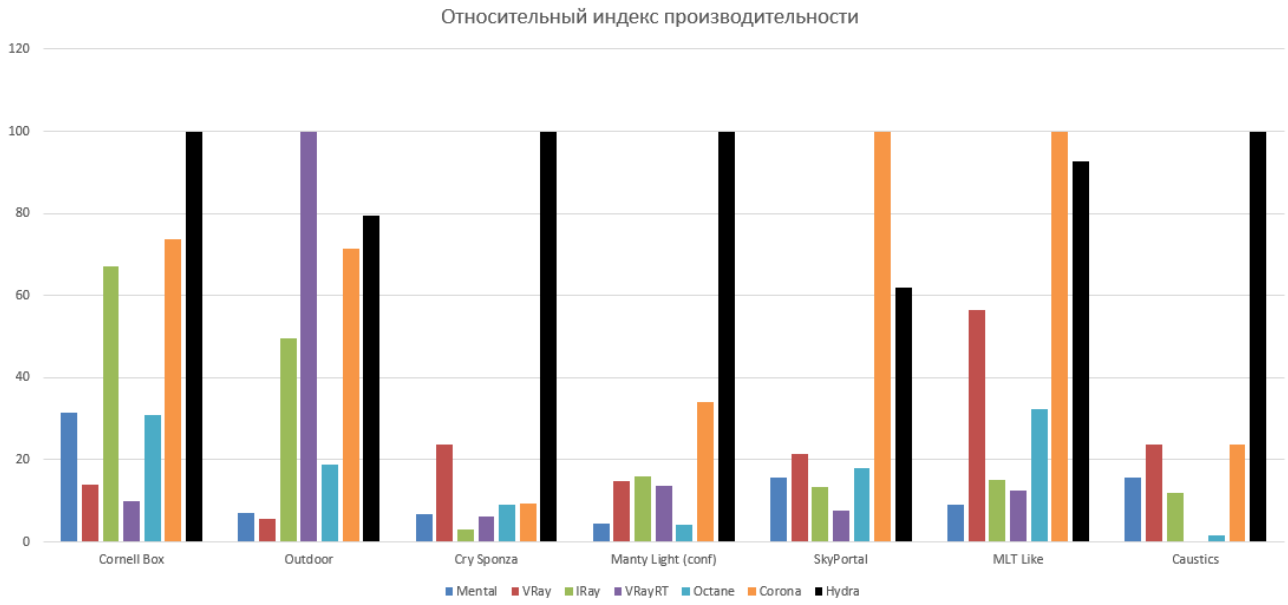


Рис. 22. Сравнение рендер-систем по относительному индексу производительности (на различных сценах).

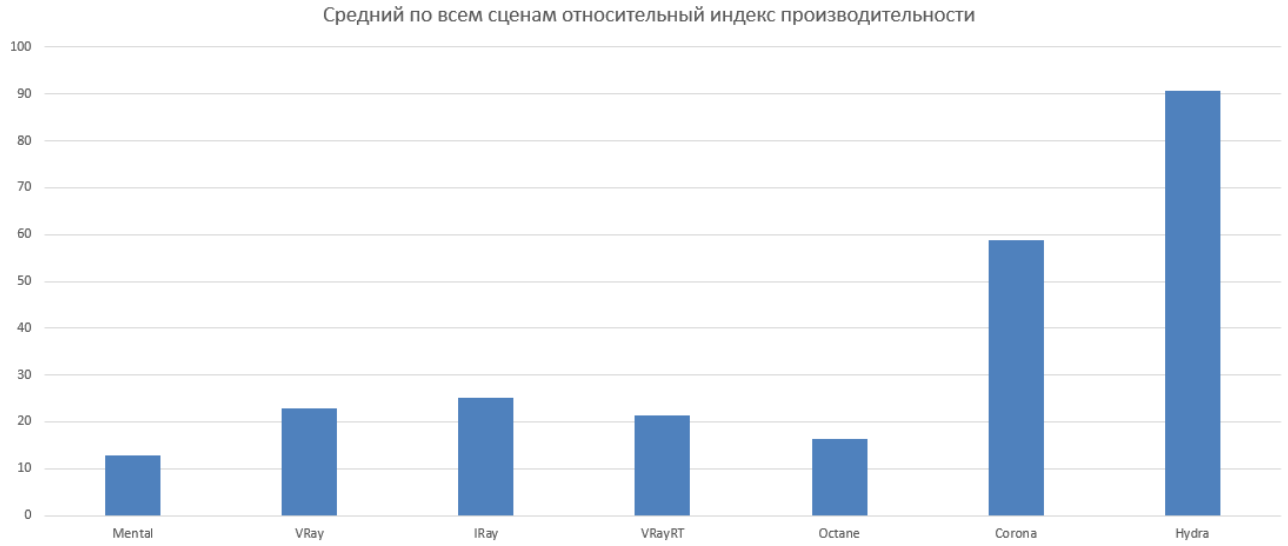


Рис. 23. Сравнение рендер-систем по относительному индексу производительности (среднее по всем сценам).

Литература

1. AMD. The Compressonator. 2014. URL: http://developer.amd.com/tools-and-sdks/archive/legacy-cpu-gpu-tools/the-compressonator/.

2. Georgiev Iliyan, Křivánek Jaroslav, Slusallek Philipp. Bidirectional light transport with vertex merging // SIGGRAPH Asia 2011 Sketches. SA '11. New York, NY, USA: ACM, 2011. P. 27:1–27:2. URL: http://doi.acm.org/10.1145/2077378.2077412.