

© Team of authors, 2026 / © Коллектив авторов, 2026

3.1.6. Oncology, radiation therapy, 3.3.3. Pathological physiology / 3.1.6. Онкология, лучевая терапия, 3.3.3. Патологическая физиология

## Treatment of head and neck cancer using electromagnetic methods

I.V. Reshetov<sup>1,2</sup>, V.N. Makarov<sup>3</sup>, N.A. Boos<sup>3</sup>, M.A. Makhov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education First Moscow State Medical University named after I.M. Sechenov Ministry of Health of Russia (Sechenov University), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Clinical Medicine named after N.V. Sklifosovsky, Moscow, Russia

<sup>3</sup>RTU MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Firm TECHNOSVET LLC, Moscow, Russia

Contacts: Makarov Valery Nikolaevich – e-mail: makarov\_vn@bk.ru

## Лечение онкологии в области головы и шеи методами электромагнитного воздействия

И.В. Решетов<sup>1,2</sup>, В.Н. Макаров<sup>3</sup>, Н.А. Боос<sup>3</sup>, М.А. Махов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава РФ (Сеченовский Университет), Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт клинической медицины им. Н.В. Склифосовского, Москва, Россия

<sup>3</sup>Российский технологический университет – РТУ МИРЭА, Москва, Россия

<sup>4</sup>ООО Фирма «ТЕХНОСВЕТ», Москва, Россия

Контакты: Макаров Валерий Николаевич – e-mail: makarov\_vn@bk.ru

## 影电磁方法在头颈部肿瘤治疗中的应用

I.V. Reshetov<sup>1,2</sup>, V.N. Makarov<sup>3</sup>, N.A. Boos<sup>3</sup>, M.A. Makhov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>俄罗斯卫生部谢切诺夫第一莫斯科国立医科大学（谢切诺夫大学），莫斯科，俄罗斯

<sup>2</sup>N.V. Sklifosovsky临床医学院，莫斯科，俄罗斯

<sup>3</sup>RTU MIREA——俄罗斯技术大学，莫斯科，俄罗斯

<sup>4</sup>TECHNOSVET有限责任公司，莫斯科，俄罗斯

作者：Makarov Valery Nikolaevich – e-mail: makarov\_vn@bk.ru

**Objective.** To systematically review the mechanisms of action, clinical data, technical characteristics and prospects of electromagnetic methods in the treatment of malignant neoplasms of the head and neck.

**Material and Methods.** A review of publications from 2014 to 2024 was conducted, covering radiofrequency ablation, microwave ablation, hyperthermia, electrochemotherapy, Tumour Treating Fields, photodynamic therapy and irreversible electroporation in head and neck oncology.

**Results.** Radiofrequency ablation has the most extensive evidence base for this localization, particularly for thyroid and parathyroid gland tumors, metastatic cervical lymph nodes, and recurrent tumors. Microwave ablation demonstrates comparable efficacy with faster generation and larger ablation zones. Electrochemotherapy shows high efficacy for superficial and accessible tumors with an excellent tolerability profile. The combination of local physical methods with modern immunotherapy represents a promising direction.

**Conclusion.** Electromagnetic methods occupy an important place in the oncological arsenal for head and neck tumors, enabling organ function preservation and improved quality of life, particularly in recurrent, locally advanced, and unresectable cases. Further development of the field is linked to the integration of nanomedicine, artificial intelligence, and personalized planning based on computational modeling. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant no. FSFZ-2026-0007).

**Ключевые слова:** опухоли головы и шеи, электромагнитное воздействие, радиочастотная абляция, микроволновая абляция, гипертермия, электрохимиотерапия, TTFs, фотодинамическая терапия, необратимая электропорация

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant No. FSFZ-2026-0007).

**For citation:** Reshetov I.V., Makarov V.N., Boos N.A., Makhov M.A. Treatment of head and neck cancer using electromagnetic methods. *Head and Neck. Russian Journal.* 2026;14(3):152–158

**Doi:** 10.25792/HN.2026.14.3.152-158

The authors are responsible for the originality of the data presented and the possibility of publishing illustrative material – tables, drawings, photographs of patients.

**Цель исследования.** Рассмотреть механизмы действия, клинические данные, технические характеристики и перспективы применения методов электромагнитного воздействия при лечении злокачественных новообразований головы и шеи.

**Материал и методы.** Проведен обзор публикаций за период 2014–2024 гг., посвященных клиническому применению радиочастотной, микроволновой абляции, гипертермии, электрохимиотерапии, Tumour Treating Fields, фотодинамической терапии и необратимой электропорации при опухолях головы и шеи.

**Результаты.** Радиочастотная абляция обладает наиболее обширной доказательной базой применительно к данной локализации, прежде всего, при опухолях щитовидной и паращитовидных желез, метастатических лимфоузлах шеи и рецидивных опухолях. Микроволновая абляция демонстрирует сопоставимую эффективность при более высокой скорости создания и большем объеме зоны деструкции. Электрохимиотерапия показывает высокую эффективность при поверхностных и доступных опухолях с отличным профилем переносимости. Перспективным направлением является сочетание локальных физических методов с современной иммунотерапией.

**Заключение.** Методы электромагнитного воздействия занимают принципиально важное место в современном онкологическом арсенале при лечении опухолей головы и шеи, обеспечивая сохранение функций органов и качества жизни пациентов, особенно при рецидивах, местнораспространенных процессах и нерезектабельных опухолях. Дальнейшее развитие области связано с интеграцией наномедицины, искусственного интеллекта и персонализированного планирования на основе компьютерного моделирования. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант №FSFZ-2026-0007).

**Ключевые слова:** опухоли головы и шеи, электромагнитное воздействие, радиочастотная абляция, микроволновая абляция, гипертермия, электрохимиотерапия, TTFields, фотодинамическая терапия, необратимая электропорация

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FSFZ-2026-0007).

**Для цитирования:** Решетов И.В., Макаров В.Н., Боос Н.А., Махов М.А. Лечение онкологии в области головы и шеи методами электромагнитного воздействия. *Head and neck. Голова и шея. Российский журнал.* 2026;14(3):152–158

**Doi:** 10.25792/HN.2026.14.3.152-158

Авторы несут ответственность за оригинальность представленных данных и возможность публикации иллюстративного материала – таблиц, рисунков, фотографий пациентов.

研究目的：系统综述电磁方法在头颈部恶性肿瘤治疗中的作用机制、临床数据、技术特征及发展前景。

材料与方法：对2014—2024年的相关文献进行综述，涵盖射频消融、微波消融、高温热疗、电化学治疗、肿瘤电场治疗（TTFields）、光动力治疗及不可逆电穿孔在头颈部肿瘤学中的应用。

结果：射频消融在该部位具有最为充分的证据基础，尤其适用于甲状腺及甲状旁腺肿瘤、颈部淋巴结转移及复发性肿瘤。微波消融在疗效方面与之相当，同时具有起效更快、消融范围更大的特点。电化学治疗在表浅及易接近肿瘤中表现出较高疗效，且耐受性良好。局部物理治疗方法与现代免疫治疗的联合应用是一个有前景的发展方向。

结论：电磁方法在头颈部肿瘤的综合治疗中占据重要地位，尤其在复发性、局部晚期及不可切除病例中，有助于保留器官功能并改善生活质量。该领域的进一步发展有赖于纳米医学、人工智能及基于计算建模的个体化治疗方案的整合。本研究得到俄罗斯联邦科学与高等教育部资助（项目编号：FSFZ-2026-0007）。

关键词：头颈部肿瘤；电磁作用；射频消融；微波消融；高温热疗；电化学治疗；TTFields；光动力治疗；不可逆电穿孔

利益冲突：作者声明无利益冲突。

经费来源：本研究未获得任何经费资助。

引用格式: Reshetov I.V., Makarov V.N., Boos N.A., Makhov M.A. Treatment of head and neck cancer using electromagnetic methods. Head and Neck. Russian Journal. 2026;14(3):152–158

Doi: 10.25792/HN.2026.14.3.152-158

作者对所呈现数据的原创性以及发表插图材料 (表格、图示、患者照片) 的可能性负责。

## Введение

Рак головы и шеи занимает 6-е место среди наиболее распространенных злокачественных новообразований в мире: ежегодно регистрируется около 900 тыс. новых случаев и 450 тыс. смертей [1]. В структуре заболеваемости доминируют плоскоклеточные карциномы (SCC – squamous cell carcinoma), на долю которых приходится до 90% всех случаев [2]. К факторам риска относятся курение, злоупотребление алкоголем, инфицирование вирусом папилломы человека (ВПЧ), особенно генотипами 16 и 18, а также воздействие радиации и некоторых химических агентов [3]. Анатомическая сложность зоны головы и шеи, близость жизненно важных структур (магистральных сосудов, черепных нервов, дыхательных и пищеварительных путей), высокий функциональный и эстетический запрос пациентов – все это делает лечение данной патологии исключительно трудной задачей.

Традиционная тактика предусматривает хирургическую резекцию с последующей лучевой или химиолучевой терапией. Однако у значительной части пациентов (особенно при рецидивах, местнораспространенных процессах, наличии противопоказаний к операции или при отказе от нее) стандартные подходы оказываются неэффективными либо неприемлемыми. Именно в этом контексте методы электромагнитного воздействия занимают все более значимое место в арсенале онколога.

Под электромагнитным воздействием в онкологии понимают широкий спектр физических методов, основанных на взаимодействии электромагнитного поля различных частот и интенсивности с биологическими тканями. Принципиально важным является то, что механизмы противоопухолевого действия существенно различаются в зависимости от частотного диапазона применяемого излучения:

- Радиочастотный диапазон (10 кГц–300 МГц): нагрев ткани за счет ионного трения и токов проводимости (радиочастотная абляция, гипертермия).
- Микроволновый диапазон (300 МГц–300 ГГц): нагрев за счет диэлектрических потерь, главным образом, вращения молекул воды (микроволновая абляция – MBA).
- Крайне низкочастотный диапазон (100–300 кГц, переменные поля): нарушение митоза – принцип Tumour Treating Fields.
- Нано- и миллисекундные импульсные поля: необратимая электропорация клеточных мембран. А–а
- Видимый и ближний ИК-диапазон: фотодинамическая терапия с активацией фотосенсибилизатора.

Настоящий обзор охватывает период 2014–2024 гг. и посвящен систематическому анализу вышеперечисленных методов применительно к опухолям головы и шеи с акцентом на клиническую эффективность и доказательную базу.

## Материал и методы

Радиочастотная абляция (РЧА) – метод термической деструкции ткани, при котором через погруженный в опухоль электрод

подается переменный электрический ток частотой 375–500 кГц [4]. Ионы тканевой жидкости, следуя за быстро меняющимся полем, совершают возвратно-поступательные движения, при этом возникает трение, выделяющее тепло. Вокруг кончика электрода формируется зона коагуляционного некроза: при температуре 60–100 °С происходит денатурация белков и гибель клеток, при 100–110 °С – испарение воды и обугливание (карбонизация), ограничивающее дальнейший прогрев. Диаметр зоны некроза варьируется от 1,5 до 5 см в зависимости от типа электрода, времени воздействия и электрических свойств ткани.

Первые успешные клинические применения РЧА в онкологии относятся к концу 1990-х гг. – преимущественно в лечении опухолей печени. В области головы и шеи метод начал активно внедряться в 2000-х гг. для лечения узловых образований щитовидной железы (ЩЖ), а в последнее десятилетие – для лечения рецидивных и метастатических опухолей лимфатических узлов, опухолей слюнных желез, а также в качестве паллиативного инструмента при нерезектабельных карциномах.

Современные РЧА-системы включают генератор радиочастотного тока, активный электрод (игольчатый) и пассивный заземляющий электрод (накожная пластина). Наиболее широко применяемые конфигурации активных электродов:

- Монополярный электрод с охлаждаемым кончиком (cool-tip): внутреннее охлаждение физиологическим раствором предотвращает обугливание вокруг кончика и позволяет создавать более крупные зоны некроза.
- Развертывающийся (expandable) электрод с выдвигными «лапками»: обеспечивает сферическую зону абляции диаметром до 5 см.
- Биполярный электрод: два активных полюса расположены на одном устройстве, заземляющая пластина не требуется; особенно предпочтителен при абляции вблизи сосудов и нервных стволов.
- Многоэлектродные системы: несколько игл устанавливаются одновременно, что позволяет обрабатывать объемные образования.

Процедура, как правило, выполняется под местной анестезией или внутривенной седацией с обязательным ультразвуковым контролем в режиме реального времени. В ряде случаев применяется компьютерно-томографическая (КТ) или магнитно-резонансная (МРТ) навигация. Температурный мониторинг осуществляется встроенными термодатчиками.

ЩЖ является наиболее изученной мишенью РЧА в области головы и шеи. Для лечения солидных и смешанных доброкачественных узлов РЧА стала альтернативой хирургическому вмешательству, обеспечивая значительную редукцию объема образования при минимальной заболеваемости.

По данным крупного мета-анализа (S.J. Cho и соавт., 2015; n>1300 пациентов), средняя редукция объема узла через 12 месяцев составила 79–88%, при этом частота рецидивов роста – менее 5% [5]. Европейское тиреоидное общество (ETA) и Корейское общество тиреоидной радиологии (KSThR) в обновленных клинических рекомендациях 2020–2022 гг. включили

РЧА в стандарты лечения симптоматических и косметически значимых доброкачественных узлов ЩЖ как метод первой линии у пациентов, отказывающихся от операции или имеющих противопоказания к ней [6, 7].

Применительно к злокачественным опухолям ЩЖ РЧА нашла место в следующих клинических сценариях:

1. Рецидивные опухоли в ложе удаленной ЩЖ после тотальной тиреоидэктомии у пациентов с высоким операционным риском. С. Kim и соавт. (2019) представили серию из 124 пациентов с рецидивами дифференцированного рака ЩЖ, у 82% из которых через 24 месяца наблюдения опухоли не определялись при ультразвуковом исследовании (УЗИ) [8].
2. Метастазы в регионарные лимфатические узлы у пациентов с дифференцированным раком ЩЖ, исчерпавших возможности хирургического лечения и терапии радиоактивным йодом.
3. Папиллярные микрокарциномы (диаметр  $\leq 1$  см) у пожилых пациентов или при наличии системных противопоказаний к операции. Ряд азиатских центров (прежде всего, в Южной Корее) накопил значительный опыт активного наблюдения и абляции микрокарцином как альтернативы немедленному хирургическому вмешательству [9].
4. Паллиативная декомпрессия при нерезектабельных первичных или рецидивных опухолях с компрессионным синдромом.

Опухоли слюнных желез, особенно доброкачественная плеоморфная аденома и опухоль Вартина (цистаденолимфома), традиционно лечатся хирургически, однако у пациентов с высоким анестезиологическим риском либо при рецидивах РЧА предоставляет привлекательную альтернативу. F. Liu и соавт. (2021) опубликовали результаты лечения 43 пациентов с плеоморфными аденомами: через 12 месяцев редукция объема опухоли составила в среднем 72%, ни у одного из пациентов не наблюдалось повреждения лицевого нерва [10]. Особенности топографии слюнных желез (непосредственная близость ветвей лицевого нерва) делают биполярные системы с точным контролем зоны нагрева предпочтительными по сравнению с монополярными.

Метастазы в лимфатические узлы шеи при плоскоклеточных карциномах, папиллярном раке ЩЖ, а также при других первичных опухолях нередко не поддаются повторным операциям ввиду выраженного рубцово-спаечного процесса после предшествующих вмешательств и лучевой терапии. РЧА позволяет осуществить локальную деструкцию метастаза под УЗ-контролем с минимальной травматизацией окружающих тканей. Систематический обзор A.K.Y. Lam и соавт. (2023) включал 18 исследований (n=612 метастатических лимфатических узлов): полный ответ (исчезновение при УЗИ и/или нормализация по данным позитронно-эмиссионной томографии, совмещенной с КТ) зарегистрирован в 84% случаев, частичный – в 10%, прогрессирование – у 6% пациентов. Осложнения носили преимущественно легкий характер: болевой синдром, подкожные гематомы; транзиторный парез гортанного нерва наблюдался в 2,1% случаев [11].

В области головы и шеи к потенциально опасным структурам, которые необходимо учитывать при планировании РЧА, относятся:

- Возвратный гортанный нерв: находится в трахеопищеводной борозде, тесно прилежит к заднемедиальной поверхности ЩЖ. Рекомендуется отступ  $\geq 2$ –5 мм от нерва; применение «гидродиссекции» (инъекция физиологического раствора в парависцеральное пространство) создает дополнительный теплоизолирующий слой.

- Наружная ветвь верхнего гортанного нерва.
- Трахея и пищевод: карбонизированная ткань может прорасти в просвет органа при чрезмерном нагреве.
- Общая и внутренняя сонные артерии, внутренняя яремная вена: эффект «теплового поглощения» движущейся кровью (heat sink effect) снижает эффективность абляции вблизи крупных сосудов, но одновременно защищает стенку сосуда от перегрева.
- Лицевой, подъязычный, добавочный нервы в зависимости от локализации процесса.

Частота серьезных осложнений при РЧА опухолей ЩЖ, по данным международного многоцентрового реестра (ETHOSZ), составляет около 1,4%, включая постоянный паралич голосовых связок (0,3%), ожог кожи (0,2%), гематому с компрессией дыхательных путей (0,4%) и инфекционные осложнения (0,1%) [12].

Ряд исследований посвящен синергетическим комбинациям РЧА с системной терапией:

- РЧА+ленватиниб/сорафениб при радиойодрезистентном раке ЩЖ: локальный контроль РЧА дополняется системным противоопухолевым и антиангиогенным эффектами таргетных препаратов [13].
- РЧА+этаноловая абляция (PEI): последовательное введение этанола и РЧА-воздействие применяются при кистозных и смешанных узлах; PEI уменьшает кистозный компонент, РЧА деструктирует солидную часть.
- РЧА+иммунотерапия: экспериментальные протоколы изучают «абскопальный» иммунный ответ, индуцируемый высвобождением опухолевых антигенов после термической деструкции на фоне введения ингибиторов иммунных контрольных точек (pembrolizumab, nivolumab).

МВА использует электромагнитное излучение в диапазоне 900 МГц–2,45 ГГц. В отличие от РЧА, нагрев при МВА происходит не за счет ионного трения, а преимущественно благодаря диэлектрическим потерям: молекулы воды, обладающие дипольным моментом, ориентируются в переменном поле и при его смене создают молекулярное трение [14]. Принципиальные преимущества МВА перед РЧА:

- Более высокая скорость нагрева: зона некроза создается за 3–10 минут (против 10–20 минут при РЧА).
- Большой объем абляции за одну процедуру: современные антенны способны формировать зону диаметром 4–6 см.
- Меньший эффект теплового поглощения: кровоток меньше влияет на результат вблизи сосудов.
- Независимость от электрических свойств ткани: МВА эффективна в некротизированной, обугленной и сухой ткани, где РЧА теряет эффективность из-за роста импеданса.

МВА активно внедряется как альтернатива РЧА для лечения узлов ЩЖ. Сравнительное исследование M. Tong и соавт. (2019) показало сопоставимую эффективность МВА и РЧА через 12 месяцев (редукция объема 83% против 81%), при этом МВА демонстрировала несколько более быстрое достижение максимальной редукции [15]. Важно, что МВА обеспечивает более предсказуемую эллиптическую форму зоны нагрева, что облегчает навигацию вблизи критических структур.

Особый клинический интерес представляет применение МВА при гиперпаратиреозе, обусловленном гиперплазией или аденомой паращитовидных желез. Пациенты с вторичным и третичным гиперпаратиреозом на программном гемодиализе нередко имеют высокий операционный риск: МВА в этом контексте позволяет деструктировать гиперфункционирующие железы под

УЗ-контролем с подтвержденным снижением уровня паратиреоидного гормона в 75–90% случаев (данные многоцентрового китайского реестра, Y. Deng и соавт., 2022) [16].

Протокол минимально инвазивной абляции метастатических лимфоузлов шеи с помощью MBA был описан исследователями ряда азиатских групп: процедура выполнялась под КТ-навигацией у пациентов с метастазами немелкоклеточного рака легкого, рака ЩЖ, орофарингеальной карциномы. Общий показатель локального контроля через 12 месяцев составил около 78%.

TTFields представляют собой переменные низкоинтенсивные (1–3 В/см) электрические поля в диапазоне 100–300 кГц, которые применяются непосредственно через трансдермальные массивы электродов (transducer arrays). Механизм противоопухолевого действия фундаментально отличается от термических методов: поле не нагревает ткань, а нарушает клеточный митоз.

Ключевые биологические эффекты TTFields:

1. Дисрупция формирования митотического веретена: диэлектростатические силы вызывают неправильную полимеризацию тубулина, дезориентацию хромосом и нарушение расхождения хроматид – клетка не может завершить анафазу.
2. Нарушение септации при цитокинезе: вибрирующие полярные молекулы мешают формированию клеточной перегородки.
3. Диэлектрофорез внутриклеточных органелл: митохондрии, ядро и другие поляризуемые структуры смещаются в направлении наибольшего градиента поля.
4. Активация иммунного ответа: TTFields индуцируют иммуногенную клеточную гибель (ICD) – высвобождение HMGB1, кальретикулина на поверхности клетки, что привлекает дендритные клетки.

Частота поля имеет значение: оптимальная частота специфична для типа клеток и коррелирует с временем митоза. Для наиболее распространенных карцином головы и шеи расчетная оптимальная частота составляет 150–200 кГц.

Первоначально TTFields были одобрены FDA для глиобластомы (2011 г., система Optune) [17] и мезотелиомы (2019) [18]. Применение при опухолях головы и шеи находится на этапе клинических исследований:

- Исследование HN-308 (фаза II, A. Mayer и соавт., 2021): TTFields (150 кГц)+цетуксимаб+платиносодержащая химиотерапия у пациентов с рецидивными/метастатическими плоскоклеточными карциномами головы и шеи – медиана выживаемости без прогрессирования 6,1 месяца, медиана общей выживаемости 14,3 месяца, что является обнадеживающим результатом по сравнению с историческими данными [19].
- Исследования при раке слюнных желез: ведется набор пациентов в протоколы сочетания TTFields с системной химиотерапией, предварительные данные демонстрируют стабилизацию заболевания у большинства включенных.
- Исследования при рецидивном раке носоглотки: в публикациях азиатских центров показан умеренный ответ на TTFields в монорежиме с профилем безопасности, ограниченным контактным дерматитом.

Ключевой технической проблемой применения TTFields в области головы и шеи является размещение трансдюсерных матриц: сложный рельеф черепа, шеи и наличие волосяного покрова затрудняют плотный контакт электродов с кожей, снижая интенсивность поля в глубоко расположенных опухолях.

Активно разрабатываются адаптивные матрицы с возможностью индивидуальной нарезки по форме шеи и головы.

По состоянию на 2024 г. TTFields не имеют одобренных показаний применительно к опухолям головы и шеи ни в США, ни в Европе. Однако продолжающиеся исследования фаз II/III, включая международный протокол KEYNOTE-B91 (TTFields+ pembrolizumab при рецидивных SCC головы и шеи) [20], могут изменить эту ситуацию в ближайшие годы.

Фотодинамическая терапия (ФДТ) занимает особое место среди методов электромагнитного воздействия: в строгом смысле активирующим агентом является свет (электромагнитное излучение видимого диапазона 630–850 нм), а не высокочастотные поля. Тем не менее ФДТ традиционно рассматривается в одном ряду с другими физическими методами лечения рака. Механизм трехступенчатый:

1. Введение фотосенсибилизатора: препарат накапливается преимущественно в опухолевых клетках и новообразованных сосудах.
  2. Облучение светом нужной длины волны: активация фотосенсибилизатора → переход в возбужденное триплетное состояние.
  3. Генерация активных форм кислорода: синглетный кислород и свободные радикалы → окислительный стресс → гибель клеток, коллапс опухолевых сосудов, иммунная активация.
- За последнее десятилетие разработаны фотосенсибилизаторы с улучшенными характеристиками [21]:

- Таламопорфин (мотексафин гадолиния): пик поглощения 664 нм, более выгодное соотношение накопления в опухоли/нормальной ткани.
- Хлорин е6 и его производные: доступны в России (фотолон, радахлорин), пик поглощения 662 нм, высокий квантовый выход синглетного кислорода.
- TPCS2a (фимапорфин): одобрен в Норвегии для фотодинамической химиотерапии – сочетание ФДТ с блеомицином при усилении внутриклеточного транспорта препарата (PCI – photochemical internalisation).
- Наночастичные платформы: фотосенсибилизаторы, конъюгированные с наночастицами золота, карбоновыми точками, мезопористым диоксидом кремния – улучшенная направленная доставка и опциональный двухфотонный сдвиг в ближний ИК-диапазон.

Для поверхностных опухолей применяются плоские лазерные аппликаторы и светодиодные матрицы. Для опухолей, расположенных в просвете гортани, ротоглотки, трахеи, используются гибкие световоды, подводимые через эндоскоп. Для глубоких солидных опухолей – интерстициальная ФДТ с погружными световодами, устанавливаемыми под навигационным контролем. Мощность облучения: 50–200 мВт/см<sup>2</sup>, световая доза 50–200 Дж/см<sup>2</sup>.

Рак полости рта и ротоглотки – исторически приоритетная область ФДТ:

- Ранние стадии рака полости рта (T1–T2N0): ФДТ сопоставима с хирургией по локальному контролю при минимальном функциональном ущербе. Мета-анализ T.S. Mang (2021, n=1100) демонстрирует полный ответ 83% при T1 и 71% при T2 [22].
- Эритроплакия и дисплазия слизистой оболочки: ФДТ является высокоэффективным методом лечения предраковых изменений – полный ответ при дисплазии высокой степени достигает 90%, снижая риск малигнизации.
- Рак гортани (ранние стадии): ФДТ трансбронхоскопическим методом применяется при карциноме in situ и T1a–T1b без

вовлечения комиссур – сохранение голосовой функции значительно лучше, чем после лучевой терапии или лазерной хирургии.

Фотодинамическая терапия+иммунотерапия: экспериментальные протоколы (фаза I/II) изучают комбинацию ФДТ с ингибиторами PD-1/PD-L1 при рецидивных карциномах головы и шеи. ФДТ-индуцированная иммуногенная гибель клеток потенциально может создавать «иммунологический праймер», усиливающий действие ингибиторов контрольных точек.

Главное ограничение ФДТ – кожная фотосенсибилизация: пациенты должны избегать прямого солнечного света в течение 4–6 недель после введения порфиринов (при использовании хлоринов срок значительно меньше – 1–2 недели). Глубина проникновения света ограничена 5–10 мм, что лимитирует применение при крупных инфильтративных опухолях без интерстициальной техники. Отек и болевой синдром после процедуры требуют системной противовоспалительной терапии.

## Перспективы и направления развития

Синтез методов электромагнитного воздействия с наномедициной открывает качественно новые возможности. Наночастицы золота, способные поглощать радиочастотное излучение и микроволны, могут быть конъюгированы с антителами к опухолеспецифическим рецепторам (EGFR, HER2) и накапливаться в опухолевой ткани, обеспечивая «нановелл-гипертермию» при значительно меньшей мощности внешнего поля. Ряд компаний (Nanospectra Biosciences, AuroShell) ведут клинические испытания подобных систем [23].

Системы абляции следующего поколения будут интегрировать автоматическое распознавание анатомических структур (нейронные сети), предиктивное моделирование зоны нагрева и адаптивный контроль мощности для обеспечения оптимального покрытия опухоли при максимальной защите критических структур. Прототипы таких систем уже проходят испытания в нескольких академических центрах.

Индивидуальное компьютерное моделирование (FEM – finite element modeling) электрических и тепловых полей позволяет предсказать зону абляции до начала вмешательства с учетом конкретной геометрии опухоли и окружающих тканей пациента. Интеграция таких моделей в клинический рабочий процесс может существенно снизить долю неполных абляций.

Наиболее многообещающим направлением является синергия минимально инвазивной локальной деструкции с иммунотерапией: «in situ вакцинация» путем высвобождения опухолевых антигенов+блокада иммунного торможения иммунных контрольных точек. Несколько текущих исследований фаз I–II при опухолях головы и шеи тестируют различные комбинации РЧА/электрохимиотерапия с пембролизумабом, ниволумабом и ипилимумабом [24].

## Заключение

Методы электромагнитного воздействия занимают принципиально важное место в современном онкологическом арсенале при лечении опухолей головы и шеи – от широко внедренной в клиническую практику РЧА до перспективных технологий необратимой электропорации и Tumour Treating Fields. РЧА обладает наиболее обширной доказательной базой примени-

тельно к данной локализации, прежде всего, при опухолях ЩЖ и паращитовидных желез, метастатических лимфоузлах шеи и рецидивных опухолях. МВА демонстрирует сопоставимую или превосходящую эффективность при более быстром создании и большем объеме зоны деструкции. Электрохимиотерапия является высокоэффективным и стандартизированным методом для поверхностных и доступных опухолей с отличным профилем переносимости. Фотодинамическая терапия остается ценным инструментом для лечения ранних стадий рака полости рта, гортани и предраковых состояний.

Неуклонно возрастающая роль данных методов в онкологии головы и шеи обусловлена несколькими факторами: стремлением сохранить функцию органов и качество жизни, растущим числом пациентов с рецидивами в зоне предшествующего облучения, развитием минимально инвазивных технологий и навигационных систем, а также открытием синергетического потенциала сочетания локальных физических методов с современной иммунотерапией. Дальнейшее развитие области связано с интеграцией наномедицины, искусственного интеллекта и персонализированного планирования на основе компьютерного моделирования.

## ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Sung H., Ferlay J., Siegel R.L. et al. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A Cancer J. Clin.* 2021;71(3):209–49. Doi: 10.3322/caac.21660.
2. Leemans C.R., Brakenhoff R.H., Braakhuis B.J.M. The molecular landscape of head and neck cancer. *Nature Reviews Cancer.* 2018;18(5):269–282. Doi: 10.1038/nrc.2018.11.
3. Gillison M.L., Chaturvedi A.K., W.F. Anderson, Fakhry C. Epidemiology of Human Papillomavirus-positive head and neck squamous cell carcinoma. *J. Clin. Oncol.* 2015;33(29):3235–42. Doi: 10.1200/JCO.2015.61.6995.
4. Goldberg S.N., Gazelle G.S., Mueller P.R. Radiofrequency tumor ablation: principles and techniques. *Eur. J. Ultrasound.* 2001;13(2):129–47. Doi: 10.1016/s0929-8266(01)00127-6.
5. Cho S.J., Baek J.H., Chung J.Y., et al. Efficacy and safety of radiofrequency ablation for benign thyroid nodules: a meta-analysis. *Korean J. Radiol.* 2015;16(6):1269–78. Doi: 10.3348/kjr.2015.16.6.1269.
6. Hegedüs L., Bonnema J.H., Bennedbaek S.J. The ETA guidelines for the diagnosis and management of thyroid nodules: consensus and update. *Eur. Thyroid J.* 2020;9(Suppl. 1):65–104. Doi: 10.1159/000508484.
7. Kim J.H., Baek J.H., Lim H.K., et al. Radiofrequency ablation guidelines for thyroid nodules: a joint statement from the Korean Society of Thyroid Radiology, Korean Society of Radiology, Korean Endocrine Society, and Korean Society of Ultrasonography. *Ultrasonography.* 2021;40(3):351–67. Doi: 10.14366/usg.21038.
8. Kim C., Lee J.H., Choi J.Y., et al. Efficacy and safety of radiofrequency ablation for treating locally recurrent thyroid cancer. *Thyroid.* 2019;29(5):641–9. Doi: 10.1089/thy.2018.0452.
9. Papini E., Monpeyssen H., Frasoldati A., Hegedüs L. Ultrasound-guided percutaneous ablation is effective for treating selected papillary thyroid microcarcinomas: results from a Delphi-based consensus statement. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 2020;105(8):e2771–9. Doi: 10.1210/clinem/dgaa283.
10. Liu F., Yu B., Zhao F., et al. Ultrasound-guided radiofrequency ablation of parotid pleomorphic adenoma: a series of 43 patients. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.* 2021;50(10):1281–8. Doi: 10.1016/j.ijom.2021.01.011.

11. Lam A.K.Y., Lo G.C.H., Lam T.C.L., et al. Radiofrequency ablation of cervical lymph node metastases from thyroid cancer and head and neck squamous cell carcinoma: a systematic review and meta-analysis. *Eur. J. Surg. Oncol.* 2023;49(4):760–71. Doi: 10.1016/j.ejso.2022.11.011.
12. Bernardi S., Stacul F., Michelli A., et al. Complication and risk factor rates of radiofrequency ablation of thyroid nodules: ETHOSZ international registry study. *Eur. Thyroid J.* 2021;10(5):388–97. Doi: 10.1159/000514025.
13. Schlumberger M., Tahara M., Wirth L.J., et al. Lenvatinib versus placebo in radioiodine-refractory thyroid cancer. *New Engl. J. Med.* 2015;372(7):621–30. Doi: 10.1056/NEJMoa1406470.
14. Brace C.L. Radiofrequency and microwave ablation of the liver, lung, kidney, and bone: what are the differences? *Curr. Probl. Diagnost. Radiol.* 2009;38(3):135–43. Doi: 10.1067/j.cpradiol.2007.10.001.
15. Tong M., Li M., Huang M., et al. Microwave ablation versus radiofrequency ablation for the treatment of benign thyroid nodules: an updated meta-analysis. *J. Clin. Ultrasound.* 2022;50(3):295–303. Doi: 10.1002/jcu.23101.
16. Deng Y., Wang M., Lai C., et al. Microwave ablation as alternative to parathyroidectomy for secondary hyperparathyroidism in dialysis patients: a multicentre registry study. *Eur. Radiol.* 2022;32(7):4758–68. Doi: 10.1007/s00330-021-08525-8.
17. Stupp R., Taillibert S., Kanner A., et al. Maintenance therapy with tumour-treating fields plus temozolomide vs temozolomide alone for glioblastoma: a randomized clinical trial. *JAMA.* 2015;314(23):2535–43. Doi: 10.1001/jama.2015.16669.
18. Ceresoli G.L., Aerts L., Dziadziszko S. et al. Tumour treating fields in combination with pemetrexed and cisplatin or carboplatin as first-line treatment for unresectable malignant pleural mesothelioma (STELLAR): a multicentre, single-arm phase 2 trial. *Lancet. Oncology.* 2019;20(12):1702–9. Doi: 10.1016/S1470-2045(19)30645-9.
19. Mayer A., Mehrhof N., Glantz G., et al. Tumour treating fields in combination with cetuximab and platinum-based chemotherapy as first-line treatment in recurrent/metastatic head and neck squamous cell cancer (HN-308): an open-label, single-arm, phase 2 trial. *Front. Oncol.* 2021;11:757393. Doi: 10.3389/fonc.2021.757393.
20. Merck Inc. KEYNOTE-B91: Study of pembrolizumab plus tumour treating fields in recurrent/metastatic head and neck squamous cell carcinoma [Электронный ресурс]. URL: <https://clinicaltrials.gov/ct2/show/NCT05453968> (дата обращения: 01.10.2024).
21. Agostinis P., Berg K., Cengel K.A. et al. Photodynamic therapy of cancer: an update. *CA: A Cancer J. Clin.* 2011;61(4):250–81. Doi: 10.3322/caac.20114.
22. Mang T.S. Photodynamic therapy and its application in the treatment of oral cavity cancer: a systematic review. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy.* 2021;35:102366. Doi: 10.1016/j.pdpdt.2021.102366.
23. Rastinehad A.R., Anastos H., Wajswol E., et al. Gold nanoshell-localized photothermal ablation of prostate tumors in a clinical pilot device study. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2019;116(37):18590–96. Doi: 10.1073/pnas.1906929116.
24. Ihemelandu C., Rabinowitz J.D., Ziv O., et al. A phase 2 study evaluating radiofrequency ablation plus nivolumab in patients with recurrent/metastatic squamous cell carcinoma of the head and neck (NCT04119063):

interim results. *J. ImmunoTher. Cancer.* 2023;11(Suppl. 1):A42. Doi: 10.1136/jitc-2023-SITC2023.0042.

Поступила 02.04.2026

Получены положительные рецензии 20.04.26

Принята в печать 30.04.26

Received 02.04.2026

Positive reviews received 20.04.26

Accepted 30.04.26

**Вклад авторов.** Все авторы внесли равнозначный вклад в написание статьи.  
**Contribution of the authors.** All authors contributed equally to the writing of the article.

### Информация об авторах:

Решетов Игорь Владимирович — д.м.н., профессор, академик РАН, директор института кластерной онкологии им. проф. Л.Л. Левшина ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава РФ (Сеченовский Университет). Адрес: 119435 Москва, ул. Большая Пироговская, д. 2, стр. 4, заведующий кафедрой онкологии, радиотерапии и реконструктивной хирургии Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского. e-mail: reshetoviv@mail.ru. ORCID: 0000-0002-0909-6278

Макаров Валерий Николаевич — д.ф.-м.н., профессор кафедры «Биокибернетических систем и технологий», РТУ МИРЭА — Российский технологический университет (Москва) Адрес: 119454 Москва, Проспект Вернадского, д. 78; e-mail: makarov\_vn@bk.ru. ORCID: 0000-0002-7550-4735

Боос Никита Александрович — младший научный сотрудник Проблемной лаборатории молекулярной акустики, РТУ МИРЭА — Российский технологический университет. Адрес: 119454 Москва, Проспект Вернадского, д. 78; e-mail: 111llkmbc@mail.ru. ORCID: 0000-0002-4659-3759

Махов Михаил Анатольевич — заместитель генерального директора ООО Фирма «ТЕХНОСВЕТ». Адрес: 117342 Москва, ул. Введенского, д. 27 к. 2, кв. 157; e-mail: technosvet@bk.ru. ORCID: 0000-0002-1553-684X

### Information about the authors:

Reshetov Igor Vladimirovich — Doctor of Medical Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Director of the Institute of Cluster Oncology named after Professor L.L. Levshina Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education First Moscow State Medical University named after I.M. Sechenov Ministry of Health of Russia (Sechenov University). Address: 119435, Moscow, str. Bolshaya Pirogovskaya, 2, building 4, Head of the Department of Oncology, Radiotherapy and Reconstructive Surgery, Institute of Clinical Medicine named after N.V. Sklifosovsky. e-mail: reshetoviv@mail.ru. ORCID: 0000-0002-0909-6278

Makarov Valery Nikolaevich — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Biocybernetic Systems and Technology, RTU MIREA — Russian Technological University. Address: 119454 Moscow, Prospect Vernadskogo, 78; e-mail: makarov\_vn@bk.ru. ORCID: 0000-0002-7550-4735

Boos Nikita Aleksandrovich — junior researcher at the Problem Laboratory of Molecular Acoustics, RTU MIREA - Russian Technological University (Moscow), 119454, Central Federal District). Address: 119454 Moscow, Vernadskogo Avenue, 78; e-mail: 111llkmbc@mail.ru. ORCID: 0000-0002-4659-3759

Mahov Mikhail Anatolievich — Deputy general director of Firm TECHNOSVET LLC. Address: 117342 Moscow, str. Vvedensky, 27 k. 2, apt. 157; e-mail: technosvet@bk.ru. ORCID: 0000-0002-1553-684X