

# Дорожная оптика для создания пространственного распределения, адаптирующегося к погодным условиям

➔ Освещение дорог при различных погодных условиях — сложная задача. Но еще более трудным является создание эффективного освещения как сухой, так и влажной поверхности дорожного покрытия. Недостаток большинства таких решений — необходимость использовать две различные системы освещения. Поскольку эти системы обычно эксплуатируются не в равной степени, они деградируют с разной скоростью. Виктор Целлер, аспирант, и д-р Криштиан Саму, старший преподаватель, из Будапештского университета технологии и экономики предлагают оптическую систему, которая решает эту головоломку.



## Введение

При освещении автомобильных дорог светильники должны обеспечивать на поверхности дороги достаточную и равномерную яркость, воспринимаемую водителями транспортных средств, а также минимизировать блескость, чтобы обеспечить четкую видимость препятствий на асфальте за пределами тормозного пути. Сила света в заданном направлении может считаться известным параметром в течение всего срока службы наружного светильника, поэтому расчеты позволяют обеспечить хорошую освещенность, однако яркость в значительной степени определяется отражательными характеристиками дорожного покрытия [1]. Отражающая преимущественно диффузно сухая поверхность во время дождя становится практически зеркальной, что может привести к плохой однородности яркости покрытия, наблюдаемой человеком, и даже уменьшить контраст ниже такого уровня, при котором препятствия становятся практически неразличимы.

В случае светодиодных дорожных светильников компактность источника света, улучшенная управляемость за счет диммирования и возможность получения пространственного распределения, близкого к требуемому, позволяют применить схему адаптивного управления освещением, в которой несколько каналов источников света с различной оптикой диммируются отдельно, изменяя распределение силы света всей системы. Эта функция может реализовываться либо в виде профиля переключения, инициируемого дискретными событиями, такими как быстрое изменение влажности, либо как схема управления с обратной связью, обрабатывающая сигналы нескольких типов датчиков, или в виде системы управления по телекоммуникационным каналам.

В данной статье представлен метод расчета пространственного распределения света, предназначенного для освещения европейских автодорог в соответствии со всеми требованиями стандартов освещения. В частности, описано применение генетического алгоритма для оптимизации двух типов пространственного распределения силы света — для сухого и мокрого покрытия — с учетом заданной сцены и требуемых параметров освещения. Очевидно, что простое

переключение питания с одной системы на другую в зависимости от погоды нельзя назвать удачным, так как наиболее часто используемая система будет быстрее стареть. В то же время одновременное использование двух оптических систем, имеющих распределение силы света, оптимизированное для разной погоды, также ухудшает качество освещения при любой погоде, поскольку результирующая сила света при этом будет являться суперпозицией двух, и эта суперпозиция не сможет удовлетворять требованиям стандартов.

Целью данной статьи является знакомство читателя с методом разделения для двух радикально отличающихся распределений силы света с определенным пользователем рабочим циклом, который минимизирует изменение светового потока в течение жизненного цикла изделия, обеспечивая баланс между двумя системами. Таким образом, можно спроектировать две оптические системы освещения, при эксплуатации которых будет иметь место равная наработка обеих систем, и при этом будет обеспечиваться превосходное освещение в различных условиях окружающей среды.

### Пример проектирования освещения

Для лучшего понимания сути проблемы в таблице 1 показаны результаты исследования улицы, недавно освещенной светодиодными светильниками, при сухом и слегка увлажненном дорожном покрытии. Причиной этого исследования была жалоба жителей на то, что после установки новых светильников контраст во время дождя существенно снижается. Кроме того, сообщалось, что в результате таких условий сила отраженного света вызывала ослепление, уменьшая способность водителей определять расстояние до препятствий и пешеходов.

Для проверки светотехнических расчетов были определены классы использованного дорожного покрытия: R1 для сухой дороги и W1 — для мокрой. Этот эффект изменения распределения яркости становится более существенным при увеличении разницы между зеркальным и диффузным коэффициентами отражения поверхности, что означает, что диффузные покрытия более чувствительны в этом аспекте. Кроме того, большая часть поверхности дорожного

покрытия в течение своего срока службы смещается в сторону более диффузного отражения.

Из таблицы 1 видно, что, в случае влажной поверхности, светильник не соответствует установленным требованиям. Как общая, так и продольная однородность значительно снижены, в то время как средняя яркость увеличена. Этот последний фактор обусловлен увеличением зеркально отраженного света [2]. Наибольший коэффициент яркости, наблюдаемый в одной из стандартных расчетных сеток, составляет в этом примере 298%.

Один из дополнительных эффектов, не учитываемых в проекте освещения, — блики. Пороговое приращение вычисляется из средней яркости дороги, и при расчете не учитывается однородность, в то время как эквивалентная вуалирующая яркость в обоих случаях одинакова. Рассчитанное значение порогового приращения — 4% — оказалось очень необычным по сравнению с традиционными источниками света, такими как натриевые лампы высокого давления.

### Оптимальное распределение силы света для выбранной сцены освещения

Для оптимизации с помощью генетического алгоритма были сгенерированы два произвольных распределения силы света для одной сцены освещения, но с разными условиями — для сухого и влажного покрытия. Использование этого метода важно для целей данной статьи, поскольку получаемые в результате требуемые силы света оказываются разными. И понимание этой разницы является ключом для адаптации этого метода с приемлемым значением средней среднеквадратической ошибки.

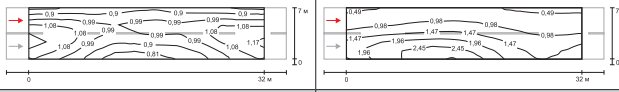
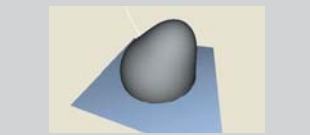
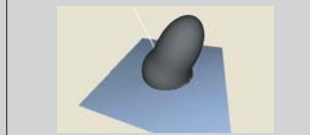
С помощью представленного алгоритма можно найти удовлетворительное решение поставленной задачи светотехнического расчета, при этом важно подчеркнуть, что наличие наблюдаемой конвергенции в процессе итерации не гарантирует, что в результате будет найден теоретический абсолютный максимум по какому-либо показателю.

### Алгоритм

Набор данных, характеризующих распределение силы света, состоит из значений силы света, обычно в [кд] или [кд/кЛм] в сферической системе координат, называемой таблицей сил света. Позиционирование в виртуальном пространстве позволяет рассчитать показатели освещения, предусмотренные Европейским стандартом EN 13201-3 [3]. Обычно такие массивы данных получают с помощью гониофотометрических измерений или оптического моделирования, но в этой работе генерируются совершенно произвольные распределения силы света. Обратное численное решение задачи освещенности достаточно легко выполняется и широко описано в литературе.

Для целей данной статьи была создана совокупность из 25 распределений силы света для каждой оптимизации, в качестве исходного было использовано ламбертовское распределение. В ходе итерационного процесса на каждом этапе сила света в выбранном направлении увеличивалась или уменьшалась на произвольное значение. Затем, после оценки результата оптимизации по критериям качества освещения, предусмотренным требованиями Европейского стандарта EN 13201, два массива с наилучшими показателями переводились на следующий шаг итерации, остальная совокупность распределений генерировалась из среднего

Таблица 1. Светотехнический расчет для улицы с проблемным освещением

	Изолинии наблюдателя, кд/м <sup>2</sup>	Кривая отражения	
		Покрытие CIE 30-2 R1	Покрытие W1
			
			
	Требования		
Lav, кд/м <sup>2</sup>	≥0,75	0,98	1,12
U0	≥0,4	0,75	0,34
U1	≥0,6	0,75	0,52
TI, %	≤15	4	4
SR	≥0,5	0,66	0,66

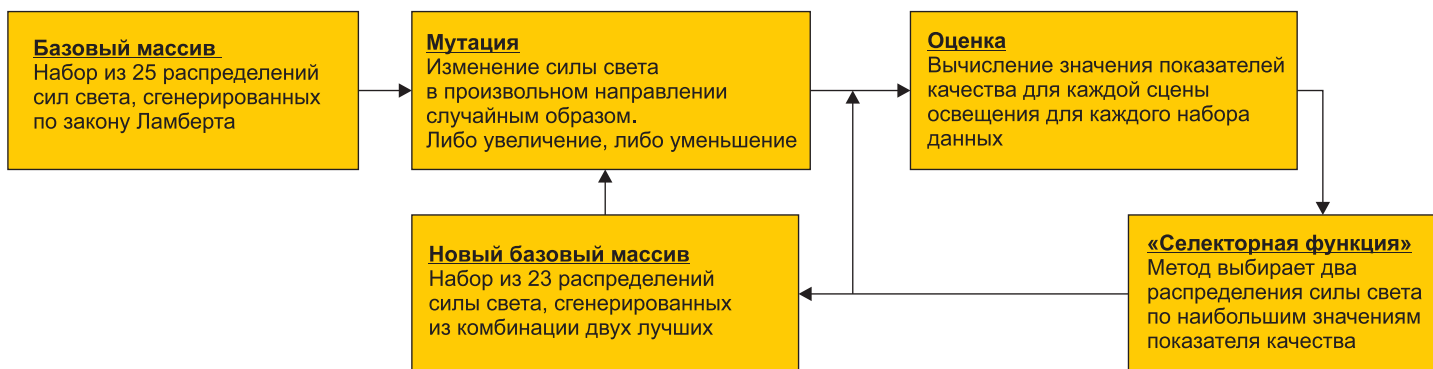


Рис. 1. Блок-схема процесса оптимизации распределения силы света

по указанным двум распределениям путем случайных изменений. На рис. 1 показана схема оптимизации.

### Целевая функция

Понимание использования целевой функции является ключом к пониманию новизны введенного метода. Для получения целевой функции рассчитывался набор параметров, характеризующих заданную сцену освещения дороги. Итерация была построена таким образом, чтобы уравнение (1) сходилось к максимуму.

$$MF = f_{L_{av}}(L_{av}) \times f_U(U0; 0, 44) \times f_U(U1; 0, 66) \times f_{TI}(TI) \times f_{SR}(SR) \times f_{LI}(LI), \quad (1)$$

где: MF — это целевая функция,  $L_{av}$  — средняя яркость, [кд/м<sup>2</sup>], U0 — полная однородность, U1 — продольная однородность, TI — пороговое приращение яркости, SR — коэффициент периферийного освещения, LI — класс силы света, установленный Европейским стандартом EN 13201, А. А1, используется числовое значение обозначения класса (например, для G3 LI = 3).

На рис. 2 показаны передаточные функции яркости, однородности, поро-

гового приращения и класса силы света, используемые для построения целевой функции при оценке любого набора кривых сил света, получаемого в процессе оптимизации. Каждая функция должна быть монотонной для обеспечения приемлемого уровня сходимости [4]. Полученное распределение силы света является билатерально симметричным. Использование результатов, полученных в виде массива с высоким разрешением, приводит к получению не гладких кривых силы света (КСС).

Использование классов силы света обусловлено необходимостью сохранения схожести КСС, выходящих под большими углами, полученными в результате оптимизации для сухого и влажного покрытий. Таким образом, используя коэффициенты, указанные в таблице 2, можно уменьшить эффект роста яркости выше вертикального угла 70° из-за зеркального отражения поверхности дорожного покрытия. Несмотря на то, что этот показатель рекомендуется для расчета только если показатель TI неприменим, в Европе, Африке и на Ближнем Востоке растет количество устанавливаемого светотехнического оборудования, где муниципалитеты требуют использовать этот показатель.

### Оценка результатов

Для оценки возможностей алгоритма генерации был разработан проект освещения проезжей части, позволяющий сравнить качество распределения силы света двух коммерческих изделий при одном и том же световом потоке, которые удовлетворяют всем требованиям освещения, предъявляемым к односторонней дороге, с расстоянием между опорами 32 м, высотой монтажа 10 м, шириной проезжей части 8 м, без навеса и с покрытием R3.

### Двухканальное регулирование яркости

Двухканальное независимое диммирование требует наличия двух отдельных источников питания светильника с возможностью индивидуальной регулировки яркости. Вход для диммирования необходимо подключать к интеллектуальному модулю, который позволяет устанавливать уровни диммирования с малым шагом по всему диапазону диммирования. Управляющий сигнал можно получать от специальных датчиков или по телекоммуникационным каналам.

Пусть RA(C, γ) — таблица сил света (I-таблица) в фотометрической системе C-γ для канала А, а RB(C, γ) — то же, но для канала В, углы C и γ для обоих каналов совпадают, значения силы света приведены в относительных единицах. Пусть DA и DB — уровни диммирования каналов А и В, и, наконец, DD(C, γ) и DW(C, γ) — требуемые распределения силы света для сухого и влажного дорожного покрытия. Кроме того, минимальные значения светового потока должны быть присвоены заданным относительным распределениям силы света, которые обеспечивают соответствие требованиям освещения описанных сцен с заданным запасом: φD и φW.

Таблица 2. Оценка результатов оптимизации

		Светильник А	Светильник В	Сгенерированное распределение силы света
кД	— C0-C180			
	— C90-C270			
Lav, кд/м <sup>2</sup>	≥0,75	0,94	0,75	1,26
U0	≥0,4	0,44	0,49	0,6
U1	≥0,6	0,61	0,66	0,92
TI, %	≤15	10	6	14
SR	≥0,5	0,55	0,55	0,52

Общий процесс разделения с помощью этого метода:

- Задать требуемые распределения силы света:  $DD(C, \gamma)$ ,  $DW(C, \gamma)$ .
- Указать минимальный световой поток.
- Определить три из четырех режимов диммирования, определяющих схему управления. Четвертое значение будет получено на основе значений светового потока. В таблице 3 приведены примеры режимов. Режим 1 — тип управления, при котором оба канала переключаются без диммирования. Режим 2 выключает RA и делает ярче RB в начале увлажнения. Режим 3 делает ярче RB для влажного дорожного покрытия. Это аналог системы, в которой часть света, отраженная зеркальной оптической системой, экранируется. Режим 4 представляет собой систему, в которой управляющий ток сбалансирован.
- Выполнить процесс факториальной оптимизации двух режимов диммирования с целью уравнивания использования обоих каналов.

Проектирование системы освещения зависит от многих факторов, включая возможности источника света, тепловой расчет и особенности освещаемого объ-

Таблица 3. Типы схем управления

	Режим 1		Режим 2		Режим 3		Режим 4	
	Состояние D	Состояние W	Состояние D	Состояние W	Состояние D	Состояние W	Состояние D	Состояние W
DA	100%	0%	100%	23%	100%	100%	70%	42%
DB	0%	100%	0%	70%	0%	100%	70%	100%
Цель	DD	DW	DD	DW	DD	DW	DD	DW
Световой поток, лм	1000	925	1000	925	1000	1555	1000	925

екта. Тем не менее можно подобрать такие компоненты системы и условия их работы, которые обеспечат, с одной стороны, требуемый световой поток при каждом режиме, а с другой — будут характеризоваться одинаковой по времени жизни светильника деградацией. В таблице 4 показана система, в которой два состояния, согласно прогнозу, будут работать при рабочем цикле 85 и 15% (т. е. 15% времени будет иметь место влажное покрытие). Исходя из этого была разработана схема управления, которая диммирует каналы таким образом, чтобы уменьшение светового потока в соответствии с TM-21-11: Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Packages («Прогнозирование долговременной стабильности светового потока светодиодных источников света») было согласовано с использованием набора данных по LM-80.

### Разделение силы света

Уравнения (2) описывают суммарное распределение силы света, получаемое на выходе осветительной системы ( $DD$  и  $DW$  являются заданными параметрами), и являются остаточной матрицей в каждом случае из указанных значений:

$$\begin{aligned} R_A \times D_{A1} + R_B \times D_{B1} &= D_D - \epsilon_D, \\ R_A \times D_{A2} + R_B \times D_{B2} &= D_W - \epsilon_W. \end{aligned} \quad (2)$$

Таблица 4. Схема управления для согласованных характеристик деградации

Параметр	Состояние D	Состояние W
DA	80%	61%
DB	70%	90%
Рабочий цикл	85%	15%
Световой поток, лм	1000	925
Световой поток А, лм	533	374
Световой поток В, лм	467	551

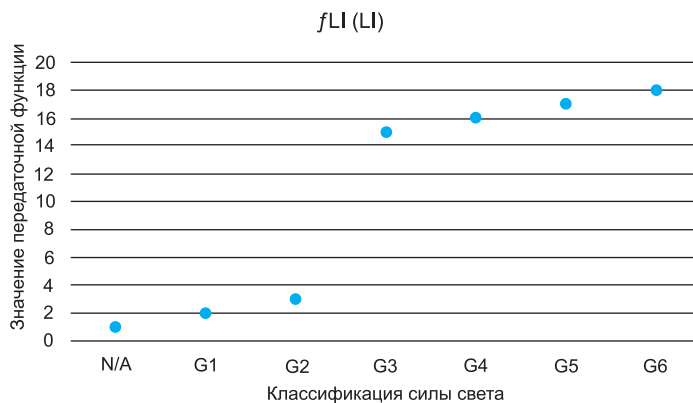
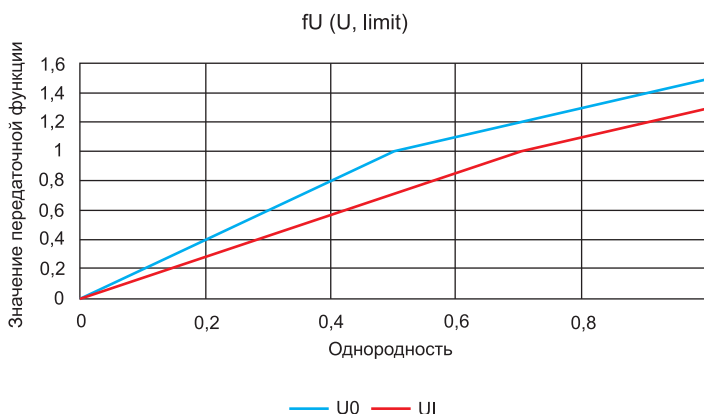
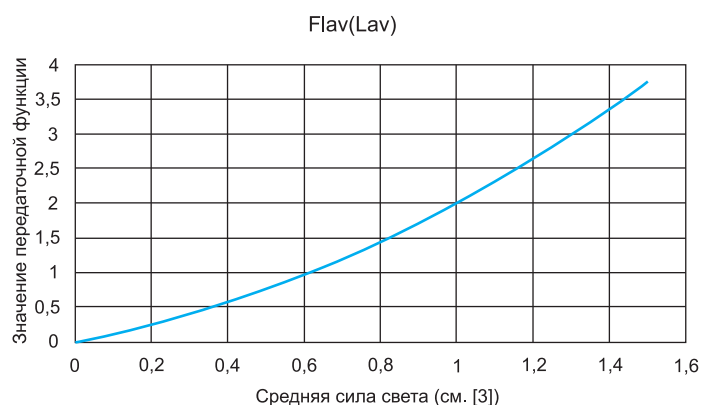
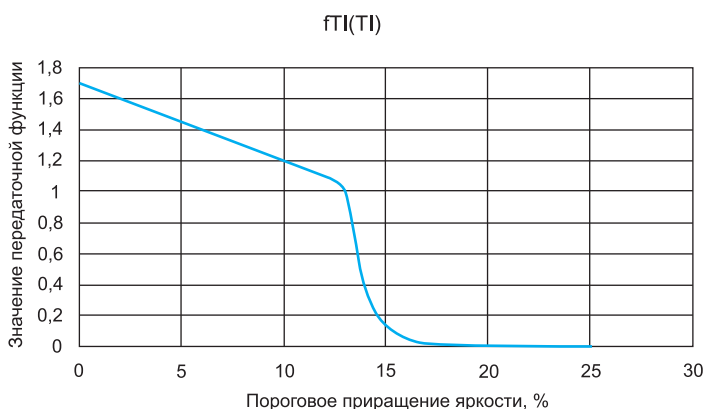


Рис. 2. Передаточные функции, использованные для построения

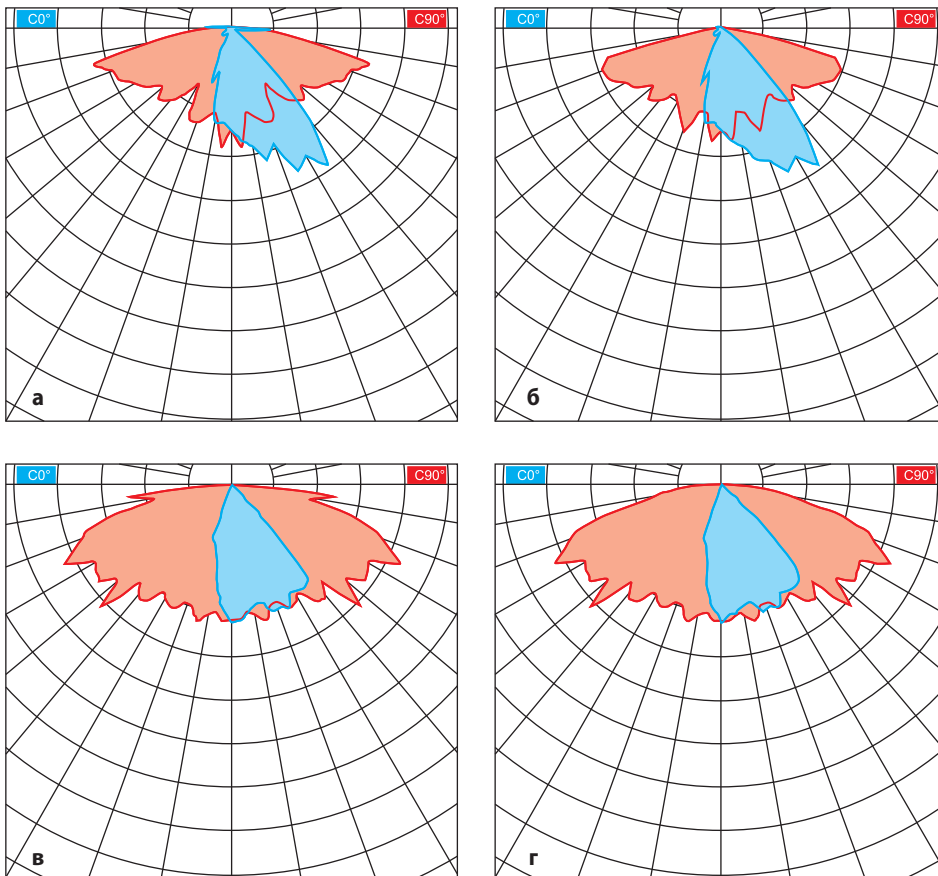


Рис. 3. Требуемые кривые силы света: а) DD; б) DW; в) и г) — полученные с помощью процесса разделения

При заданной схеме управления требуемые распределения силы света рассчитываются следующим образом:

$$R_A = \frac{(D_W - \frac{D_{B2}}{D_{B1}} \times D_D)}{(D_{A2} - \frac{D_{B2}}{D_{B1}} \times D_{A1})}, \quad (3)$$

$$R_B = D_W - (D_{A2} \times R_A), \quad (4)$$

После этих вычислений должна выполняться итерация, которая восстанавливает

заданные распределения силы света в соответствии с уравнением (5). Таким образом может быть получен остаток. Какая бы схема управления ни была выбрана, значение переменной коэффициента диммирования может быть установлено следующим образом:

$$\sum \epsilon_D + \epsilon_W \xrightarrow{appr.} 0. \quad (5)$$

На рис. 3 показан результат генерации распределений силы света с использованием системы, представленной в таблице 4.

## Заключение

В этой работе на основании расчетов и требований Европейского стандарта EN 13201 было показано, что во многих случаях постоянное распределение силы света в течение всего срока службы светильника, освещающего проезжую часть, может привести к плохой однородности яркости (как общей, так и продольной) при определенных погодных условиях. В некоторых случаях ухудшение распределения яркости, воспринимаемое обычным наблюдателем, может привести даже к ослеплению.

Поэтому был предложен метод, обеспечивающий управление распределением силы света, позволяющий соблюсти требования к освещению в случае изменения оптических свойств среды, что необходимо для обеспечения лучшей видимости препятствий, уменьшения бликов и повышения безопасности для всех участников дорожного движения. Представленный алгоритм имеет своей целью выравнивание деградации светового потока каналов, пространственное распределение силы света которых было специально сгенерировано с учетом необходимости удовлетворения особых требований такого разделения системы освещения. ●

*Оригинал статьи опубликован в журнале LED professional, март 2017 г.*

## Литература

1. Peter R. Boyce. Lighting for driving. CRC Press, 2008.
2. The outdoor lighting guide. The Institution of Lighting Engineers. Taylor & Francis, 2005.
3. European Standard EN 13201-3 Road lighting— Part 3: Calculation of performance.
4. Darrell Whitley. A genetic algorithm tutorial // Statistics and Computing. 1994.