

СТАТЬИ

УДК 004.9

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МАКЕТА
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА
РЕГИОНАРНОГО ВЕНТИЛЯЦИОННО-ПЕРФУЗИОННОГО
ОТНОШЕНИЯ ЛЕГКИХ ЧЕЛОВЕКА**

Алексанян Г.К.

*ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова», Новочеркасск, e-mail: graer@yandex.ru*

В работе приведены первые результаты экспериментальной оценки работоспособности разработанной и изготовленной информационно-измерительной системы длительного мониторинга регионарной вентиляции и вентиляционно-перфузионного отношения легких человека на основе многочастотной электроимпедансной томографии. Данные исследования были выполнены на добровольцах из числа разработчиков системы. При этом массив измерительной информации был получен с применением нагрузочного спирометра Coach2, с помощью которого испытуемые самостоятельно устанавливали дыхательные объемы. Экспериментальные исследования выполнялись на разработанном автором ранее медико-техническом стенде для проведения исследований методом электроимпедансной томографии. Таким образом, в лабораторных условиях на здоровых людях (испытуемых) в упрощенном виде и безопасным способом моделировался процесс искусственной вентиляции легких в части задания и изменения дыхательных объемов, а также выполнялась оценка возможности получения измерительной информации для левого и правого лёгкого в отдельности. По результатам первичной экспериментальной апробации можно сделать вывод, что предложенные решения позволяют вести непрерывный длительный мониторинг вентиляции и вентиляционно-перфузионного отношения лёгких человека (в том числе и регионарный) без необходимости выполнения дополнительных перенастроек. Работоспособность системы сохранялась в установленном диапазоне дыхательных объемов (от 500 мл до 4000 мл) в заданном частотном диапазоне инжектируемого тока (от 50 кГц до 400 кГц). Предложенные решения позволяют визуализировать регионарную вентиляцию и вентиляционно-перфузионное отношение лёгких (левого и правого лёгкого в отдельности).

Ключевые слова: многочастотная электроимпедансная томография, информационно-измерительная система, дыхательные объемы, испытуемые, вентиляция легких, вентиляционно-перфузионное отношение

**EXPERIMENTAL APPROBATION OF THE LAYOUT
OF THE INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR MONITORING
THE REGIONAL VENTILATION-PERFUSION RATIO OF HUMAN LUNGS**

Aleksanyan G.K.

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, e-mail: graer@yandex.ru

The paper presents the first results of an experimental assessment of the operability of the developed and manufactured information-measuring system for long-term monitoring of regional ventilation and ventilation-perfusion ratio of human lungs based on multi-frequency electrical impedance tomography. These studies were performed on volunteers from among the developers of the system. At the same time, an array of measuring information was obtained using a Coach2 load spirometer, with which the subjects independently set respiratory volumes. Experimental studies were carried out on a medical and technical stand developed by the author earlier for conducting research by electrical impedance tomography. Thus, in laboratory conditions on healthy people (subjects), the process of artificial lung ventilation was modeled in a simplified form and in a safe way in terms of tasks and changes in respiratory volumes, as well as an assessment of the possibility of obtaining measuring information for the left and right lungs separately. Based on the results of the initial experimental approbation, it can be concluded that the proposed solutions allow continuous long-term monitoring of ventilation and ventilation-perfusion ratio of human lungs (including regional) without the need for additional reconfigurations. The operability of the system was maintained in the established range of respiratory volumes (from 500 ml to 4000 ml) in the specified frequency range of the injected current (from 50 kHz to 400 kHz). The proposed solutions make it possible to visualize regional ventilation and the ventilation-perfusion ratio of the lungs (left and right lungs separately).

Keywords: multifrequency electrical impedance tomography, information and measurement system, respiratory volumes, subjects, lung ventilation, ventilation-perfusion ratio

Многочастотная электроимпедансная томография (МЭИТ) является одним из направлений развития метода ЭИТ [1], при котором объект исследования (ОИ) инжектируется переменным током в заданном диапазоне частот. Это позволяет в режиме реального времени получать дополни-

тельную диагностическую информацию об изменении свойств исследуемой области (ИО), в том числе обусловленную индивидуальными особенностями самого ИО. Наибольшее практическое применение метод ЭИТ получил в области мониторинга функционального состояния легких челове-

ка при выполнении реанимационных мероприятий по искусственной вентиляции легких (ИВЛ) [2–5]. Это объясняется тем, что применение ЭИТ позволяет преодолеть ряд клинических проблем, которые невозможно решить с помощью других современных способов медицинской визуализации. К таким задачам, например, относится выявление изменений функционального состояния в отдельных (регионарных) областях легких, например, мониторинг и оценка вентиляции правого и левого лёгкого в отдельности, регионарной перфузии и регионарного вентиляционно-перфузионного отношения (ВПО)) [6]. При этом применение МЭИТ создает предпосылки для повышения качества персонализированной визуализации и достоверности мониторинга состояния легких человека, находящегося на респираторной поддержке. Таким образом существует практическая необходимость в создании медико-технических средств МЭИТ, позволяющих реализовать комплекс алгоритмов, методов и подходов для сбора, обработки, реконструкции и визуализации изменений функционального состояния ОИ. В рамках данной работы проводится начальная экспериментальная апробация разработанной автором информационно-измерительной системы многочастотной электроимпедансной томографии (ИИС МЭИТ) для задач мониторинга процесса вентиляции и ВПО легких человека.

Целью настоящих исследований является первичная оценка работоспособности разработанных и изготовленных аппаратно-программных средств мониторинга регионарной вентиляции и ВПО легких человека на основе многочастотной электроимпедансной томографии. Ключевая особенность данных исследований заключается в том, что массив измерительной информации получен с добровольцев из числа разработчиков ИИС МЭИТ с применением реанимационного нагрузочного спирометра. Таким образом, в лабораторных условиях на здоровых людях (испытуемых) в упрощенном виде и безопасным способом моделируется процесс ИВЛ в части задания и изменения дыхательных объемов, а также производится оценка возможности получения измерительной информации для левого и правого лёгкого в отдельности. Полученные данные использованы для реконструкции изменений поля проводимости и динамической визуализации процесса вентиляции и ВПО при разных частотах инжектируемого тока и дыхательных объемах.

Материалы и методы исследования

В основу проведения исследований был положен метод многочастотной элек-

троимпедансной томографии. Информационно-измерительная система МЭИТ позволяет визуализировать изменения поля проводимости $\Delta\Omega$ в области наложения электродной системы (ЭС), обусловленные процессами вентиляции и перфузии легких в отдельности. Задание дыхательных объемов V_i и моделирование мероприятия ИВЛ выполнены с применением нагрузочного спирометра Соач 2, который был использован также в работе [7]. Количество циклов исследований – 5. Сила инжектируемого тока I – 5 мА. Диапазон изменения частоты инжектирования тока f_i – от 50 кГц до 400 кГц. При этом переключение частоты тока инжектирования f_i выполняется автоматически каждые 20 секунд. Данные значения обеспечиваются с помощью источника тока и микроконтроллерным блоком ИИС МЭИТ. Электродная система реализована на основе 16 многоцветных металлических электродов, конструктивно соединенных с резиновым растяжимым поясом в единое устройство. Данная ЭС показала высокую надежность выполнения ЭИТ на предыдущих этапах исследований. Использованный тип электродного геля – гель для выполнения электрокардиографии. Зарегистрированные измерительные потенциалы ϕN с каждого электрода ЭС были программно сгруппированы на два массива, а именно: с левой стороны – ΨL , а с правой стороны – ΨR . Программное обеспечение ИИС МЭИТ разработано на языке C++. Интерфейс пользователя позволяет выводить динамические изображения наблюдаемых процессов (изменение вентиляции и ВПО легких). Конструктивное исполнение ИИС МЭИТ – портативное устройство с собственными вычислительными мощностями. Все электронные блоки безопасны для человека и имеют необходимые линии гальванической развязки. Количество добровольцев (И), принявших участие в исследовании, – 3 чел. (И1, И2 и И3), отличающихся друг от друга разным индексом массы тела, внешним видом и строением. Они являются одними из основных разработчиков ИИС МЭИТ и дали согласие на участие в испытаниях. Место проведения исследований – экспериментальный стенд для проведения медико-технических исследований методом ЭИТ (рис. 1), спроектированный и собранный автором ранее [8]. Сроки проведения исследований: с 13 сентября 2021 г. по 15 ноября 2021 г. Каждый испытуемый находился в положении «стоя» и самостоятельно задавал вдыхаемый объем, ориентируясь на шкалу спирометра Соач 2. При этом одновременно

выполнялась МЭИТ легких, а на экране прикроватного монитора выводилось значение SpO₂. Таким образом, для каждого испытуемого были получены значения Ψ_L и Ψ_R при разных величинах дыхательных объемов V_i при разных частотах f_i инжектируемого тока I . Обобщенная схема, поясняющая суть проводимых исследований, а также введенные обозначения, представлена на рис. 2.

В процессе выполнения МЭИТ на постоянной основе выполнялся мониторинг качества крепления электродов к телу испытуемого как с помощью соответствующего программного модуля, встроенного в ИИС МЭИТ, так и визуально.

В целом при подключении каждого испытуемого решались следующие основные задачи:

1) оценка возможности длительного непрерывного мониторинга регионарной вентиляции и ВПО легких (плановое время непрерывного мониторинга – не менее 3 ч) с помощью разработанной ИИС МЭИТ в лабораторных условиях на испытуемых И (И1, И2 и И3);

2) мониторинг работоспособности ИИС МЭИТ при заданных дыхательных объемах V_i при разных частотах f_i инжектируемого тока I на испытуемых И, а также оценка визуализации регионарного ВПО и динамических изображений регионарной вентиляции лёгких (левого и правого лёгкого в отдельности) каждого И (И1, И2 и И3);

3) оценка зависимостей регионарных измерительных потенциалов Ψ_L и Ψ_R от величины дыхательного объема V_i при разных частотах f_i для каждого И1, И2 и И3.

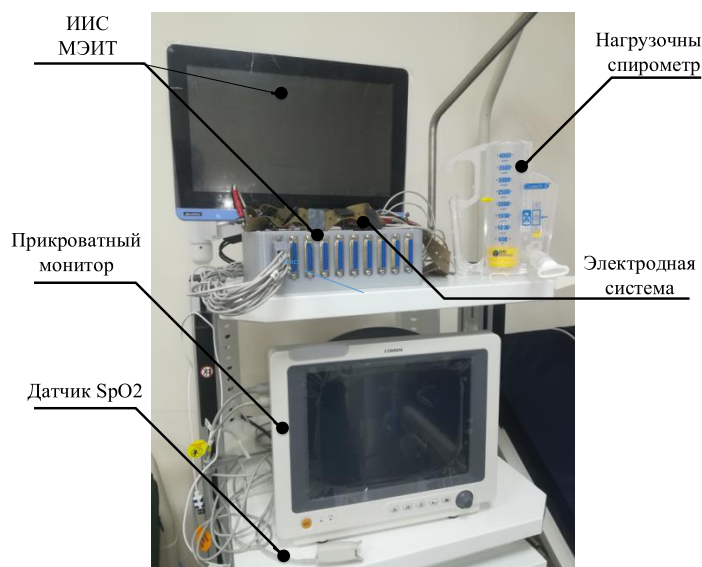


Рис. 1. Фотография медико-технического стенда для проведения экспериментальных исследований методом ЭИТ

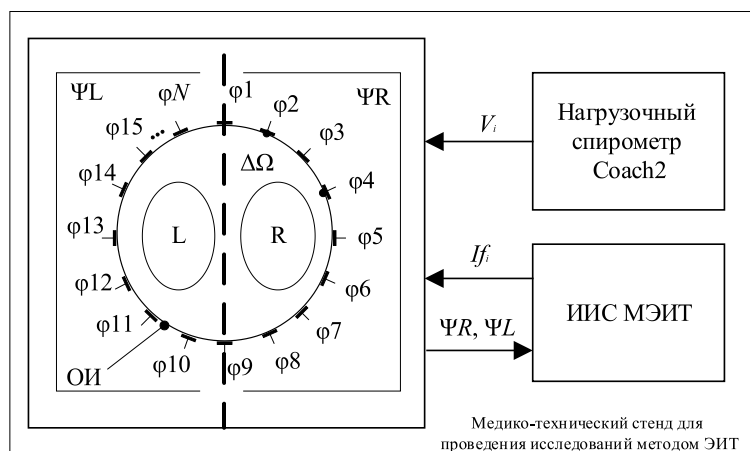
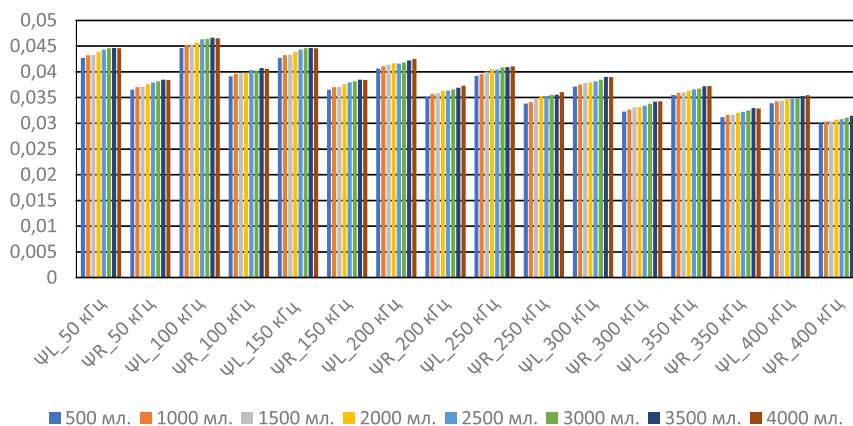


Рис. 2. Общая схема получения измерительных данных

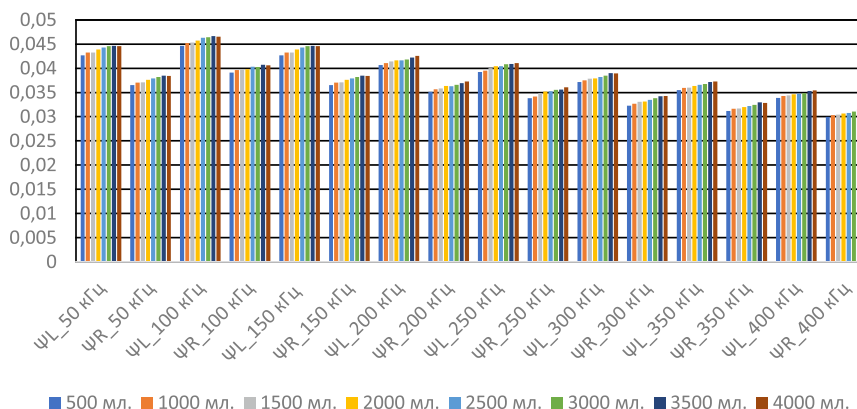
Результаты исследования и их обсуждение

В результате выполненных экспериментальных исследований при установленном диапазоне дыхательных объемов (от 500 мл до 4000 мл) в заданном частотном диапазоне инжектируемого тока (от 50 кГц до 400 кГц) были получены временные ряды регионарных измерительных данных Ψ_L и Ψ_R

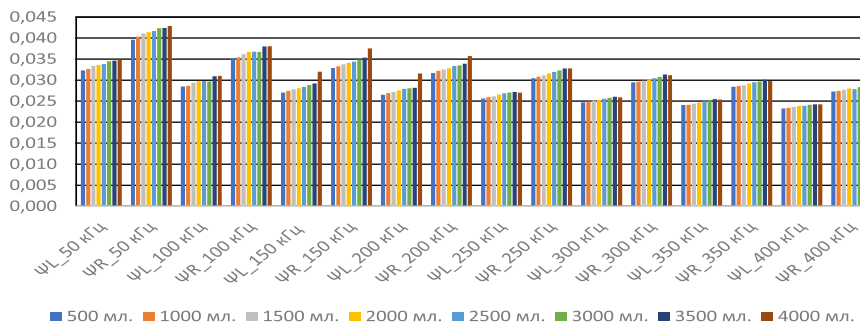
для каждого из И. Данные значения были обработаны с целью их наглядного графического представления и удобства интерпретации. На рис. 3 представлены графики зависимостей Ψ_L и Ψ_R от величины дыхательного объема V_i при разных частотах f_i для И1 (рис. 3, а), И2 (рис. 3, б) и И3 (рис. 3, в). По оси ординат показаны зарегистрированные величины Ψ_L и Ψ_R (единица измерения – мВ).



а)



б)



в)

Рис. 3. Зависимость регионарных измерительных потенциалов Ψ_L и Ψ_R от величины дыхательного объема V_i при разных частотах f_i для И1 (а), И2 (б) и И3 (в)

Пример динамической визуализации вентиляции легких для И1, И2 и И3

И	Дыхательные объемы, заданные нагрузочным спирометром Coach 2							
	500 мл	1000 мл	1500 мл	2000 мл	2500 мл	3000 мл	3500 мл	4000 мл
И1								
И2								
И3								

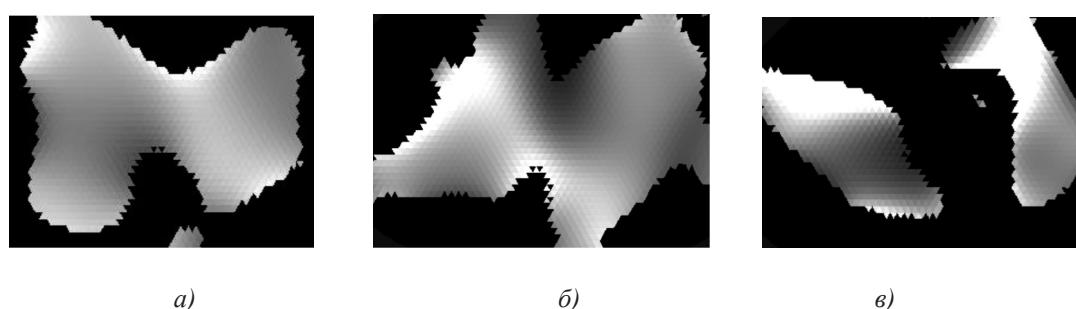


Рис. 4. Пример динамической визуализации ВПО

Анализируя сведения, представленные на рис. 3, можно заключить, что для И1, И2 и И3 с ростом f_i наблюдается уменьшение средней величины зарегистрированных ΨL и ΨR в пределах заданного V_i . Однако на фиксированной f_i значения ΨL и ΨR возрастают с увеличением V_i . Причем скорость изменений значений ΨL и ΨR при изменении f_i различна для каждого И. Таким образом, применение МЭИТ позволяет учесть особенности ОИ и персонализировать ЭИТ под конкретного обследуемого. Количественная оценка и разработка алгоритмов по выбору требуемых параметров ЭИТ является предметом дальнейших исследований.

При выполнении программы и всего цикла экспериментальных исследований на экране ИИС МЭИТ непрерывно выводились динамические изображения процесса вентиляции легких. Они были получены по результатам реконструкции и визуализации изменений поля проводимости $\Delta\Omega$ в плоскости наложения ЭС при установленных V_i и f_i . К сожалению, предоставить весь спектр получаемых изображений на каждый цикл дыхания для каждого испытуемого И не представляется возможным. В этой

связи в таблице для иллюстрации приведен пример динамической визуализации вентиляции как стоп-кадр для момента максимального вдоха для каждого И.

Из таблицы видно, что ИИС МЭИТ позволяет выполнять регионарный мониторинг вентиляции легких человека (правого и левого в отдельности) в установленных диапазонах V_i и f_i . При этом незначительные отклонения изображений в правую или в левую стороны связаны с артефактами, вызванными несимметричным наложением ЭС на поверхность грудной клетки испытуемого. Данная особенность свойственна методу ЭИТ и требует дальнейших работ по минимизации отклонений. Пример динамической визуализации ВПО (стоп-кадр для момента максимального вдоха) приведен на рис. 4 (на частоте тока инъектирования 100 кГц) для И1 (рис. 4, а), И2 (рис. 4, б) и И3 (рис. 4, в).

Изображение ВПО является малодинамичным, что согласуется с теоретическими исследованиями и справочными данными, в соответствии с которыми у здорового человека коэффициент ВПО должен постоянно находиться на уровне 0,8–1 [9]. Любые отклонения или периодические изменения

свидетельствуют о наличии проблем с функцией внешнего дыхания. Так как в экспериментальных исследованиях принимали участие здоровые добровольцы без наличия патологий в функции внешнего дыхания, то изменений в значении ВПО не наблюдается. Данное обстоятельство подтверждается и показаниями пульсоксиметра (SpO₂) прикроватного монитора пациента, встроенного в медико-технический стенд. Для всех испытуемых значение SpO₂ не опускалось ниже 98–99% (положение стоя).

Заключение

По результатам проведенных экспериментальных исследований можно сформулировать следующие основные выводы.

1. Предложенные решения позволяют вести непрерывный длительный мониторинг вентиляции и ВПО лёгких человека (в том числе и регионарный) без необходимости выполнения дополнительных перенастроек ИИС МЭИТ. Единственной особенностью является потребность в периодическом мониторинге качества крепления ЭС и необходимость добавления электродного геля.

2. Работоспособность ИИС МЭИТ сохранялась в установленном диапазоне дыхательных объемов (от 500 мл до 4000 мл) и в заданном частотном диапазоне инжестируемого тока (от 50 кГц до 400 кГц). Все режимы работы ИИС МЭИТ, связанные с переключением частоты тока инжестирования, визуализацией изменений реконструированного поля проводимости, сохранением результатов измерения, отображением качества крепления электродов к телу испытуемого, программным мониторингом длительности исследования и др., находились в рабочем состоянии. Изменение степени функционирования ИИС МЭИТ и нестабильность в ее работе не наблюдались.

3. Предложенные решения позволяют длительно и непрерывно визуализировать

регионарную вентиляцию лёгких и ВПО (левого и правого лёгкого в отдельности). Данная информация адекватно отображается на экране ИИС МЭИТ и позволяет наблюдать в режиме реального времени за процессом регионарного воздухонаполнения легких.

Работы выполняются в рамках проекта СП-21.2019.4.

Список литературы

1. Пеккер Я.С., Бразовский К.С., Усов В.Н. Электроимпедансная томография. Томск: НТЛ, 2004. 192 с.
2. Blankman P., Shono A., Hermans B.J.M., Wesselius T., Hasan D., Gommers D. Detection of optimal PEEP for equal distribution of tidal volume by volumetric capnography and electrical impedance tomography during decreasing levels of PEEP in post cardiac – surgery patients. *British Journal of Anaesthesia*. 2016. Vol. 116. No. 6. P. 862–869.
3. Cinnella G., Grasso S., Raimondo P., D’Antini D., Mirabella L., Rausedo M., Dambrosio M. Physiological effects of the open lung approach in patients with early, mild, diffuse acute respiratory distress syndrome: An electrical impedance tomography study. *Anesthesiology*. 2015. Vol. 123. No. 5. P. 1113–1121.
4. Hough J.L., Shearman A.D., Liley H., Grant C.A., Schibler A. Lung recruitment and endotracheal suction in ventilated preterm infants measured with electrical impedance tomography. *Journal of Paediatrics and Child Health*. 2014. Vol. 50. No. 1. P. 884–889.
5. Bialka S., Copik M., Rybczyk K., Misiolok H. Electrical impedance tomography for diagnosis and monitoring of pulmonary function disorders in the intensive care unit – case report and review of literature. *Anaesthesiology intensive therapy*. 2017. Vol. 49. No. 3. P. 222–226.
6. Науменко Ж.К., Черняк А.В., Неклюдова Г.В., Чучалин А.Г. Вентиляционно-перфузионное отношение // *Практическая пульмонология*. 2018. № 4. С. 86–89.
7. Aleksanyan G. Experimental dependences of measurement data on the volume of inhaled air in multi-frequency electrical impedance tomography. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 5. No. 113. P. 39–50.
8. Aleksanyan G. Designing a bench for testing medically and technically an information and measuring system for multi-frequency electrical impedance tomography of human lungs. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 4. No. 112. P. 27–40.
9. Мирошкина Т.А., Шустова С.А., Пономарева И.Б. Вентиляционно-перфузионное отношение в норме и патологии // *Наука молодых (Eruditio Juvenium)*. 2020. Т. 8. № 3. С. 422–432. DOI: 10.23888/HMJ202083422-432.