

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD71434>

# Современные технологии визуализации и термоабляции очагов гиперпаратиреоза

П.О. Румянцев<sup>1</sup>, А.А. Бубнов<sup>2, 3</sup>, М.В. Дегтярев<sup>2</sup>, К.Ю. Слащук<sup>2</sup>, С.М. Захарова<sup>2</sup>,  
Д.Ю. Агибалов<sup>3</sup>, В.Ю. Тимошенко<sup>3, 4</sup>

<sup>1</sup> Международный медицинский центр «СОГАЗ МЕДИЦИНА», Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> Национальный медицинский исследовательский центр эндокринологии, Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Российская Федерация

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

Патология околощитовидных желёз по частоте встречаемости находится на третьем месте среди эндокринных болезней, уступая сахарному диабету и заболеваниям щитовидной железы. На сегодняшний день в клинической практике широко применяются только два метода лечения гиперпаратиреоза — консервативный и хирургический. Однако в последние время помимо них появились способы транскутанной термодеструкции (аблации), основанные на прицельном физическом воздействии — лазерном, радиочастотном, микроволновом, ультразвуковом. Настоящий обзор посвящён критическому анализу современного арсенала методов локальной термодеструкции гиперфункции околощитовидных желёз при гиперпаратиреозе. Цель обзора — показать возможности современных неинвазивных и малоинвазивных методов лечения гиперпаратиреоза без противопоставления их хирургическому методу. В обзор включены данные рандомизированных клинических исследований за период с 2012 по 2021 г., найденных в Google Scholar, Pubmed. Общее количество пациентов — 1938 (лазерная абляция — 216, радиочастотная абляция — 225, микроволновая абляция — 1467, абляция ультразвуком высокой плотности — 30). Получены критерии применимости методов термодеструкции. Составлен алгоритм по лечению гиперпаратиреоза. Таким образом, в качестве альтернативы хирургическому вмешательству проанализированы четыре современных метода термодеструкции патологически изменённых околощитовидных желёз, каждый из которых имеет преимущества и недостатки, свой профиль эффективности и безопасности. Как показывает анализ существующей доказательной практики, наибольшей популярностью среди клиницистов пользуется метод микроволновой аблации, однако более эффективным методом термодеструкции гиперфункционирующих околощитовидных желёз является лазерная абляция.

**Ключевые слова:** гиперпаратиреоз; термодеструкция; абляция околощитовидных желёз; лазерная абляция; радиочастотная абляция; микроволновая абляция; HIFU-абляция.

## Как цитировать

Румянцев П.О., Бубнов А.А., Дегтярев М.В., Слащук К.Ю., Захарова С.М., Агибалов Д.Ю., Тимошенко В.Ю. Современные технологии визуализации и термоаблации очагов гиперпаратиреоза // *Digital Diagnostics*. 2021. Т. 2, № 3. С. 369–385. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD71434>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD71434>

# Methods of medical visualization and thermal ablation as a new approach to treatment of hyperparathyroidism

Pavel O. Rumyantsev<sup>1</sup>, Aleksandr A. Bubnov<sup>2,3</sup>, Mikhail V. Degtyarev<sup>2</sup>, Konstantin Yu. Slashchuk<sup>2</sup>, Svetlana M. Zakharova<sup>2</sup>, Dmitry Yu. Agibalov<sup>3</sup>, Viktor Yu. Timoshenko<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> International Medical Center "SOGAZ", Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Endocrinology Research Centre, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russian Federation

<sup>4</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

The pathologies of parathyroid glands are widespread among endocrine system diseases, excluding diabetes and thyroid pathology. There are only two methods that are used to treat hyperparathyroidisms, such as surgery and conservative therapy. However, transracial thermal destruction methods (ablation) have recently appeared in clinical practice. The methods have good precision and connect with physical phenomena, such as interaction laser, radiofrequency, microwave, and HIFU irradiation with bio substance. The review is dedicated to critically analyze the modern methods for local thermal destruction of the hyper-functioning parathyroid glands. The review includes data from randomized clinical trials from 2012 to 2021. The studies were from Google Scholar and Pubmed with a total number of 1,938 patients (laser ablation — 216 patients, radiofrequency ablation — 225, microwave ablation — 1467, high-density ultrasound ablation — 30 patients). Recommendations methods of thermal destruction application were obtained during the review. Furthermore, we have designed some algorithms for hyperparathyroidism treatment. Moreover, thermal destruction methods were observed. There are four modern methods of thermal destruction which have been analyzed like alternatives to surgery. Each of them has advantages and disadvantages, its profile of safety and effectiveness. After processing information from a proven database, the most popular among specialists is methods of microwave ablation. However, laser ablation is more effective than other ways.

**Keywords:** hyperparathyroidism; thermal destruction; ablation of parathyroid glands; laser ablation; radiofrequency ablation; microwave ablation; HIFU ablation.

## To cite this article

Rumyantsev PO, Bubnov AA, Degtyarev MV, Slashchuk KY, Zakharova SM, Agibalov DY, Timoshenko VY. Methods of medical visualization and thermal ablation as a new approach to treatment of hyperparathyroidism. *Digital Diagnostics*. 2021;2(3):369–385. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD71434>

Received: 13.08.2021

Accepted: 24.08.2021

Published: 02.09.2021

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD71434>

# 甲状旁腺功能亢进病灶可视化和热消融的现代技术

Pavel O. Rumyantsev<sup>1</sup>, Aleksandr A. Bubnov<sup>2,3</sup>, Mikhail V. Degtyarev<sup>2</sup>, Konstantin Yu. Slashchuk<sup>2</sup>, Svetlana M. Zakharova<sup>2</sup>, Dmitry Yu. Agibalov<sup>3</sup>, Viktor Yu. Timoshenko<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> International Medical Center "SOGAZ", Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Endocrinology Research Centre, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russian Federation

<sup>4</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

## 简评

甲状旁腺病理学在内分泌疾病中居第三位，仅次于糖尿病和甲状腺疾病。目前，只有两种治疗甲状旁腺功能亢进的方法被广泛应用于临床：保守的和手术的。然而，最近还出现了基于激光、射频、微波等目标物理效应的跨层热分解（消融）方法，超声波。本综述致力于对甲状旁腺功能亢进的局部热分解方法的现代武库进行批判性分析。本综述的目的是展示现代微创和微创方法治疗甲状旁腺功能亢进的可能性，同时又不反对手术方法。该综述包括2012年至2021年期间在谷歌学者（Google Scholar, PubMed）中发现的随机临床研究数据。患者总数-1938人（激光消融216人，射频消融225人，微波消融1467人，高密度超声消融30人）。获得了热分解方法的适用性标准。建立了治疗甲状旁腺功能亢进的算法。因此，作为手术干预的替代方法，已经分析了四种现代热破坏病理改变的甲状旁腺方法，每种方法都有优点和缺点，其自身的有效性和安全性。对现有循证实践的分析表明，最受临床医生欢迎的是微波消融方法，而激光消融是一种更有效的热破坏功能亢进的甲状旁腺的方法。

**关键词：** 甲状旁腺功能亢进； 热破坏； 甲状旁腺消融； 激光烧蚀； 射频消融； 微波消融； HIFU 消融。

## 引用本文

Rumyantsev PO, Bubnov AA, Degtyarev MV, Slashchuk KY, Zakharova SM, Agibalov DYU, Timoshenko VY. 甲状旁腺功能亢进病灶可视化和热消融的现代技术. *Digital Diagnostics*. 2021;2(3):369-385. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD71434>

收到: 13.08.2021

接受: 24.08.2021

发布日期: 02.09.2021

## 绪论

甲状旁腺功能亢进 (HPT) 是一种或多种甲状旁腺自主功能亢进。原发性甲状旁腺功能亢进 (PHPT) 是原发性自主神经功能亢进的结果, 最常见的是一个具有肿瘤性质的甲状旁腺。继发性性和三发性甲状旁腺功能亢进症通常伴有多个功能亢进的甲状旁腺功能亢进, 这是由于慢性肾功能衰竭引起的长期低血钙水平所致 [1]。

PHPT的特征是甲状旁腺激素 (甲状旁腺激素) 分泌过多, 由于甲状旁腺的原发性病理, 血液中的钙浓度高于正常值或增加。全球PHPT的患病率从每 100,000 人 1 至 40 例不等 [2]。PHPT通常发生在工作年龄。45 岁以下的年龄组中, 男女患该病的可能性相等。45 岁后 - 更常见于女性 [3]。

继发性甲状旁腺功能亢进症是由于血清钙浓度降低而导致甲状旁腺激素生成代偿性增加的结果 [4]。最常见于终末期肾功能衰竭。尽管高达 75% 的肾功能衰竭患者有临床上明显的继发性甲状旁腺功能亢进, 但其中只有 5% 需要手术治疗 [5]。

诊断HPT的主要方法是生化血液检查 (甲状旁腺激素、钙、磷、肌酐、维生素 D 的浓度) 和每日尿液 (钙) 的分析。确诊并存在根治性治疗指征后, 进行仪器研究 - 超声检查 (超声波)、具有对比增强的 X 射线计算机断层扫描以及放射性同位素, 包括混合分子成像方法 - 平面闪烁扫描和单-光子发射计算机断层扫描/计算机断层扫描 (SPECT/CT) 与 technetium 染色 ( $^{99m}\text{Tc}$ -MIBI)、正电子发射断层扫描/计算机断层扫描 (PET/CT) 与  $^{18}\text{F}$ -胆碱 [6, 7]。

今天, 临床实践中广泛使用两种 HPT 治疗方法 - 保守和手术 (表 1)。保守治疗包括药物治疗 [8], 以减少高钙血症、预防高钙血症危

象和预防骨折。这种方法并不意味着甲状旁腺功能亢进症的根治性治疗, 主要用于“轻度”-不复杂-的HPT, 无法进行甲状旁腺切除术或患者拒绝接受手术。手术方法能够从根本上消除甲状旁腺激素的过度分泌, 但与住院、麻醉、手术并发症风险、颈部疤痕和恢复期有关 [9, 10]。

将HPT中甲状旁腺可视化的新算法引入到外科实践中, 使得改进局部鉴别诊断、提高精确度和降低手术的侵袭性成为可能 [11]。内镜技术、术中神经监测和甲状旁腺荧光成像可以提高干预的效率和安全性 [12]。手术治疗的效率为 92 - 94% [13]。并非所有患者都表示希望接受手术, 而对于其他患者 (禁忌症、麻醉和手术的生命风险) 则没有办法进行手术。

B. Wu和合著者的研究 [14] GPT的外科治疗仅达到 29% 的患者对其进行绝对证词。最常经常运作 60 岁以下的患者; 在年龄较大的年龄群体中, 手术干预的份额每年减少 1.5-3 次。

这方面, 需要开发多功能泛囊状腺体的替代性降解 (消融)。

除了外科治疗方法外, 基于靶向物理效应的经皮热破坏 (烧蚀) - 激光, 射频, 微波, 超声 (表 2) [15-17] 出现。

根据谷歌学术数据库发现, 在功能亢进的甲状旁腺热破坏的出版物中, 使用微波消融的数量最多, 最小的——高强度聚焦超声 (high-intensity focused ultrasound, HIFU) 消融 (图 1)。

射频和激光消融占据中间位置。微波消融是目前已知的甲状旁腺热破坏的第一种方法, 这一事实解释了微波消融的高度普及和积累的广泛经验。

## 最先进的术前成像和术中导航功能

考虑在 HPT 中破坏甲状旁腺的替代手术方法

表 1 甲状旁腺功能亢进的传统治疗方法

医法	处方治疗的适应症	方法	可视化方法
保守疗法	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 矫正高钙血症</li> <li>• 预防高钙糖危机</li> <li>• 低酒精骨折警告</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 姑息疗法</li> <li>• 对证疗法</li> </ul>	-
手术疗法	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 血清中总钙的浓度超过 0.25 毫摩尔 / 公升 (1 毫克%) 超过该实验室中设定的速率</li> <li>• 降低肾小球过滤速度 &lt; 60 毫升 / 分 / 1.73 平方米</li> <li>• PHPT 的内脏表现 (ICD)</li> <li>• 每日排泄钙 &gt; 400 毫克 / 天 (10 毫摩尔)</li> <li>• T-Criterion 上减少径向, 股骨骨骼或椎骨骨骼的矿物质密度 &lt; -2.5 SD</li> <li>• 历史中低酒精骨折和 / 或放射学识别的椎体骨折 (也根据 MSCT 或 MRI)</li> <li>• 年龄 &lt; 50 年</li> </ul>	根本疗法	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 超声检查, 闪烁图 (SPECT/CT, PET / CT)</li> <li>• CT 与对比剂, PET/CT</li> </ul>

**注意。** PHPT (ICD) - 原发性甲状旁腺功能亢进; MSCT - 多螺旋 CT; 磁共振成像; MRI - 超声-超声检查; SPECT/CT - 单光子发射计算机断层摄影术 / 计算机断层摄影术; PET/CT - 正电子发射断层扫描 / 计算机断层扫描。

**表 2**附近形腺体的多功能损坏的各种方法的特征，具有验证的甲状旁腺功能亢进（基于国际建议）

消融方法	n	适用性方法的标准	操作模式	效率	副作用
激光	216	<ul style="list-style-type: none"> <li>失败直径≤30毫米</li> <li>手术禁忌症</li> <li>异位限制</li> <li>年龄为18岁以上。</li> </ul>	3 瓦 6-10分钟	92%	8% (发音障碍)
射频	225	<ul style="list-style-type: none"> <li>甲状旁腺激素≥800 纳克/毫升</li> <li>甲状旁腺增生数&lt;4</li> <li>药物治疗不受控制的继发性甲状旁腺功能亢进</li> <li>无严重出血性疾病、心力衰竭或不受控制的高血压</li> </ul>	10-50 瓦 1-2 分	83,6%	2,1% (一过性低钙血症，一过性声音嘶哑)
微波	1467	<ul style="list-style-type: none"> <li>肾功能衰竭伴甲状旁腺功能亢进</li> <li>保守治疗无效（尽管药物治疗充分）</li> <li>甲状旁腺激素浓度≥600 皮克/毫升</li> <li>至少一个增大的甲状旁腺</li> <li>最小压盖直径 ≥6毫米</li> <li>不适合手术切除</li> <li>在难以切除的区域存在甲状旁腺</li> </ul>	30 瓦 3-5 分	89,4%	6% (嘶哑)
聚焦高强度超声	30	<ul style="list-style-type: none"> <li>血清钙浓度≥2.60 毫摩尔/升</li> <li>甲状旁腺起源病变的细胞学确认</li> <li>后缘和皮肤表面之间的腺瘤深度&lt;23毫米</li> <li>腺瘤厚度 &gt;8毫米</li> <li>距气管&gt;3毫米，距食道及颈动脉&gt;2毫米</li> <li>距离目标 &lt;10毫米 处没有明显的宏观钙化</li> <li>年龄为18岁以上。</li> </ul>	5 瓦 2-3分	一年后完全缓解 23%。69% 的疾病控制良好	暂时性副作用包括声带活动能力受损 (23.1%)、皮下水肿 (23.1%)、综合效应 (15.2%)

**注意:** n — 撰写本文时接受治疗的患者总数。

之前，有必要强调它们在术前和术中阶段可视化的现代可能性。

## 甲状旁腺术前影像学

HPT术前成像的标准、最经济和最安全的方法是超声（图 2）。

除超声外，还可以使用  $^{99m}\text{Tc}$ -MIBI 进行单同位素双相闪烁扫描，或使用  $^{99m}\text{Tc}$ -MIBI 和  $^{99m}\text{TcO}_4$ （高锝酸盐）在 SPECT/CT 模式下进行双同位素闪烁扫描 [18, 19]（图 3）。

HPT 局部诊断信息量最大的方法是使用  $^{99m}\text{Tc}$ -MIBI 进行放射性核素诊断，尤其是在 SPECT/CT 模式下（图 4）。平均而言，该方法的灵敏度达到 88%（阳性预测值为 96%）[20]。

据文献报道，在 PGPT 患者中， $^{99m}\text{Tc}$ -MIBI 研究的敏感性在 88% 的水平[21]。诊断方法的组合给出了最好的结果。因此，闪烁显像与  $^{99m}\text{Tc}$ -MIBI

和超声相结合的灵敏度为 95%，而单独的超声诊断为 80%，放射性核素诊断为 87% [22]。

## 使用微创方法去除甲状旁腺的术中成像

当使用微创技术切除甲状旁腺时，术前和术中成像方法的互补性是病理结构定位的一个重要因素（图5）。

术中成像的方法中，超声波是最常用的，它可以实时获取有关感兴趣区域的信息。然而，随着技术的发展，除了超声波之外，还可以使用多通道伽马探头，其中包括便携式（Sentinella-102）和手持式（CrystalCam）伽马相机（图6）。

这些设备的操作基于相同的物理原理，但它们实现了不同的技术方案，这使得手持伽马相机的使用成为更有前景的发展方向（表 3）。由于其更好的特性，CrystalCam 提供了比 Sentinella-102 更高质量（对比度）的图像。



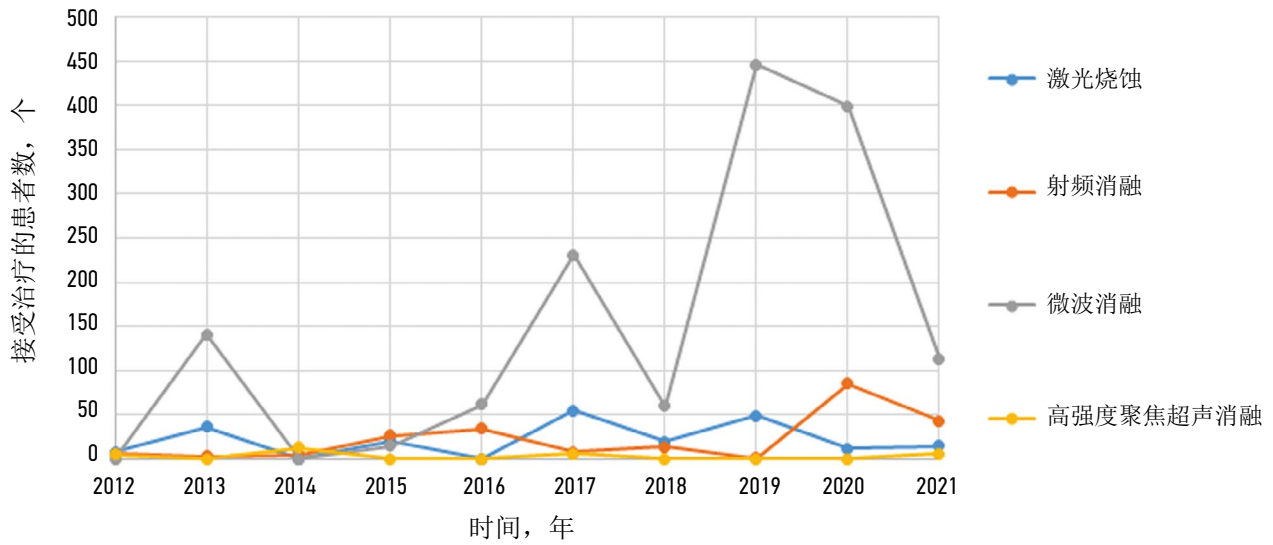


图 1 使用替代方法破坏甲状旁腺的出版物动态。

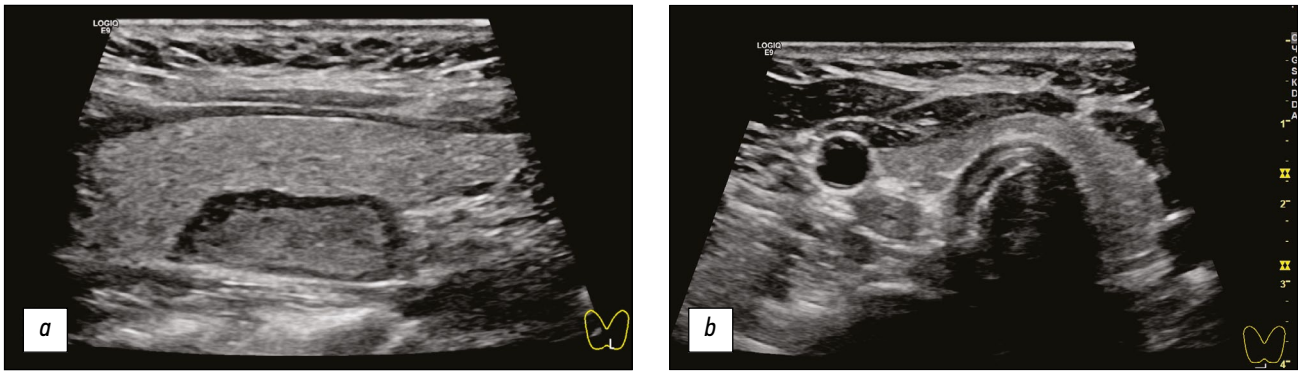


图 2 甲状旁腺功能亢进的甲状旁腺功能亢进的超声成像: a - 原发性甲状旁腺功能亢进; b - 继发性甲状旁腺功能亢进。

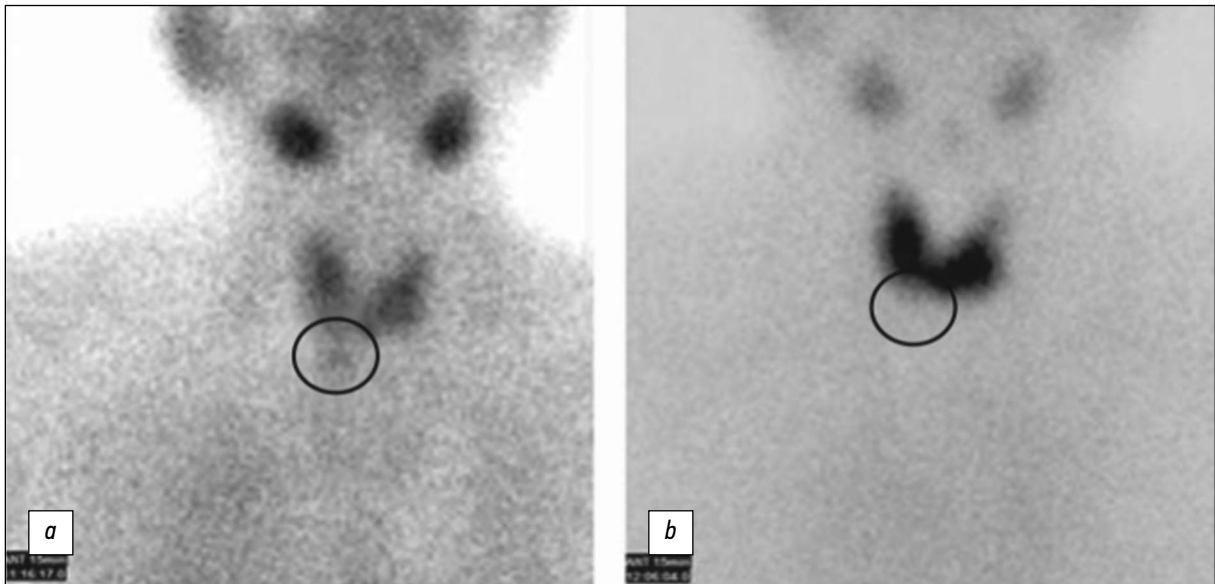


图 3 双同位素闪烁扫描: a -  $^{99m}\text{Tc}$ -MIBI 闪烁扫描; b -  $^{99m}\text{Tc}$ -TcO<sub>4</sub> 闪烁扫描。

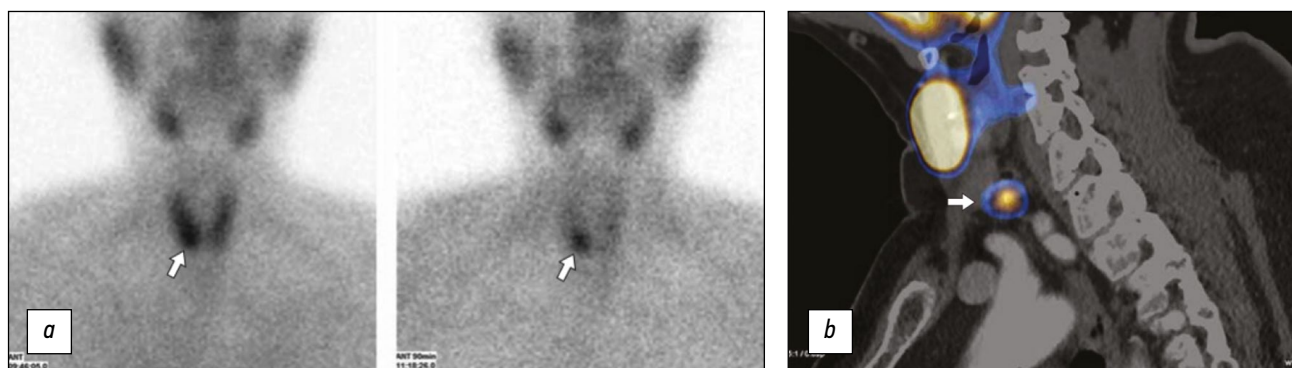


图 4。使用  $^{99m}\text{Tc}$ -MIBI (technetritil) 进行放射性核素研究: **a** - 两相平面闪烁扫描 (早期和延迟扫描): 甲状旁腺的形成在右叶 (箭头) 的投影中可视化, 放射性药物的持续积累增加关于延迟扫描; **b** - 单光子发射计算机断层扫描, 结合计算机断层扫描,  $^{99m}\text{Tc}$ -MIBI: 在左叶下极 (箭头) 后面和向下形成甲状旁腺, 积累放射性药物。

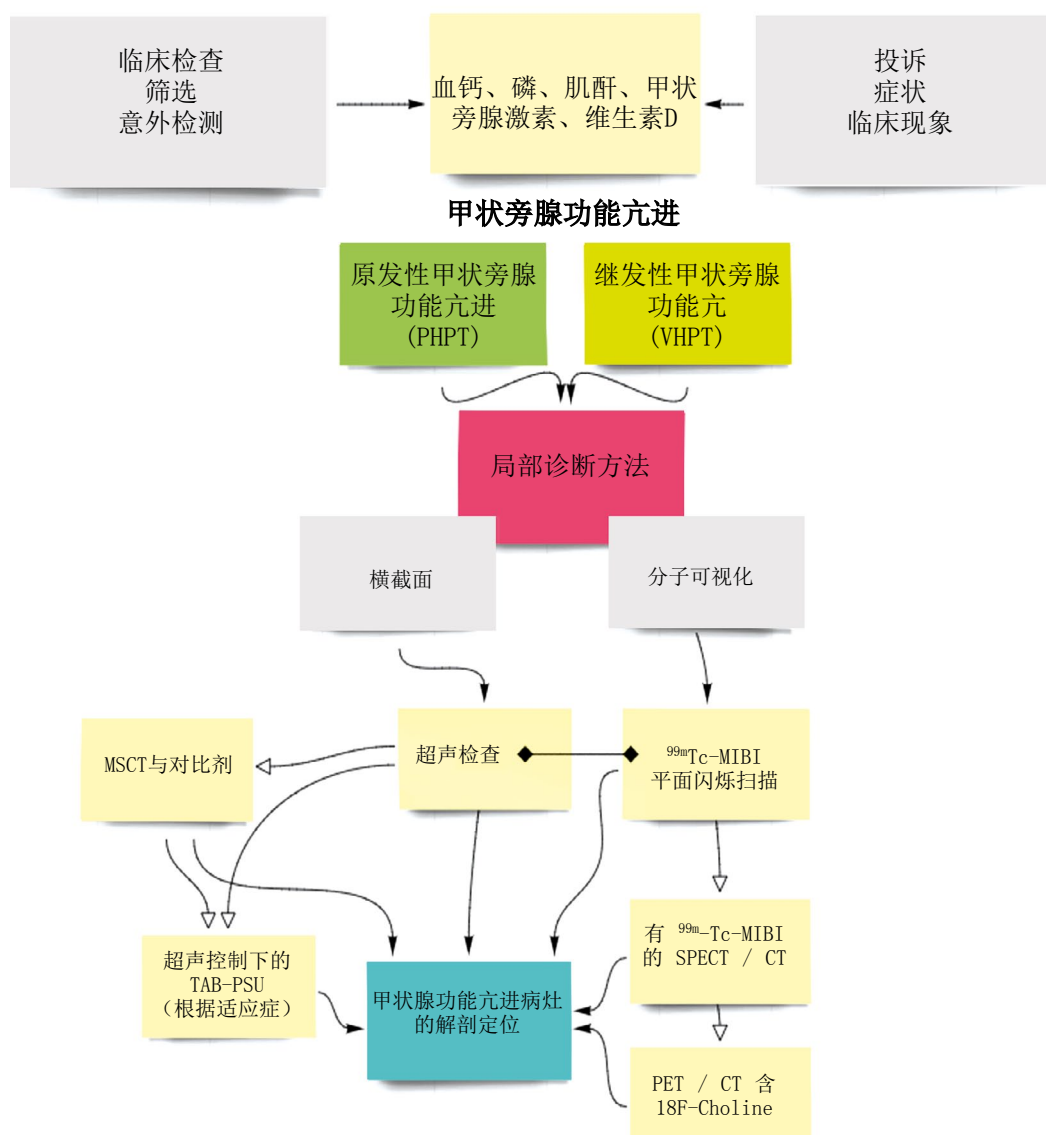


图 5 甲状旁腺功能亢进症诊断算法

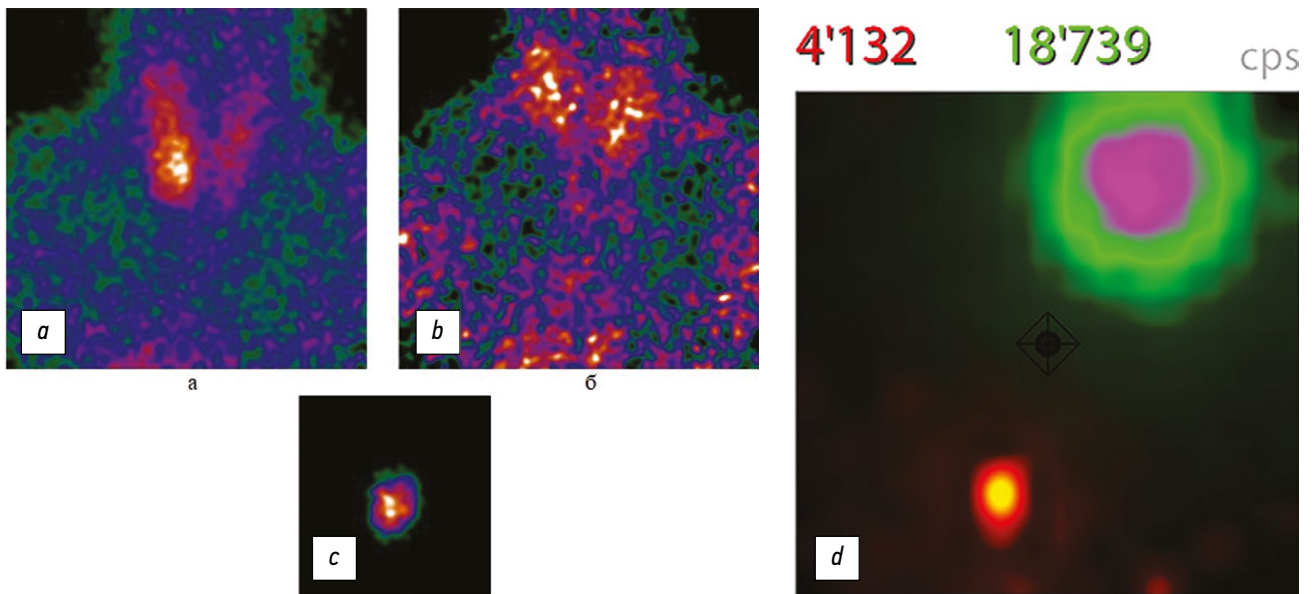


图 6. 使用多通道伽马探测器 Sentiella-102 (a - c) 和 CrystalCam (d) 获得的图像。

## 因此，术中成像方法的使用允许控制甲状腺床区域，并使用替代甲状旁腺切除术破坏甲状旁腺。

### 功能亢进的甲状旁腺微创热消融方法

热消融方法或多或少会对周围组织产生不受控制的影响，甲状旁腺的位置可能与喉返神经相邻。需要评估热消融期间喉返神经损伤的风险，这在选择治疗方法时会产生额外的困难，因为语音功能丧失的可能性是非常不希望的并发症。热效应越集中和控制，对周围组织造成损害的风险就越小。因此，MR-FUS 方法 (InSightec, 以色列) 在 MR 控制下使用聚焦超声，具有加热破坏物体的功能 (下面看一下)。目前没有足够的证据基础来充分比较热消融和手术治疗方法对喉返神经损伤的风险，但证据基础将继续增长。

### 激光破坏 (烧蚀)

1960 年美国物理学家西奥多·哈罗德·迈曼 (Theodore Harold Maiman) 发明了一种基于红宝石晶体的激光，开启了该技术在包括医学在内的人类生活各个领域的应用时代 [23]。1962 年

激光首次在医学中用于视网膜手术中的微焊接。因此，从历史上看，激光最初用于眼科，因为眼睛及其内部由于其透明度而成为最容易接近的器官之一。第一个程序可以称为激光消融，于 1984 年在伦敦国家医学激光中心进行：一名皮肤癌患者使用输出功率为 20 W 的 Nd-YAG 激光辐射进行了持续 10 分钟的手术 [24]。

激光消融的基础是通过向病理生物结构提供能量来加热病理生物结构的现象，以在细胞水平上造成不可逆的损伤 (由于细胞内液体的加热及其随后的蒸发而导致的组织坏死)。通常，组织被加热到 50 - 54°C 以在感兴趣的区域内实现凝固。

目前，激光消融越来越多地用于去除甲状旁腺。该技术基于在超声引导下将纤维引入甲状旁腺 (图 7)。然后打开激光，能量通过内部的纤维供应，用于随后的组织凝固。对于激光消融，通常使用混合装置 (EchoLaser X4, Esaote, Genova, Italy)，它将超声扫描与线性探头和四个独立的光纤相结合，将激光辐射传送到甲状旁腺。辐射由二极管激光器产生，波长为 1064 纳米，光束直径为 0.3 毫米，输出功率为 1 至 7 瓦。可以使用 21G 针头将长度为

表 3 伽马探针的特性

指标	安装类型	
	便携式伽马相机	手动伽马相机
模型	Sentinnella-102	CrystalCam
灵敏度、计数速度、MBq	300 - 200	5000
计数速度, <sup>106</sup>	1.7	6.2
使用准直器的空间分辨率 (本机), 毫米	4-10 在 10 厘米的距离, 使用不同的准直器	5, 4 - 9, 2
能量分辨率, %	16	<7
记录能量的动态范围, keV	50 - 200	40 - 250



1.5米、芯为 300 微米的光纤经皮插入目标中。

使用激光消融治疗功能性甲状旁腺腺瘤患者表现出高水平的持续完全反应，临床显著的随访期为 24 个月。甲状旁腺功能亢进的临床症状在 6 个月时消失，并且在 6 个月时也观察到甲状旁腺激素和钙的持续血清学正常化 [25]。

## 射频消融

一百多年前，即1891年人们发现了无线电波能够穿过生物组织的能力。同时，注意到组织温度的升高不会引起神经肌肉兴奋。这一发现成为开发射频消融方法的起点 [26]。长期以来，科学家们面临着暴露于射频波时组织坏死面积扩大的问题，在解决了这个问题后，他们遇到了与坏死发展的不受控制的形式和不可预测性相关的困难。直到二十世纪末，随着一种特殊类型电极的发明，使得能够更准确地预测组织坏死的方向，才有可能解决这个问题[27]。

该方法的物理基础是通过导电路径（交流电对组织的作用）进行电阻加热，该路径由组织分子组成，其中大部分粒子是水分子。子的偶极矩试图与电流方向保持一致，当快速施加交流电时，它们被迫振荡，同时将振荡传递给邻近的分子。由于相邻分子之间的摩擦而造成能量损失，导致能量局部释放，温度升高至 50° C 以上，从而激活随后的组织坏死。无线电波在 450-500 kHz 的频率范围内产生。该方法的主要物理限制是其在低电导率组织中的应用[28]。

射频消融用于治疗多种肿瘤，包括肺、肾、乳腺、骨、甲状腺和肝肿瘤 [29-31]。最近，研究开始测试该技术治疗 PHPT 的有效性和安全性，并考虑将其作为开放甲状旁腺切除术的替代方案 [32]。该程序在超声波扫描的监督下进行。探头通过穿刺插入腺瘤，根据形成的大小，向腺瘤提供的总功率从10到70 瓦不等[33]。

方法是一种替代开放性甲状旁腺切除术的方法，适用于伴有单一腺瘤的患者，该腺瘤在超声

和SPECT/CT上清晰可见。引起颈部不适或美容问题的大腺瘤也是很好的候选者。如果怀疑甲状旁腺形成的恶性肿瘤（局部侵犯的超声征象，尺寸> 3厘米，实验室甲状旁腺激素> 300 p毫摩尔/升；白蛋白校正钙> 3 毫摩尔/升），该程序是禁忌的！如果怀疑甲状旁腺癌，建议手术切除和病理证实。

## 微波消融

微波消融方法是“最年轻”的方法。第一次提到使用微波烧蚀可追溯到上世纪80年代，但直到21世纪才开始商业化生产适用于该过程的特殊发电机，这在很大程度上推动了该方向的发展[34]。

微波消融的机制基于更高频率的电磁场的作用 - 从 915 兆赫到 2.45 吉赫兹。这种类型的辐射介于红外线辐射和无线电波之间。水分子是极性的，即 分子上的电荷是不对称的。分子中含有两个氢原子的部分带正电，含有氧的部分带负电。这些分子充当小电偶极子，在空间方向上来回旋转，快速旋转以尝试与相反极性的电荷对齐。组织中的极性分子被迫通过振荡电场不断重新排列自身，从而增加其动能，从而增加组织温度。含水量高的组织（如硬器官和肿瘤）最适合这种加热方式。当温度达到 50 至 100 °C 时，维持 DNA 三级结构所必需的蛋白质和酶促降解以及组蛋白复合物的变性被激活。暴露于这些细胞毒性温度后，随着时间的推移，细胞会通过凝固性坏死发生死亡 [35]。

PHPT 微波消融是在超声引导下进行的。外科医生通过 17G针创建通路，将涂药器天线带到甲状旁腺。涂药器的末端形成一个场，能量通过该场传递到组织。消融在分馏模式下进行，对于体积中的每个点，输入功率为 30瓦，持续 25-30 秒。该过程的持续时间为 3 到 5 分钟，并一直持续到在超声图像上获得低回声图像 [36]。

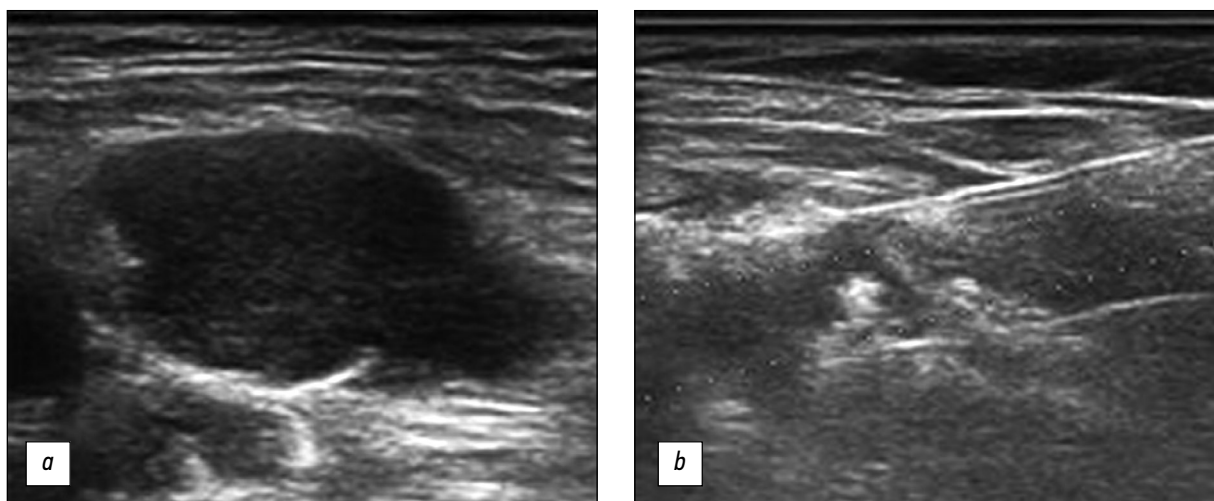


图 7原发性甲状旁腺功能亢进的激光消融：a - 甲状旁腺腺瘤； b - 两根激光纤维的存在和消融后甲状旁腺区域。

根据文献, 甲状旁腺切除术后复发性和持续性甲状旁腺功能亢进的发生率分别为 0.83-26% 和 0.4-15% [37]。使用微波消融法去除甲状旁腺时, 局部复发率达到8.8%, 新发病例为11.8%。当然, 消融与手术治疗不同, 但远期疗效并不逊色于甲状旁腺切除术[38]。微波消融作为HHPT患者的根治性治疗是安全有效的, 且长期随访未见并发症增多。

### 高强度聚焦超声消融 (high-intensity focused ultrasound, HIFU)

1927年, R. W. Wood 和 A. L. Loomis 首先介绍了高强度超声的热特性。1942年, J. G. Lynn描述了聚焦超声发生器的使用, 该发生器能够通过颅骨的中间部分、脑膜对肝脏样本以及大脑进行局部热消融 *ex vivo*, 而不会损坏皮肤 [39]。1950年代William Fry 和 Francis Fry 兄弟开发了一种高强度超声经颅系统, 可以在动物开颅手术后使用该系统来靶向大脑的更深区域, 这激发了人们对这种消融治疗运动障碍的兴趣, 例如帕金森病[40]。

最早的高强度超声消融治疗病例是在 1990 年代初期描述的前列腺疾病患者, 影像技术 (超声检查、MRI) 的进一步改进使得治疗各种良性和恶性肿瘤成为可能 [41]。目前, HIFU 方法用于去除甲状腺的良性功能性活动结节、功能亢进的甲状旁腺以及前列腺癌 [42-44]。

超声波的形成是逆压电效应的结果。发生器向板的极板上提供交流电压, 施加到压电晶体 (石英晶体) 上, 结果在电场的作用下, 晶格发生变形, 发生受迫振动。当电场电压变化的频率与晶体振荡的固有频率重合时, 观察到振荡的共振。结果, 随着环境相邻层中晶体厚度的减小, 形成稀薄, 并且随着介质颗粒的厚度增加。因此, 在介质中产生超声波, 其沿垂直于压电晶体表面的方向传播。

超声波产生的频率范围为 20 千赫至 1 太赫兹。治疗性超声的强度超过 5 瓦/平方厘米, 可诱发凝固性组织坏死, 最常用于消融。蛋白质变性和凝固性坏死通常发生在 56°C 下, 持续时间为 1 秒, 而高于 43°C 的温度持续 1 小时会使组织更容易受到化疗和放疗的影响。吸收超声波辐射引起的生物组织温度的升高与声音的强度成线性正比。

EchoPulse (Theraclion, 巴黎, 法国) 是目前唯一可用于PHPT高强度超声消融的系统。该设备包含一个用于术中成像的诊断超声单元 (7.5 兆赫) 和一个用于将能量输送到目标体积的治疗超声组件 (3 兆赫)。该设备的特殊冷却回路可降低连续脉冲之间的温度。治疗性超声脉冲会产生一个椭圆形消融区域, 其长半轴为 4.5 毫米, 短半轴为 1 毫米。在对程序进行初步规划后, 将给出几个脉冲来执行消融。治疗区域的安全边界为距气管 3 毫米、距颈动脉 2 毫米和距皮肤

5 毫米。皮肤表面的最大工作深度为 28 毫米。该过程通常在镇静状态下进行, 患者处于清醒状态, 很少需要局部麻醉。

因此, 甲状旁腺的大小和甲状旁腺激素在治疗后一个月显着减少。钙浓度缓慢下降。一年后 23% 的患者完全缓解, 69% 的患者疾病控制良好, 8% 的患者认为手术不成功。治疗次数高度依赖于治疗反应 [45]。

尽管这些研究的结果令人鼓舞, 但高强度超声治疗仍然存在一些限制因素。该过程非常耗时。患者在整个消融期间必须保持不动, 因为移动时必须重新开始治疗。此外, 需要额外的程序来治疗大而深的病变, 因为该方法工作的最大深度距离皮肤仅 28 毫米。如果探头和皮肤之间有疤痕或痣, 则无法使用此方法进行消融。需要更大规模的研究将高强度聚焦超声消融引入临床实践。

## 讨论

需要注意的是, 使用上述方法破坏甲状旁腺功能亢进病灶的质量可能存在显着差异。甲状旁腺的腺瘤或增生由每个细胞发挥作用, 仅破坏一部分腺体可能达不到预期的效果。这方面, 最重要的争议是确定达到最佳结果的破坏量并考虑并发症的可能性。本综述收录的文章中, 破坏体积是在超声引导下确定的, 并与术前SPECT/CT的数据进行比较。持续性并发症要么没有被观察到, 要么作者没有在结果中指出, 这进一步实现了对这一问题进行直接比较和随机临床试验的需要。

从实用的角度来看, 当确定破坏体积时, 考虑甲状旁腺机能亢进的性质是极其重要的, 并分别考虑在原发性和继发性 (肾源性) 甲状旁腺功能亢进症中使用热消融方法。这些是完全不同的疾病, 使用微创方法治疗这些疾病的策略可能会有所不同。原发性和继发性甲状旁腺功能亢进的形态学变化彼此根本不同, 因此, 这些疾病的破坏程度可能不同。

特别值得关注的是与外科治疗相比, 热消融方法的长期有效性问题。审查中分析的绝大多数文章中, 作者对使用替代治疗方法持积极态度, 很少对方法与传统 (激进) 方法进行批判性比较。不幸的是, 到目前为止, 在对比研究的框架内, 尚未积累足够的关于热消融后患者长期观察的数据, 以评估与传统方法相比的有效性, 因此, 在现阶段, 只有在无法使用传统方法的情况下, 才应主要考虑使用替代方法的便利性。

根据分析的信息, 考虑到使用替代方法的可能性, 我们开发了自己的甲状旁腺功能亢进治疗算法 (图8)。该算法不同于俄罗斯卫生部批准的原发性甲状旁腺功能亢进症治疗临床指南, 以及继发性甲状旁腺功能亢进症治疗建议KDIGO [46] 和KDOQI [47]。然而, 制定的算法是基于更现代的数据和最新的研究结果, 使用了本综述中描述的技术, 这使其与进一步讨论相关, 但不会改变或质疑其他算法。

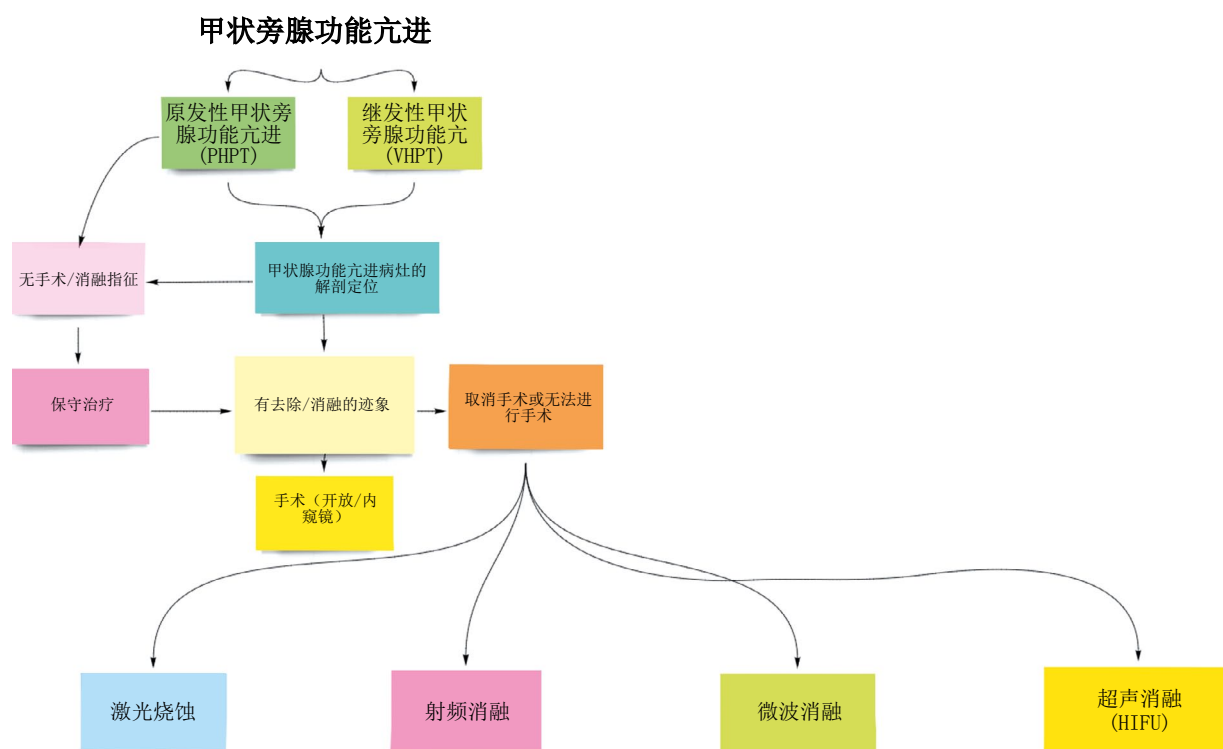


图 8 治疗甲状旁腺功能亢进症的算法。

因此，该综述分析了 HPT 的四种热破坏方法作为手术干预的替代方法（图 9）。该技术使用热消融的各种物理原理，并在其应用中积累了重要的临床经验。HPT 的来源是使用功能性局部诊断方法的结果。HPT 术前局部诊断的现代算法，包括超声、MSCT、SPECT/CT、PET/CT，使功能亢进的甲状旁腺的检测率达到 95%。

### 结论

因此，任何选定的热破坏方法都需要对热暴露

进行控制（超声波、MRI），以及专家的高素质和经验。热破坏功能亢进的甲状旁腺的四种基本方法中的每一种都有其自身的优点和缺点、有效性和安全性。临床实践分析表明，最流行的方法是微波消融 - 第一个也是最著名的方法，但是，在我们看来，可能更有效和更安全的方法是激光消融。这首先通过该方法在更有针对性和超声波控制的热破坏中的技术可能性来解释。

考虑到并非所有有HPT手术治疗指征的患者都可以进行手术，人们对改进替代非手术治疗方法的兴趣将会增加。



图 9 甲状旁腺热破坏方法的优点（绿色）和缺点（红色）的简要说明。



## 附加信息

**资金来源。**作者认为在进行研究和分析工作以及撰写文章时，缺乏外部资金。

**利益冲突。**作者声明没有明显的和潜在的利益冲突相关的发表这篇文章。

**作者贡献。**P. O. Rumyantsev - 研究的概念和设计，材料的处理，文字的写作；A. A. Bubnov - 研究设计、材料的收集和处理、所得数据的分析、文字写作、插图设计；M. V.

Degtyarev - 撰写文字，装饰插图，收集和材料；K. YU. Slashchuk - 撰写文字，装饰插图，收集和材料；S. M. Zakharova - 插图设计，获得的数据分析；D. YU. Agibalov - 插图设计，获得的数据分析；V. YU. Timoshenko - 分析获得的数据，编写文本。所有作者都确认其作者符合国际ICMJE标准（所有作者为文章的概念，研究和准备工作做出了重大贡献，并在发表前阅读并批准了最终版本）。

## REFERENCES

- Fraser WD. Hyperparathyroidism. *Lancet*. 2009;374(9684):145–158. doi: 10.1016/S0140-6736(09)60507-9
- Vadiveloo T, Donnan PT, Leese GP. A population-based study of the epidemiology of chronic hypoparathyroidism. *J Bone Miner Res*. 2018;33(3):478–485. doi: 10.1002/jbmr.3329
- Yanevskaya LG, Karonova TL, Sleptsov IV, et al. Primary hyperparathyroidism: clinical forms and their features. Retrospective study. *Clinical and Experimental Thyroidology*. 2019;15(1):19–29. (In Russ). doi: 10.14341/ket10213
- Mokrysheva NG, Eremkina AK, Mirnaya SS, et al. Challenges in differential diagnosis between primary and secondary forms of hyperparathyroidism. *Obesity and Metabolism*. 2017;14(3):48–53. (In Russ). doi: 10.14341/omet2017348-53
- Smorshchok VN, Kuznetsov NS, Artemova AM, et al. Surgical treatment of patients with secondary hyperparathyroidism in chronic renal failure. *Problems of Endocrinology*. 2003;49(6):36–41. (In Russ). doi: 10.14341/probl11761
- Slashchuk KY, Degtyarev MV, Rumyantsev PO, et al. Imaging methods of the parathyroid glands in primary hyperparathyroidism. Literature review. *Endocrine Surgery*. 2019;13(4):153–174. (In Russ). doi: 10.14341/serg12241
- Broos WM, van der Zant FM, Knol JJ, Wondergem M. Choline PET/CT in parathyroid imaging: a systematic review. *Nucl Med Commun*. 2019;40(2):96–105. doi: 10.1097/MNM.0000000000000952
- Yu N, Leese GP, Smith D, Donnan PT. The natural history of treated and untreated primary hyperparathyroidism: the parathyroid epidemiology and audit research study. *QJM*. 2011;104(6):513–521. doi: 10.1093/qjmed/hcq261
- Ishii H, Stechman MJ, Watkinson JC, et al. A review of parathyroid surgery for primary hyperparathyroidism from the United Kingdom Registry of Endocrine and Thyroid Surgery (UKRETS). *World J Surg*. 2021;45:782–789. doi: 10.1007/s00268-020-05885-5
- Kim MS, Kim GH, Lee CH, et al. Surgical outcomes of subtotal parathyroidectomy for renal hyperparathyroidism. *Clin Exp Otorhinolaryngol*. 2020;13(2):173–178. doi: 10.21053/ceo.2019.01340
- LeBlanc RA, Isaac A, Abele J, et al. Validation of a novel method for localization of parathyroid adenomas using SPECT/CT. *J Otolaryngol Head Neck Surg*. 2018;47(1):65. doi: 10.1186/s40463-018-0307-6
- Zhao S, Guo X, Taniguchi M, et al. Detection of mediastinal lymph node metastases using indocyanine green (ICG) fluorescence imaging in an orthotopic implantation model. *Anticancer Res*. 2020;40(4):1875–1882. doi: 10.21873/anticancer.14141
- Kose E, Rudin AV, Kahramangil B, et al. Autofluorescence imaging of parathyroid glands: An assessment of potential indications. *Surgery*. 2020;167(1):173–179. doi: 10.1016/j.surg.2019.04.072
- Wu B, Haigh PI, Hwang R, et al. Underutilization of parathyroidectomy in elderly patients with primary hyperparathyroidism. *J Clin Endocrinol Metab*. 2010;95(9):4324–4330. doi: 10.1210/jc.2009-2819
- Kovatcheva RD, Vlahov JD, Stoinov JI, et al. High-intensity focused ultrasound (HIFU) treatment in uraemic secondary hyperparathyroidism. *Nephrol Dial Transplant*. 2012;27(1):76–80. doi: 10.1093/ndt/gfr590
- Korkusuz H, Nimsdorf F, Happel C, et al. Percutaneous microwave ablation of benign thyroid nodules. Functional imaging in comparison to nodular volume reduction at a 3-month follow-up. *Nuklearmedizin*. 2015;54(1):13–19. doi: 10.3413/Nukmed-0678-14-06
- Zeng Z, Peng CZ, Liu JB, et al. Efficacy of ultrasound-guided radiofrequency ablation of parathyroid hyperplasia: single session vs. two-session for effect on hypocalcemia. *Sci Rep*. 2020;10(1):6206. doi: 10.1038/s41598-020-63299-8
- Casara D, Rubello D, Piotta A, Pelizzo MR. 99mTc-MIBI radio-guided minimally invasive parathyroid surgery planned on the basis of a preoperative combined 99mTc-pertechnetate/99mTc-MIBI and ultrasound imaging protocol. *Eur J Nucl Med*. 2000;27(9):1300–1304. doi: 10.1007/s002590000297
- Huang Z, Lou C. 99mTcO4-/99mTc-MIBI dual-tracer scintigraphy for preoperative localization of parathyroid adenomas. *J Int Med Res*. 2019;47(2):836–845. doi: 10.1177/0300060518813742
- Zhang R, Zhang Z, Huang P, et al. Diagnostic performance of ultrasonography, dual-phase 99mTc-MIBI scintigraphy, early and delayed 99mTc-MIBI SPECT/CT in preoperative parathyroid gland localization in secondary hyperparathyroidism. *BMC Med Imaging*. 2020;20(1):91. doi: 10.1186/s12880-020-00490-3
- Treglia G, Sadeghi R, Schalin-Jäntti C, et al. Detection rate of 99mTc-MIBI single photon emission computed tomography (SPECT)/CT in preoperative planning for patients with primary hyperparathyroidism: A meta-analysis. *Head Neck*. 2016;38(Suppl 1):2159–2172. doi: 10.1002/hed.24027
- Huber GF, Hüllner M, Schmid C, et al. Benefit of 18F-fluorocholine PET imaging in parathyroid surgery. *Eur Radiol*. 2018;28(6):2700–2707. doi: 10.1007/s00330-017-5190-4
- Pacella CM, Mauri G. History of laser ablation. image-guided laser ablation. Springer, Cham; 2020. doi: 10.1007/978-3-030-21748-8\_1
- Bown SG. Phototherapy in tumors. *World J Surg*. 1983;7(6):700–709. doi: 10.1007/BF01655209



25. Appelbaum L, Goldberg SN, Ierace T, Mauri G. US-guided laser treatment of parathyroid adenomas. *Int J Hyperthermia*. 2020;37(1):366–372. doi: 10.1080/02656736.2020.1750712
26. Rhim H, Goldberg SN, Dodd GD, et al. Essential techniques for successful radio-frequency thermal ablation of malignant hepatic tumors. *Radiographics*. 2001;21:S17–S35. doi: 10.1148/radiographics.21.suppl\_1.g01oc11s17
27. McGahan JP, Dodd G. Radiofrequency ablation of the liver. *American Journal of Roentgenology*. 2001;176(1): 3–16 doi: 10.2214 / ajr.176.1.1760003
28. Hong K, Georgiades C. Radiofrequency ablation: mechanism of action and devices. *J Vasc Interv Radiol*. 2010;21(8 Suppl):179–186. doi: 10.1016/j.jvir.2010.04.008
29. Zhang M, Tufano RP, Russell JO. Ultrasound-Guided radiofrequency ablation versus surgery for low-risk papillary thyroid microcarcinoma: results of over 5 years' follow-up. *Thyroid*. 2020;30(3):408–417. doi: 10.1089/thy.2019.0147
30. Schullian P, Johnston EW, Putzer D, et al. Safety and efficacy of stereotactic radiofrequency ablation for very large ( $\geq 8$  cm) primary and metastatic liver tumors. *Sci Rep*. 2020;10(1):1618. doi: 10.1038/s41598-020-58383-y
31. Marshall HR, Shakeri S, Hosseiny M, et al. Long-term survival after percutaneous radiofrequency ablation of pathologically proven renal cell carcinoma in 100 patients. *J Vasc Interv Radiol*. 2020;31(1):15–24. doi: 10.1016/j.jvir.2019.09.011
32. Laird AM, Libutti SK. Minimally invasive parathyroidectomy versus bilateral neck exploration for primary hyperparathyroidism. *Surg Oncol Clin N Am*. 2016;25(1):103–118. doi: 10.1016/j.soc.2015.08.012
33. Ha EJ, Baek JH, Baek SM. Minimally invasive treatment for benign parathyroid lesions: treatment efficacy and safety based on nodule characteristics. *Korean J Radiol*. 2020;21(12):1383–1392. doi: 10.3348/kjr.2020.0037
34. Sidorov DV, Stepanov SO, Grishin NA, et al. Microwave ablation in the treatment of liver malignancies. *Oncology. Journal named after P.A. Herzen*. 2013;1(2):27–31. (In Russ).
35. Lubner MG, Brace CL, Hinshaw JL, Lee FT. Microwave tumor ablation: mechanism of action, clinical results, and devices. *J Vasc Interv Radiol*. 2010;21(8):192–203 doi: 10.1016/j.jvir.2010.04.007
36. Wei Y, Peng L, Li Y, et al. Clinical study on safety and efficacy of microwave ablation for primary hyperparathyroidism. *Korean J Radiol*. 2020;21(5):572–581. doi: 10.3348/kjr.2019.0593
37. Schlosser K, Bartsch DK, Diener MK, et al. Total parathyroidectomy with routine thymectomy and autotransplantation versus total parathyroidectomy alone for secondary hyperparathyroidism: results of a nonconfirmatory multicenter prospective randomized controlled pilot trial. *Annals of Surgery*. 2016;264(5):745–753. doi: 10.1097/SLA.0000000000001875
38. Zhuo L, Zhang L, Peng LL, et al. Microwave ablation of hyperplastic parathyroid glands is a treatment option for end-stage renal disease patients ineligible for surgical resection. *Int J Hyperthermia*. 2019;36(1):29–35. doi: 10.1080/02656736.2018.1528392
39. Copelan A, Hartman J, Chehab M, Venkatesan AM. High-Intensity focused ultrasound: current status for image-guided therapy. *Semin Intervent Radiol*. 2015;32(4):398–415. doi: 10.1055/s-0035-1564793
40. Suleimanov EA, Filonenko EV, Moskvicheva LI, et al. The possibility of hifu therapy at the present stage. *Research and Practical Medicine Journal*. 2016;3(3):76–82. (In Russ). doi: 10.17709/2409-2231-2016-3-3-8
41. Limani K, Aoun F, Holz S, et al. Single high intensity focused ultrasound session as a whole gland primary treatment for clinically localized prostate cancer: 10-year outcomes. *Prostate Cancer*. 2014;2014:186782. doi: 10.1155/2014/186782
42. Chung SR, Baek JH, Suh CH, et al. Efficacy and safety of high-intensity focused ultrasound (HIFU) for treating benign thyroid nodules: a systematic review and meta-analysis. *Acta Radiologica*. 2020;61(12):1636–1643. doi: 10.1177/0284185120909339
43. Ploussard G. Re: Salvage high-intensity focused ultrasound (HIFU) for locally recurrent prostate cancer after failed radiation therapy: multi-institutional analysis of 418 patients. *Eur Urol*. 2018;73(1):140–141. doi: 10.1016/j.eururo.2017.09.031
44. Tsamatropoulos P, Valcavi R. HIFU and RFA Ablation for thyroid and parathyroid disease. *Advanced thyroid and parathyroid ultrasound*. Springer, Cham; 2017. doi: 10.1007/978-3-319-44100-9\_36
45. Kovatcheva R, Vlahov J, Stoinov J, et al. US-guided high-intensity focused ultrasound as a promising non-invasive method for treatment of primary hyperparathyroidism. *Eur Radiol*. 2014;24(9):2052–2058. doi: 10.1007/s00330-014-3252-4
46. Khwaja A. KDIGO clinical practice guidelines for acute kidney injury. *Nephron Clin Pract*. 2012;120(4):179–184. doi: 10.1159/000339789
47. Daugirdas JT, Depner TA, Inrig J, et al. KDOQI clinical practice guideline for hemodialysis adequacy: 2015 update. *Am J Kidney Dis*. 2015;66(5):884–930. doi: 10.1053/j.ajkd.2015.07.015

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Fraser W.D. Hyperparathyroidism // *Lancet*. 2009. Vol. 374, N 9684. P. 145–158. doi: 10.1016/S0140-6736(09)60507-9
- Vadiveloo T., Donnan P.T., Leese G.P. A population-based study of the epidemiology of chronic hypoparathyroidism // *J Bone Miner Res*. 2018. Vol. 33, N 3. P. 478–485. doi: 10.1002/jbmr.3329
- Яневская Л.Г., Каронова Т.Л., Слепцов И.В., и др. Первичный гиперпаратиреоз: клинические формы и их особенности. Результаты ретроспективного исследования // *Клиническая и экспериментальная тиреоидология*. 2019. Т. 15, № 1. С. 19–29. doi: 10.14341/ket10213
- Мокрышева Н.Г., Еремкина А.К., Мирная С.С., Ковалева Е.В. Трудности дифференциальной диагностики между первичной

- и вторичной формами гиперпаратиреоза // *Ожирение и метаболизм*. 2017. Т. 14, № 3. С. 48–53. doi: 10.14341/omet2017348-53
- Сморщок В.Н., Кузнецов Н.С., Артемова А.М., и др. Хирургическое лечение больных с вторичным гиперпаратиреозом при хронической почечной недостаточности // *Проблемы эндокринологии*. 2003. Т. 49, № 6. С. 36–41. doi: 10.14341/probl11761
  - Слащук К.Ю., Дегтярев М.В., Румянцев П.О., и др. Методы визуализации околощитовидных желез при первичном гиперпаратиреозе. Обзор литературы // *Эндокринная хирургия*. 2019. Т. 13, № 4. С. 153–174. doi: 10.14341/serg12241
  - Broos W.M., van der Zant F.M., Knol J.J., Wondergem M. Choline PET/CT in parathyroid imaging: a systematic re-

- view // *Nucl Med Commun*. 2019. Vol. 40, N 2. P. 96–105. doi: 10.1097/MNM.0000000000000952
8. Yu N., Leese G.P., Smith D., Donnan P.T. The natural history of treated and untreated primary hyperparathyroidism: the parathyroid epidemiology and audit research study // *QJM*. 2011. Vol. 104, N 6. P. 513–521. doi: 10.1093/qjmed/hcq261
  9. Ishii H., Stechman M.J., Watkinson J.C., et al. A review of parathyroid surgery for primary hyperparathyroidism from the United Kingdom Registry of Endocrine and Thyroid Surgery (UKRETS) // *World J Surg*. 2021. Vol. 45. P. 782–789. doi: 10.1007/s00268-020-05885-5
  10. Kim M.S., Kim G.H., Lee C.H., et al. Surgical outcomes of subtotal parathyroidectomy for renal hyperparathyroidism // *Clin Exp Otorhinolaryngol*. 2020. Vol. 13, N 2. P. 173–178. doi: 10.21053/ceo.2019.01340
  11. LeBlanc R.A., Isaac A., Abele J., et al. Validation of a novel method for localization of parathyroid adenomas using SPECT/CT // *J Otolaryngol Head Neck Surg*. 2018. Vol. 47, N 1. P. 65. doi: 10.1186/s40463-018-0307-6
  12. Zhao S., Guo X., Taniguchi M., et al. Detection of mediastinal lymph node metastases using indocyanine green (ICG) fluorescence imaging in an orthotopic implantation model // *Anticancer Res*. 2020. Vol. 40, N 4. P. 1875–1882. doi: 10.21873/anticancer.14141
  13. Kose E., Rudin A.V., Kahramangil B., et al. Autofluorescence imaging of parathyroid glands: An assessment of potential indications // *Surgery*. 2020. Vol. 167, N 1. P. 173–179. doi: 10.1016/j.surg.2019.04.072
  14. Wu B., Haigh P.I., Hwang R., et al. Underutilization of parathyroidectomy in elderly patients with primary hyperparathyroidism // *J Clin Endocrinol Metab*. 2010. Vol. 95, N 9. P. 4324–4330. doi: 10.1210/jc.2009-2819
  15. Kovatcheva R.D., Vlahov J.D., Stoinov J.I., et al. High-intensity focused ultrasound (HIFU) treatment in uraemic secondary hyperparathyroidism // *Nephrol Dial Transplant*. 2012. Vol. 27, N 1. P. 76–80. doi: 10.1093/ndt/gfr590
  16. Korkusuz H., Nimsdorf F., Happel C., et al. Percutaneous microwave ablation of benign thyroid nodules. Functional imaging in comparison to nodular volume reduction at a 3-month follow-up // *Nuklearmedizin*. 2015. Vol. 54, N 1. P. 13–19. doi: 10.3413/Nukmed-0678-14-06
  17. Zeng Z., Peng C.Z., Liu J.B., et al. Efficacy of ultrasound-guided radiofrequency ablation of parathyroid hyperplasia: single session vs. two-session for effect on hypocalcemia // *Sci Rep*. 2020. Vol. 10, N 1. P. 6206. doi: 10.1038/s41598-020-63299-8
  18. Casara D., Rubello D., Piotto A., Pelizzo M.R. 99mTc-MIBI radio-guided minimally invasive parathyroid surgery planned on the basis of a preoperative combined 99mTc-pertechnetate/99mTc-MIBI and ultrasound imaging protocol // *Eur J Nucl Med*. 2000. Vol. 27, N 9. P. 1300–1304. doi: 10.1007/s002590000297
  19. Huang Z., Lou C. 99mTcO4-/99mTc-MIBI dual-tracer scintigraphy for preoperative localization of parathyroid adenomas // *J Int Med Res*. 2019. Vol. 47, N 2. P. 836–845. doi: 10.1177/0300060518813742
  20. Zhang R., Zhang Z., Huang P., et al. Diagnostic performance of ultrasonography, dual-phase 99mTc-MIBI scintigraphy, early and delayed 99mTc-MIBI SPECT/CT in preoperative parathyroid gland localization in secondary hyperparathyroidism // *BMC Med Imaging*. 2020. Vol. 20, N 1. P. 91. doi: 10.1186/s12880-020-00490-3
  21. Treglia G., Sadeghi R., Schalin-Jääntti C., et al. Detection rate of 99m Tc-MIBI single photon emission computed tomography (SPECT)/CT in preoperative planning for patients with primary hyperparathyroidism: A meta-analysis // *Head Neck*. 2016. Vol. 38, Suppl 1. P. 2159–2172. doi: 10.1002/hed.24027
  22. Huber G.F., Hüllner M., Schmid C., et al. Benefit of 18F-fluorocholine PET imaging in parathyroid surgery // *Eur Radiol*. 2018. Vol. 28, N 6. P. 2700–2707. doi: 10.1007/s00330-017-5190-4
  23. Pacella C.M., Mauri G. History of laser ablation. Image-guided laser ablation. Springer, Cham. 2020. doi: 10.1007/978-3-030-21748-8\_1
  24. Bown S.G. Phototherapy in tumors // *World J Surg*. 1983. Vol. 7, N 6. P. 700–709. doi: 10.1007/BF01655209
  25. Appelbaum L., Goldberg S.N., Ierace T., Mauri G. US-guided laser treatment of parathyroid adenomas // *Int J Hyperthermia*. 2020. Vol. 37, N 1. P. 366–372. doi: 10.1080/02656736.2020.1750712
  26. Rhim H., Goldberg S.N., Dodd G.D., et al. Essential techniques for successful radio-frequency thermal ablation of malignant hepatic tumors // *Radiographics*. 2001. Vol. 21. P. 17–35. doi: 10.1148/radiographics.21.suppl\_1.g01oc11s17
  27. McGahan J.P., Dodd G. Radiofrequency ablation of the liver // *American Journal of Roentgenology*. 2001. Vol. 176, N 1. P. 3–16. doi: 10.2214/ajr.176.1.1760003
  28. Hong K., Georgiades C. Radiofrequency ablation: mechanism of action and devices // *J Vasc Interv Radiol*. 2010. Vol. 21, Suppl 8. P. 179–186. doi: 10.1016/j.jvir.2010.04.008
  29. Zhang M., Tufano R.P., Russell J.O. Ultrasound-Guided radiofrequency ablation versus surgery for low-risk papillary thyroid microcarcinoma: results of over 5 years' follow-up // *Thyroid*. 2020. Vol. 30, N 3. P. 408–417. doi: 10.1089/thy.2019.0147
  30. Schullian P., Johnston E.W., Putzer D., et al. Safety and efficacy of stereotactic radiofrequency ablation for very large ( $\geq 8$  cm) primary and metastatic liver tumors // *Sci Rep*. 2020. Vol. 10, N 1. P. 1618. doi: 10.1038/s41598-020-58383-y
  31. Marshall H.R., Shakeri S., Hosseiny M., et al. Long-Term survival after percutaneous radiofrequency ablation of pathologically proven renal cell carcinoma in 100 patients // *J Vasc Interv Radiol*. 2020. Vol. 31, N 1. P. 15–24. doi: 10.1016/j.jvir.2019.09.011
  32. Laird A.M., Libutti S.K. Minimally invasive parathyroidectomy versus bilateral neck exploration for primary hyperparathyroidism // *Surg Oncol Clin N Am*. 2016. Vol. 25, N 1. P. 103–118. doi: 10.1016/j.soc.2015.08.012
  33. Ha E.J., Baek J.H., Baek S.M. Minimally invasive treatment for benign parathyroid lesions: treatment efficacy and safety based on nodule characteristics // *Korean J Radiol*. 2020. Vol. 21, N 12. P. 1383–1392. doi: 10.3348/kjr.2020.0037
  34. Сидоров Д.В., Степанов С.О., Гришин Н.А., и др. Микроволновая абляция при лечении злокачественных новообразований печени // *Онкология. Журнал им. П.А. Герцена*. 2013. Т. 1, № 2. С. 27–31.
  35. Lubner M.G., Brace C.L., Hinshaw J.L., Lee F.T. Microwave tumor ablation: mechanism of action, clinical results, and devices // *J Vasc Interv Radiol*. 2010. Vol. 21, Suppl 8. P. 192–203. doi: 10.1016/j.jvir.2010.04.007
  36. Wei Y., Peng L., Li Y., et al. Clinical study on safety and efficacy of microwave ablation for primary hyperparathyroidism // *Korean J Radiol*. 2020. Vol. 21, N 5. P. 572–581. doi: 10.3348/kjr.2019.0593

- 37.** Schlosser K., Bartsch D.K., Diener M.K., et al. Total parathyroidectomy with routine thymectomy and autotransplantation versus total parathyroidectomy alone for secondary hyperparathyroidism: results of a nonconfirmatory multicenter prospective randomized controlled pilot trial // *Annals of Surgery*. 2016. Vol. 264, N 5. P. 745–753. doi: 10.1097/SLA.0000000000001875
- 38.** Zhuo L., Zhang L., Peng L.L., et al. Microwave ablation of hyperplastic parathyroid glands is a treatment option for end-stage renal disease patients ineligible for surgical resection // *Int J Hyperthermia*. 2019. Vol. 36, N 1. P. 29–35. doi: 10.1080/02656736.2018.1528392
- 39.** Copelan A., Hartman J., Chehab M., Venkatesan A.M. High-intensity focused ultrasound: current status for image-guided therapy // *Semin Intervent Radiol*. 2015. Vol. 32, N 4. P. 398–415. doi: 10.1055/s-0035-1564793
- 40.** Suleimanov E.A., Filonenko E.V., Moskvicheva L.I., et al. The possibility of hifu therapy at the present stage // *Research and Practical Medicine Journal*. 2016. Vol. 3, N 3. P. 76–82. doi: 10.17709/2409-2231-2016-3-3-8
- 41.** Limani K., Aoun F., Holz S., et al. Single high intensity focused ultrasound session as a whole gland primary treatment for clinically localized prostate cancer: 10-year outcomes // *Prostate Cancer*. 2014. Vol. 2014. P. 186782. doi: 10.1155/2014/186782
- 42.** Chung S.R., Baek J.H., Suh C.H., et al. Efficacy and safety of high-intensity focused ultrasound (HIFU) for treating benign thyroid nodules: a systematic review and meta-analysis // *Acta Radiologica*. 2020. Vol. 61, N 12. P. 1636–1643. doi: 10.1177/0284185120909339
- 43.** Ploussard G. Re: Salvage high-intensity focused ultrasound (HIFU) for locally recurrent prostate cancer after failed radiation therapy: multi-institutional analysis of 418 patients // *Eur Urol*. 2018. Vol. 73, N 1. P. 140–141. doi: 10.1016/j.eururo.2017.09.031
- 44.** Tsamatropoulos P., Valcavi R. HIFU and RFA ablation for thyroid and parathyroid disease. *Advanced thyroid and parathyroid ultrasound*. Springer, Cham; 2017. doi: 10.1007/978-3-319-44100-9\_36
- 45.** Kovatcheva R., Vlahov J., Stoinov J., et al. US-guided high-intensity focused ultrasound as a promising non-invasive method for treatment of primary hyperparathyroidism // *Eur Radiol*. 2014. Vol. 24, N 9. P. 2052–2058. doi: 10.1007/s00330-014-3252-4
- 46.** Khwaja A. KDIGO clinical practice guidelines for acute kidney injury // *Nephron Clin Pract*. 2012. Vol. 120, N 4. P. 179–184. doi: 10.1159/000339789
- 47.** Daugirdas J.T., Depner T.A., Inrig J., et al. KDOQI clinical practice guideline for hemodialysis adequacy: 2015 update // *Am J Kidney Dis*. 2015. Vol. 66, N 5. P. 884–930. doi: 10.1053/j.ajkd.2015.07.015

## AUTHORS' INFO

\* **Pavel O. Rumyantsev**, MD, Dr. Sci. (Med.);  
address: 8 Malaya Konyushennaya str., Saint Petersburg,  
191186, Russia;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7721-634X>;  
eLibrary SPIN: 7085-7976; e-mail: pavelrum@gmail.com

**Aleksandr A. Bubnov**, MD;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5877-6982>;  
eLibrary SPIN: 9380-1293; e-mail: bubnov96@mail.ru

**Mikhail V. Degtyarev**, MD;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5652-2607>;  
eLibrary SPIN: 7725-7831; e-mail: germed@mail.ru

**Konstantin Y. Slashchuk**, MD;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3220-2438>;  
eLibrary SPIN: 3079-8033; e-mail: slashuk911@gmail.com

**Svetlana M. Zakharova**, MD, Cand. Sci. (Med.);  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6059-2827>;  
eLibrary SPIN: 9441-4035; e-mail: smzakharova@mail.ru

**Dmitry Yu. Agibalov**;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2995-7140>;  
eLibrary SPIN: 6938-5804; e-mail: agibalovd@bk.ru

**Victor Yu. Timoshenko**, Dr. Sci. (Phys-Math), Professor;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3234-1427>;  
eLibrary SPIN: 7536-2368; e-mail: vtimoshe@gmail.com

## ОБ АВТОРАХ

\* **Румянцев Павел Олегович**, д.м.н.;  
адрес: Россия, 191186, Санкт-Петербург,  
ул. Малая Конюшенная, д. 8;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7721-634X>;  
eLibrary SPIN: 7085-7976; e-mail: pavelrum@gmail.com

**Бубнов Александр Андреевич**;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5877-6982>;  
eLibrary SPIN: 9380-1293; e-mail: bubnov 96@mail.ru

**Дегтярев Михаил Владимирович**;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5652-2607>;  
eLibrary SPIN: 7725-7831; e-mail: germed@mail.ru

**Слащук Константин Юрьевич**;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3220-2438>;  
eLibrary SPIN: 3079-8033; e-mail: slashuk911@gmail.com

**Захарова Светлана Михайловна**, к.м.н.;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6059-2827>;  
eLibrary SPIN: 9441-4035; e-mail: smzakharova@mail.ru

**Агибалов Дмитрий Юрьевич**;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2995-7140>;  
eLibrary SPIN: 6938-5804; e-mail: agibalovd@bk.ru

**Тимошенко Виктор Юрьевич**, д.ф.-м.н., профессор;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3234-1427>;  
eLibrary SPIN: 7536-2368; e-mail: vtimoshe@gmail.com

\* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку