

УДК 616.24-008.331.1-036.12-005.7-073.75.091.941

DOI: 10.24884/1682-6655-2019-18-1-17-23

К. В. ЗАВАДОВСКИЙ, М. О. ГУЛЯ

## Хроническая постэмболическая легочная гипертензия: возможности радионуклидных методов диагностики

Научно-исследовательский институт кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук, г. Томск, Россия  
634012, Россия, г. Томск, ул. Киевская, д. 111а  
e-mail: konstz@cardio-tomsk.ru

Статья поступила в редакцию 05.02.19; принята к печати 15.02.19

### Резюме

Хроническая постэмболическая легочная гипертензия (ХПЛГ) является следствием хронической обструкции ветвей легочных артерий (ЛА) после однократной или повторной эмболии тромбами с последующей их организацией. Частота развития ХПЛГ у пациентов, перенесших легочную эмболию, составляет приблизительно 3,8 %. Несмотря на существенный терапевтический прогресс, ХПЛГ остается плоходиагностируемой патологией. Настоящий обзор посвящен некоторым возможностям сцинтиграфических методов в обследовании пациентов с ХПЛГ. Приведена информация о возможностях вентиляционно-перфузионной сцинтиграфии легких, равновесной радионуклидной вентрикулографии, перфузионной сцинтиграфии миокарда и сцинтиграфии сердца с  $^{123}\text{I}$ -МИБГ у пациентов с ХПЛГ.

**Ключевые слова:** хроническая постэмболическая легочная гипертензия, вентиляционно-перфузионная сцинтиграфия легких, радионуклидная равновесная вентрикулография, перфузионная сцинтиграфия легких, сцинтиграфия сердца с  $^{123}\text{I}$ -МИБГ

**Для цитирования:** Завадовский К. В., Гуля М. О. Хроническая постэмболическая легочная гипертензия: возможности радионуклидных методов диагностики. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2018;18(1):17–23. Doi: 10.24884/1682-6655-2019-18-1-17-23

UDC 616.24-008.331.1-036.12-005.7-073.75.091.941

DOI: 10.24884/1682-6655-2019-18-1-17-23

K. V. ZAVADOVSKY, M. O. GULYA

## Chronic postembolic pulmonary embolism: the role of radionuclide imaging

Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Centre, Russian Academy of Sciences, Russia, Tomsk  
634012, Russia, Tomsk, Kievskaya street, 111a  
e-mail: konstz@cardio-tomsk.ru

Received 05.02.19; accepted 15.02.19

### Summary

Chronic postembolic pulmonary embolism (CTEPH) is the result of chronic pulmonary artery obstruction followed by pulmonary embolism. The frequency of CTEPH in patients with pulmonary embolism is approximately 3.8 %. Despite significant progress of pulmonary embolism management, the diagnosis of CTEPH remains difficult. The current review is devoted to the opportunities of radionuclide methods in patients with CTEPH. The information about ventilation-perfusion scintigraphy, equilibrium radionuclide angiography, myocardial perfusion scintigraphy as well as cardiac scintigraphy with  $^{123}\text{I}$ -MIBG is presented.

**Keywords:** chronic postembolic pulmonary hypertension, ventilation/perfusion lung scintigraphy, equilibrium radionuclide angiography, myocardial perfusion scintigraphy, cardiac scintigraphy with  $^{123}\text{I}$ -MIBG

**For citation:** Zavadovsky K. V., Gulya M. O. Chronic postembolic pulmonary embolism: the role of radionuclide imaging. Regional hemodynamics and microcirculation. 2019;18(1):17–23. Doi: 10.24884/1682-6655-2019-18-1-17-23

### Введение

Как известно, хроническая постэмболическая легочная гипертензия (ХПЛГ) является следствием хронической обструкции ветвей легочных артерий (ЛА) после однократной или повторной эмболии тромбами с последующей их организацией. По данным V. Pengo et al. [1], ХПЛГ развивается, приблизительно, у 3,8 % пациентов, перенесших легочную эмболию. Прогноз таких пациентов детерминиру-

ется состоянием сократительной функции правого желудочка (ПЖ). Хроническая постэмболическая легочная гипертензия – единственная форма легочной гипертензии, которая является потенциально излечимой. Однако без соответствующей терапии 5-летняя выживаемость составляет 30 % при уровне среднего давления в легочной артерии ( $\text{ДЛА}_{\text{cp}}$ ) > 40 мм рт. ст. и только 10 % при  $\text{ДЛА}_{\text{cp}}$  > 50 мм рт. ст. [2]

Несмотря на существенный терапевтический прогресс, ХПЛГ остается плохо диагностируемой патологией по ряду причин, включая скудность клинической симптоматики, неудовлетворительное направление пациентов на диагностические исследования, плохую информированность профессионального сообщества, неравномерность распределения медицинских центров экспертного уровня.

Клинические симптомы и признаки являются неспецифическими или отсутствуют на ранних стадиях ХПЛГ, и только с появлением признаков недостаточности правых отделов сердца, на поздних стадиях заболевания, диагноз становится очевидным. Таким образом, ранняя диагностика остается актуальной проблемой при ХПЛГ.

### Значение вентиляционно-перфузионной сцинтиграфии при ХПЛГ

В настоящее время одним из подходов к диагностике ХПЛГ является выявление следующих признаков [3]:

1) среднее давление ЛА более 25 мм рт. ст. в состоянии покоя и давление заклинивания ниже 12 мм рт. ст. во время катетеризации правых отделов сердца;

2) множественные перфузионные дефекты, выявленные при выполнении вентиляционно-перфузионной (VQ) сцинтиграфии легких;

3) ангиографические признаки ХПЛГ: дивертикулы стенки ЛА, мембраны в просвете ЛА, стенозы, пристеночные неровности, резкие сужения сосудов, ампутация дистальных сосудов (в сочетании с признаками нарушения перфузии соответствующих локализаций). Важно, что указанные изменения должны быть выявлены в срок не ранее 6 месяцев после эпизода острой тромбоэмболии легочной артерии (ТЭЛА) [4].

В данном обзоре основное внимание будет уделено VQ-сцинтиграфии [5], а также некоторым другим сцинтиграфическим методикам, которые позволяют выявить патогномоничные для ХПЛГ признаки.

Вентиляционно-перфузионная сцинтиграфия легких играет важную роль в диагностике ХПЛГ. В совместных рекомендациях Европейского общества кардиологов и Европейского респираторного общества VQ-сцинтиграфия показана всем пациентам с подозрением на ХПЛГ [6].

Ключевым паттерном при легочной эмболии (как при острой, так и при хронической) является сохранение вентиляции при отсутствии перфузии в сегменте легкого (рисунок).

Пациенты с ЛГ обычно характеризуются гетерогенной перфузией с наличием небольших, периферически расположенных несовпадающих VQ-дефектов и несегментарных перфузионных нарушений [7–9]. Высокая вероятность ХПЛГ имеет место при наличии множественных сегментарных VQ-дефектов или одного большого перфузионного дефекта [10]. Нормальные или низкой вероятности результаты VQ-сцинтиграфии исключают ХПЛГ с чувствительностью 90–100 % и специфичностью 94–100 % [11]. Несмотря на то, что относительно недавние исследования [12, 13] показали информативность мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ) в диагностике ХПЛГ, VQ-сцинтиграфия считается отличным скрининговым тестом.

В работе N. Tunariu et al. [14] было показано, что VQ-сканы, соответствующие высокой и средней вероятности ТЭЛА, обладают чувствительностью 97,4 %, специфичностью 90 %, точностью 92,5 %, отрицательной предсказательной значимостью 98,5 % и положительной предсказательной значимостью 85 % в диагностике ХПЛГ. Если принимать во внимание только VQ-сканы с высокой вероятностью ТЭЛА, то чувствительность составляет 96,2 %, специфичность – 94,6 %, точность – 95,2 %, отрицательная предсказательная значимость – 79,9 % и положительная предсказательная значимость – 90,3 %. При этом чувствительность МСКТ-ангиопульмонографии (АПГ) составила всего 51 %.

В данной работе также было показано, что причиной ложно-отрицательных результатов VQ-сцинтиграфии в диагностике ХПЛГ может быть хорошая степень реканализации легочных артерий без их значимого сужения. Избежать таких ошибок может помочь МСКТ АПГ, которая позволяет выявить кальцифицированные тромбы и сужения ЛА.

Ложно-положительные результаты сцинтиграфии в аспекте диагностики ХПЛГ могут быть обусловлены наличием повышенного давления в системе ЛА другой этиологии – идиопатической, вызванной дефектами внутрисердечных перегородок, легочной веноокклюзионной болезнью, ХОБЛ, а также паренхиматозными заболеваниями легких (эмфиземой и идиопатическим легочным фиброзом).

Стоит отметить, что паттерн VQ-несоответствия может наблюдаться также при других патологических процессах: артериите Такаясу [15], саркоме легкого [16], фиброзирующем медиастините [17], сдавлении легочных артерий извне при лимфоаденопатии или новообразовании средостения [18]. Важно отметить, что выполнение VQ-сцинтиграфии не позволяет также дифференцировать легочную гипертензию и легочную веноокклюзионную болезнь [19].

Для оценки степени нарушений легочного сосудистого русла, как при острой ТЭЛА, так и при ХПЛГ, используется интегральный показатель Pulmonary Vascular Obstruction Index (PVO). Данный индекс высчитывается следующим образом. Каждой доле легкого присваивается «весовой коэффициент», пропорциональный региональному кровотоку в ортостатическом положении: правая нижняя доля – 25 %; правая средняя доля – 12 %; правая верхняя доля – 18 %; левая нижняя доля – 20 %; левая верхняя доля – 18 % (из них язычковые сегменты – 12 %). Перфузия в каждой доле оценивается во всех проекциях. Для каждой доли определяют полуколичественный балл снижения перфузии от 0 до 1 (0; 0,25; 0,5; 0,75 и 1) по плотности сцинтиляционного счета, в сравнении с нормально перфузируемой областью. Далее для каждой доли «весовой коэффициент» умножается на полуколичественный перфузионный балл; затем полученные цифры суммируются. Показатель обструкции легочного сосудистого русла определяют по формуле:

$$PVO (\%) = (1 - \text{суммарный перфузионный балл}) \times 100.$$

Такой подход может быть использован для активной динамической оценки нарушения легочной



Результаты вентиляционно-перфузионной сцинтиграфии легких у пациента с ХПЛГ. В обоих легких визуализируются множественные клиновидные дефекты перфузии, которым соответствуют области нормальной вентиляции

The results of ventilation-perfusion lung scintigraphy in patient with chronic postembolic pulmonary embolism. Multiple areas with absent perfusion (P) and preserved ventilation (V) well delineated

перфузии. По данным G. Meyer et al. [20], данный индекс имеет хорошую корреляцию с результатами прямой ангиографии легочных артерий. Интересно, что, согласно результатам работы R. Azarian et al. [21], указанный индекс коррелировал с давлением в легочной артерии и легочным сосудистым сопротивлением у пациентов с острой ТЭЛА и не показал таких взаимосвязей при ХПЛГ.

Кроме того, авторы данной работы обнаружили, что при одинаковом показателе PVO давление в ЛА и ЛСС выше у пациентов с ХПЛГ, чем при острой ТЭЛА. Это, по их мнению, объясняется тем, что ЛГ при ХПЛГ обусловлена не только обструкцией проксимальных легочных артерий, но и поражением артериол и капилляров [22], что не может быть обнаружено по данным перфузионной сцинтиграфии легких [7].

### Нарушение симпатической активности сердца при ХПЛГ

Симпатическая денервация является важным патофизиологическим фактором в развитии сердечной недостаточности [23] и может вносить свой вклад в развитие аритмий и внезапной сердечной смерти [23, 24]. Одним из диагностических препаратов для оценки симпатической иннервации сердца считается метайодбензилгуанидин, меченный йодом-123 ( $^{123}\text{I}$ -МИБГ) [25, 26], который способен избирательно накапливаться непосредственно в симпатических нервных терминалях [27, 28]. Довольно немного работ представлено по возможностям использования данного препарата при ЛГ. Т. Morimitsu et al. [29, 30] описали сниженное накопления  $^{123}\text{I}$ -МИБГ в межжелудочковой перегородке у пациентов с ЛГ; они также



отметили отрицательную корреляцию между аккумуляцией  $^{123}\text{I}$ -МИБГ и давлением легочных артерий. S. Sakamaki et al. [31] обнаружили, что при сцинтиграфии с  $^{123}\text{I}$ -МИБГ у пациентов с ЛГ, по сравнению с контролем, индекс «сердце/средостение» был достоверно ниже, а скорость вымывания  $^{123}\text{I}$ -МИБГ выше. Российские работы в этом направлении единичны. Так, в исследовании А. А. Аншлеса и др. [32] представлены результаты выполнения сцинтиграфии с  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -МИБИ и  $^{123}\text{I}$ -МИБГ у пациентов с идиопатической формой легочной гипертензии. Авторами работы было установлено, что у больных идиопатической легочной гипертензией, по сравнению со здоровыми добровольцами, имеют место сниженное накопление  $^{123}\text{I}$ -МИБГ в сердце, а также повышение скорости его вымывания.

### Радионуклидная оценка функции желудочков сердца при ХПЛГ

Известно, что функциональное состояние ПЖ является значимым предиктором прогноза при различной сердечно-сосудистой патологии, в том числе и при легочной гипертензии [33–37]. Перегрузка давлением ПЖ приводит к его недостаточности и нередко является причиной смерти.

Методы ядерной медицины позволяют оценивать объемы и фракцию выброса ПЖ [38]. К таким методам относятся радионуклидная ангиография, радионуклидная равновесная вентрикулография (РРВГ) в планарном и томографическом режимах [39–43]. Среди этих методов выполнение РРВГ в томографическом режиме является наиболее предпочтительным в связи с тем, что позволяет получать данные в трехмерном режиме [43–46].

Впервые РТВГ была проведена в 1984 г. J. L. Barat et al. [47]. На сегодняшний день доступны новые алгоритмы математической обработки результатов РТВГ, такие как QBS [48], QUBE [49] и 4DM-SPECT для автоматического и полуавтоматического определения контуров желудочков сердца.

В 2005 г. исследователи из Бельгии под руководством P. de Bondt et al. [50] оценили точность перечисленных алгоритмов вычисления объемов и фракции выброса правого желудочка.

Используя механический 4-камерный фантом сердца, они выполнили 25 экспериментов. В результате было показано, что QBS, QUBE и 4DM-SPECT позволяют точно оценивать КДО, КСО и ФВ правого желудочка. Так, коэффициенты корреляции между расчетными и реальными объемами ПЖ фантомного сердца для QBS, QUBE и 4DM-SPECT были высокими (0,93; 0,93 и 0,96 соответственно;  $p < 0,001$ ). Коэффициент корреляции между расчетной и реальной ФВ ПЖ по алгоритмам QBS, QUBE и 4D-MSPECT составил 0,92; 0,94 и 0,84 соответственно;  $p < 0,001$ .

В результате работы было показано, что значения КДО, КСО и ФВ правого желудочка, вычисленные при помощи указанных программ, имеют высокую корреляцию с их истинными (физическими) значениями.

Высокое соответствие показателей ФВ ПЖ, вычисленных при помощи РТВГ и высокопольной МРТ, обнаружил в 2005 г. Andreas Kjaer из клиники уни-

верситета Копенгагена (Дания) [51]. Было показано, что пределы нормальных значений для ФВ ПЖ, по данным МРТ и РТВГ, составили, соответственно, 49–72 % и 40–69 %, а для конечно-диастолического индекса ПЖ – 37–95 и 29–91 мл/м<sup>2</sup>. При этом была установлена высокая статистическая согласованность указанных параметров по критерию Bland – Altman.

Подобные результаты согласованности были получены также исследовательской группой M. Hacker et al. [52] в 2006 г. Авторы данной работы сообщают, что нормальные значения ФВ и объемов желудочков сердца, полученные при выполнении РТВГ, в значительной степени согласуются с литературными данными о нормальных значениях для сердечной магнитно-резонансной томографии.

J. Kjaergaard et al. [53] на основании данных РТВГ и МРТ установили, что у пациентов с ТЭЛА, по сравнению с контрольной группой, значения КДО и максимальной скорости трикуспидальной регургитации были достоверно повышены, а межгрупповых различий по значениям ФВ ПЖ выявлено не было.

В 2007 г. T. P. Clements et al. [54] сообщил о результатах определения объемов и фракции выброса правого желудочка методом электронно-лучевой компьютерной томографии и РТВГ у 9 пациентов до и после легочной эндартертромбэктомии. Выполнение операции привело к достоверному снижению КСО ПЖ на (72±59) и (58±25) мл; КДО ПЖ – на (75±85) и (76±32) мл; увеличению ФВ ПЖ – на (12±7) и (5±6) % по данным ЭЛКТ и РТВГ соответственно. На основании полученных данных авторы делают вывод, что метод РТВГ позволяет точно оценивать функцию правого желудочка до и после эндартертромбэктомии.

К. В. Завадовский и др. показали возможности использования радионуклидной равновесной томо-вентрикулографии у пациентов с острой ТЭЛА и ХПЛГ [55, 56]. Ими, в частности, было показано, что, по данным вентиляционной и перфузионной сцинтиграфии, у пациентов с острой ТЭЛА в верхних и средних отделах легких были обнаружены дефекты перфузии, которые характеризовались четкостью контуров, имели треугольную или клиновидную форму, соответствовали бассейну тромбированного сосуда и по локализации не совпадали с областями вентиляционных нарушений. Соотношение поперечных размеров радиоактивного пула крови правого желудочка сердца к левому (ПЖ/ЛЖ) на аксиальных томографических срезах не превышало 1,0. У лиц с ХПЛГ картина нарушений кровоснабжения имела диффузно-неравномерный характер, границы между пораженными отделами и интактной тканью легких были нечеткими. Показатель соотношения поперечных размеров радиоактивного пула крови правого желудочка сердца к левому превышал 1,0.

Кроме того, данным авторами была выявлена тесная корреляция между объемом легочной эмболии (определенной по числу гипоперфузируемых легочных сегментов при проведении VQ-сцинтиграфии) и гуморальными маркерами регуляции сосудистого тонуса легких: эндотелином-1, стабильными метаболитами оксида азота и стабильным метаболитом простаглицлина – 6-кето-простаглицлином-F1 $\alpha$  [57].

Известно, что ОФЭКТ-перфузионная сцинтиграфия миокарда позволяет обнаружить нарушение структуры и функционального состояния правого желудочка при его перегрузке давлением [58–63]. В исследовании Н. А. Cohen et al. [58] было показано, что толщина стенки ПЖ, определенная по данным сцинтиграфии с  $^{201}\text{Tl}$ -хлоридом, коррелирует с клиническими и электрокардиографическими признаками гипертрофии ПЖ. В исследовании J. N. Shuck et al. [59] также было выявлено повышенное накопление  $^{201}\text{Tl}$ -галлия в стенках ПЖ у пациентов с легочной гипертензией, сформировавшейся на фоне ХОБЛ. При исследовании сердца с  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -МИБИ индекс отношения накопления препарата в ПЖ к ЛЖ продемонстрировал положительную корреляцию с давлением в ЛА и легочным сосудистым сопротивлением [61]. R. M. Movahed et al. [64] установили, что уплотнение межжелудочковой перегородки (так называемые признаки D-образного левого желудочка) коррелирует со степенью перегрузки ПЖ, наряду с такими сцинтиграфическими признаками, как повышенное накопление РФП в ПЖ и дилатация его полости. Mazraeshahi et al. также показали, что индекс аккумуляции РФП в ПЖ по отношению к ЛЖ статистически значимо коррелирует с систолическим давлением в ПЖ и толщиной его свободной стенки [64]. Кроме того, выполнение исследования с  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -МИБИ позволяет выявлять переходящие дефекты, соответствующие ишемии. Генез этой ишемии может быть обусловлен как пониженной доставкой кислорода, так и повышенным его потреблением (в связи с гипертрофией стенки), а также повышенным конечно-диастолическим давлением в полости ПЖ [65].

### Заключение

Хроническая постэмболическая легочная гипертензия представляет собой достаточно сложную задачу с точки зрения ее ранней и точной диагностики. На сегодняшний день для этого используется весь арсенал неинвазивных методов визуализации, а также инвазивные подходы, включающие катетеризацию правых отделов сердца и легочных артерий. К радионуклидным методам, наиболее часто используемым для диагностики и прогноза ХПЛГ, относят вентиляционно-перфузионную сцинтиграфию легких, равновесную вентрикулографию, перфузионную сцинтиграфию миокарда, а также оценку симпатической активности сердца. Вентиляционно-перфузионная сцинтиграфия легких является одной из основных методик скрининга и верификации ХПЛГ. Равновесная вентрикулография позволяют точно и с высокой воспроизводимостью оценить функциональное состояние правого желудочка. Признаки дилатации полости и гипертрофии стенок левого желудочка могут быть идентифицированы по данным перфузионной сцинтиграфии миокарда. Исследование сердца с  $^{123}\text{I}$ -МИБГ позволяет оценить прогноз развития неблагоприятных сердечных событий при сердечной недостаточности, развившейся на фоне ХПЛГ.

### Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Авторы благодарят заведующего отделением радионуклидной диагностики ФГБУ «НМИЦ им. акад. Е. Н. Мешалкина» Минздрава России, г. Новосибирск, канд. мед. наук С. М. Минина за предоставленные иллюстрации.

### Литература / References

1. Pengo V, Lensing AW, Prins MH et al. Incidence of chronic thromboembolic pulmonary hypertension after pulmonary embolism. *N Engl J Med*. 2004;350:2257–2264. Doi: <https://doi.org/10.1056/NEJMoa032274>.
2. Fedullo P, Kerr KM, Kim NH et al. Chronic thromboembolic pulmonary hypertension. *Am J Respir Crit Care Med*. 2011 Jun 15;183(12):1605–1613. Doi: <https://doi.org/10.1164/rccm.201011-1854CI>.
3. Simonneau G, Azarian R, Brenot F, et al. Surgical management of unresolved pulmonary embolism: a personal series of 72 patients. *Chest* 1995;107:52s–55s. Doi: [https://doi.org/10.1378/chest.107.1\\_Supplement.52S](https://doi.org/10.1378/chest.107.1_Supplement.52S).
4. Auger WR, Fedullo PF, Moser KM et al. Chronic major vessel thromboembolic pulmonary artery obstruction: appearance at angiography. *Radiology* 1992;182:393–398. Doi: <https://doi.org/10.1148/radiology.182.2.1732955>.
5. Лилиманов Ю. Б., Кривоногов Н. Г., Завадовский К. В. Радионуклидная диагностика патологии малого круга кровообращения. – Томск: STT, 2007. – 204 с. [Lishmanov YuB, Krivonogov NG, Zavadovsky KV. Radionuclide Diagnostics of Pathology of Pulmonary Circulation. Tomsk, STT, 2007:204. (In Russ)].
6. Galie N, Hoeper MM, Humbert M et al. Guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension: The Task Force for the Diagnosis and Treatment of Pulmonary Hypertension of the European Society of Cardiology (ESC) and the European Respiratory Society (ERS), endorsed by the International Society of Heart and Lung Transplantation (ISHLT). *Eur Heart J* 2009;30:2493–2537. Doi: <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehp297>.
7. Fishman AJ, Moser KM, Fedullo PF. Perfusion lung scans vs pulmonary angiography in evaluation of suspected primary pulmonary hypertension. *Chest* 1983;84:679–683. Doi: <https://doi.org/10.1378/chest.84.6.679>.
8. Powe JE, Palevsky HI, McCarthy KE et al. Pulmonary arterial hypertension: Value of perfusion scintigraphy. *Radiology* 1987;164:727–730. Doi: <https://doi.org/10.1148/radiology.164.3.3615869>.
9. Worsley DF, Palevsky HI, Alavi A. Ventilation-perfusion lung scanning in the evaluation of pulmonary hypertension. *J Nucl Med* 1994;35:793–796.
10. Viner SM, Bagg BR, Auger WR et al. The management of pulmonary hypertension secondary to chronic thromboembolic disease. *Prog Cardiovasc Dis*. 1994;37:79–92. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0033-0620\(05\)80044-1](https://doi.org/10.1016/S0033-0620(05)80044-1).
11. Galie N, Humbert M, Vachiery JL et al. 2015 ESC/ERS Guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension. The Joint Task Force for the Diagnosis and Treatment of Pulmonary Hypertension of the European Society of Cardiology (ESC) and the European Respiratory Society (ERS). *Eur Respir J*. 2015;46:903–975. Doi: <https://doi.org/10.1183/13993003.51032-2015>.
12. Reichelt A, Hoeper MM, Galanski M et al. Chronic thromboembolic pulmonary hypertension: Evaluation with 64-detector row CT versus digital subtraction angiography. *Eur J Radiol* 2009;71:49–54. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2008.03.016>.
13. Sugiura T, Tanabe N, Matsuura Y et al. Role of 320-slice CT imaging in the diagnostic workup of patients with chronic thromboembolic pulmonary hypertension.



Chest. 2013;143:1070–1077. Doi: <https://doi.org/10.1378/chest.12-0407>.

14. Tunariu N, Gibbs SJ, Win Z et al. Ventilation-perfusion scintigraphy is more sensitive than multidetector CTPA in detecting chronic thromboembolic pulmonary disease as a treatable cause of pulmonary hypertension. *J Nucl Med*. 2007;48:680–684. Doi: <https://doi.org/10.2967/jnumed.106.039438>.

15. Haque U, Hellmann D, Traill T, et al. Takayasu's arteritis involving proximal pulmonary arteries and mimicking thromboembolic disease. *J Rheumatol*. 1999 Feb;26(2):450–453.

16. Wiedera E, Sulica R. Pulmonary artery sarcoma misdiagnosed as chronic thromboembolic pulmonary hypertension. *Mt Sinai J Med*. 2005;72:360–364.

17. Berry DF, Buccigrossi D, Peabody J et al. Pulmonary vascular occlusion and fibrosing mediastinitis. *Chest* 1986; 89:296–301. Doi: <https://doi.org/10.1378/chest.89.2.296>.

18. Damuth TE, Bower JS, Cho K et al. Major pulmonary artery stenosis causing pulmonary hypertension in sarcoidosis. *Chest*. 1980;78:888–891. Doi: <https://doi.org/10.1378/chest.78.6.888>.

19. Seferian A, Helal B, Jais X et al. Ventilation/perfusion lung scan in pulmonary veno-occlusive disease. *Eur Respir J* 2012;40:75–83. Doi: <https://doi.org/10.1183/09031936.00097911>.

20. Meyer G, Collignon MA, Guinet F et al. Comparison of perfusion lung scanning and angiography in the estimation of vascular obstruction in acute pulmonary embolism. *Eur J Nucl Med*. 1990;17(6-8):315–319. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF01268022>.

21. Azarian RI, Wartski M, Collignon MA et al. Lung perfusion scans and hemodynamics in acute and chronic pulmonary embolism. *J Nucl Med*. 1997 Jun;38(6):980–983.

22. Moser KM, Bloor CM. Pulmonary vascular lesions occurring in patients with chronic major vessel thromboembolic pulmonary hypertension. *Chest*. 1993;103:685–692. Doi: <https://doi.org/10.1378/chest.103.3.685>.

23. Schrier RW, Abraham WT. Hormones and hemodynamics in heart failure. *N Engl J Med* 1999;341:577–585. Doi: <https://doi.org/10.1056/NEJM199908193410806>.

24. Verrier RL, Antzelevitch C. Autonomic aspects of arrhythmogenesis: The enduring and the new. *Curr Opin Cardiol* 2004;19:2–11. Doi: <https://doi.org/10.1097/00001573-200401000-00003>.

25. Nakajima K, Nakata T. Cardiac 123I MIBG Imaging for Clinical Decision Making: 22-Year Experience in Japan. *Journal of Nuclear Medicine*. 2015;56(4):11–19. Doi: <https://doi.org/10.2967/jnumed.114.142794>.

26. Merlet P, Pouillart F, Dubois-Rande JL et al. Sympathetic nerve alterations assessed with 123I MIBG in the failing human heart. *Journal of Nuclear Medicine*. 1999;40:224–231. PMID: 10025827.

27. Chen X, Werner R, Javadi M et al. Radionuclide Imaging of Neurohormonal System of the Heart Theranostics. 2015;5(6):545–558. Doi: 10.7150/thno.10900. Doi: <https://doi.org/10.7150/thno.10900>.

28. Patel AD, Iskandrian AE. MIBG imaging. *Journal of Nuclear Cardiology*. 2002;9:75–94. Doi: <https://doi.org/10.1067/mnc.2002.121471>.

29. Morimitsu T, Miyahara Y, Sinboku H et al. Iodine-123-metaiodobenzylguanidine myocardial imaging in patients with right ventricular pressure overload. *J Nucl Med*. 1996;37:1343–1346.

30. Morimitsu T, Miyahara Y, Sonoda K et al. Iodine-123 metaiodobenzylguanidine myocardial imaging in patients with pulmonary hypertension. *J Int Med Res*. 1997;25:53–61. Doi: <https://doi.org/10.1177/030006059702500201>.

31. Sakamaki F, Satoh T, Nagaya N, et al. Correlation between severity of pulmonary arterial hypertension and 123I-metaiodobenzylguanidine left ventricular imaging. *J Nucl Med*. 2000 Jul;41(7):1127–1133.

32. Анишелес А. А., Кузнецова Э. Г., Мартынюк Т. В. и др. Изучение особенностей симпатической активности и перфузии миокарда левого и правого желудочков по данным однофотонной эмиссионной компьютерной томографии миокарда у пациентов с идиопатической легочной гипертензией // Вестн. рентгенол. и радиол. – 2018. – Т. 99, № 5. – С. 244–252. [Ansheles AA, Kuznetsova EG, Martynyuk TV, et al. Myocardial Perfusion and Neurotropic Single-Photon Emission Computed Tomography Features in Patients with Primary Pulmonary Hypertension. *Journal of radiology and nuclear medicine*. 2018;99(5):244–252. (In Russ.)]. Doi: <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2018-99-5-244-252>.

33. D'Alonzo GE, Barst RJ, Ayres SM et al. Survival in patients with primary pulmonary hypertension. Results from a national prospective registry. *Ann Intern Med*. 1991;115:343–349. Doi: <https://doi.org/10.7326/0003-4819-115-5-343>.

34. Haddad F, Doyle R, Murphy DJ et al. Right ventricular function in cardiovascular disease, part II: Pathophysiology, clinical importance, and management of right ventricular failure. *Circulation* 2008;117:1717–1731. Doi: <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.107.653584>.

35. de Groote P, Millaire A, Foucher-Hossein C et al. Right ventricular ejection fraction is an independent predictor of survival in patients with moderate heart failure. *J Am Coll Cardiol* 1998;32:948–954. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0735-1097\(98\)00337-4](https://doi.org/10.1016/S0735-1097(98)00337-4).

36. Meyer P, Filippatos GS, Ahmed MI et al. Effects of right ventricular ejection fraction on outcomes in chronic systolic heart failure. *Circulation*. 2010;121:252–258. Doi: <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.109.887570>.

37. Forfia PR, Fisher MR, Mathai SC et al. Tricuspid annular displacement predicts survival in pulmonary hypertension. *Am J Respir Crit Care Med*. 2006;174:1034–1041. Doi: <https://doi.org/10.1164/rccm.200604-547OC>.

38. Лышманов Ю. Б., Завадовский К. В., Ефимова И. Ю. и др. Возможности ядерной медицины в диагностике сердечно-сосудистых заболеваний // Сибир. мед. журн. (г. Томск). – 2015. – Т. 30, № 2. – С. 21–29. [Lishmanov YuB, Zavadovsky KV, Efimova NYu. et al. Prospects of Nuclear Medicine for the Diagnosis of Cardiovascular Diseases. *Siberian Medical Journal (Tomsk)*. 2015;30(2):21–29. (In Russ.)].

39. Friedman JD, Berman DS, Borges-Neto S. et al. First-pass radionuclide angiography. *J Nucl Cardiol* 2006;13:e42–55. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.nuclcard.2006.08.006>.

40. Corbett JR, Akinboboye OO, Bacharach SL et al. Equilibrium radionuclide angiocardiology. *J Nucl Cardiol* 2006;13:e56–79. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.nuclcard.2006.08.007>.

41. Daou D, Van Krieking SD, Coaguila C et al. Automatic quantification of right ventricular function with gated blood pool SPECT. *J Nucl Cardiol* 2004;11:293–304. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.nuclcard.2004.01.008>.

42. Schulman DS. Assessment of the right ventricle with radionuclide techniques. *J Nucl Cardiol* 1996;3:253–264. Doi: [https://doi.org/10.1016/S1071-3581\(96\)90039-2](https://doi.org/10.1016/S1071-3581(96)90039-2).

43. Nichols K, Saouaf R, Ababneh AA et al. Validation of SPECT equilibrium radionuclide angiographic right ventricular parameters by cardiac magnetic resonance imaging. *J Nucl Cardiol*. 2002;9:153–160. Doi: <https://doi.org/10.1067/mnc.2002.119464>.

44. Rich JD, Ward RP. Right-ventricular function by nuclear cardiology. *Curr Opin Cardiol* 2010;25:445–450. Doi: <https://doi.org/10.1097/HCO.0b013e32833cb252>.

45. Завадовский К. В., Саушкин В. В., Панькова А. Н. и др. Методические особенности выполнения, обработки результатов и интерпретации данных радионуклидной равновесной томографики // Радиология – практика. – 2011. – № 6. – С. 75–83. [Zavadovskiy KV, Saushkin VV, Pankova AN et al. Methodological Features of Gated Blood Pool SPECT Data Acquisition, Imaging Processing and Results Interpretation. Radiology-Practice. 2011;(6):75–83. (In Russ.)].
46. Завадовский К. В., Панькова А. Н., Кривоногов Н. Г. и др. Радионуклидная диагностика тромбозов легочной артерии: визуализации перфузии и вентиляции легких, оценка сократимости правого желудочка // Сибир. мед. журн. (г. Томск). – 2011. – Т. 26, № 2–1. – С. 14–21. [Zavadovsky KV, Pankova AN, Krivonogov NG et al. Radionuclide Diagnostics of Pulmonary Embolism: Imaging of Perfusion and Lung Ventilation, Evaluation of Contractility of the Right Ventricle in Pulmonary Embolism. Siberian Medical Journal (Tomsk). 2011;26(2-1):14–21. (In Russ.)].
47. Barat JL, Brendel AJ, Colle JP et al. Quantitative analysis of left – ventricular function using gated single photon emission tomography. J Nucl Med. 1984. Nov;25(11):1167–1174.
48. Oliver RM, Fleming JS, Dawkins KD et al. Right ventricular function at rest and during submaximal exercise assessed by 81Krm equilibrium ventriculography in normal subjects. Nucl Med Commun. 1993 Jan;14(1):36–40. Doi: <https://doi.org/10.1097/00006231-199301000-00008>.
49. Vanhove C, Franken PR, Defrise M et al. Automatic determination of left ventricular ejection fraction from gated blood-pool tomography. J Nucl Med. 2001 Mar;42(3):401–417.
50. De Bondt P, Claessens T, Rys B et al. Accuracy of 4 different algorithms for the analysis of tomographic radionuclide ventriculography using a physical, dynamic 4-chamber cardiac phantom. J Nucl Med. 2005 Jan;46(1):165–171.
51. Kjaer A, Lebech AM, Hesse B et al. Right-sided cardiac function in healthy volunteers measured by first-pass radionuclide ventriculography and gated blood-pool SPECT: comparison with cine MRI. Clin Physiol Funct Imaging. 2005 Nov;25(6):344–349. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1475-097X.2005.00635.x>.
52. Hacker M, Hoyer X, Kupzyk S et al. Clinical validation of the gated blood pool SPECT QBS processing software in congestive heart failure patients: correlation with MUGA, first-pass RNV and 2D-echocardiography. Int J Cardiovasc Imaging. 2006 Jun-Aug;22(3-4):407–416. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10554-005-9031-1>.
53. Kjaergaard J, Petersen CL, Kjaer A et al. Evaluation of right ventricular volume and function by 2D and 3D echocardiography compared to MRI. Eur J Echocardiogr. 2006 Dec;7(6):430–438. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.euje.2005.10.009>.
54. Clements IP, Mullan BP, O'Connor MK et al. Assessment of pulmonary thromboendarterectomy by tomographic electrocardiogram-gated equilibrium radionuclide angiocardiology compared with electron beam computed tomography. J Nucl Cardiol. 2007 Jan;14(1):92–99. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.nuclcard.2006.09.009>.
55. Завадовский К. В., Панькова А. Н. Сцинтиграфическая оценка дисфункции правого желудочка сердца у пациентов с тромбозом легочной артерии // Мед. визуализация. – 2009. – № 3. – С. 24–30. [Pankova AN, Zavadovsky KV. Estimation of Dysfunction of the Heart's Right Ventricle at Patients with Pulmonary Embolism by Scintigraphy. Medical Visualization. 2009;(3):24–30. (In Russ.)].
56. Кривоногов Н. Г., Завадовский К. В., Лишманов Ю. Б. Возможности использования сцинтиграфических методов в дифференциальной диагностике острой тромбозии легочной артерии и хронической постэмболической легочной гипертензии // Мед. визуализация. – 2016. – № 2. – С. 22–28. [Krivonogov NG, Zavadovsky KV, Lishmanov YB. Possibilities of Pulmonoscintigraphy in Differential Diagnostics of Acute Pulmonary Scintigraphy Pulmonary Embolism and Chronic Postembolic Pulmonary Hypertension. Medical Visualization. 2016;(2):22–28. (In Russ.)].
57. Лишманов Ю. Б., Панькова А. Н., Завадовский К. В. К вопросу о причинах диссоциации между объемом тромбозии артериального русла легких и степенью дисфункции правого желудочка // Росс. кардиолог. журн. – 2012. – Т. 17, № 3. – С. 28–32. [Lishmanov YB, Pankova AN, Zavadovskiy KV. Possible causes of dissociation between pulmonary embolism volume and right ventricular dysfunction degree. Russian Journal of Cardiology. 2012;17(3):28–32. (In Russ.)]. Doi: <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2012-3-28-32>.
58. Cohen HA, Baird MG, Rouleau JR et al. Thallium 201 myocardial imaging in patients with pulmonary hypertension. Circulation. 1976;54:790–795. Doi: [10.1161/01.CIR.54.5.790](https://doi.org/10.1161/01.CIR.54.5.790).
59. Shuck JW, Walder J, Oetgen WJ et al. Right ventricular visualization by thallium 201 myocardial scintigraphy in chronic obstructive pulmonary disease. South Med J. 1985;78:1435–1439. Doi: <https://doi.org/10.1097/00007611-198512000-00009>.
60. Aepfelbacher FC, Yeon SB, Ho KK et al. ECG-gated 99mTc single-photon emission CT for assessment of right ventricular structure and function: Is the information provided similar to echocardiography? Chest. 2003;124:227–232. Doi: <https://doi.org/10.1378/chest.124.1.227>.
61. Nishijima K, Miyahara Y, Furukawa K et al. Simultaneous assessment of right ventricular function and hypertrophy by Tc-99m MIBI. Clin Nucl Med. 1999;24:151–155. Doi: <https://doi.org/10.1097/00003072-199903000-00001>.
62. Movahed MR, Hepner A, Lizotte P et al. Flattening of the interventricular septum (D-shaped left ventricle) in addition to high right ventricular tracer uptake and increased right ventricular volume found on gated SPECT studies strongly correlates with right ventricular overload. J Nucl Cardiol. 2005;12:428–434. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.nuclcard.2005.04.004>.
63. Wackers FJ. On the bright right side. J Nucl Cardiol. 2005;12:378–380. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.nuclcard.2005.05.005>.
64. Mazraeshahi RM, Striet J, Oeltgen RC et al. Myocardial SPECT images for diagnosis of pulmonary hypertension and right ventricular hypertrophy. J Nucl Med Technol. 2010;38:175–180. Doi: <https://doi.org/10.2967/jnmt.110.080200>.
65. Gomez A, Bialostozky D, Zajarias A et al. Right ventricular ischemia in patients with primary pulmonary hypertension. J Am Coll Cardiol. 2001;38:1137–1142. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0735-1097\(01\)01496-6](https://doi.org/10.1016/S0735-1097(01)01496-6).

### Информация об авторах

**Завадовский Константин Валерьевич** – д-р мед. наук, руководитель лаборатории радионуклидных методов исследования НИИ кардиологии Томского НИМЦ, e-mail: konstz@cardio-tomsk.ru.

**Гуля Марина Олеговна** – канд. мед. наук, врач-рентгенолог лаборатории радионуклидных методов исследования НИИ кардиологии Томского НИМЦ, e-mail: gulya@cardio-tomsk.ru.

### Author information

**Zavadovsky Konstantin V.** – MD, head of nuclear medicine department, Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Centre, Russian Academy of Sciences, e-mail: konstz@cardio-tomsk.ru.

**Gulya Marina O.** – PhD, radiologist in nuclear medicine department, Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Centre, Russian Academy of Sciences, e-mail: gulya@cardio-tomsk.ru.