



# Библио- и патентометрический анализ развития нанофотоники: 2000–2020 годы

А. И. Терехов

ФГБУН Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Россия

В статье анализируется развитие исследований, структура и динамика патентования научных результатов в области нанофотоники в период 2000–2020 годов. В центре внимания глобальный публикационный выход и вклад в него отдельных стран и их групп, тематическая структура исследований, показатели международной научной кооперации. Рассмотрен внутривосточный исследовательский ландшафт, отмечено повышение роли географической периферии и университетов в его формировании. На примере базовых направлений нанофотоники показан сдвиг интереса от фотонных кристаллов к метаматериалам (как в исследованиях, так и в патентовании). В качестве источников информации использованы: библиографическая база данных Science Citation Index Expanded (SCIE) и база данных Ведомства по патентам и товарным знакам США (USPTO).

**Ключевые слова:** нанофотоника, научная публикация, патент, анализ данных

Статья получена: 05.08.2021

Статья принята: 14.08.2021

**Н**анофотоника как фронт исследований, относящихся к взаимодействию света с материей на наномасштабе, появилась в начале 2000-х годов. Драйвером роста стали открываемые новые возможности в светодиодах и солнечных батареях, биофотонной медицинской терапии и диагностике, сверхзащищен-

# Biblio- and Patentometric Analysis of the Development of Nanophotonics: 2000–2020

A. I. Terekhov

FSBIS Central Economics and Mathematics Institute RAS, Moscow, Russia

The article analyzes the development of research, the structure and dynamics of patenting scientific results in the field of nanophotonics in the period 2000–2020. The focus is on the global publication output and the contribution of individual countries and their groups to it, the thematic structure of research, indicators of international scientific cooperation. The internal Russian research landscape is considered, an increase in the role of the geographic “periphery” and universities in its formation is noted. Using the basic directions of nanophotonics as an example, a shift of interest from photonic crystals to metamaterials (both in research and in patenting) is shown. The sources of information are the Science Citation Index Expanded bibliographic database (SCIE) and the United States Patent and Trademark Office (USPTO) database.

**Keywords:** nanophotonics, scientific publication, patent, data analysis

Received on: 05.08.2021

Accepted on: 14.08.2021

**N**anophotonics as a front for research related to the interaction of light with matter on the nanoscale appeared in the early 2000s. The growth driver was the new opportunities that are opening up in LEDs and solar panels, biophotonic medical therapy and diagnostics, ultra-secure communications and quantum information processing, as well as in the military sphere, for example, in elec-

ной связи и квантовой обработке информации, а также в военной сфере, например, в системах электроники на оружейных платформах, стелс-технологии и т. д. [1-3].

Ввиду отсутствия пока еще надежных экономических данных, для оценки результативности и конкурентных позиций стран в нанопотонике могут быть полезны наукометрические индикаторы. В частности, сведения о научных статьях и патентах способны дать представление о научно-технологическом заделе для ее будущих инновационных приложений. Используя библиометрические методы, мы изучим тематическую структуру исследований по нанопотонике, оценим количество и воздействие публикаций, производимых их основными участниками, проанализируем структуру международного научного сотрудничества, охарактеризуем внутрироссийский исследовательский ландшафт. Источником информации для этого выбрана библиографическая база данных Science Citation Index Expanded (БД SCIE). Источником необходимой патентной информации для анализа послужила база данных Ведомства по патентам и товарным знакам США (БД USPTO).

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исходная выборка – 77984 публикаций (типа: *article*, *review*, *proceedings paper*, *letter*) за период 2000–2020 годы – получена путем поиска в БД SCIE по ключевым терминам и их сочетаниям (см. Приложение) в полях «Заголовок» и «Ключевые слова автора». Ее данные были использованы для макроанализа на уровне стран и их групп. Сведения о 2986 публикациях с адресом в России обеспечили более детальное изучение внутрироссийского исследовательского ландшафта, оценки вклада и научного воздействия отечественных институтов. 2539 патентов США на изобретения по базовым тематикам нанопотоники («фотонные кристаллы», «метаматериалы», «плазмоника») извлечены из БД USPTO путем поиска по ключевым терминам в названиях и резюме патентных документов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Далее приведены основные результаты анализа в соответствии с поставленными задачами.

### Тематическая структура исследований

Тематический профиль отобранного массива публикаций характеризуют примерно 150 предметных категорий WoS, 20 из которых имеют

tronics systems on weapon platforms, stealth technology, etc. [1-3].

Due to the lack of reliable economic data, for assessing the performance and competitive positions of countries in nanophotonics, scientometric indicators can be useful. In particular, information about scientific articles and patents can give an idea of the scientific and technological groundwork for its future innovative applications. Using bibliometric methods, we will study the thematic structure of research in nanophotonics, assess the number and impact of publications produced by their main participants, analyze the structure of international scientific cooperation, and characterize the internal Russian research landscape. The bibliographic database Science Citation Index Expanded (DB SCIE) was selected as the source of information for this. The source of the necessary patent information for the analysis was the United States Patent and Trademark Office (USPTO) database.

## INITIAL DATA

Initial sample – 77984 publications (type: *article*, *review*, *proceedings paper*, *letter*) for the period 2000–2020 years – was obtained by searching the SCIE database for key terms and their combinations (see Appendix) in the “Title” and “Author’s keywords” fields. Her data were used for macro analysis at the level of countries and their groups. Information on 2986 publications with an address in Russia provided a more detailed study of the domestic Russian research landscape, assessment of the contribution and scientific impact of domestic institutions. 2539 US patents for inventions on basic topics of nanophotonics (“photonic crystals”, “metamaterials”, “plasmonics”) were retrieved from the USPTO database by searching for key terms in the titles and abstracts of patent documents.

## RESULTS

The following are the main results of the analysis in accordance with the tasks set.

### Thematic structure of research

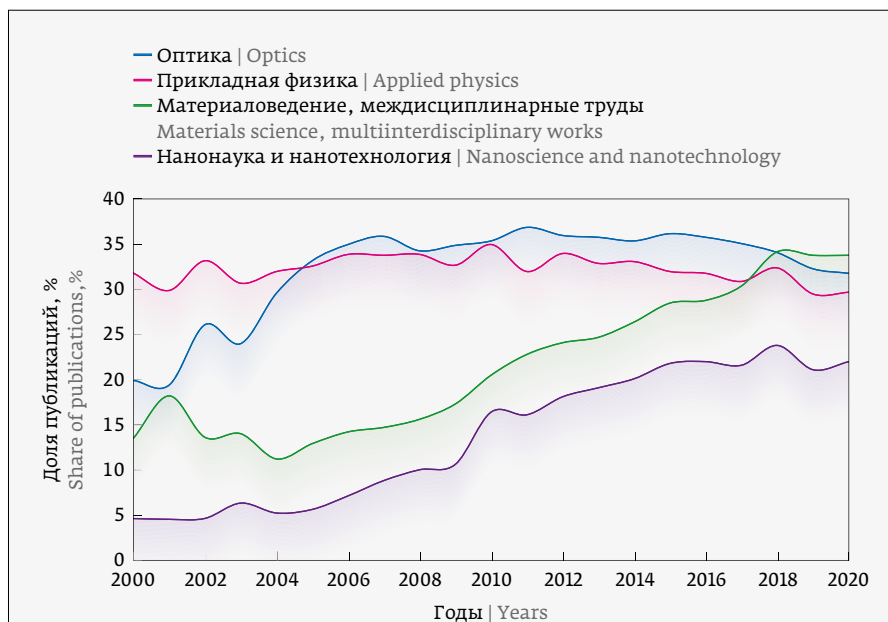
The thematic profile of the selected array of publications characterizes approximately 150 WoS subject categories, 20 of which have more than 1% contribution. The first five categories are: optics (~34% of publications), applied physics (~32%), materials science, multidisciplinary works (~26%), nanoscience and nanotechnology (~18%), engineering, electrical engineering and electronics (~15%). The dynamics of the thematic structure of research in nanophotonics in terms of WoS subject categories and such basic top-

более чем 1%-й вклад. Первые пять категорий – это: оптика (~34% публикаций), прикладная физика (~32%), материаловедение, междисциплинарные труды (~26%), нанонаука и нанотехнология (~18%), техника, электротехника и электроника (~15%).

Динамика тематической структуры исследований по нанофотонике в терминах предметных категорий WoS и таких базовых тематик, как фотонные кристаллы, метаматериалы и плазмоника [3], представлена на рис. 1 и 2. Рис. 1 показывает достаточно установившийся вклад двух лидирующих категорий WoS и поступательный рост материаловедческой и нанотехнологической составляющих в работах по нанофотонике. Как следует из рис. 2, этому не в последнюю очередь мог способствовать бурный рост интереса, особенно в последние годы, к метаматериалам. Ввиду важности был составлен специальный запрос для выявления биомедицинских приложений нанофотоники. Из 2621 отобранных по запросу публикаций 26,6% пришлось на долю США, 25,4% – Китая, 6,8% – Индии. Россия с 2,2%-м вкладом лишь на 16-м месте, что означает отсутствие специализации нашей страны в данном направлении. Интересно, что 13 публикаций по нанофотонике за 2020 год (6 статей и 7 обзоров) связаны с проблематикой COVID-19 и посвящены главным образом применению поверхностного плазмонного резонанса для диагностики коронавируса SARS-CoV-2 и разработки лекарственных препаратов. Среди авторов ученые из Китая, Испании, США, Великобритании, Бразилии и некоторых других стран.

В целом изучение тематической структуры публикационного массива (в том числе сочетания предметных категорий)

ics as photonic crystals, metamaterials, and plasmonics [3] is shown in Fig. 1 and 2. Fig. 1 shows the fairly steady contribution of the two leading categories of WoS and the progressive growth of the materials science and nanotechnological components in nanophotonics. As follows from Fig. 2, this, not least,



**Рис. 1.** Доля публикаций по нанофотонике в 4-х наиболее часто присваиваемых предметных категориях WoS: изменение по годам

**Fig. 1.** Share of publications on nanophotonics in the 4 most frequently assigned WoS subject categories: change over the years



**Рис. 2.** Изменение количества публикаций по трем базовым тематикам нанофотоники

**Fig. 2.** Change in the number of publications on three basic topics of nanophotonics



подтверждает междисциплинарный характер нанофотоники (см. [3]).

### Основные участники исследований (страны и группы стран) и их вклад

За рассматриваемый период в исследованиях по нанофотонике хотя бы минимально участвовали более ста стран. Наиболее значимый вклад (свыше 1% от общего количества публикаций) внесли 22 страны, перечисленные в табл. 1. Выделим из состава участников три сопоставимые по количеству публикаций группы стран: семерку промышленно развитых стран (США, Япония, Германия, Великобритания, Франция, Италия, Канада) – G7; семерку азиатских стран (Китай, Южная Корея, Индия, Иран, Тайвань, Сингапур, Турция) – условно «А-7» и «Остальной мир». В соревновании групп «А-7» не только выигрывает, обогнав в 2006 году «Остальной мир», а в 2013 году группу G7, но и определяет в последние годы мировую динамику роста количества публикаций (рис. 3). Китай, обойдя США в 2010 году, прочно закрепился на 1-й позиции в соревновании стран; ему хватило набранных темпов, чтобы в 2018 году превзойти по количеству производимых публикаций всю группу G7 (рис. 3). Согласно табл. 1 (1-й столбец), США, Великобритания, Канада на конец периода только сохранили свои позиции в рейтинге стран, тогда как Япония, Германия, Франция, Италия ухудшили их. Напротив, к концу периода Индия и Иран поднялись в рейтинге на 3-е и 4-е место соответственно, улучшили свои позиции Южная Корея и Турция, Сингапур сохранил за собой 15-е место, и лишь Тайвань опустился на две позиции. Бурному прогрессу Китая, очевидно, способствовали целенаправленная политика руководства и усиленное финансирование науки. Важную роль в нанофотонике сыграла Оптическая долина Китая (ОДК), а также принятая в 2009 году целевая программа по привлечению в ОДК научных талантов, в том числе из-за рубежа. Общую картину своеобразного наступления Востока на Запад в исследованиях по нанофотонике дополняет тот факт, что к 2020 году публи-

could be facilitated by the rapid growth of interest, especially in recent years, in metamaterials. Due to its importance, a special search query was drawn up to identify biomedical applications of nanophotonics. Of the 2621 publications selected by this query, 26.6% were from the United States, 25.4% from China, and 6.8% from India. Russia, with a 2.2% contribution, is only in 16th place, which means that our country does not specialize in this direction. Interestingly, 13 publications on nanophotonics for 2020 (6 articles and 7 reviews) are related to COVID-19 issues and are mainly devoted to the use of surface plasmon resonance for the diagnosis of SARS-CoV-2 coronavirus and drug development. Among the authors are scientists from China, Spain, USA, UK, Brazil and some other countries.

In general, the study of the thematic structure of the publication array (including the combination of subject categories) confirms the interdisciplinary nature of nanophotonics (see [3]).

### Key research actors (countries and groups of countries) and their contributions

During the period under review, more than a hundred countries participated in research on nanophotonics, at least minimally. The most significant contribution (over 1% of the total number of publications) was made by 22 countries listed in Table 1. Let us single out from the list of participants three groups of countries comparable in terms of the number

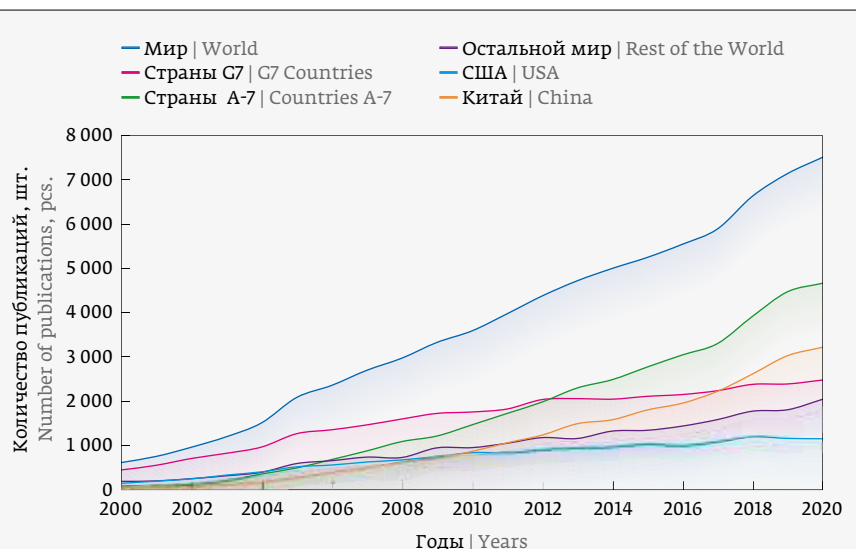


Рис. 3. Динамика публикационной активности в области нанофотоники стран и их групп

Fig. 3. Dynamics of publication activity in the field of nanophotonics of countries and their groups

Индия и Иран поднялись в рейтинге на 3-е и 4-е место соответственно, улучшили свои позиции Южная Корея и Турция, Сингапур сохранил за собой 15-е место, и лишь Тайвань опустился на две позиции. Бурному прогрессу Китая, очевидно, способствовали целенаправленная политика руководства и усиленное финансирование науки. Важную роль в нанофотонике сыграла Оптическая долина Китая (ОДК), а также принятая в 2009 году целевая программа по привлечению в ОДК научных талантов, в том числе из-за рубежа. Общую картину своеобразного наступления Востока на Запад в исследованиях по нанофотонике дополняет тот факт, что к 2020 году публи-



**Таблица 1.** Библиометрические показатели наиболее продуктивных в области нанопотоники стран (упорядочены по количеству публикаций за период 2000–2020 годы)

**Table 1.** Bibliometric indicators of the most productive countries in the field of nanophotonics (sorted by the number of publications for the period 2000–2020)

Место в общем рейтинге стран: за весь период / в 2020 году Place in the overall ranking of countries: for the entire period / in 2020	Страна Country	Количество публикаций (доля в %) Number of publications (share in %)	Доля цитат (%) Share of citations (%)	Доля публикаций с международным соавторством % Share of publications with international co-authorship (%)	Среднее число стран-соавторов Average number of sponsoring countries
1/1	Китай   China	24 029 (30,8)	19,5	22,8	2,3
2/2	США   USA	15 607 (20,0)	37,7	42,3	2,4
3/9	Япония   Japan	5 173 (6,6)	6,3	26,1	2,3
4/8	Германия   Germany	4 769 (6,1)	8,4	59,8	2,5
5/5	Великобритания   UK	4 342 (5,6)	9,6	65,5	2,5
6/7	Франция   France	3 987 (5,1)	5,9	58,6	2,5
7/6	Южная Корея   South Korea	3 581 (4,6)	3,6	29,9	2,3
8/3	Индия   India	3 559 (4,6)	2,5	20,8	2,3
9/10	Россия   Russia	2 986 (3,8)	2,5	52,7	2,5
10/11	Италия   Italy	2 593 (3,3)	3,3	56,8	2,6
11/4	Иран   Iran	2 371 (3,0)	1,1	17,6	2,4
12/12	Канада   Canada	2 325 (3,0)	3,7	47,9	2,4
13/13	Испания   Spain	2 305 (3,0)	4,4	59,6	2,6
14/16	Тайвань   Taiwan	2 198 (2,8)	2,0	25,2	2,4
15/15	Сингапур   Singapore	2 078 (2,7)	3,4	67,3	2,5
16/14	Австралия   Australia	2 042 (2,6)	3,5	66,4	2,5
17/20	Швейцария   Switzerland	1 242 (1,6)	2,0	67,5	2,6
18/27	Дания   Denmark	1 141 (1,5)	2,5	60,6	2,5
19/29	Швеция   Sweden	1 057 (1,4)	1,9	70,5	2,5
20/25	Нидерланды   Netherlands	981 (1,3)	2,0	58,4	2,6
21/18	Турция   Turkey	953 (1,2)	1,1	37,0	2,6
22/31	Израиль   Israel	800 (1,0)	1,1	46,8	2,6
–	Мир   World	77 984 (100,0)	100,0	–	–



кационного вклада более 1% достигли Малайзия, Саудовская Аравия, Вьетнам, Пакистан, Египет и Бангладеш, тогда как вклад Дании, Швеции и Израиля стал ниже этого уровня.

Созданные еще в советские годы научные школы в области оптики и наноструктурированных материалов позволили России с самого начала включиться в исследования по нанопотонике. Доля ее публикаций в данной области за период 2000–2020 годы превышает ее долю в науке в целом по БД SCIE в 1,5 раза. Она устойчиво входит в Топ-10 стран; в рейтинге 2020 г. Россия находилась между двумя членами G7: Японией и Италией (табл. 1). Более высокое место она занимает в таких горячих тематиках, как «фотонные кристаллы» (7-е) и «метаматериалы» (8-е).

Вклад стран можно оценивать не только с количественной, но и с качественной точки зрения, воспользовавшись показателями цитирования. На момент проведения обследования (май 2021 г.) публикации из исходной выборки были процитированы более 2,194 млн. раз. В табл. 1 (столбец 4) приведен вклад стран в общее количество цитат. Лидируют США, за ними с большим отрывом следует Китай. Вклад Китая и России в общее количество публикаций (30,8 и 3,8% соответственно) отстает от их вклада в общее количество цитат (19,5 и 2,5% соответственно), что служит первым сигналом о низком воздействии публикаций обеих стран. Детализацию картины обеспечивает относительный показатель цитирования (ОПЦ)\*, демонстрирующий научное влияние страны. Согласно рис. 4, публикации, производимые Китаем и Россией (за небольшим исключением), цитируются ниже среднемирового уровня, хотя в последние годы у обеих стран заметен прогресс: они обошли Японию; Китай превысил, а Россия вплотную приблизилась к среднемировому уровню цитирования. На этом фоне США

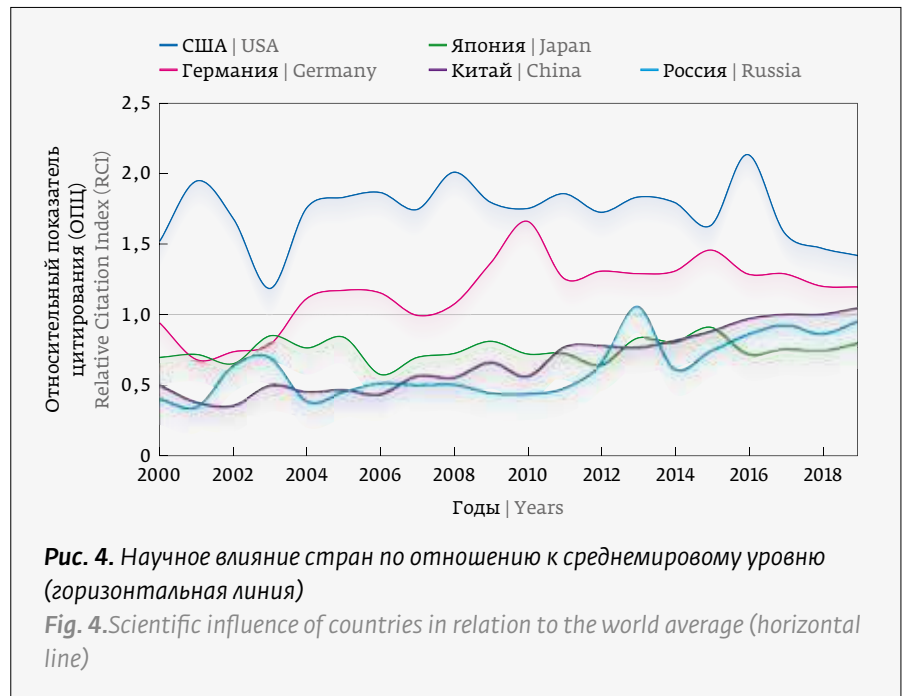


Рис. 4. Научное влияние стран по отношению к среднемировому уровню (горизонтальная линия)

Fig. 4. Scientific influence of countries in relation to the world average (horizontal line)

of publications: seven industrialized countries (USA, Japan, Germany, UK, France, Italy, Canada) – G7; seven Asian countries (China, South Korea, India, Iran, Taiwan, Singapore, Turkey) – conventionally “A-7” and “Rest of the World”. In the competition of the groups, “A-7” not only wins, overtaking the rest of the world in 2006 and the G7 group in 2013, but also determines the global dynamics of the growth in the number of publications in recent years (Fig. 3). China, having surpassed the United States in 2010, firmly entrenched itself in the 1st position in the competition among countries; it had enough momentum to surpass the entire G7 group in terms of the number of publications produced in 2018 (Fig. 3). According to Table 1 (1st column), the USA, UK, Canada at the end of the period only retained their positions in the ranking of countries, while Japan, Germany, France, Italy worsened them. On the contrary, by the end of the period, India and Iran rose in the ranking to 3rd and 4th places, respectively, South Korea and Turkey improved their positions, Singapore retained its 15th place and only Taiwan dropped two positions. China’s rapid progress has apparently been fueled by targeted leadership policies and increased funding for science. An important role in nanophotonics was played by the Optical Valley of China (OVC), as well as a targeted program adopted in 2009 to attract scientific talent to the OVC, including from abroad. The general picture of a kind of “offensive” of the East to the West in research on nanophotonics is complemented by the fact that by 2020 the publication contribution of

\* ОПЦ рассчитывается путем деления средней цитируемости публикаций страны на среднюю цитируемость публикаций мира и показывает, выше или ниже среднемирового уровня (=1) цитируются публикации этой страны.



и Германия в последние годы снижают свое влияние в терминах ОПЦ.

Заметим, что для Китая и России международное соавторство заметно повышало цитируемость публикаций по нанофотонике. Так, соавторские публикации Китая цитировались в среднем чаще его автономных публикаций от 1,1 до 3-х раз в зависимости от года выхода; для России же этот показатель колебался по годам от 1,5 до 8,7 раз. Данное обстоятельство создает дополнительный интерес к изучению научного сотрудничества стран в нанофотонике.

### Международное сотрудничество (соавторство)

Роль международного сотрудничества в современной науке все более возрастает. Согласно нашему расчету, доля международно-соавторских публикаций по нанофотонике выросла с 22,5% в 2007 году до 28,3% в 2020 году. Среднее число стран, ученые которых были соавторами, в расчете на одну публикацию составляло в эти же годы 2,2 и 2,4 соответственно, что, в частности, говорит о преобладании двустороннего международного партнерства в данной области. Доля международно-соавторских публикаций у стран из табл. 1 довольно различна: от 17,6% у Ирана до 70,5% у Швеции. В целом наибольшая степень интернационализации исследований характерна для европейских стран и Австралии, наименьшая – для стран из «А-7» (исключая Сингапур). При этом среднее число стран-партнеров в соавторских публикациях разных стран варьируется слабо: в диапазоне 2,3–2,6 (табл. 1). Для России наблюдается постепенный переход к многостороннему международному сотрудничеству: если в 2000 году доля ее публикаций с соавторством ученых из трех и более стран составляла около 27% то в 2007 году – 35, в 2014 году – 37 и в 2020 году – 45%.

Проанализируем кратко соавторскую сеть 22 стран (из табл. 1), в которой отсутствуют только две соавторские связи: между Израилем и Ираном, Израилем и Турцией. Чтобы оценить силу соавторских связей для остальных 229 пар стран, рассчитаем показатель Солтона (IS)\*. Разобьем

\* Индекс Солтона – не имеющий размерности показатель силы сотрудничества. Для пары стран он рассчитывается путем деления числа их соавторских публикаций на среднее геометрическое число всех публикаций каждого из партнеров. Впервые в библиометрической практике предложен в [4], впоследствии стал активно применяться при анализе сетей международного соавторства [5].

more than 1% was reached by Malaysia, Saudi Arabia, Vietnam, Pakistan, Egypt, and Bangladesh, while the contribution of Denmark, Sweden and Israel became lower this level.

The scientific schools in the field of optics and nanostructured materials, created back in the Soviet years, allowed Russia from the very beginning to get involved in research in nanophotonics. The share of her publications in this area for the period 2000–2020 exceeds its share in science as a whole for the SCIE database by 1.5 times. It is consistently included in the Top 10 countries; in the 2020 ranking, Russia was between two members of the G7: Japan and Italy (tab. one). It takes a higher place than in general in such “hot” topics as “photonic crystals” (7th) and “metamaterials” (8th).

The contribution of countries can be assessed not only quantitatively but also qualitatively using citation indicators. At the time of the survey (May 2021), publications from the original sample were cited more than 2.194 million times. Table 1 (column 4) shows the contribution of countries to the total number of citations. The United States is in the lead, followed by China by a large margin. The contribution of China and Russia to the total number of publications (30.8 and 3.8%, respectively) lags behind their contribution to the total number of citations (19.5 and 2.5%, respectively), which is the first signal of the low impact of publications of both countries. The detail of the picture is provided by the relative citation index (RCI)\*, which demonstrates the scientific influence of the country. According to Fig. 4, publications produced by China and Russia (with a few exceptions) are cited below the world average, although in recent years both countries have made progress: they have bypassed Japan; China exceeded, and Russia came close to the world average citation level. Against this background, the United States and Germany have been decreasing their influence in terms of RCI in recent years.

Note that for China and Russia, international co-authorship significantly increased the citation rate of publications on nanophotonics. Thus, China's co-authorship publications were cited on average more often than its stand-alone publications from 1.1 to 3 times, depending on the year of publication; for Russia, this indicator fluctuated from 1.5 to 8.7 times over the years. This circumstance creates addi-

\* RCI is calculated by dividing the average citations of publications in a country by the average citations of publications in the world and shows whether the publications of that country are cited above or below the world average (= 1).



далее совокупность полученных значений с помощью квартилей на четыре примерно равные части, которые обозначим:  $S_1$  – первую (или нижнюю – с наименьшими значениями IS),  $S_2$  – вторую,  $S_3$  – третью и, наконец,  $S_4$  – четвертую (или верхнюю – с наибольшими значениями IS). В первую очередь интересны группы наиболее тесно сотрудничающих стран, поэтому рассмотрим страны со связями в  $S_4$ . Наибольшее число таких связей (18) имеют США; за ними следуют Германия и Великобритания (по 11 связей), Франция (9), Испания и Швейцария (по 8), Италия и Швеция (по 7) и т. д. Среди азиатских стран в  $S_4$  больше всего связей у Китая (5) и Сингапура (4), а у Индии и Ирана их нет вообще. У России 6 связей в  $S_4$ : с Германией (IS=0,091), Австралией (0,078), Великобританией (0,051), США (0,05), Данией (0,041) и Францией (0,04). Наибольшую клику\*\* в  $S_4$  образуют 7 стран: США, Германия, Великобритания, Франция, Италия, Испания и Швейцария. Россия вместе с США, Германией, Великобританией и Францией образует в  $S_4$  максимальную клику. Если добавить связи из  $S_3$ , то в  $S_4 \cup S_3$  эта пятерка стран вместе с Данией, Швецией и Нидерландами составляет наибольшую клику размера 8. Таким образом, в нанопотонике Россия входит в тесно сплоченное исследовательское сообщество с учеными из Европы и США; помимо этого у нее сильные соавторские связи и с учеными из Австралии. Рассмотрим теперь сеть в разрезе априорно выделенных групп стран: G7, «А-7» и «Остальной мир» в лице восьми представителей из табл. 1. Согласно распределению значений показателя IS, наиболее сплоченной из них является группа G7 (~90% ее внутренних связей входит в  $S_4 \cup S_3$ , причем 62% – в  $S_4$ ); для «Остального мира» и группы «А-7» аналогичные показатели составляют: 75 и 29%, 24 и 5% соответственно. Перекрестные связи групп «А-7» и «Остального мира» с группой G7 в совокупности сильнее внутренних связей каждой из них, что более выражено для «А-7». Учитывая, что между собой «А-7» и «Остальной мир» связаны слабо (~88% их перекрестных связей входят в  $S_2 \cup S_1$ , причем 55% – в  $S_1$ ), это подтверждает определенную притягательность сотрудничества с группой промышленно развитых стран. В большей степени это характерно для «А-7», тогда как для восьми представителей «Остального мира» из табл. 1 перекрестные связи с G7 и их внутренние связи более или менее сбалансированы.

\*\* Клика – термин теории графов. Здесь означает подмножество стран, любые две из которых имеют соавторские связи.

tional interest in the study of scientific cooperation between countries in nanophotonics.

### International cooperation (co-authorship)

The role of international cooperation in modern science is growing more and more. According to our calculations, the share of internationally co-authored publications on nanophotonics increased from 22.5% in 2007 to 28.3% in 2020. The average number of countries whose scientists were co-authors per publication was 2.2 and 2.4, respectively, in the same years, which, in particular, indicates the prevalence of bilateral international partnerships in this area. The share of internationally co-authored publications in the countries from Table 1 is quite different: from 17.6% for Iran to 70.5% for Sweden. In general, the greatest degree of internationalization of research is characteristic of European countries and Australia, the least – for countries from the “А-7” (excluding Singapore). At the same time, the average number of partner countries in co-authored publications of different countries varies slightly: in the range of 2.3–2.6 (tab. one). For Russia, there is a gradual transition to multilateral international cooperation: if in 2000 the share of its publications with co-authorship of scientists from three or more countries was about 27%, then in 2007–35, in 2014–37 and in 2020–45%.

Let us briefly analyze the co-authorship network of 22 countries (from Table 1), which lacks only two co-author's ties: between Israel and Iran, Israel and Turkey. To assess the strength of co-authorship ties for the remaining 229 country pairs, calculate the index of Salton (IS)\*\*. Let us further divide the total of the obtained values using quartiles into four approximately equal parts, which we denote:  $S_1$  – the first (or lower – with the smallest IS values),  $S_2$  – the second,  $S_3$  – the third and, finally,  $S_4$  – the fourth (or upper – with the highest IS values). First of all, the groups of the most closely cooperating countries are of interest, so consider the countries with links in  $S_4$ . The United States has the largest number of such links (18); they are followed by Germany and the UK (11 ties each), France (9), Spain and Switzerland (8 each), Italy and Sweden (7 each), etc. Among Asian countries in  $S_4$ , China (5) and Singapore (4) have the most

\*\* The index of Salton is a non-dimensional measure of the strength of cooperation. For a couple of countries, it is calculated by dividing the number of their co-authored publications by the geometric mean of all publications of each partner. For the first time in bibliometric practice it was proposed in [4]; later it became actively used in the analysis of networks of international co-authorship [5].





Отметим, что в 2014–2020 годах (по сравнению с 2007–2013 годами) ослабления соавторских связей России с четверкой ведущих западных стран не наблюдалось независимо от участия или неучастия в них третьей стороны. Однако по сравнению с 2000–2006 годами эти связи заметно ослабли.

### Важные институциональные участники исследований: в мире и России

Мировой исследовательский ландшафт в нанопотонике определяют крупные национальные научно-организационные структуры, университеты и в значительно меньшей степени корпоративный сектор. В числе первых, например: Китайская академия наук (4,8%; 15,7%<sup>\*</sup>); Национальный центр научных исследований Франции, НЦНИ (3,8%; 73,8%); Российская академия наук, РАН (2,2%; 57,5); Министерство энергетики США (1,7%; 8,6%); Национальный исследовательский совет Италии (1,3%; 38,6%); Общество Макса Планка (Германия) (1,1%; 17,4%); Высший совет по научным исследованиям (Испания) (0,9%; 30,4%); Агентство научно-технологических исследований A\*STAR (Сингапур) (0,8%; 31,6%); Министерство обороны США (0,7%; 3,6%) и др. В некоторых странах (Франция, Россия) вклад этих структур в национальный публикационный выход весьма значителен, что говорит о высокой степени централизации исследований. Тем не менее основными производителями научного знания в области нанопотоники в мире и в большинстве стран выступают университеты. Так, в первой мировой двадцатке по количеству произведенных публикаций США представляют Система Калифорнийского университета (1573 публикации; 1-е место), Система Техасского университета (773; 8-е), Массачусетский технологический институт (663; 17-е), Стэнфордский университет (607; 20-е); Китай – Юго-восточный университет (1082; 4-е), Нанкинский университет (918; 5-е), Чжэцзянский университет (882; 6-е), Университет Китайской академии наук (747; 9-е), Хуачжунский университет науки и технологий (740; 10-е), Университет электронных наук и технологий (707; 11-е), Харбинский технологический университет (687; 12-е); Университет Цинхуа (677; 13-е), Пекинский университет (674; 14-е), Тяньцзиньский университет (625; 19-е); Сингапур – Наньянский технологический университет (1111; 3-е), Национальный университет Сингапура (669; 15-е); Индию – Система

links, while India and Iran have none at all. Russia has 6 links in  $S_4$ : with Germany ( $IS=0.091$ ), Australia (0.078), UK (0.051), USA (0.05), Denmark (0.041) and France (0.04). The largest clique\* in  $S_4$  is formed by 7 countries: USA, Germany, UK, France, Italy, Spain and Switzerland. Russia, together with the USA, Germany, Great Britain and France, forms the maximum clique in  $S_4$ . If we add links from  $S_3$ , then in  $S_4 \cup S_3$  these five countries, together with Denmark, Sweden and the Netherlands, make up the largest clique of size 8. Thus, in nanophotonics, Russia is part of a closely cohesive research community with scientists from Europe and the United States; in addition, it has strong co-authorship ties with scientists from Australia. Let us now consider the network in the context of the a priori selected groups of countries: G7, “A-7” and “Rest of the World” represented by eight representatives from Table 1. According to the distribution of IS indicator values, the most cohesive of them is the G7 group (~90% of its internal links are included in  $S_4 \cup S_3$ , with 62% in  $S_4$ ); for the “Rest of the World” and the “A-7” group, the similar figures are: 75 and 29%, 24 and 5%, respectively. The cross-links between the “A-7” and “Rest of the World” groups with the G7 group are collectively stronger than the internal ties of each of them, which is more pronounced for “A-7”. Considering that “A-7” and the “Rest of the World” are weakly connected with each other (~88% of their cross-links are in  $S_2 \cup S_1$ , and 55% are in  $S_1$ ), this confirms the certain attractiveness of cooperation with a group of industrialized countries. To a greater extent, this is typical for “A-7”, while for eight representatives of the “Rest of the World” from Table 1, the cross-links with the G7 and their internal links are more or less balanced.

Note that in 2014–2020 (compared to 2007–2013), the weakening of Russia’s co-authorship ties with the four leading Western countries was not observed, regardless of the participation or non-participation of a third party in them. However, compared with 2000–2006, these ties have noticeably weakened.

### Important Institutional Research Participants: Worldwide and Russia

The global research landscape in nanophotonics is determined by large national scientific and organizational structures, universities and, to a much lesser extent, the corporate sector. Among the first, for example: Chinese Academy of Sciences (4.8%; 15.7%<sup>\*\*</sup>); National Center for Scientific Research of

\* Clique is a graph theory term. Here it means a subset of countries, any two of which have co-authorship links.

\*\* The 1<sup>st</sup> indicator corresponds to the contribution to the world

\* 1-й показатель соответствует вкладу в мировые, а 2-ой – в национальные публикации по нанопотонике.



Индийских институтов технологий (1117; 2-е); Францию – Университет Париж – Саклей (775; 7-е); Данию – Датский технический университет (663; 16-е); Тайвань – Национальный университет Тайваня (631; 18-е). В приведенном списке преобладают университеты из Азии. Однако научное влияние может быть связано не только с количеством публикуемых работ, но и с их качеством, часто измеряемым цитированием. В этом отношении заметным влиянием могут обладать менее крупные университеты. Например, из 470 публикаций по нанопотонике Имперского колледжа Лондона 90 и 14 вошли соответственно в Топ-10% и Топ-1% сегменты высоко цитируемых публикаций. Для Технологического института Карлсруэ (Германия) аналогичное соотношение составило 382, 72 и 10 публикаций, а для отечественного ИТМО – Университета – 457, 71 и 11 публикаций соответственно. Как правило, такие университеты активно участвуют в международном сотрудничестве: так, доля международно-соавторских публикаций Технологического института Карлсруэ, Имперского колледжа Лондона и ИТМО – Университета составила 57, 66 и 80% соответственно.

О прикладной направленности исследований может говорить участие в них представителей корпоративного сектора. В нанопотонике это такие гиганты ИКТ-отрасли, как: Nippon Telegraph Telephone Corporation (Япония) – 242 публикации; Samsung Group (Южная Корея) – 126; Thales Group (Франция) – 108; International Business Machines IBM (США) – 107; Hewlett-Packard (США) – 42 публикации. Сюда же входят компании с меньшим публикационным вкладом, например американские: Omega Optics Inc (оптические сенсоры, биосенсоры, оптические коммуникации), Lockheed Martin Corporation (авиастроение, авиакосмическая техника, судостроение), PFIZER (биофармацевтика), SensorMetrix Inc (метаматериалы, системы детектирования) и др.; китайские оптоволоконные компании из ОДК: Yangtze Optical Fiber & Cable Co.Ltd, Wuhan Research Institute of Post & Telecommunications Co.Ltd. В целом на долю корпоративного сектора в рассматриваемый период пришлось около 1,5% мировых публикаций. В публикационном выходе США эта доля составила примерно 2,2%, а Китая – менее 1%. Интересно, что даже в открытой части на долю военно-исследовательских структур этих стран пришлось больше публикаций: примерно 3,6 и 2,3% соответственно.

**Таблица 2.** Российские города с наибольшим количеством публикаций по нанопотонике

**Table 2.** Russian cities with the largest number of publications on nanophotonics

№ No.	Город City	Количество публикаций Number of publications
1	Москва   Moscow	1 423
2	Санкт-Петербург   St. Petersburg	847
3	Долгопрудный   Dolgoprudny	161
4	Новосибирск   Novosibirsk	144
5	Саратов   Saratov	121
6	Красноярск   Krasnoyarsk	114
7	Нижний Новгород   Nizhny Novgorod	103
8	Ульяновск   Ulyanovsk	81
9	Троицк   Troitsk	72
10	Томск   Tomsk	69
11	Владивосток   Vladivostok	48
12	Черноголовка   Chernogolovka	44
13	Казань   Kazan	37
14	Сколково   Skolkovo	36

France, CNRS (3.8%; 73.8%); Russian Academy of Sciences, RAS (2.2%; 57.5); US Department of Energy (1.7%; 8.6%); National Research Council of Italy (1.3%; 38.6%); Max Planck Society (Germany) (1.1%; 17.4%); Spanish National Research Council (0.9%; 30.4%); Agency for Science, Technology and Research A\*STAR (Singapore) (0.8%; 31.6%); US Department of Defense (0.7%; 3.6%), etc. In some countries (France, Russia), the contribution of these structures to the national publication output is very significant, which indicates a high degree of centralization of research. Nevertheless, universities are the main producers of scientific knowledge in the field of nanophotonics in the world and in most countries. So, in the first world twenty in terms of the number of publications produced, the United States is represented by the University of California System (1573 publications; 1st place), University of Texas System (773; 8th), Massachusetts Institute of Technology (663; 17th), Stanford University (607; 20th); China – Southeast University (1082; 4th), Nanjing University (918; 5th), Zhejiang University (882; 6th), University of the Chinese Academy

publications on nanophotonics, and the 2<sup>nd</sup> - to the national ones.



**Таблица 3.** Топ 10 наиболее продуктивных в области нанофотоники российских институтов, 2000–2020 годы

**Table 3.** Top 10 most productive Russian institutes in the field of nanophotonics, 2000–2020

Ранг Rank	Институт Institute	Количество публикаций Number of publications	Количество публикаций в топ-10%/1% сегментах (2000–2019 годы) Number of publications in the Top 10%/1% segments (2000–2019)
1	МГУ   MSU	602	22/6
2	ИТМО   ITMO	457	71/11
3	ФТИ РАН   PTI RAS	345	22/3
4	ФИ РАН   LPI RAS	201	6/1
5	МФТИ   MIPT	171	11/3
6	ИОФ РАН   GPI RAS	145	6/–
7	ИРЭ РАН   IRE RAS	115	7/–
8	ФНИЦ КИФ РАН   FRC C&P RAS	104	1/–
9	ИФ СО РАН   IP SB RAS	102	–/–
10	ИСАН   ISAN	99	4/–
	Университеты   Universities	2056	125/19
	РАН   RAS	1716	72/6
	Всего   total	2984	172/22

Примечание: МГУ – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; ИТМО – Университет ИТМО; ФТИ РАН – Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН; ФИ РАН – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН; МФТИ – Московский физико-технический институт (государственный университет); ИОФ РАН – Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН; ИРЭ РАН – Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН; ФНИЦ КИФ РАН – Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН; ИФ СО РАН – Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН; ИСАН – Институт спектроскопии РАН,

Note: MSU – Lomonosov Moscow State University; ITMO – ITMO University; PTI RAS – A. F. Ioffe Physical-Technical Institute of RAS; LPI RAS – P. N. Lebedev Physical Institute of RAS; MIPT – Moscow Institute of Physics and Technology (State University); GPI RAS – A. M. Prokhorov General Physics Institute of RAS; IRE RAS – V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS; FRC C&P RAS – Federal Research Center “Crystallography and Photonics” of RAS; IP SB RAS – L. V. Kirensky Institute of Physics of SB of RAS; ISAN – Institute of Spectroscopy of RAS,

Охарактеризуем кратко российский исследовательский ландшафт. Табл. 2 показывает достаточно широкую географию отечественных исследований. Тем не менее на долю Москвы пришлось около 48% всех российских публикаций по нанофотонике. Это сильно контрастирует

of Sciences (747; 9th), Huazhong University of Science and Technology (740; 10th), University of Electronic Science and Technology (707; 11th), Harbin University of Technology (687; 12th); Tsinghua University (677; 13th), Peking University (674; 14th), Tianjin University (625; 19th); Singapore – NanYang Technological University (1111; 3rd), National University of Singapore (669; 15th); India – Indian Institute of Technology System (1117; 2nd); France – University Paris Sacklay (775; 7th); Denmark – Technical University of Denmark (663; 16th); Taiwan – National Taiwan University (631; 18th). The above list is dominated by universities from Asia. However, scientific impact can be related not only to the number of published works, but also to their quality, often measured by citation. In this respect, smaller universities can have a noticeable influence. For example, of the 470 nanophotonics publications at Imperial College London, 90 and 14 were included in the Top 10% and Top 1%, respectively, of the highly cited publications segments. For the Karlsruhe Institute of Technology (Germany), a similar ratio was 382, 72, and 10 publications, and for the Russian ITMO University – 457, 71 and 11 publications, respectively. As a rule, such universities are actively involved in international cooperation: for example, the share of internationally co-authored publications of the Karlsruhe Institute of Technology, Imperial College London and ITMO University was 57, 66 and 80%, respectively.

The participation of representatives of the corporate sector in them can indicate the applied orientation of research. In nanophotonics, these are such giants of the ICT industry as: Nippon Telegraph Telephone Corporation (Japan) – 242 publications; Samsung Group (South Korea) – 126; Thales Group (France) – 108; International Business



с другими столицами мира: так, доля Пекина и Лондона в национальном публикационном выходе примерно по 22%, Токио – 20, Парижа – 14, Берлина – 13%. Вклад трех городов США – Бостона, Лос-Анджелеса и Нью-Йорка – 3,4; 2,4 и 2,3%, соответственно. Условный «Центр» – Москва и Санкт-Петербург вместе с Московской и Ленинградской областями – произвел за весь период 70% всех российских публикаций. Однако со временем производство научного знания все же распространялось, и в результате публикационный вклад «Центра» сократился с 78 в 2000–2006 годы до 65% в 2014–2020 годы.

Наряду с географической деконцентрацией имела место и децентрализация исследований. На фоне уменьшения вклада РАН (с 59 до 52% в сравнимые периоды\*) заметно вырос вес российских университетов, а отечественные лидеры – МГУ и ИТМО – заняли в мировом рейтинге университетов по количеству публикаций 21-е и 40-е место соответственно. Университеты совокупно внесли больший, чем РАН, вклад в топ-10% и топ-1% сегменты высоко цитируемых публикаций (табл. 3). Характерно, что ИТМО, внесший максимальный вклад в эти элитные сегменты мировых публикаций по нанофотонике, имел высочайшую степень научной кооперации (международной и внутренней): лишь 7% всех работ были выполнены им автономно. Для сравнения: у Технологического института Карлсруэ и Имперского колледжа Лондона доля таких работ составляла 17 и 27% соответственно. ИТМО сотрудничал с учеными из 39 стран и более чем 300-х научных организаций. Его наиболее предпочтительными международными партнерами были Австралия (Австралийский национальный университет, АНУ), США (Система Техасского университета), Великобритания (Лондонский университет). Более 75% публикаций ИТМО, совместных с АНУ, выполнены учеными Международного научно-исследовательского центра нанофотоники

\* Интересно, что вклад НЦНИ Франции в национальный публикационный выход в 2014–2020 годы, напротив, вырос по сравнению с 2000–2006 годами с 61 до 77%.

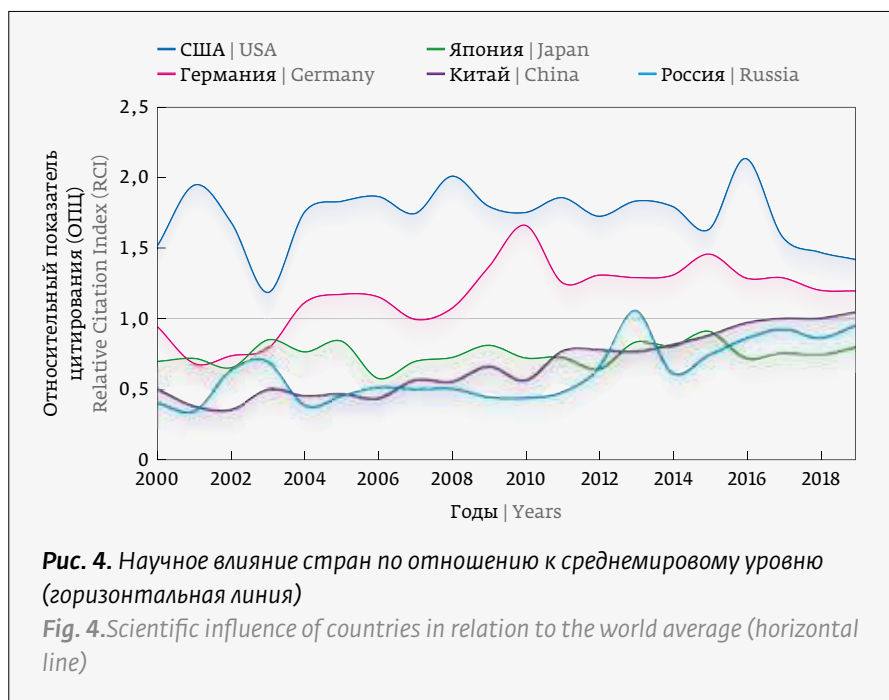
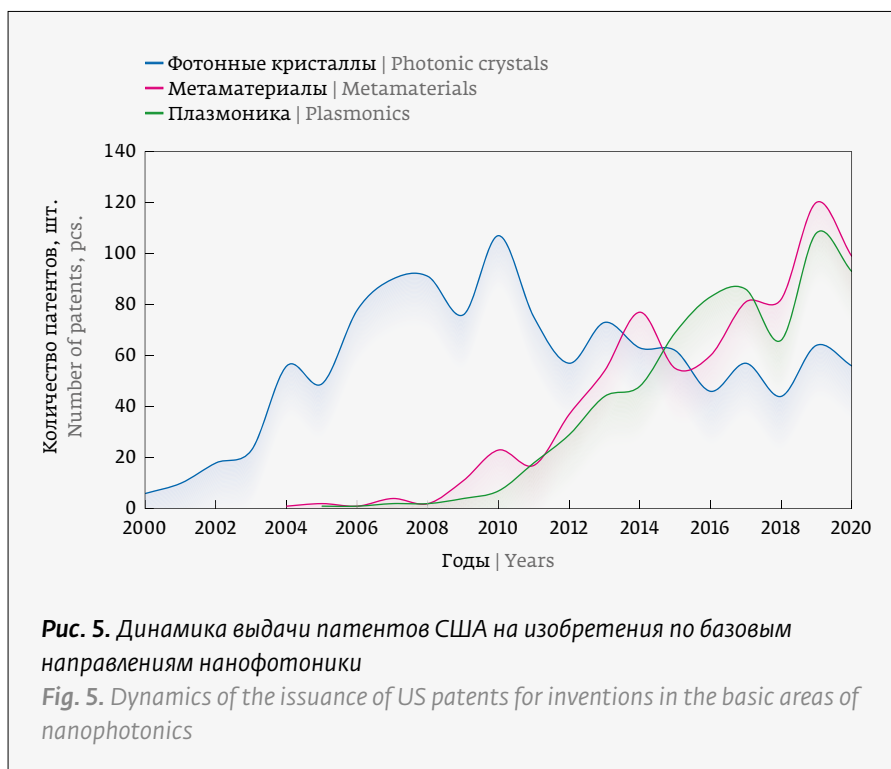


Рис. 4. Научное влияние стран по отношению к среднему мировому уровню (горизонтальная линия)

Fig. 4. Scientific influence of countries in relation to the world average (horizontal line)

Machines IBM (USA) – 107; Hewlett-Packard (USA) – 42 publications. This also includes companies with less publication contribution, for example, American: Omega Optics Inc (optical sensors, biosensors, optical communications), Lockheed Martin Corporation (aircraft industry, aerospace engineering, shipbuilding), PFIZER (biopharmaceuticals), SensorMetrix Inc (metamaterials, detection systems), etc.; Chinese fiber optic companies from OVC: Yangtze Optical Fiber & Cable Co. Ltd, Wuhan Research Institute of Post & Telecommunications Co. Ltd. In general, the corporate sector in the period under review accounted for about 1.5% of world publications. In the publication output of the United States, this share was approximately 2.2%, while China’s – less than 1%. It is interesting that even in the open part, the share of the military research structures of these countries accounted for more publications: approximately 3.6 and 2.3%, respectively.

Let us briefly characterize the Russian research landscape. Table 2 shows a fairly wide geography of Russian studies. Nevertheless, Moscow accounted for about 48% of all Russian publications on nanophotonics. This contrasts strongly with other capitals of the world: for example, the share of Beijing and London in the national publication output is about 22%, Tokyo – 20, Paris – 14, Berlin – 13%. Contribution of three US cities – Boston, Los Angeles and New York – 3.4; 2.4 and 2.3%, respectively. The conditional “Center” – Moscow and St. Petersburg together with the Moscow and Leningrad regions – produced over



и метаматериалов, созданного под руководством Ю. С. Кившаря (АНУ) и П. А. Белова (ИТМО), что говорит об успешной реализации выигранного ими в 2010 году мегагранта российского правительства. Внутри страны ИТМО активно сотрудничает с РАН и прежде всего с Физико-техническим институтом им. А. Ф. Иоффе.

Вклад отечественного корпоративного сектора в публикационный выход страны пока не превышает 1%; в исследованиях приняли участие лишь несколько малых инновационных компаний: ООО «Новые энергетические технологии» (Сколково; медицинское оборудование, лазерные технологии, солнечная энергетика); ООО НПП «Наноструктурная технология стекла» (Саратов; производство стеклянных микро- и наноструктур для применений в биомедицине и оптике); ООО «НТ-МДТ» (Зеленоград; сканирующая зондовая микроскопия); ООО «Авеста» (Троицк; лазеры и оптические системы).

### Патентование научных результатов

Сигналом перехода к стадии внедрения можно считать патентование научных результатов. Динамика выдачи патентов США на изобретения по трем базовым тематикам нанофотоники показана на рис. 5. Как и в случае публикаций, сначала в тематической структуре изобретений преобладали фотонные кристаллы, однако затем

the entire period 70% of all Russian publications. However, over time, the production of scientific knowledge nevertheless spread, and as a result, the publication contribution of the Center fell from 78 in 2000–2006 to 65% in 2014–2020.

Along with geographic deconcentration, there has also been a decentralization of research. Against the background of the decrease in the contribution of the Russian Academy of Sciences (from 59 to 52% in the compared periods\*), the “weight” of Russian universities has noticeably increased, and Russian leaders – Moscow State University and ITMO – ranked 21st and 40th place, respectively in the world ranking of universities in terms of the number of publications. Universities collectively contributed more than RAS to the Top 10%

and Top 1% segments of highly cited publications (Table 3). It is characteristic that ITMO, which made the maximum contribution to these elite segments of world publications on nanophotonics, had the highest degree of scientific cooperation (international and domestic): only 7% of all publications was performed by it autonomously. For comparison: at the Karlsruhe Institute of Technology and Imperial College London, the proportion of such publications was 17 and 27%, respectively. ITMO collaborated with scientists from 39 countries and more than 300 scientific organizations. Its most preferred international partners were Australia (Australian National University, ANU), USA (University of Texas System), UK (University of London). More than 75% of ITMO publications, jointly with ANU, were made by scientists of the International Research Center for Nanophotonics and Metamaterials, created under the leadership of Yu. S. Kivshar (ANU) and P. A. Belova (ITMO), which speaks of the successful implementation of the mega-grant of the Russian government won by them in 2010. Within the country, ITMO actively cooperates with the Russian Academy of Sciences and, first of all, with the A. F. Ioffe Physical-Technical Institute.

\* Interestingly, the contribution of the CNRS of France to the national publication output in 2014–2020, on the contrary, increased compared to 2000–2006, from 61 to 77%.

изобретательский интерес сместился в пользу метаматериалов и плазмоники. 57% от общего числа патентов по трем указанным тематикам были выданы американским патентовладельцам. За ними следуют патентовладельцы из азиатских стран: Японии (~13%), Южной Кореи (~7%) и Китая (~4%). Представители России входили в состав изобретательских коллективов в шести патентах:

1. «Активный фотонно-кристаллический волновод: устройство и метод» (патент № 6674949; выдан в 2004 году.). Изобретатель из Санкт-Петербурга (Россия) и трое из США, Канады и Франции; патентовладелец - Corning, Inc (США);
2. «Методы, материалы и устройства плазмонной нанофотоники» (№ 6977767; 2005 год). Изобретатель из Долгопрудного (Россия) и трое из США; патентовладелец - Arrowhead Center, Inc (США);
3. «Настраиваемый терагерцевый фильтр из метаматериала» (№ 8958050; 2015 год). Изобретатели из Санкт-Петербурга (Россия); патентовладелец - Samsung Electronics Co., Ltd. (Южная Корея);

The contribution of the domestic corporate sector to the country's publication output does not yet exceed 1%; only a few small innovative companies took part in the research: New Energy Technologies LLC (Skolkovo; medical equipment, laser technologies, solar energy); NPP "Nanostructured Glass Technology" LLC (Saratov; production of glass micro- and nanostructures for applications in biomedicine and optics); NT-MDT LLC (Zelenograd; scanning probe microscopy); Avesta LLC (Troitsk; lasers and optical systems).

Patenting scientific results

The signal of the transition to the implementation stage can be considered the patenting of scientific results. The dynamics of the issuance of US patents for inventions on three basic topics of nanophotonics is shown in Fig. 5. As in the case of publications, at first, photonic crystals predominated in the thematic structure of inventions, however, then inventive interest shifted in favor of metamaterials and plasmonics. 57% of the total number of patents in these three areas were granted to US patent owners. They are followed by the patent holders from Asian countries: Japan (~13%), South Korea (~7%) and China (~4%). Representatives of Russia were part of the inventive teams in six patents:

Зарождая вопросы / Обнаруживая ответы



ORCA-Quest - первая количественная КМОП (qCMOS) камера с функцией количественного определения числа детектируемых фотонов. Это скачок в эволюции развития научных камер, который трансформирует изображение в понимание.

Начните Ваше приключение

**HAMAMATSU**  
PHOTON IS OUR BUSINESS  
www.hamamatsu.com

Представительство Hamamatsu Photonics в России и СНГ  
Тел: +7 (495) 258-85-18, E-mail: info@hamamatsu.ru



4. «Саморезонансный аппарат для системы беспроводной передачи энергии» (№ 9330836; 2016 год). Изобретатели из Санкт-Петербурга, Архангельска и Всеволожска (Россия), а также Южной Кореи; патентовладелец – Samsung Electronics Co., Ltd. (Южная Корея);
5. «Аппарат магнитно-резонансной томографии» (№ 10732237; 2020 год). Изобретатели из Санкт-Петербурга (Россия); заявитель патента – Университет ИТМО;
6. «Устройство и способ управления направлением распространения лазерного излучения с использованием множества наноплазмонных антенн» (№ 10831082; 2020 год). Изобретатели из Тулы, Долгопрудного и Краснодара (Россия); патентовладелец – Samsung Electronics Co., Ltd. (Южная Корея).

Как видим, патентоспособные идеи российских изобретателей, не находя заинтересованности у российских высокотехнологических компаний, утекают за рубеж. В то же время, согласно прогнозу аналитической компании ReportLinker (Франция), мировой рынок нанопластики (даже с учетом поправок на воздействие пандемии) достигнет к 2027 году 202 млрд. долларов; при этом среднегодовой темп роста в период 2020–2027 годов составит 37,6% [6].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нанопластика превратилась в последние годы в динамично растущую научную область с широким спектром технологических выходов. В глобальном научном соревновании показателен переход (с 2012 года) ключевого влияния на исследовательский ландшафт от группы промышленно развитых стран (G7) к группе быстро прогрессирующих азиатских стран («А-7»). На этом фоне Россия по публикационному выходу устойчиво входит в лидирующую десятку стран.

Все большая часть мировых исследований по нанопластике выполняется на международном уровне. При этом у разных стран свои особенности: если в Великобритании, Германии, США рост общего годового производства публикаций в последние годы полностью связан с международным сотрудничеством, то в Китае – преимущественно с внутренними исследованиями, а в России – с внутренними и международными исследованиями в равной мере.

Отечественные исследования достаточно тесно интегрированы в мировые: около 53% всех публикаций и 80% публикаций ИТМО имеют международное соавторство. Россия входит в сплоченное исследовательское сообщество с ведущими запад-

1. «Active photonic crystal waveguide device and method» (patent No. 6674949; issued in 2004.). Inventor from St. Petersburg (Russia) and three from the USA, Canada and France; patent owner – Corning, Inc(USA);
2. «Plasmonic nanophotonics methods, materials, and apparatuses» (No. 6977767; 2005). An inventor from Dolgoprudny (Russia) and three from the USA; patent owner – Arrowhead Center, Inc (USA);
3. «Tunable terahertz metamaterial filter» (No. 8958050; 2015). Inventors from St. Petersburg (Russia); patent holder – Samsung Electronics Co., Ltd. (South Korea);
4. «Self-resonant apparatus for wireless power transmission system» (No. 9330836; 2016). Inventors from St. Petersburg, Arkhangelsk and Vsevolozhsk (Russia), as well as South Korea; patent holder – Samsung Electronics Co., Ltd. (South Korea);
5. «Magnetic resonance imaging machine» (No. 10732237; 2020). Inventors from St. Petersburg (Russia); patent applicant – ITMO University;
6. «Apparatus and method for controlling laser light propagation direction by using a plurality of nano-antennas» (No. 10831082; 2020). Inventors from Tula, Dolgoprudny and Krasnodar (Russia); patent holder – Samsung Electronics Co., Ltd. (South Korea).

As you can see, the patentable ideas of Russian inventors, not finding interest from Russian high-tech companies, “flow away” abroad. At the same time, according to the forecast of the analytical company ReportLinker (France), the global nanophotonics market (even taking into account the adjustments for the impact of the pandemic) will reach 202 billion dollars by 2027; while the average annual growth rate in the period 2020–2027 will be 37.6% [6].

## CONCLUSION

In recent years, nanophotonics has become a dynamically growing scientific field with a wide range of technological outputs. In the global scientific competition, the transition (since 2012) of the key influence on the research landscape from the group of industrialized countries (G7) to the group of rapidly progressing Asian countries («A-7») is indicative. Against this background, Russia is consistently among the top ten countries in terms of publication output.

An increasing proportion of the world’s nanophotonics research is carried out internationally. At the same time, different countries have their own char-

ными странами, имеет сильные соавторские связи с учеными из Австралии. В свою очередь, ИТМО, благодаря поддержке правительства, стал конкурентоспособным мировым центром исследований в области нанофотоники. Как показали расчеты, международное сотрудничество значительно повышает видимость российских публикаций.

Нанофотоника дает позитивный пример выполнения целевых индикаторов, установленных для отечественной науки, например по доле публикаций в БД Web of Science (2,44% к 2015 году, согласно указу Президента РФ № 599 от 07.05.2012 г.), по доле статей в соавторстве с иностранными учеными (29,6% к 2024 году, согласно постановлению Правительства РФ № 377 от 29.03.2019 г.); цитируемость российских публикаций по нанофотонике вплотную приблизилась к среднемировому уровню. По результатам анализа можно отметить определенную деконцентрацию исследований, а также их децентрализацию как результат целенаправленной научной политики.

Научные результаты ведущих мировых игроков все больше становятся объектом патентования, за которым стоят интересы корпоративного сектора. Поиск в БД USPTO в частности показал:

acteristics: if in the UK, Germany, and the USA, the growth in the total annual production of publications in recent years is fully associated with international cooperation, then in China – mainly with domestic research, and in Russia – with domestic and international research equally.

Domestic research is rather closely integrated with global research: about 53% of all publications and 80% of ITMO publications are internationally co-authored. Russia is part of a cohesive research community with leading Western countries, has strong co-authorship ties with scientists from Australia. In turn, ITMO, thanks to government support, has become a competitive global center for research in the field of nanophotonics. Calculations have shown that international cooperation significantly increases the visibility of Russian publications.

Nanophotonics provides a positive example of the fulfillment of target indicators set for domestic science, for example, by the share of publications in the Web of Science database (2.44% by 2015, according to Decree of the President of the Russian Federation No. 599 dated 07.05.2012), by the share of articles in co-authorship with foreign scientists (29.6% by 2024, according to Decree of the Government of

## ЭССЕНТОПТИКС ESSENTOPTICS

### LINZA 150

**Первый в мире спектрофотометр для измерения пропускания и отражения линз и объективов**



**Спектрофотометр LINZA 150**  
Новая функция: измерение пропускания и отражения от асферических поверхностей

LINZA 150 Spectrophotometer  
New feature: transmittance and reflectance measurement of aspheric lens

ООО «ЭссентОптикс»

23а-81, ул. 40 лет Победы, Боровляны, Минская обл., Минский р-н, 223053 Беларусь  
Тел.: +375-17-5112025 | Факс: +375-17-5112026 | [www.essentoptics.com](http://www.essentoptics.com)





если вначале изобретательский интерес больше привлекали фотонные кристаллы, то в последние годы – метаматериалы и плазмоника. К сожалению, Россия пока слабо участвует в этой игре.

## REFERENCES

1. **Editorial.** The hidden face of nanophotonics. *Nature Photonics*. 2011; 5(7): 379. DOI: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.141>.
2. **Koenderink A. F., Alù A., Polman A.** Nanophotonics: Shrinking light-based technology. *Science*. 2015; 348(6234): 516–521. DOI: 10.1126/science.1261243.
3. National Research Council. 2008. *Nanophotonics: Accessibility and Applicability*. – Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11907>.
4. **Luukkonen T., Tijssen R. J.W., Persson O., Sivertsen G.** The measurement of international scientific collaboration. *Scientometrics*. 1993; 28(1): 15–36. DOI: 10.1007/BF02016282.
5. **Glanzel W.** National characteristics in international scientific cooperation. *Scientometrics*. 2001; 51(1): 69–115. DOI: 10.1023/A:1010512628145.
6. **Global Nanophotonics Industry.** ReportLinker. April 2021. [[www.reportlinker.com/p05817672/Global-Nanophotonics-Industry.html?utm\\_source=PRN](http://www.reportlinker.com/p05817672/Global-Nanophotonics-Industry.html?utm_source=PRN)].

## ПРИЛОЖЕНИЕ (ПОИСКОВЫЙ ЗАПРОС)

### 1. Ключевые термины:

nanophotonic\*; nanoscale photonic\*; nanocarbon photonic\*; nanotube\* photonic\*; graphene\* photonic\*; nanobiophotonic\*; bionanophotonic\*; nano-optic\*; subwavelength optic\*; two-dimensional optic\*; flat optic\*; nano-optoelectronic\*; near-field scanning optical microscopy; NSOM; photonic crystal\*; photonic band structure\*; negative-index material\*; metamaterial\*; metasurface\*; nanoplasmonic\*; plasmonics; surface plasmon\*; magnetoplasmon resonance; plasmonic nanostructure\*; plasmonic nanoparticle\*; plasmonic nanowire\*; plasmonic nanomaterial\*; plasmonic meta-atom\*; superlens\*; nanolaser\*; small laser\*; plasmonic laser\*; quantum dot (QD) laser\*; photonic nanodevice\*; photonic nanojet\*; electro-optical switch\*; plasmonic sensor\*; plasmonic biosensor\*; optical nanoantenna\*; plasmonic nanoantenna\*;

### 2. Фрагмент запроса (сочетание термина

«photon\*» с нано-терминами и термином «DNA» на расстоянии 2-х лексических шагов):  
photon\* NEAR/2 (nanostructure\* or «metal nanoparticle\*» or nanocrystal\* or nanowire\* or «semiconductor nanodot\*» or «quantum\* dot\*» or «quantum\* well\*» or DNA);

### 3. Исключенные термины:

acoustic metamaterial\* (metasurface\*); mechanical metamaterial\* (metasurface\*); elastic metamaterial\* (metasurface\*); seismic metamaterial\* (metasurface\*); phononic metamaterial\* (metasurface\*).

## АВТОР

Терехов Александр Иванович, к. ф.-м. н.; e-mail: [a.i.terekhov@mail.ru](mailto:a.i.terekhov@mail.ru); ведущий научный сотрудник, ФГБН Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Россия.  
ID WoS: AAJ-1693-2021

the Russian Federation No. 377 dated 29.03.2019); the citation rate of Russian publications on nanophotonics has come close to the world average. According to the results of the analysis, one can note a certain deconcentration of research, as well as their decentralization as a result of purposeful scientific policy.

The scientific results of the world's leading players are increasingly becoming the subject of patenting, behind which are the interests of the corporate sector. A search in the USPTO database, in particular, showed that if at first inventive interest was attracted more by photonic crystals, then in recent years – metamaterials and plasmonics. Unfortunately, Russia is still weakly involved in this “game”.

## APPLICATION (SEARCH TERM)

### 1. Key terms:

nanophotonic\*; nanoscale photonic\*; nanocarbon photonic\*; nanotube\* photonic\*; graphene\* photonic\*; nanobiophotonic\*; bionanophotonic\*; nano-optic\*; subwavelength optic\*; two-dimensional optic\*; flat optic\*; nano-optoelectronic\*; near-field scanning optical microscopy; NSOM; photonic crystal\*; photonic band structure\*; negative-index material\*; metamaterial\*; metasurface\*; nanoplasmonic\*; plasmonics; surface plasmon\*; magnetoplasmon resonance; plasmonic nanostructure\*; plasmonic nanoparticle\*; plasmonic nanowire\*; plasmonic nanomaterial\*; plasmonic meta-atom\*; superlens\*; nanolaser\*; small laser\*; plasmonic laser\*; quantum dot (QD) laser\*; photonic nanodevice\*; photonic nanojet\*; electro-optical switch\*; plasmonic sensor\*; plasmonic biosensor\*; optical nanoantenna\*; plasmonic nanoantenna\*;

### 2. Search fragment (combination of the term “photon\*” with nano-terms and the term “DNA” at a distance of 2 lexical steps):

photon\* NEAR/2 (nanostructure\* or «metal nanoparticle\*» or nanocrystal\* or nanowire\* or «semiconductor nanodot\*» or «quantum\* dot\*» or «quantum\* well\*» or DNA);

### 3. excluded terms:

acoustic metamaterial\* (metasurface\*); mechanical metamaterial\* (metasurface\*); elastic metamaterial\* (metasurface\*); seismic metamaterial\* (metasurface\*); phononic metamaterial\* (metasurface\*).

## AUTHOR

Terekhov Alexander Ivanovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences; e-mail: [a.i.terekhov@mail.ru](mailto:a.i.terekhov@mail.ru); Leading Researcher, Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
IDWoS: AAJ-1693-2021



## Аддитивные технологии: настоящее и будущее



ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ совместно с АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина» и Технологическими платформами «Материалы и технологии металлургии», «Новые полимерные композиционные материалы и технологии» проводит VII Международную конференцию «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» 7–8 октября 2021 года в Москве в ВИАМ.

Обсуждение развития аддитивных технологий пройдет по следующим тематическим трекам:

- исследования в области материаловедения аддитивных технологий;
- исследования в области разработки аддитивных процессов;
- программное обеспечение для аддитивных технологий;
- компьютерное моделирование аддитивных процессов;
- материалы и оборудование для аддитивных технологий;
- методы контроля синтезированного материала.

Подробнее можно найти на сайте конференции:

<https://conf.viam.ru/conf/344>.

<https://viam.ru>

## SARATOV FALL MEETING (SFM'21): IX Симпозиум по оптике и биофотонике и XXV Международная школа для молодых ученых и студентов по оптике, лазерной физике и биофотонике



В Саратове на базе университета СГУ с 27 сентября по 1 октября 2021 года пройдет Международная конференции Saratov Fall Meeting (SFM'21). Основная цель SFM'21 – представить и обсудить последние разработки и применения оптических и лазерных технологий в биологии и медицине, вопросы когерентной оптики случайных и упорядоченных сред, нелинейной динамики лазерных систем, лазерной физики, спектроскопии, молекулярного моделирования, нанофотоники и нанобиофотоники. Основное внимание будет уделено фундаментальным исследованиям взаимодействия когерентного, слабокогерентного, поляризованного, пространственно- и временно-модулированного электромагнитного излучения в широком от рентгеновского до терагерцевого диапазоне длин волн с неоднородными рассеивающими средами и биологическими тканями и клетками. Будут рассмотрены упругое, неупругое (комбинационное, SERS и CARS) и динамическое рассеяние света, доплеровское, фотоакустическое, фототермическое и нелинейное взаимодействия, механика тканей и клеток, а также фотобиологические эффекты.

В рамках SFM'21 намечена Международная школа для молодых ученых и студентов по оптике, лазерной физике и биофотонике. Конференции, семинары и научные школы – это один из эффективных способов привлечь талантливых молодых людей к научной работе, особенно в области оптических исследований.

<https://www.sgu.ru>

### Современным компаниям – инновационные решения!

**Диодная лазерная система повышенной мощности DLC DL pro HP 461 нм для охлаждения атомов стронция**



Компания **ТОРТИСА** (Германия) анонсировала выход новой модели диодной лазерной системы для охлаждения атомов стронция **DLC DL pro HP 461**, с **увеличенной на 50%** выходной мощностью, по сравнению с предыдущей моделью **DLC DL pro 461**. Параллельно, увидела свет и модель **MDL pro HP 461** для монтажа в 19-ти дюймовую стойку. Выходная мощность настольной модели составляет величину **170 мВт**, а **MDL – 90 мВт**. Для многих пользователей, появление этих моделей – долгожданное решение. Для тех, кому величина выходной мощности, по-прежнему является недостаточной, остается вариант лазерной системы **DLC SR COOLING** с удвоением частоты (**DLC TA-SHG pro 461**), имеющей выходную мощность **800 мВт**.

Эксклюзивным представителем компании **ТОРТИСА** (Германия) в РФ является компания «ЕвроЛэйз».

[www.eurolase.ru](http://www.eurolase.ru)

