

## 12. Принципы построения и ключевые технологии устройств дополненной реальности световодного типа с голограммными и дифракционными оптическими элементами

*С. Н. Корешев*

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

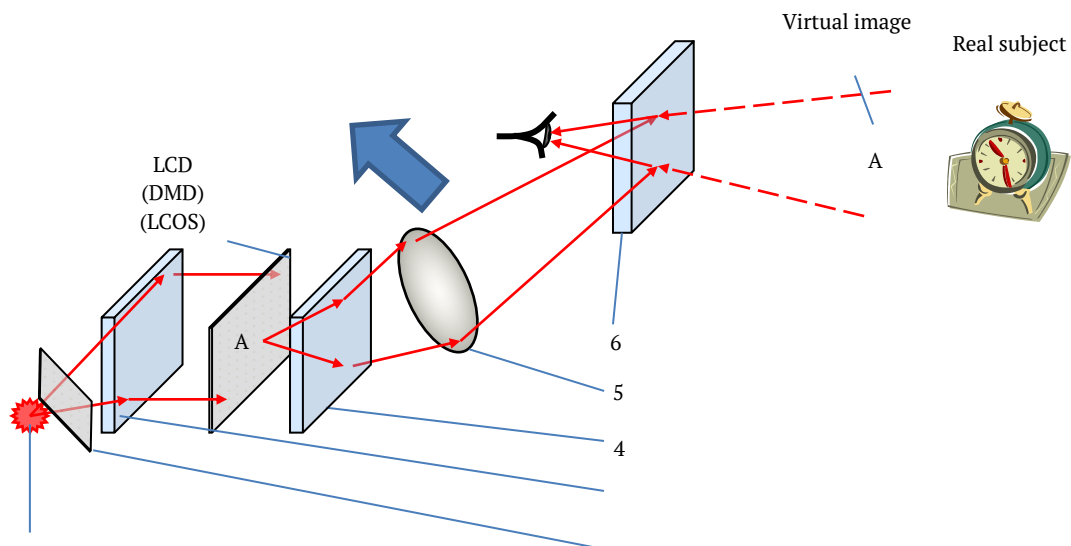
Рассмотрены устройства дополненной реальности. Основное внимание уделено устройствам световодного типа, содержащим голограммные оптические элементы. Даны и обоснованы рекомендации по выбору типа и характеристик используемых в их составе голограммных структур. Отмечается необходимость использования для ввода излучения в световод элементов с максимально возможной дифракционной эффективностью. Вывод излучения из световода предлагается осуществлять оптическими элементами с угловой селективностью и относительно малой дифракционной эффективностью, не превышающей 5–7 %.

*Ключевые слова:* Устройства дополненной реальности, Голограммные и дифракционные оптические элементы, световод, Дифракционная отражательная решетка с углом блеска, Синтез зрачка.

*Цитирование:* **Корешев, С. Н.** Принципы построения и ключевые технологии устройств дополненной реальности световодного типа с голограммными и дифракционными оптическими элементами / С. Н. Корешев // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 64–72.

### Введение

Разработка устройств дополненной и виртуальной реальности представляет собой одну из актуальнейших задач современного оптического приборостроения. Это объясняется широкими потенциальными возможностями их использования в различных областях науки и техники. Применение устройств дополненной и виртуальной реальности в технологических процессах представляет собой наикратчайший путь внедрения компьютерных (цифровых) технологий в производство. В настоящей работе основное внимание будет уделено устройствам дополненной реальности. Их основное отличие от устройств виртуальной реальности состоит в обеспечении одновременного наблюдения окружающего пространства и генерируемого с помощью компьютера изображения. Среди разработанных и опубликованных к настоящему времени устройств наибольший интерес вызывают устройства, основанные на использовании голограммных или дифракционных оптических элементов [1]. Одно из основных их преимуществ заключено в минимизации площадей зон, блокируемых в канале наблюдения окружающего пространства оптическими системами ввода виртуального изображения.



1 — источник света, 2 — спектральный фильтр, 3 — конденсор, 4 — компенсатор «дисторсии»,  
5 — силовая оптическая система, 6 — комбинер

Рис. 1. Принципиальная схема устройства дополненной реальности открытого типа

### 1. Основные схмотехнические решения устройств дополненной реальности с голограммными оптическими элементами

На основе голограммных или дифракционных оптических элементов могут быть построены системы дополненной реальности как световодного, так и открытого типа. Отметим, что деление оптических элементов на дифракционные элементы и голограммные чисто условное. Оно, в основном, отражает не суть осуществляемых с их помощью преобразований волновых фронтов, а лишь технологию изготовления элементов. Принципиальная схема устройства открытого типа представлена на рисунке 1. Отметим, что большинство из входящих в его состав элементов могут быть выполнены в виде голограммных оптических элементов [1]. Поясним принцип его работы. Излучение источника 1 пропускается через спектральный фильтр 2 и направляется на генератор изображения — *LCD*. После генератора изображения излучение, пропускается через компенсатор «дисторсии», предназначенный для изменения направления распространения главных лучей изображений, сформированных с помощью генератора *LCD*. Силовая оптическая система 5 переносит сформированное с помощью генератора изображение на требуемое расстояние от наблюдателя, а комбинер 6 предназначен для обеспечения возможности одновременного наблюдения сформированного с помощью генератора виртуального изображения и изображения окружающего пространства.

В качестве основного недостатка подобных устройств можно отметить малую степень интеграции, т. е. большое число отдельно стоящих элементов, существенно усложняющую юстировку изделия на этапе его изготовления. С этой точки зрения более выигрышными являются построенные на голограммных оптических элементах устройства дополненной реальности световодного типа см., например. [2–4]. Их можно условно разделить на два типа

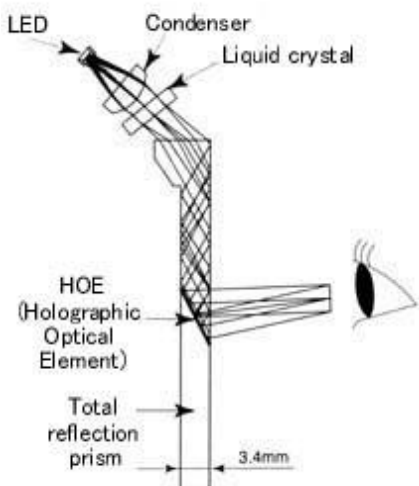


Рис. 2. Принципиальная схема устройства первого типа с одним голограммным оптическим элементом

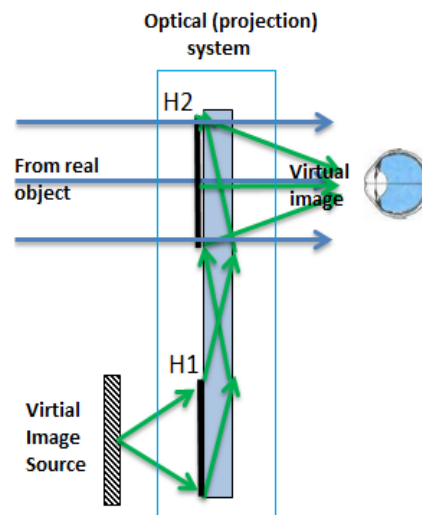


Рис. 3. Принципиальная схема устройства первого типа с двумя голограммными оптическими элементами

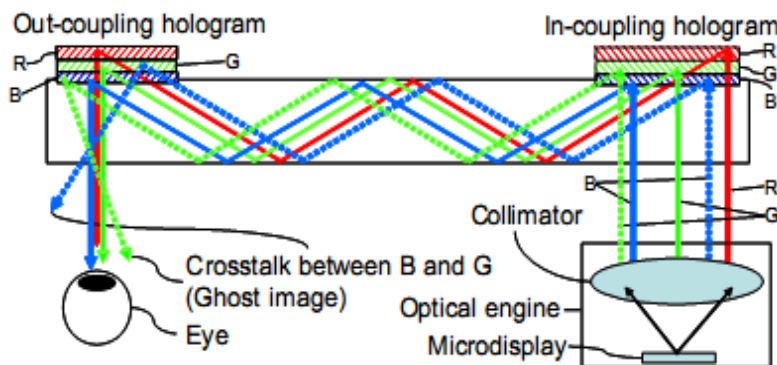


Рис. 4. Принципиальная схема цветного устройства первого типа с двумя голограммными оптическими элементами

устройств. При этом к первому типу устройств отнесем устройства, в которых световод используется лишь в качестве среды распространения излучения (см. рисунки 2–4).

Ко второму типу устройств отнесем устройства, в которых эффект полного внутреннего отражения излучения в световоде используется помимо передачи излучения еще и для синтеза выходного зрачка, позволяя при относительно малых размерах входного зрачка получать большой по площади выходной зрачок (см. рисунок 5). В устройствах, построенных по приведенным выше принципиальным схемам, информационный канал, т. е. канал наблюдения виртуального изображения, сформированного генератором, реализуется путем многократного отражения излучения на границах световода. Канал наблюдения окружающего пространства в них реализуется за счет прямого наблюдения через световод, представляющий собой плоскопараллельную пластину.

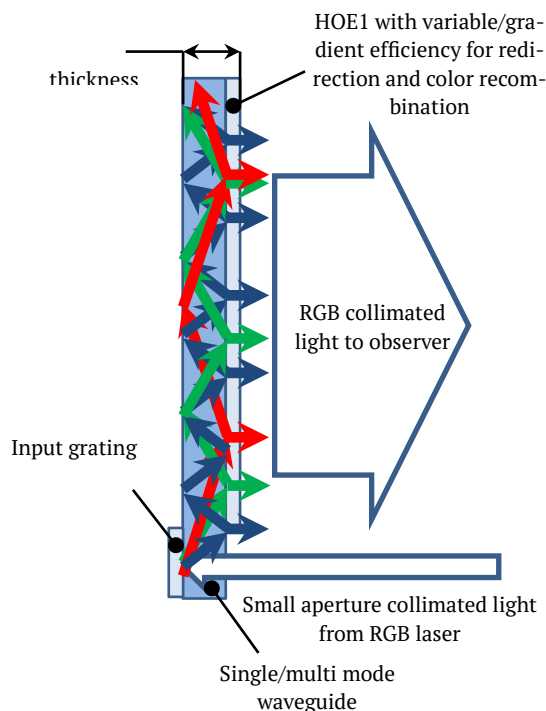
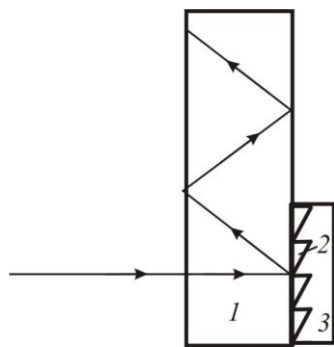


Рис. 5. Принципиальная схема цветного устройства второго типа с двумя голограммными оптическими элементами.

Конструктивно все рассматриваемые устройства состоят из следующих основных узлов: генератора изображения с источником света, оптической системы, переносящей сформированное с помощью генератора изображение на бесконечность, системы ввода излучения в световод и системы вывода излучения из световода. При этом устройства, в которых ввод и вывод излучения осуществляется с помощью голограммных оптических элементов, в отличие от устройств, подобных устройству, приведенному на рисунке 2, позволяют использовать в качестве источников излучения коммерчески легкодоступные лазерные диоды, характеризующиеся существенной зависимостью длины волны излучения от температуры диода. В устройстве, построенном по принципиальной схеме, приведенной на рисунке 2, изменение рабочей длины волны излучения приведет к смещению формируемого устройством виртуального изображения в канале наблюдения окружающего пространства [5]. В дальнейшем ограничимся лишь рассмотрением устройств, содержащих голограммные системы ввода и вывода излучения в волокно.

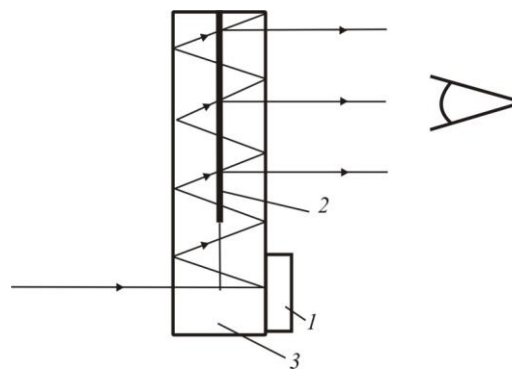
## 2. Принципы построения устройств дополненной реальности световодного типа с голограммными оптическими элементами

Основные принципы построения устройств дополненной реальности световодного типа сводятся к выбору голограммных систем ввода излучения в световод и вывода излучения из него и определению требований к характеристикам этих систем, к выбору метода формирования цветного изображения в информационном канале этих устройств и к определению геометрических параметров световода. Рассмотрим их, оставляя за скобками Фурье преобразующую



1 — световод, 2 — оптический клей,  
3 — подложка решетки

Рис. 6. Ввод излучения в световод с помощью дифракционной решетки с углом блеска



1 — система ввода излучения в световод,  
2 — система вывода излучения из световода,  
3 — световод

Рис. 7. Принципиальная схема устройства дополненной реальности с синтезированным выходным зрачком, состоящим из трех элементарных зрачков

оптическую систему, используемую для переноса виртуального изображения на бесконечность. При этом будем рассматривать вводимое в световод виртуальное изображение в виде пучка лучей, представляющего собой веер параллельных пучков, распространяющихся в пределах угла зрения виртуального изображения. Отметим, что максимальный угол зрения виртуального изображения для устройств световодного типа не зависит от их конструктивного исполнения и целиком определяется критическим углом полного внутреннего отражения световода. Так, для находящегося в воздухе световода из стекла с показателем преломления 1,5 критический угол полного внутреннего отражения равен  $41,8^\circ$ . Следовательно, в этом случае допустимый максимальный угол поля зрения виртуального изображения не будет превышать  $\pm 24^\circ$  при выборе угла падения главного луча пучка, соответствующего этому изображению, на поверхности световода внутри него, равного  $65,8^\circ$ .

Голограммная система ввода излучения предназначена для преобразования пучка лучей, соответствующего виртуальному изображению, из нормально падающего на световод, в пучок лучей, главный луч которого распространяется в толще световода под углом, превышающим критический угол полного внутреннего отражения. Отметим, что каждый элементарный параллельный пучок, составляющий пучок лучей, соответствующий виртуальному изображению, в толще световода должен также распространяться под углом, превышающим критический угол полного внутреннего отражения в материале световода. При использовании голограммных оптических элементов операция ввода излучения в световод может быть выполнена с помощью дифракционных, работающих на пропускание либо отражение, решеток с симметричной формой профиля и решеток с углом блеска. Кроме того, для этой цели могут быть использованы работающие на отражение фазовые брэгговские решетки, т. е. объемные фазовые голограммы. К используемым в устройствах дополненной реальности системам

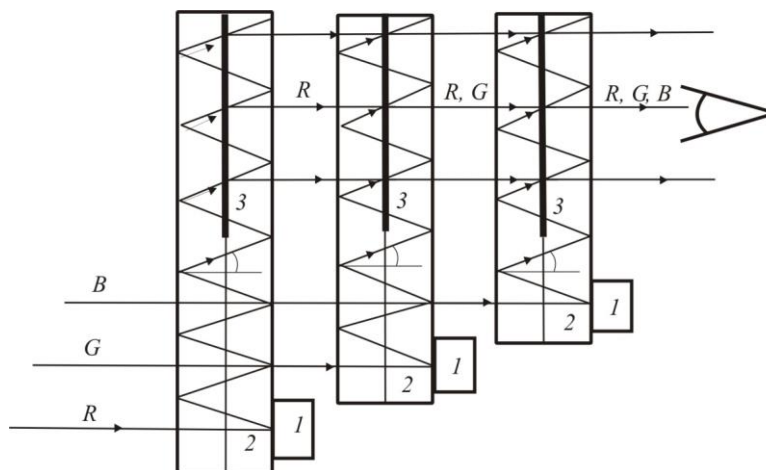
ввода излучения в световод предъявляются два основных требования. Во-первых, они должны обладать максимально возможной дифракционной эффективностью и минимальной угловой селективностью в пределах поля виртуального изображения. Относительно высокая угловая селективность брэгговских решеток и существенная сложность их изготовления не позволяют рекомендовать их для использования в системах ввода излучения в световод для устройств дополненной реальности. Дифракционные решетки с симметричной формой профиля штриха также не могут быть рекомендованы для ввода излучения в световод в устройствах дополненной реальности из-за их относительно малой дифракционной эффективности. Лучшим выбором для системы ввода излучения в световод представляется рельефно-фазовая отражательная решетка с углом блеска, приклеиваемая к задней поверхности световода (см. рисунок 5).

Система ввода излучения в световод, основанная на использовании дифракционной решетки с углом блеска обладает относительно малой угловой селективностью. Ее дифракционная эффективность может достигать 60–70 % для неполяризованного света.

Отметим, что системы ввода излучения в световод могут выполняться как на одномерных решетках, так и на скрещенных двумерных решетках. Тип решетки выбирается в зависимости от выбранного типа синтеза выходного зрачка в устройстве дополненной реальности. Если синтез выходного зрачка предполагается осуществлять по двум координатам, то решетка с углом блеска должна быть скрещенной — двумерной. Если синтез выходного зрачка предполагается лишь по одной координате, то структура решетки выбирается одномерной. С точки зрения энергетических потерь в устройстве дополненной реальности синтез зрачка предпочтительно осуществлять лишь по одной координате. Именно такие устройства и будут рассматриваться далее. Голограммная система вывода излучения из световода помимо всего прочего выполняет функции комбинера, совмещающего изображение окружающего пространства с виртуальным изображением. Это обуславливает существенное отличие требований, предъявляемых к системам ввода и вывода излучения из световода. Начнем с дифракционной эффективности. Если дифракционная эффективность системы будет велика, то из спектра изображения окружающего пространства будут удалены составляющие, соответствующие рабочей длине волны информационного канала, т. е. в этом канале будет нарушена цветопередача. Например, если информационный канал будет работать в зеленой области спектра, то изображение окружающего пространства в рассматриваемом случае приобретет пурпурный оттенок. В качестве второго негативного последствия высокой дифракционной эффективности голограммных оптических элементов, используемых для вывода излучения из световода, можно отметить относительно высокую дифракционную эффективность голограммного элемента в сопряженном рабочему порядку его дифракции. Ведь действительно, чем выше дифракционная эффективность в основном рабочем порядке дифракции голограммного элемента, тем выше она и в его сопряженном порядке [6]. Кроме того, увеличение дифракционной эффективности системы вывода излучения из световода при той же угловой

селективности голограммы приведет к увеличению интенсивности виртуального изображения, направляемого устройством дополненной реальности в сторону наблюдаемого окружающего пространства. Отметим, что голограммный элемент, осуществляющий вывод излучения из световода, восстанавливается двумя пучками, соответствующими виртуальному изображению, падающими на него с разных сторон, т. е. его восстановление осуществляется встречными пучками лучей. Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что голограммный оптический элемент, используемый в устройстве дополненной реальности для вывода излучения из световода, должен обладать угловой селективностью и относительно невысокой дифракционной эффективностью. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют пропускающие фазовые голограммные решетки с объемными свойствами. Например, пропускающие голограммные решетки, выполненные на коммерчески доступных слоях голографической фотоэмульсии толщиной 3–5 мкм методом «желатины, сенсibilизированной серебром» [7]. При этом требуемая дифракционная эффективность системы вывода излучения определяется допустимой неравномерностью интенсивности виртуального изображения по апертуре выходного зрачка устройства дополненной реальности и числом элементарных зрачков, составляющих синтезированный выходной зрачок устройства дополненной реальности. Так, если считать допустимой  $\pm 10\%$  неравномерность интенсивности виртуального изображения в выходном зрачке и положить, что выходной зрачок формируется из трех элементарных зрачков, то требуемую дифракционную эффективность системы вывода изображения из световода можно положить равной 5–7 %. На рисунке 7 приведена принципиальная схема устройства дополненной реальности с синтезированным выходным зрачком, состоящим из трех элементарных зрачков. В нем световод выполнен клеенным из двух стеклянных пластин, одна из которых представляет собой подложку голограммной решетки.

Здесь необходимо отметить, что использование синтеза выходного зрачка обуславливает ужесточение требований к плоскопараллельности стеклянной пластины, используемой в качестве световода. Так, если положить допуск на разрешающую способность устройства дополненной реальности равным  $2'$ , то при синтезе зрачка из трех элементарных зрачков допуск на непараллельность поверхностей световода составит  $20''$ . Расположение системы вывода излучения из световода внутри него позволяет защитить структуру голограммного элемента от механических повреждений. Использование при фотохимической обработке голограммных решеток в процессе их изготовления способа «желатины, сенсibilизированной серебром» обеспечивает полное отсутствие серебра и его солей в изготовленной решетке и тем самым предотвращает возможность снижения коэффициента пропускания голограммного элемента под воздействием ультрафиолетового излучения. Отметим, что по требованиям технических заданий на устройства дополненной реальности интегральный коэффициент пропускания системы вывода излучения из световода в канале наблюдения окружающего пространства в видимом диапазоне спектра не должен быть менее 85 %. Использование низкоэффективных, с дифракционной эффективностью, не превышающей 7 %, голограммных решеток для вывода излучения из световода и широкополосных просветляющих оптических покрытий на



1 — система ввода излучения в световод, 2 — световод, 3 — система вывода излучения

Рис. 8. Метод формирования цветного изображения в устройствах дополненной реальности, основанный на использовании своего световода для каждой спектральной компоненты изображения

рабочих поверхностях световода обеспечивают это требуемое значение коэффициента пропускания голограммного элемента.

В рассмотренных ранее принципиальных схемах устройств дополненной реальности, представленных на рисунках 4 и 5, цветное виртуальное изображение предлагается формировать до этапа ввода излучения в световод. Использование одного световода для всех трех составляющих цветное изображение пучков лучей приводит к ограничению поля формируемого виртуального изображения. Дело в том, что изменение длины волны поступающего в световод излучения при неизменных пространственных частотах систем ввода и вывода излучения приведет к изменению угла падения на границы световода каждой из его хроматических составляющих и, тем самым, приведет к уменьшению допустимого угла поля виртуального изображения. Этого можно избежать, используя для каждой основной хроматической компоненты цветного виртуального изображения свои световод и системы ввода и вывода изображения. На рисунке 8 приведена схема, поясняющая предлагаемый метод формирования цветного виртуального изображения. Отметим, что предлагаемый метод обуславливает довольно-таки высокие требования, предъявляемые к параллельности главных лучей пучков, соответствующих виртуальным изображениям, в R, G, B каналах и к параллельности расположения пластин, используемых в качестве световодов.

### Заключение

Рассмотрены принципы построения и ключевые технологии устройств дополненной реальности световодного типа с голограммными и дифракционными оптическими элементами. Даны и обоснованы рекомендации по выбору типа и характеристик используемых в их составе голограммных структур.



### Список источников

- [1] **Путилин, А. Н.** Голографические оптические элементы в устройствах виртуальной реальности / А. Н. Путилин, А. В. Морозов, В. В. Дружин // Мир Голографии. — 2017. — Том 3. — № 1. — С. 35.
- [2] **Mukawa, H.** A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection volume holograms / H. Mukawa, K. Akutsu, I. Matsumura, S. Nakano, T. Yoshida, M. Kuwahara, K. Aiki // J. Soc. Info. Disp. — 2009. — № 17. — P. 185–193.
- [3] **Патент № 2016 028 828 WO.** AI Head-mounted display with electrochromic dimming module for augmented and virtual reality perception / C. Bell. — Оpubл. 25.02.2016.
- [4] **Kasai, I.** A practical see-through head mounted display using a holographic optical element / I. Kasai, Y. Tanuiri, T. Endo, H. Ueda // Optical review. — 2001. — Vol. 8. — № 4. — P. 241–244.
- [5] **Корешев, С. Н.** Оптические системы голографических коллиматорных прицелов / С. Н. Корешев, М. К. Шевцов // Оптический журнал — 2015. — Том 82. — № 9. — С. 22–28.
- [6] **Корешев, С. Н.** Анализ интенсивности ложных изображений, формируемых объемными голограммными оптическими элементами / С. Н. Корешев, Г. Б. Семенов // Оптика и спектроскопия. — 1986. — Том 60. — № 1. — С. 148–151.
- [7] **Belendez, A.** High-efficiency silver-halide sensitized gelatin holograms with low adsorption and scatter / A. Belendez, C. Neipp // Journal of modern optics. — 1998. — Vol. 45. — № 10. — P. 1985–1992.