

© Коллектив авторов, 2021

УДК 616.61-073.43-089.879

DOI 10.21886/2308-6424-2021-9-3-127-134

ISSN 2308-6424



## Радиоимпульсная ультразвуковая литотрипсия – новая ступень эволюции дистанционной ударно-волновой литотрипсии

Нариман К. Гаджиев<sup>1</sup>, Дмитрий С. Горелов<sup>2</sup>, Андрей О. Иванов<sup>2</sup>, Игорь В. Семенякин<sup>3</sup>,  
Ибрагим Е. Маликиев<sup>2</sup>, Владимир М. Обидняк<sup>2</sup>, Яна И. Крючковенко<sup>2</sup>, Сергей Б. Петров<sup>2</sup>,  
Владислав Е. Григорьев<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Клиника высоких медицинских технологий им. Н.И. Пирогова –  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»  
199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет  
имени академика И.П. Павлова» Минздрава России  
197022, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6–8

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет  
имени А.И. Евдокимова» Минздрава России  
127473, Россия, г. Москва, ул. Делегатская, д. 20, стр. 1

<sup>4</sup> ФГБУ «Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины имени А.М. Никифорова»  
МЧС России  
194044, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 4/2

Мочекаменная болезнь на сегодняшний день является одной из актуальных проблем в мире, каждый одиннадцатый житель Земли страдает от данного заболевания. Ранее единственной возможностью избавиться от камней почек и мочевыводящих путей являлась открытая хирургия, которая отличалась высокой травматичностью. За последние десятилетия развитие технологий внесло значимый вклад в разработку новых методов лечения мочекаменной болезни. Одним из таких методов является дистанционная ударно-волновая литотрипсия. Первый дистанционный литотриптер Dornier HM-1 был выпущен в 1980 году. Последующие модели претерпели множество конструктивных изменений как в плане эргономики, так и мощностных показателей. Исследователями было замечено, что показатели эффективности дробления камней у литотриптера Dornier HM-1 были выше, чем у более новых моделей, так как более низкая мощность обеспечивала менее интенсивное образование кавитационных пузырьков, препятствующих эффективному прохождению последующих волн через камень. На сегодняшний день разрабатывается новый метод дистанционного дробления камней, основанный на низкоамплитудной высокочастотной технологии, совмещённой с ультразвуковой пропульсией, что является главным отличием от традиционных дистанционных ударно-волновых литотриптеров. Новая технология дробления камней получила название «burst wave lithotripsy», или «радиоимпульсная ультразвуковая литотрипсия». На сегодняшний день получены данные о том, что данный метод является более эффективным по качеству дробления и менее травматичным.

**Ключевые слова:** мочекаменная болезнь; дистанционная ударно-волновая литотрипсия; радиоимпульсная ультразвуковая литотрипсия

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки. **Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов:** Н.К. Гаджиев – разработка концепции и дизайна обзора; Д.С. Горелов, А.О. Иванов, И.Е. Маликиев – анализ литературных данных, написание текста рукописи; И.В. Семенякин, В.М. Обидняк, Я.И. Крючковенко, В.Е. Григорьев – обзор публикаций по теме исследования; С.Б. Петров – научное редактирование текста рукописи.

**Поступила в редакцию:** 19.03.2021. **Принята к публикации:** 08.06.2021. **Опубликована:** 26.09.2021.

**Автор для связи:** Дмитрий Сергеевич Горелов; тел.: +7 (921) 796-48-92; e-mail: [dsgorelov@mail.ru](mailto:dsgorelov@mail.ru)

**Для цитирования:** Гаджиев Н.К., Горелов Д.С., Иванов А.О., Семенякин И.В., Обидняк В.М., Маликиев И.Е., Крючковенко Я.И., Петров С.Б., Григорьев В.Е. Радиоимпульсная ультразвуковая литотрипсия – новая ступень эволюции дистанционной ударно-волновой литотрипсии. Вестник урологии. 2021;9(3):127-134. DOI: 10.21886/2308-6424-2021-9-3-127-134

## Burst wave lithotripsy – the new evolution stage of extracorporeal shock-wave lithotripsy

Nariman K. Gadzhiev<sup>1</sup>, Dmitry S. Gorelov<sup>2</sup>, Andrey O. Ivanov<sup>2</sup>, Igor V. Semenyakin<sup>3</sup>,  
Ibragim E. Malikiev<sup>2</sup>, Vladimir M. Obidnyak<sup>2</sup>, Yana I. Kryuchkovenko<sup>2</sup>, Sergey B. Petrov<sup>2</sup>,  
Vladislav E. Grigoriev<sup>4</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg State University – Pirogov Clinic of Advanced Medical Technologies  
199034, Russian Federation, St. Petersburg, 7-9 Universitetskaya sq.

<sup>2</sup> Pavlov First St. Petersburg State Medical University  
197022, Russian Federation, St. Petersburg, 6-8 Lev Tolstoy st.

<sup>3</sup> Evdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry  
127473, Russian Federation, Moscow, 20 Delegatskaya st. bldg. 1

<sup>4</sup> A.I. Evdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry  
127473, Russian Federation, Moscow, 20, bldg. 1 Delegatskaya st.

Urolithiasis is currently one of the most urgent problems in the world. Every eleventh worldwide inhabitant suffers from this disease. Previously, the only way to get rid of kidney stones and the urinary tract was open surgery, which was characterized by high trauma. Over the past decades, the development of technologies has made a significant contribution to the development of new methods of urolithiasis treatment. One of these methods is extracorporeal shock wave lithotripsy (ESWL). The first lithotripter Dornier HM-1 was produced in 1980. Subsequent models have got many changes, both in terms of ergonomics and power. The researchers noticed that the efficiency of stone crushing in the Dornier HM-1 lithotripter was higher than in newer models since the lower power provided the less intensive formation of cavitation bubbles that prevent the effective transit of subsequent waves through the stone. Nowadays, a new method of remote stone crushing is being developed based on low-amplitude high-frequency technology combined with ultrasonic propulsion, which is the main difference from traditional shock-wave lithotripters. The new technology of stone crushing is called «burst wave lithotripsy» (BWL). Currently, the data have been obtained that this method is more effective in terms of crushing quality and less traumatic.

**Key words:** urolithiasis; extracorporeal shock wave lithotripsy; radio-pulsed ultrasound lithotripsy

**Financing.** The study was not sponsored. **Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Authors' contribution:** Nariman K. Gadzhiev – study design development; Dmitry S. Gorelov, Andrey O. Ivanov, Ibragim E. Malikiev – analysis of literary data, writing the manuscript's text; Igor V. Semenyakin, Vladimir M. Obidnyak, Yana I. Kryuchkovenko, Vladislav E. Grigoriev – reviewing of publications on the research topic; Sergey B. Petrov – scientific editing of the manuscript.

**Received:** 03/19/2021. **Accepted:** 06/08/2021. **Published:** 09/26/2021.

**For correspondence:** Dmitry Sergeevich Gorelov; tel.: +7 (921) 796-48-92; e-mail: [dsgorelov@mail.ru](mailto:dsgorelov@mail.ru)

**For citation:** Gadzhiev N.K., Gorelov D.S., Ivanov A.O., Semenyakin I.V., Obidnyak V.M., Malikiev I.E., Kryuchkovenko Ya.I., Petrov S.B., Grigoriev V.E. Burst wave lithotripsy – the new evolution stage of extracorporeal shock-wave lithotripsy. *Vestn.Urol.* 2021;9(3):127-134. (In Russ.). DOI: 10.21886/2308-6424-2021-9-3-127-134

За последние десятилетия заболеваемость мочекаменной болезнью значительно возросла, и в настоящее время примерно каждый одиннадцатый житель Земли страдает от данного заболевания [1]. Несмотря на технологические достижения в области хирургических методов лечения, частота повторных вмешательств высока и составляет от 26 до 34% в зависимости от вида операции [2].

Ранее открытая операция являлась единственным способом удаления камней из почек и мочевыводящих путей. Поэтому настоящей

революцией можно было назвать представление в 1980 году первого аппарата для дистанционной ударно-волновой литотрипсии (ДУВЛ) Dornier HM-1 [3]. История ударно-волновой литотрипсии фактически началась с авиации. Во время гиперзвукового полёта под дождём устойчивость конструкции самолёта подвергалась серьёзным испытаниям: капли дождя создавали ударные волны, которые не только разрушали материал в точке удара, но и вызывали повреждение внутренней части обшивки. Изучение этого феномена и семь лет экспериментальных исследований

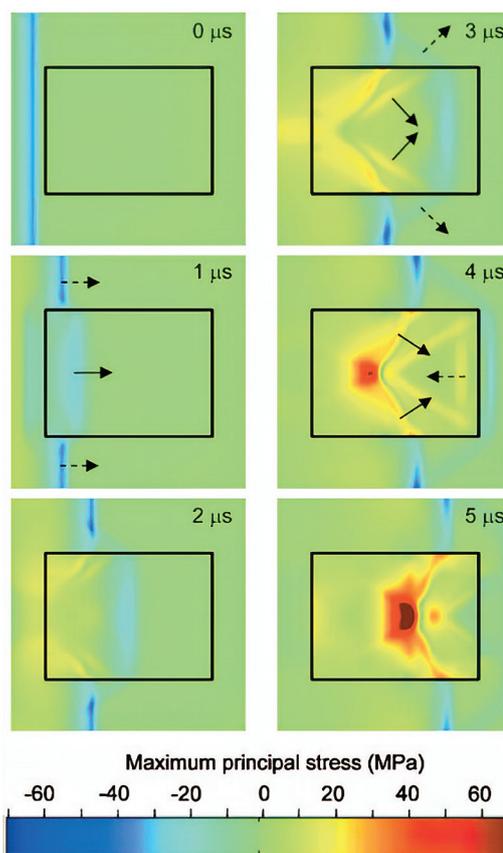
привели к созданию Dornier HM-1, а 7 февраля 1980 года была проведена первая экстракорпоральная ударно-волновая литотрипсия. Потребовалось ещё три года клинических исследований, прежде чем этот метод стал применяться на международном уровне [4].

Во время ДУВЛ фрагментация камня в почке достигается двумя способами. Первый – прямое приложение акустической энергии, сфокусированной на поверхности камня, которая вырабатывается электрогидравлическим, электромагнитным или пьезоэлектрическим источником. Вторая – косвенная энергия от схлопывания кавитационных пузырьков, которые образуются на поверхности камня [5]. Разрушение камня похоже на разрушение любого хрупкого объекта, оно может рассматриваться как процесс, при котором трещины образуются, растут и сливаются в результате внутреннего напряжения, к примеру, создаваемого ударной волной литотриптера. Предполагается, что при сжатии ударная волна шире, но короче, чем камень, и распространяется в жидкости вдоль боковой поверхности камня, создавая окружное напряжение на камень. Eisenmenger предположил, что скорость волны в жидкости намного меньше, чем скорость упругой волны в камне, что означает, что продольная волна движется вдоль камня, оставляя тонкую ударную волну в жидкости, которая окружает и сжимает камень квазистатическим образом. В результате этого напряжение растяжения создаётся около ближнего и дальнего концов камня, что способствует разрушению параллельно направлению распространения волны (рис. 1).

Поскольку скорость поперечной волны в камне близка к скорости звука в воде, волна сжатия усиливает поперечную волну, которая усиливает напряжение внутри камня [6]. Однако камни, состоящие из брусита, моногидрата оксалата кальция и цистина, остаются резистентными к ДУВЛ [7].

Литотриптор Dornier HM-3 обладал высокой стоимостью и довольно сложной конструкцией, а пациент (находясь под общей анестезией; позднее эти операции стали проводить и под спинальной анестезией) во время процедуры должен был лежать в ванне, заполненной водой. Несмотря на эти неудобства, аппарат был достаточно успешен. Эффективность первых установок ДУВЛ была обусловлена тем, что они генерировали широко сфокусированные импульсы с относительно низкими амплитудами давления [8].

Современные аппараты ДУВЛ значительно более эргономичны, так как более компактны, не требуют нахождения пациента в ванне и облада-



**Рисунок 1.** Максимальное напряжение в срезе камня во временной последовательности

**Figure 1.** The maximum stress in a stone cut during the time sequence

ют возможностью комбинированного наведения (рентгеновского и ультразвукового). Они обеспечивают высокое пиковое давление (30 – 100 МПа) в одном цикле с низкой скоростью ( $\leq 2$  Гц). Но такое пиковое давление приводит к избыточному образованию кавитационных пузырьков. В свою очередь кавитационные пузырьки создают барьер и препятствуют контакту следующих волн с камнем и, соответственно, снижают эффективность литотрипсии.

Недостаточная эффективность ДУВЛ, высокая частота повторных вмешательств привели к тому, что предпочтения специалистов при выборе метода удаления камней стали смещаться в сторону эндоскопических подходов, таких как чрескожная нефролитотрипсия и гибкая уретероскопия [9]. Так, если в 2003 году в США на долю дистанционной литотрипсии приходилось 54% всех хирургических вмешательств по поводу уrolитиаза, то в 2013 году – уже 36,3% [6].

В поисках улучшения результатов дистанционной литотрипсии стали исследоваться альтернативные методики. В 2010 году A. Shah et

а). продемонстрировали прототип устройства, которое использует сфокусированный ультразвук для перемещения камней внутри тканевого фантома. Сила акустического излучения возникает в результате передачи импульса акустической волны объекту и является одним из примеров явления, связанного с формами волнового движения. При корректном фокусировании волн на камне его можно направлять так, как это необходимо [10]. Прототип устройства состоял из двух кольцевых датчиков и работал при следующих параметрах: акустическая мощность – 5 – 40 Вт, рабочий цикл – 50%, длительность импульса – 2 – 5 секунд и пиковое отрицательное давление – 20 МПа. Впоследствии эта система была модифицирована до одного датчика диаметром 6 см и частотой работы 350 кГц. Он использовался как для визуализации, так и для репозиции камня. Модифицированный датчик обеспечивал более широкую ширину луча, большую глубину фокусировки и длительность импульса. Также были изменены рабочие параметры: трёхсекундные импульсы при 50% рабочем цикле и пиковом отрицательном давлении 2,4 МПа в течение 10 минут. Методика получила название «ultrasonic propulsion» (UP), или «ультразвуковая пропульсия» (рис. 2). Опубликованы предварительные результаты: 65 пациентам была проведена UP с успешной репозицией камней разной локализации. Контроль эффективности методики проводился с помощью УЗИ и эндоскопии. UP была способна перемещать камни размером до 7 мм в 95% случаев на расстояние более 3 мм [11].

Ещё одна технология на основе сфокусированного ультразвука появилась в 2015 году. Она основана на исследованиях импульсов сфокусированных ультразвуковых волн высокой интенсивности, используемых для фрагментации камня путём создания облака кавитационных пузырьков [12]. Технология получила название «Burst wave lithotripsy» (BWL) [1]. Интерес к более низким амплитудам энергии волны возник из наблюдения, что самый первый коммерческий литотриптор Dornier HM3 обладал большей эффективностью, чем последующие поколения литотрипторов, поскольку он доставлял импульсы с более низкой амплитудой в более широкую фокальную зону [6]. Эта особенность снижала чрезмерное образование пузырьков, происходящее во время кавитации. Известно, что при ДУВЛ соотношение положительной и отрицательной энергии, передаваемой за четыре микросекунды, составляет 5:1, тогда как BWL обеспечивает синусоидальный всплеск волн с соотношением 1:1 в течение 0,5 микросекунд, а амплитуда волны значительно

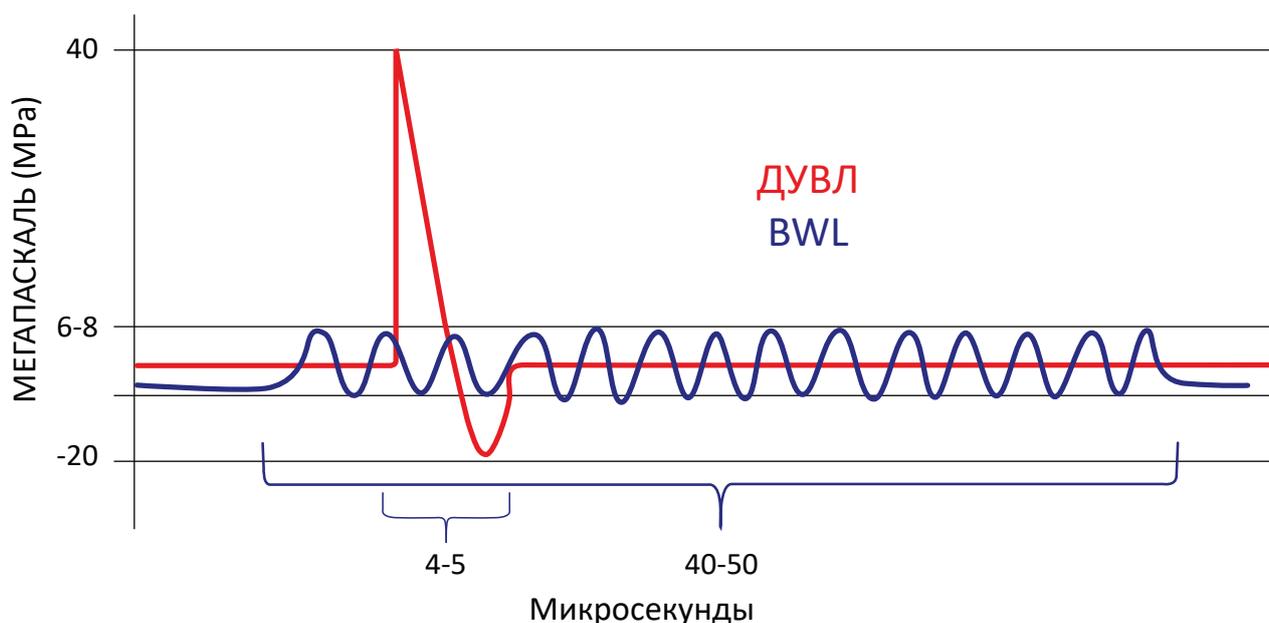


Рисунок 2. Датчик для ультразвуковой пропульсии  
*Figure 2. Ultrasonic propulsion sensor*

ниже (6,5 МПа против 40,0 МПа), чем амплитуда, наблюдаемая при стандартной ДУВЛ (рис. 3) [6].

Таким образом, короткие всплески синусоидальных импульсов меньшей амплитуды в сравнении с ДУВЛ минимизировали чрезмерное образование кавитационных пузырьков, повышая эффективность и контролируемость фрагментации. Также это позволило минимизировать облучение пациента и персонала, так как мониторинг во время литотрипсии осуществляется с помощью УЗИ. Проблема снижения воздействия ионизирующего излучения при лечении нефролитиаза является очень актуальной, особенно учитывая увеличение уровня радиации на душу населения за последние 20 лет почти на 600% [13]. В первых исследованиях BWL in vitro использовали искусственные камни с характеристиками, аналогичными характеристикам уратов, струвитов и цистиновых камней [6]. Камни имели размер от 5 до 15 мм в наибольшем диаметре и были закреплены на акустически проницаемых мембранах.

Продолжительность процедуры, необходимой для фрагментации камня, и размер фрагментов больше всего зависели от типа камня. Уратные камни фрагментировались наиболее быстро (0,17 – 1,40 минуты), затем следовали струвит (0,07 – 2,02 минуты), кальций оксалатные камни (8,0 – 18,1 минуты) и цистиновые камни



**Рисунок 3.** Разница между амплитудой всплесков волн при ДУВЛ и BWL  
**Figure 3.** The difference between the amplitude of the ESWL and BWL bursts

(10,3 – 21,3 минуты). Более мелкие фрагменты были получены при создании волн более высокой частоты [14].

Безопасность BWL изучалась на животных. Повреждение ткани во время проведения BWL обнаруживалось в режиме реального времени и проявлялось в виде повышенной эхогенности на ультразвуковом изображении. Повышение эхогенности на протяжении более 20 секунд продемонстрировало 100% корреляции с повреждением почек [15]. В экспериментах на животных была отмечена картина геморрагического повреждения почек, схожая с повреждениями после ДУВЛ. При этом объём поражения был значительно меньше (0,1%) по сравнению с 5% при ДУВЛ [1]. Считается, что механизм повреждения заключается в том, что быстрое образование кавитационных пузырьков и их схлопывание во время BWL вызывает механические повреждения мелких сосудов. В исследовании по оценке безопасности BWL, проводимом на свиньях, удалённые из почек людей камни, состоящие из моногидрата оксалата кальция, были хирургическим путём имплантированы в свиные почки. Затем проводились сеансы BWL в разных режимах в течение 30 минут. Последующие MPT и гистологическое исследование не выявили повреждения паренхимы почек, хотя отмечались признаки петехиального кровоизлияния и поверхностной эрозии участков уротелия, непосредственно контактирующих с камнем [16].

По мере того, как разработки UP и BWL клини-

чески изучаются, обнаруживаются определенные ограничения этих методик. При нынешней конструкции ультразвукового датчика объект (например, камень в почке или фрагмент камня) можно перемещать только в одном направлении (от датчика). Однако недавняя работа, проделанная исследовательской группой из Вашингтонского университета, была направлена на манипулирование объектами в трёхмерном пространстве [17].

Идея «акустического пинцета» (перемещения небольших объектов с помощью звуковых волн) не является новшеством. Ранее были описаны работы с использованием акустических волн для управления небольшими, лёгкими объектами в воздушной и жидкой среде. Исследователи в Вашингтонском университете совместно с NASA (Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства) изучают возможности использования «акустического пинцета» в клинической практике для перемещения камней в почках в различных направлениях. Эта технология получила название Tractor (vortex) beam [17].

С целью повышения эффективности технологии BWL было принято решение совместить её с технологией UP. Во время эксперимента *in vitro* сочетание BWL с доработанной системой Propulse-1 позволило успешно фрагментировать 89% всех камней [18].

При чередовании BWL и UP фрагментация камней увеличивалась в 4,6 раза по сравнению

с только BWL. У этой корреляции есть логичные объяснения:

1) первая ультразвуковая пропульсия облегчает отделение рыхлых, ослабленных фрагментов от поверхности камня;

2) переориентация камня перераспределяет напряжение и приводит к образованию новых трещин в камне;

3) UP предотвращает скопление кавитационных пузырьков, которые могут создавать барьерный эффект;

4) UP усиливает повреждение камня за счёт образования трещин под напряжением и увеличения колебаний кавитационных пузырьков [15].

В исследовании K. Maeda et al. результаты моделирования показали, что величина энергетической защиты за счёт тонкого слоя кавитационных пузырьков может достигать 90% от общей энергии волны, которая в противном случае передавалась бы в камень. Это указывает на большую потенциальную потерю эффективности BWL из-за кавитации. Кроме того, авторы обнаружили сильную корреляцию между величиной экранирования и амплитудой обратно рассеянной звуковой волны. Эту корреляцию можно использовать, например, для мониторинга величины экранирования в почках путём измерения рассеянной звуковой волны вне человеческого тела в реальном времени во время процедуры BWL и настройки параметров для минимизации экранирования во время процедуры [19, 20].

В исследовании C. Hunter et al. для выяснения того, как разные типы камней влияют на кавитацию при BWL, использовали как образцы из мочевыводящих путей, так и синтетические камни. Было отмечено, что более пористые образцы (струвит, карбонатапатит) вызывают образование большего количества кавитационных пузырьков, чем менее пористые камни (кальция оксалат моногидрат). Высокую эффективность фрагментирования струвитов можно объяснить тем, что кавитационные пузырьки за счёт пористой структуры камня проникают глубже, а энергия,

образующаяся при их схлопывании, усугубляет разрушение камня. Также было отмечено, что при большей гидратации образцов отмечалось заметное снижение кавитации [21].

Клинические испытания BWL на людях были одобрены Управлением по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США и проводятся с августа 2019 года, завершение исследования планируется в апреле 2022 года (NCT03873259 – идентификатор исследования на портале [clinicaltrials.gov](https://clinicaltrials.gov)). В 2020 году были опубликованы успешные промежуточные результаты BWL в сочетании с UP. Лечение проводилось при следующих параметрах: 20 циклов с частотой 350 кГц, пиковое отрицательное давление 6 МПа и частота повторения импульсов 17 Гц в течение менее 10 минут. Одному пациенту был проведен сеанс BWL с применением анестезии. Сразу после литотрипсии была выполнена эндоскопическая инспекция: камень был раздроблен на фрагменты менее 2 мм, при этом наблюдалась лишь незначительная эритема слизистой. В этом же исследовании другой пациент перенес процедуру BWL без анестезии, отметив лишь легкий дискомфорт. Единственным отмеченным нежелательным явлением была транзиторная гематурия сразу после процедуры [22].

### Заключение

Складывается впечатление, что новая технология литотрипсии действительно станет прорывом в области лечения уролитиаза. Результаты исследований показывают, что при BWL в комбинации с UP достигается фрагментация камня, достаточная для его самопроизвольного отхождения. Кроме того, отмечается минимальное повреждение почек и мочевыводящих путей. BWL обладает огромным потенциалом и способна вытеснить не только ДУВЛ, но и значительно потеснить позиции некоторых хирургических методов, например, ретроградной интратанальной хирургии.

### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Chen TT, Samson PC, Sorensen MD, Bailey MR. Burst wave lithotripsy and acoustic manipulation of stones. *Curr Opin Urol*. 2020;30(2):149-156. DOI: 10.1097/MOU.0000000000000727
2. Urologic Diseases in America. NIDDK. Available at: <https://www.nidk.nih.gov/about-nidk/strategic-plans-reports/urologic-diseases-in-america> Accessed December 11, 2020.
3. Elmansy HE, Lingeman JE. Recent advances in lithotripsy technology and treatment strategies: A systematic review update. *Int J Surg*. 2016;36(Pt D):676-680. DOI: 10.1016/j.ijsu.2016.11.097
4. Chaussy CG. The history of shockwave lithotripsy. In: *The History of Technologic Advancements in Urology*. Springer International Publishing; 2017.
5. Sapozhnikov OA, Maxwell AD, MacConaghy B, Bailey MR. A mechanistic analysis of stone fracture in lithotripsy. *J Acoust Soc Am*. 2007;121(2):1190-202. DOI: 10.1121/1.2404894
6. Large T, Krambeck AE. Emerging Technologies in Lithotripsy. *Urol Clin North Am*. 2019;46(2):215-223. DOI: 10.1016/j.ucl.2018.12.012
7. Türk C (Chair), Neisius A, Petřík A, Seitz, Skolarikos A (Vice-chair), Somani B, Thomas K, Gambaro G (Consultant

- nephrologist). Urolithiasis. In: EAU Guidelines. Edn. presented at the EAU Annual Congress Milan 2021. ISBN 978-94-92671-13-4. EAU Guidelines Office, Arnhem, the Netherlands, 2021. <http://uroweb.org/guidelines/compilations-of-all-guidelines/>
8. Maxwell AD, Cunitz BW, Kreider W, Sapozhnikov OA, Hsi RS, Harper JD, Bailey MR, Sorensen MD. Fragmentation of urinary calculi in vitro by burst wave lithotripsy. *J Urol.* 2015;193(1):338-44. DOI: 10.1016/j.juro.2014.08.009
  9. Rassweiler J, Rieker P, Rassweiler-Seyfried MC. Extracorporeal shock-wave lithotripsy: is it still valid in the era of robotic endourology? Can it be more efficient? *Curr Opin Urol.* 2020;30(2):120-129. DOI: 10.1097/MOU.0000000000000732
  10. Shah A, Owen NR, Lu W, Cunitz BW, Kaczkowski PJ, Harper JD, Bailey MR, Crum LA. Novel ultrasound method to reposition kidney stones. *Urol Res.* 2010;38(6):491-5. DOI: 10.1007/s00240-010-0319-9
  11. Bailey MR, Wang YN, Kreider W, Dai JC, Cunitz BW, Harper JD, Chang H, Sorensen MD, Liu Z, Levy O, Dunmire B, Maxwell AD. Update on clinical trials of kidney stone repositioning and preclinical results of stone breaking with one system. *Proc Meet Acoust.* 2018;35(1):020004. DOI: 10.1121/2.0000949
  12. Ikeda T, Yoshizawa S, Tosaki M, Allen JS, Takagi S, Ohta N, Kitamura T, Matsumoto Y. Cloud cavitation control for lithotripsy using high intensity focused ultrasound. *Ultrasound Med Biol.* 2006;32(9):1383-97. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2006.05.010
  13. Chen TT, Wang C, Ferrandino MN, Scales CD, Yoshizumi TT, Preminger GM, Lipkin ME. Radiation Exposure during the Evaluation and Management of Nephrolithiasis. *J Urol.* 2015;194(4):878-85. DOI: 10.1016/j.juro.2015.04.118
  14. Dai JC, Bailey MR, Sorensen MD, Harper JD. Innovations in Ultrasound Technology in the Management of Kidney Stones. *Urol Clin North Am.* 2019;46(2):273-285. DOI: 10.1016/j.ucl.2018.12.009
  15. Zwaschka TA, Ahn JS, Cunitz BW, Bailey MR, Dunmire B, Sorensen MD, Harper JD, Maxwell AD. Combined Burst Wave Lithotripsy and Ultrasonic Propulsion for Improved Urinary Stone Fragmentation. *J Endourol.* 2018;32(4):344-349. DOI: 10.1089/end.2017.0675
  16. Wang YN, Kreider W, Hunter C, Cunitz BW, Thiel J, Starr F, Dai JC, Nazari Y, Lee D, Williams JC, Bailey MR, Maxwell AD. An in vivo demonstration of efficacy and acute safety of burst wave lithotripsy using a porcine model. *Proc Meet Acoust.* 2018;35(1):020009. DOI: 10.1121/2.0000975
  17. Ghanem MA, Maxwell AD, Wang YN, Cunitz BW, Khokhlova VA, Sapozhnikov OA, Bailey MR. Noninvasive acoustic manipulation of objects in a living body. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2020;117(29):16848-16855. DOI: 10.1073/pnas.2001779117
  18. Ramesh S, Chen TT, Maxwell AD, Cunitz BW, Dunmire B, Thiel J, Williams JC, Gardner A, Liu Z, Metzler I, Harper JD, Sorensen MD, Bailey MR. In Vitro Evaluation of Urinary Stone Comminution with a Clinical Burst Wave Lithotripsy System. *J Endourol.* 2020;34(11):1167-1173. DOI: 10.1089/end.2019.0873
  19. Marzo A, Seah SA, Drinkwater BW, Sahoo DR, Long B, Subramanian S. Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects. *Nat Commun.* 2015;6:8661. DOI: 10.1038/ncomms9661
  20. Maeda K, Maxwell AD, Colonius T, Kreider W, Bailey MR. Energy shielding by cavitation bubble clouds in burst wave lithotripsy. *J Acoust Soc Am.* 2018;144(5):2952. DOI: 10.1121/1.5079641
  21. Hunter C, Cunitz B, Dunmire B, Bailey M, Randad A, Kreider W, Maxwell AD, Sorensen MD, Williams JC. Impact of stone characteristics on cavitation in burst wave lithotripsy. *Proc Meet Acoust.* 2018;35(1):020005. DOI: 10.1121/2.0000950
  22. Harper JD, Metzler I, Hall MK, Chen TT, Maxwell AD, Cunitz BW, Dunmire B, Thiel J, Williams JC, Bailey MR, Sorensen MD. First In-Human Burst Wave Lithotripsy for Kidney Stone Comminution: Initial Two Case Studies. *J Endourol.* 2021;35(4):506-511. DOI: 10.1089/end.2020.0725

#### Сведения об авторах

**Нариман Казиханович Гаджиев** – д.м.н.; заместитель директора по медицинской части (урологии) клиники высоких медицинских технологий им. Н.И. Пирогова ФГБОУ ВО «СПбГУ»

г. Санкт-Петербург, Россия  
ORCID iD 0000-0002-6255-0193  
e-mail: nariman.gadjiev@gmail.com

**Дмитрий Сергеевич Горелов** – врач-уролог отделения дистанционной литотрипсии и эндовидеохирургии НИЦ урологии ФГБОУ ВО «ПСПбГМУ им. акад. И.П. Павлова» Минздрава России

г. Санкт-Петербург, Россия  
ORCID iD 0000-0002-7592-8167  
e-mail: dsgorelov@mail.ru

**Андрей Олегович Иванов** – заведующий отделением дистанционной литотрипсии и эндовидеохирургии НИЦ урологии ФГБОУ ВО «ПСПбГМУ им. акад. И.П. Павлова» Минздрава России

г. Санкт-Петербург, Россия  
ORCID iD 0000-0002-3707-9491  
e-mail: andrey\_ivanov\_62@bk.ru

**Игорь Владимирович Семенякин** – д.м.н.; ассистент кафедры урологии ФГБОУ ВО «МГМСУ им. А.И. Евдокимова» Минздрава России

г. Москва, Россия  
ORCID iD 0000-0003-3246-7337  
e-mail: dr.semeniakin@gmail.com

#### Information about the authors

**Nariman K. Gadjiev** – M.D., Dr.Sc.(Med.); Deputy Head for Medical (Urology), St. Petersburg State University – Pirogov Clinic of Advanced Medical Technologies  
St. Petersburg, Russian Federation  
ORCID iD 0000-0002-6255-0193  
e-mail: nariman.gadjiev@gmail.com

**Dmitry S. Gorelov** – M.D.; Urologist, ESWL and Endovideosurgery Division, Research Center of Urology, Pavlov First St. Petersburg State Medical University  
St. Petersburg, Russian Federation  
ORCID iD 0000-0002-7592-8167  
e-mail: dsgorelov@mail.ru

**Andrei O. Ivanov** – M.D.; Head, ESWL and Endovideosurgery Division, Research Center of Urology, Pavlov First St. Petersburg State Medical University  
St. Petersburg, Russian Federation  
ORCID iD 0000-0002-3707-9491  
e-mail: andrey\_ivanov\_62@bk.ru

**Igor V. Semenyakin** – M.D., Dr.Sc. (Med.); Assist., Dept. of Urology, Evdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry  
Moscow, Russian Federation  
ORCID iD 0000-0003-3246-7337  
e-mail: dr.semeniakin@gmail.com

**Ибрагим Ермакович Маликиев** – ординатор кафедры урологии с курсом урологии с клиникой ФГБОУ ВО «ПСПбГМУ им. акад. И.П. Павлова» Минздрава России  
г. Санкт-Петербург, Россия  
ORCID iD 0000-0001-6438-6959  
e-mail: malikiev9511@gmail.com

**Владимир Михайлович Обидняк** – врач-уролог отделения дистанционной литотрипсии и эндовидеохирургии НИЦ урологии ФГБОУ ВО «ПСПбГМУ им. акад. И.П. Павлова» Минздрава России  
г. Санкт-Петербург, Россия  
ORCID iD 0000-0002-7095-9765  
e-mail: v.obidniak@gmail.com

**Яна Ивановна Крючковенко** – студентка ФГБОУ ВО «ПСПбГМУ им. акад. И.П. Павлова» Минздрава России  
г. Санкт-Петербург, Россия  
ORCID iD 0000-0003-0021-1003  
e-mail: kruchkovenkoyana19@mail.ru

**Сергей Борисович Петров** – д.м.н., профессор; руководитель НИЦ урологии ФГБОУ ВО «ПСПбГМУ им. акад. И.П. Павлова» Минздрава России  
г. Санкт-Петербург, Россия  
ORCID iD 0000-0003-3460-3427  
e-mail: petrov-uro@yandex.ru

**Владислав Евгеньевич Григорьев** – врач-уролог отделения урологии ФГБУ ВЦЭРМ им. А.М. Никифорова МЧС России  
г. Санкт-Петербург, Россия  
ORCID iD 0000-0002-7797-8897  
e-mail: vladislav.grigorev@outlook.com

**Ibrahim E. Malikiyev** – M.D.; Dept. of Urology with the Clinical Urology Course, Pavlov First St. Petersburg State Medical University  
St. Petersburg, Russian Federation  
ORCID iD 0000-0001-6438-6959  
e-mail: malikiev9511@gmail.com

**Vladimir M. Obidnyak** – M.D.; Urologist, ESWL and Endovideosurgery Division, Research Center of Urology, Pavlov First St. Petersburg State Medical University  
St. Petersburg, Russian Federation  
ORCID iD 0000-0002-7095-9765  
e-mail: v.obidniak@gmail.com

**Yana I. Kryuchkovenko** – Student, Pavlov First St. Petersburg State Medical University  
St. Petersburg, Russian Federation  
ORCID iD 0000-0003-0021-1003  
e-mail: kruchkovenkoyana19@mail.ru

**Sergey B. Petrov** – M.D., Dr.Sc. (Med.); Full Prof.; Head, Research Center of Urology, Pavlov First St. Petersburg State Medical University  
St. Petersburg, Russian Federation  
ORCID iD 0000-0003-3460-3427  
e-mail: petrov-uro@yandex.ru

**Vladislav E. Grigoriev** – M.D.; Urologist, Urology Division, A.M. Nikiforov All-Russian Center for Emergency and Radiation Medicine  
St. Petersburg, Russian Federation  
ORCID iD 0000-0002-7797-8897  
e-mail: vladislav.grigorev@outlook.com