

УДК 616.316+616.366]-003.7+611-018.54-073.584

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.43.4.027](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.43.4.027)

Использование метода лазерно-индуцированной спектроскопии для проведения анализа электролитов в сыворотке крови

С.В. Магомедова✉, С.З. Магомедсаидова

*Дагестанский государственный технический университет, Махачкала,
Российская Федерация*

Резюме. Анализ электролитов в сыворотке крови позволяет посредством показателей кальция, натрия и калия выявить патологическое состояние организма человека. Обозначенные показатели представляется возможным количественно измерить посредством спектроскопии (LIBS) для получения впоследствии более точных данных в числовых значениях. Цель исследования – формирование возможности более точного прогнозирования вероятных заболеваний посредством показателей натрия, кальция и калия в крови. Процесс исследования осуществлялся путем использования имеющихся биоматериалов, представленных лабораторией ИНВИТРО г. Махачкалы Республики Дагестан, которые впоследствии использовались в целях анализа электролитов в сыворотке крови на фильтровальной бумаге и предметных стеклах. В целях прогнозирования рассматриваемых концентрация калия, натрия и кальция посредством LIBS был применен метод частичной регрессии наименьших квадратов. Для образцов сыворотки более высокая точность прогнозирования с превосходной линейностью была достигнута как на предметных стеклах, так и на фильтровальной бумаге. Для сыворотки крови на предметных стеклах точность прогнозирования K, Na, Ca составила 1,45 %, 0,61 % и 3,80 %. Более того, для сыворотки крови на фильтровальной бумаге при существующих погрешностях составили 7,47 %, 1,56 % и 0,52 %. Результаты проведенного исследования показали, что портативные инструменты LIBS являются оптимальным инструментом для уточненных показателей калия, натрия и кальция в клинической практике в режиме реального времени.

Ключевые слова: сыворотка крови, клиническая практика, аналитический метод, реальное время.

Для цитирования: Магомедова С.В., Магомедсаидова С.З. Использование метода лазерно-индуцированной спектроскопии для проведения анализа электролитов в сыворотке крови. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2023;11(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1469> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.027

Using the laser-induced spectroscopy method to analyze electrolytes in blood serum

S.V. Magomedova✉, S.Z. Magomedsaidova

Dagestan State Technical University, Makhachkala, the Russian Federation

Abstract. The analysis of electrolytes in the blood serum helpsto identify the pathological state of the human body by means of indicators of calcium, sodium and potassium. It is possible to quantify the indicated indicators by means of spectroscopy (LIBS), which makes it possible to identify sufficiently accurate data in numerical values. The aim of the study is to form the possibility of a more accurate prediction of probable diseases by means of indicators of sodium, calcium and potassium in the blood. The research process was carried out by using the available biomaterials presented by the INVITRO laboratory of Makhachkala, the Republic of Dagestan, which were subsequently used for the analysis of electrolytes in blood serum on filter paper and slides. In order to predict the concentrations of potassium, sodium and calcium under consideration by means of LIBS, the method of partial least squares

regression was applied. For serum samples, higher prediction accuracy with excellent linearity was achieved both on slides and on filter paper. For blood serum on slides, the prediction accuracy of K, Na, Ca was 1,45 %, 0,61 % and 3,80 %. Moreover, for blood serum on filter paper with the existing errors were 7,47 %, 1,56 % and 0,52 %. Results. The results of the study suggest that LIBS portable tools will be an excellent tool for clinical practice in real time.

Key words: blood serum, clinical practice, analytical method, real time.

For citation: Magomedova S.V., Magomedsaidova S.Z. Using the laser-induced spectroscopy method to analyze electrolytes in blood serum. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1469> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.027 (In Russ.).

Введение

Функциональное назначение проведения тестов в лабораторных условиях состоит в обнаружении и предупреждении потенциальных заболеваний, на которые указывают нормативные показатели крови и прецеденты отклонения от нормы [1]. Данный аспект представляет особую важность для медицинской практики, так как позволяет предупреждать заболевания еще на начальном этапе и своевременно определить корректный курс лечения для пациента. По данным Министерства здравоохранения РФ, более 63,7 % всех заболеваний, которые в настоящее время удается предупредить, обнаруживаются в результате показателей тестирования крови. В отношении 43,4 % из них действия врачей оказались своевременными во избежание необратимых патологий в организме пациента. В частности, анализ жидкой части крови, которая в лабораторных целях остается непосредственно после свертывания ее клеточных элементов, является одним из наиболее востребованных методов определения широкого перечня заболеваний. На данные заболевания могут указывать показатели в сыворотке крови, которые свидетельствуют о происходящей в организме определенной патологии [1-3]. Таким образом, за счет анализа сыворотки крови в лабораторных условиях представляется возможным определить, прослеживаются ли в организме человека какие-либо процессы воспалительного характера, имеются ли у него определенные инфекции, обнаруживаются ли в его организме нарушения гормонального характера. Кроме того, лабораторные исследования сыворотки крови позволяют извлекать искомые сведения о характере функционирования сердца, печени и почек человека [4].

Диагностика осуществляется посредством выявления уровня различных химических веществ, среди которых исследуются электролиты. Исследование крови непосредственно на электролиты нацелено в отношении определения показателей кальция, калия, натрия и хлора. Так как соли обозначенных химических элементов имеют электрический заряд, то представляется возможным выявить с достаточной точностью причину ухудшения состояния человека за счет изменения электролитного баланса, который в нормальном состоянии обладает постоянными показателями. Обозначенные изменения в лабораторных условиях выявляются посредством лазерно-индуцированной спектроскопии (LIBS). Данный метод реализуется посредством портативного лазера, который в режиме реального времени позволяет достаточно точно в количественном значении определить показатели указанных химических элементов в сыворотке крови [5, 6]. Таким образом, лазерно-индуцированная спектроскопия позволяет получать достаточно точные показатели, указывающие на изменения в электролитном балансе, что предоставляет возможность для интенсивного диагностирования заболевания пациента и назначения ему терапевтических мероприятий [7, 8]. Основным преимуществом является быстрый бесконтактный анализ

любого материала, обеспечивающий уникальную универсальность и возможности определения состава в реальном времени [9, 10].

Целью настоящего исследования является формирование возможности более точного прогнозирования вероятных заболеваний посредством показателей натрия, кальция и калия в сыворотке крови человека.

Для достижения обозначенной цели в рамках исследования предполагается решить следующие задачи: 1) определить результативность данных, получаемых от корреляции между числом попаданий на единице пикселя ПЗС-детектора и энергией излучения; 2) выявить результативность данных в результате нанесения образцов сыворотки крови на фильтрованную бумагу; 3) выявить результативность данных в результате нанесения образцов сыворотки крови на предметные стекла; 4) сопоставить полученные данные между собой на предмет формирования возможности более точного прогнозирования вероятных заболеваний.

Имеющиеся на сегодняшний день данные отечественных и зарубежных источников отраслевой информации исследовательского характера указывают на то, что LIBS еще продолжительное время будет выполнять стратегическую роль при исследовании электролитов в сыворотке крови и других химических элементов, извлекаемых из крови человека [3, 4]. К примеру, Носкин Г.В. в процессе проведения идентичного исследования в клетках крови человека в 1987 году обнаружил достаточно точные показатели, относительная погрешность которых составила менее 9 %. Его исследование впервые показало, что применение LIBS целесообразно при определении отклонений в организме человека таких элементов, как натрий и калий [1]. Последующие исследования Понуровского Я.Я. и Надеждинского А.И. электролитов в сыворотке крови человека в лабораторных условиях посредством LIBS показали качество результатов на 10 % выше, чем у Носкина Г.В. [2]. Исследование Рогаткина Д.А., Лапаевой Л.Г. и Дунаева А.В. в 2010 году позволило выявить, что определенные метрологические измерения используемых в клинической практике приборов могут помочь выявить не только заболевания дифференциальных нозологических форм, но также и показатели относительно наличия подобных заболеваний в прогрессирующей фазе. Исследователи обнаружили, что использование спектров LIBS должно сопровождаться специальными алгоритмами, которые позволяют более точно определять диагностическое заключение проведенного анализа, в том числе в сыворотке крови [4]. В целом спектроскопические методы, включая метод LIBS для определения характеристик биологических материалов, позволяют осуществлять минеральный анализ в разных органах тела человека, анализ различных тканей, выявлять характеристику дифференциальных типов камней, которые образуют в организме человека, а также проводить анализ аэрозолей биологического характера [11]. Метод LIBS допускает напрямую измерять концентрацию электролита в клетке. Полезность спектров LIBS в исследованиях ограничена. Существуют результаты исследований, которые указывают, что клиническую значимость спектров LIBS следует оценивать по площади пика, а не по пиковой интенсивности. Методы LIBS могут быть перспективным инструментом для анализа небольшой группы живых клеток [12].

Из приведенных выше работ можно обнаружить, что лазерно-индуцированная деградационная спектроскопия является оптимальным методом измерения показателей в сыворотке крови. Однако подобный анализ целесообразно осуществлять преимущественно в лабораторных и клинических условиях, когда предполагается выявить показатели в отношении незначительного числа пациентов. В целях повышения лабораторной точности в отношении количественных показателей рассматриваемых химических элементов в целом в клинической практике и в рамках настоящего исследования использовался метод частичной регрессии наименьших квадратов (ЧРНК).

Материалы и методы

Данное исследование проводилось в период с 10 августа по 12 сентября 2023 года с применением биологических материалов медицинской лаборатории ООО «ИНВИТРО – Объединенные коммуникации», расположенной в городе Махачкала Республики Дагестан. Все исследуемые участники подписали форму информированного согласия на исследование.

В качестве методов проведения исследования применялись аналитический метод, а также метод статистического анализа. Для осуществления указанных видов анализа необходимо было применить стандартные методики сбора образцов крови. Следует отметить, что стандартный метод исследования плазмы крови предполагает возможность анализа в течение первых 10-15 минут после взятия образца у пациента, что способствует интенсификации действий сотрудника лаборатории и потенциально приводит к вероятности совершения им ошибок при нарушении процедуры исследования. Поэтому был использован метод Libs, представляющий собой превосходную альтернативу стандартному методу для проведения анализа электролитов в сыворотке крови. Его неинвазивность, высокая точность и быстрота результатов, а также экономическая эффективность делают его оптимальным выбором для проведения анализа электролитного статуса пациентов и проведения научных исследований в данной области.

Эталонные образцы были взяты в лаборатории ООО «ИНВИТРО – Объединенные коммуникации», расположенной в городе Махачкала Республики Дагестан. Статистический анализ позволяет рассчитать различные показатели, и впоследствии на основе полученных данных, применяя метод анализа, возможно просчитать прогнозные показатели и отобразить их в графическом виде.

На основе данных статистического анализа стало возможным применить методику графического анализа для выявления возможности составления прогнозных данных в отношении вероятных заболеваний посредством показателей натрия, кальция и калия в сыворотке крови человека.

Рассматриваемое исследование проводилось посредством системы лазерно-индуцированной спектроскопии. В качестве абляционного источника света использовалось портативное устройство YAG-лазер (КНР). Технические характеристики применяемого устройства были следующими: энергия импульса – 7 мДж, длина волны с флуктуацией энергии – 0,8 %. При частоте следования 10 Гц длительность лазерного импульса меньше на 2 нс. Стоит добавить, что на исследуемом образце непосредственно лазерный луч проявлялся посредством кварцевой линзы с фокусным расстоянием 60 мм. Плазменное излучение фокусировалось на раздвоенном оптоволоконном кабеле парой плоско-выпуклых линз. Волокно было подключено к шестиканальному волоконно-оптическому спектрометру (Многоканальный AvaSpec, Avantes, NLD, Апелдорн, Нидерланды) с учетом спектрального разрешения 0,08 ~ 0,11 нм, диапазон которого составил 220 ~ 880 нм. Выявляемые сигналы фиксировались непосредственно ПЗС-детекторами с наименьшей шириной затвора 2 мс. За отражающим зеркалом был установлен детектор фотодиодов для контроля оставшихся лазерных импульсов и запуска спектрометра. Образцы удерживались на моторизованном столике, вращающемся на 360°, чтобы обновить целевую точку и избежать разрушения образца. Все исследования проводились на воздухе без какого-либо контроля окружающей атмосферы.

Детекторы на основе ПЗС (ПЗС-детекторы) способны накапливать электроны, которые, в свою очередь, были сгенерированы фотонами, падающими на светочувствительную поверхность. Оставшийся заряд передается в буфер в конце

интервала времени управляемого принципа (времени интегрирования), впоследствии обозначенный сигнал поступает в аналогово-цифровой преобразователь.

ПЗС-детекторы на сегодняшний день обладают большим динамическим диапазоном, ограничительные рамки которого составляют скорость АЦП и темновый (термический) ток. Преимуществом ПЗС-детекторов выступают значительное число пикселей, скорость и высокая чувствительность. Их ведущим недочетом является низкое соотношение шум/сигнал.

Чувствительность пикселя ПЗС-детектора при длине волны 500 нм устанавливается как электрическая мощность, освобождаемая с детектора, на определенную единицу падающего на обозначенный пиксель излучения.

Корреляция между числом попаданий на единицу пикселя ПЗС-детектора и энергией излучения, попадающей в оптическую скамью, обуславливается конфигурацией непосредственной оптической скамьи. Результативность зависит от применяемой дифракционной решетки, размера щели или диаметра оптического волокна, параметров зеркала и применения цилиндрических собирающих линз, установленных на линейки детекторного типа.

Данные 53 индивидуальных образцов сыворотки крови человека были получены из медицинской лаборатории ИНВИТРО в г. Махачкале. Заявленные образцы сыворотки крови изначально наносились на фильтровальную бумагу, а также предметные стекла, соответственно. Используемая фильтровальная бумага соотносилась с требованиями GB/T 1914-2017. Впоследствии исследуемые образцы подлежали сушке в течение десяти минут в лабораторных условиях. При этом следует обозначить, что каждый исследуемый образец сыворотки крови на разных опорах применялся лишь однажды. В целях обеспечения отсутствия каких-либо помех на носителях, используемую бумагу и стекла измеряли, а затем вычитали полученные показатели из спектров образцов. При проведении исследования, применяемый спектрометр запускался посредством лазерного импульса с интервалом 1,3 мкс. В целях повышения репродуцируемых измерений в отношении каждого образца снималось десять спектров, каждый из которых показывал среднее значение – 50 лазерных импульсов. Обозначенные спектры в рамках исследований с образцами сыворотки крови представлены на Рисунке 1.

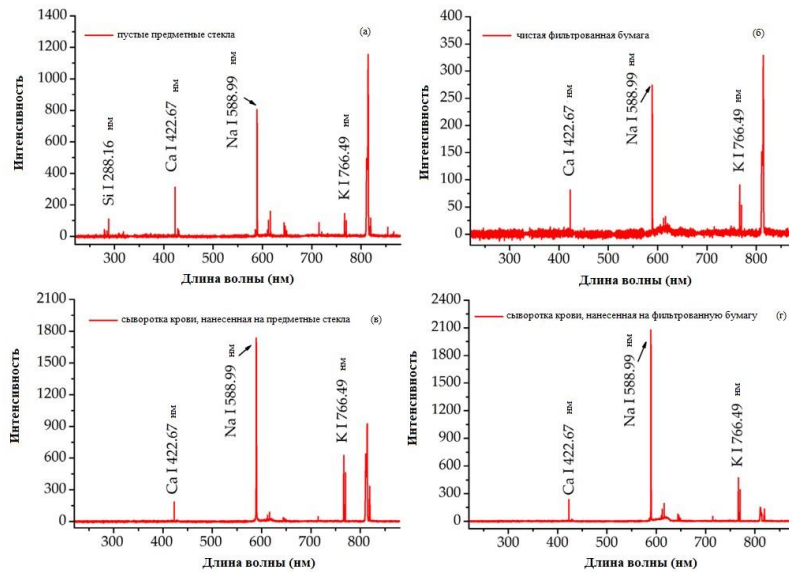


Рисунок 1 – Спектры LIBS образцов и их пустые опоры: а) пустые предметные стекла; б) чистая фильтровальная бумага; в) сыворотка крови, нанесенная на предметные стекла; г) сыворотка крови, нанесенная на фильтровальную бумагу
Figure 1 – LIBS spectra of samples and their blank supports: a) empty slides; b) clean filter paper; c) blood serum applied to glass slides; d) blood serum applied to filter paper

Отсутствие влияния предметного стекла непосредственно на спектр сыворотки было выявлено путем сравнительного анализа на пустом предметном стекле и на стекле с сывороткой крови. Однако в отношении фильтровальной бумаги результаты исследования показывают в некоторой степени иную лабораторную картину, а именно концентрация рассматриваемых химических элементов зависят от качества подложки фильтровальной бумаги. Стоит отметить, что обозначенное качество подложки может влиять на показатели кальция, натрия и калия, однако подобное влияние незначительно. При последующем анализе сыворотки крови на дифференциальных средах становилось целесообразным удалять фильтровальную бумагу в качестве носителя, так как показатели исследуемых спектров сыворотки крови отражали различные числовые значения.

Результаты и обсуждение

Итак, рассмотрим количественные показатели метода в результате применения метода частичной регрессии наименьших квадратов. Спектроскопия позволяет получить достаточно точные данные [6]. Рассматриваемый метод подразумевает определенный алгоритм линейной регрессии, который конструируется посредством применения элементов многомерного анализа [8]. В обозначенном анализе проблемные вопросы мультиколлинеарности представляется возможным исключить путем трансформации исходных показателей входного параметра непосредственно в сопутствующие переменные, которые впоследствии приводят к образованию коэффициентов искомой регрессии [7].

Дополнительным компонентом исследования является обстоятельство, при котором более 50 спектров сыворотки, выявленных случайным образом, выступали в качестве составляющих обучающего набора. Оставшийся спектр в ходе исследования выполнял роль тестового набора. В целях применения входных данных были взяты за основу показатели всех линий спектров нормированного значения. Путем преобразования матрицы X были трансформированы показатели характерных линий,

которые отразили интенсивность нормированных значений. При этом эталонные концентрации рассматриваемых химических элементов, которые представлялось возможным получить посредством использования анализатора электролитов, были впоследствии трансформированы в матрицу Y. Обозначенные матрицы непосредственно в обучающем наборе использовались в целях обучения искомой модели частичного регрессионного анализа наименьших квадратов. Соответственно, в обозначенном случае была сконструирована модель сывороточной частичной регрессии наименьших квадратов непосредственно на предметном стекле.

На Рисунке 2 представлена дисперсия посредством одиночных уровней (LV) и кумулятивных уровней (LVs) для двух обозначенных матриц X и Y. На Рисунке 3а представлена информация относительно выявленных расхождений при превышении кумулятивных уровней на 9 пунктов. Абсолютное большинство данных дисперсионного характера в отношении матрицы X было аргументировано кумулятивными уровнями. Однако данные относительно дисперсии для рассматриваемой матрицы Y накопила 12 кумулятивных уровней и, таким образом, увеличилась до 80 %, как представлено на Рисунке 2б. В целом количество кумулятивных уровней в пределах от 12 до 20 подлежало оптимизации и адаптации, в соответствии с моделью частичного регрессионного анализа наименьших квадратов.

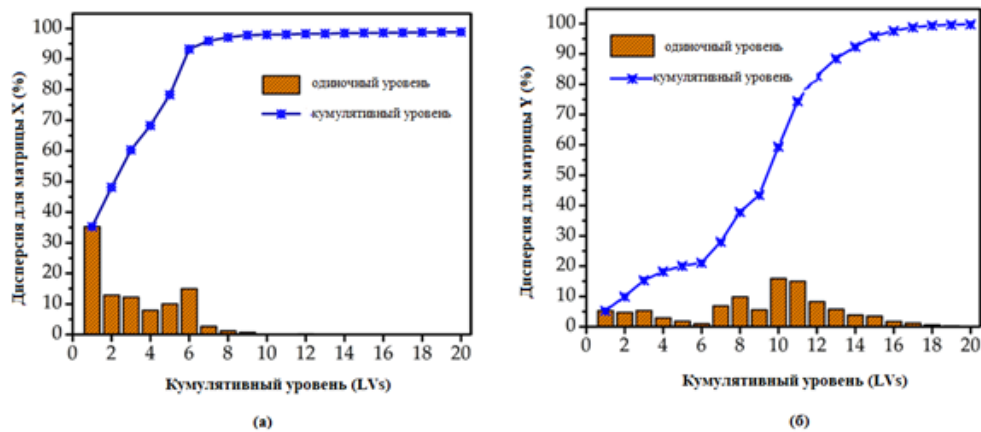


Рисунок 2 – Дисперсия, отождествляемая уровнями (LV) и кумулятивными уровнями (LVs): а) Дисперсии для матрицы X. б) Дисперсии для матрицы Y

Figure 2 – Description of variance explained by levels (LV) and cumulative levels (LVs): a) Explanation of variance for matrix X. b) Explanation of variance for matrix Y

Необходимо обратить внимание, на то, что на Рисунке 3 представлена оптимизация количества (LVs). Средние ошибки прогнозирования тестовой выборки были рассчитаны по модели ЧРНК с дифференциальным числом (LVs). Диапазон количества исследуемых участников существенно влияет на количество прогнозируемых ошибок. Таким образом, представляется важным обеспечение в исследовательских целях наибольшего количества участников для выявления конкретных ошибок при прогнозировании. Однако средняя погрешность прогноза резко возросла, когда количество (LVs) было увеличено до 19. Это может быть связано с переобучением меньшим группам данных в обучающем наборе. Поэтому оптимальный параметр ЧРНК был зафиксирован на уровне 16 (LVs) для его меньшей погрешности и меньшей вычислительной нагрузки.

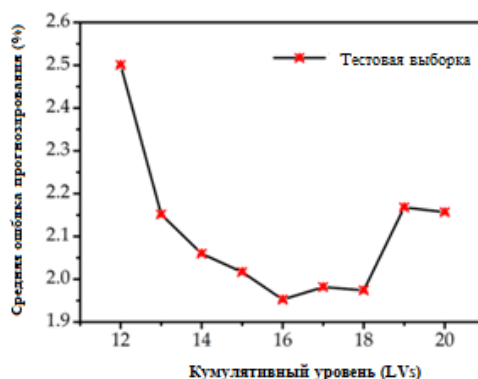


Рисунок 3 – Средняя погрешность прогноза при разном количестве Lvs
Figure 3 – Average forecast error for different numbers of Lvs

Следует отметить, что медицинский анализатор электролитов позволил выявить искомые эталонные концентрации исследуемых химических элементов. При этом LIBS позволил измерить прогнозируемые концентрации частичного регрессионного анализа наименьших квадратов. Таким образом, корреляция между эталонной и прогнозируемой концентрацией была сконструирована посредством модельной кривой $y = x$. Посредством обозначенной кривой стало возможным выявить, что концентрация исследуемых химических элементов в целом соответствовала эталонным показателям. Как обозначено в Таблице 1, достоверная точность ожидаемых прогнозов в отношении рассматриваемых химических элементов, а именно калия, натрия и кальция составила 1,45 %, 0,61 % и 3,80 %. Таким образом, модель частичного регрессионного анализа наименьших квадратов доказала свою способность выявлять уточненные данные в процессе исследования.

Таблица 1 – Результаты проведенного исследования на предметных стеклах в отношении сыворотки крови с применением тестового набора
Table 1 – Results of the study of blood serum on glass slides using the test kit

Целевой элемент	Контрольная концентрация (ммоль/л)	Прогнозируемая концентрация (ммоль / л)	Точность (%)
K	4.23	4.19	1.42
Na	144.58	143.69	0.58
Ca	1.12	1.12	3.78

Уточненные данные исследуемых химических элементов были получены путем размещения на предметные стекла и с использованием оптимальных результатов частичного регрессионного анализа наименьших квадратов.

Исходя из Таблицы 1 представляется возможным обозначить, что наибольшая точность полученных данных указана в отношении кальция, наименьшая – в отношении натрия. Обозначенные показатели могут одновременно указывать как на наличие более высокой концентрации кальция в сыворотке крови, так и на повышенные показатели данного химического элемента в организме участника. В совокупности контрольная и прогнозируемая концентрации химических элементов в незначительной степени различаются между собой. Это указывает, что проведение исследования путем использования фильтровальной бумаги целесообразно и может обеспечивать достаточную точность искомых результатов.

Данные из Таблицы 2 показывают, что наибольшая точность отражена в отношении калия, наименьшая – в отношении кальция. При этом контрольная и прогнозируемая концентрации заметно отличаются друг от друга по числовым показателям. Данный аспект указывает на достаточно избирательную достоверность при использовании фильтровальной бумаги.

Таблица 2 – Результаты проведенного исследования на фильтровальной бумаге в отношении сыворотки крови с применением тестового набора

Table 2 – Results of blood serum analysis on filter paper using a test kit

Целевой элемент	Контрольная концентрация (ммоль / л)	Прогнозируемая концентрация (ммоль / л)	Точность (%)
K	4.26	3.94	7.47
Na	145.60	143.33	1.56
Ca	1.11	1.12	0.52

Следует отметить, что результаты, представленные в Таблицах 1 и 2, указывают на то, что точный анализ электролитов сыворотки может быть достигнут с использованием лазерно-индуцированной спектроскопии пробоя и метода частичной регрессии наименьших квадратов. Однако необходима дальнейшая работа для повышения точности определения частиц сывороточного кальция, нанесенных на предметные стекла, и компонентов сывороточного калия, обнаруженных на фильтровальной бумаге. В случае нанесения сыворотки на предметные стекла само предметное стекло не удалялось лазером. Низкая концентрация кальция в исследуемой сыворотке крови привела к менее точным показателям данного химического элемента. При этом нанесенные на фильтровальную бумагу исследуемая сыворотка крови и подложка последовательно удалялись посредством лазера. Вероятный фактор отрицательного изменения выявленных предикторов послужил источником для затухания К-линии примерно на треть при длине 766,49 нм. Клиническая картина выявленных показателей относительно низкой концентрации кальция для исследуемого участника может означать гипокальциемию, которая зачастую прослеживается при наличии существенных нарушений обмена.

Заключение

Применение метода лазерно-индуцированной спектроскопии в рамках настоящего исследования дополнительно подтвердила возможность получения уточненных данных относительно искомого кальция, натрия и калия. В частности, показатели калия важны для определения стабильности функционирования нервной системы и уровня сахара в крови. Показатели натрия как электролита позволяют определить, как функционирует сердце человека, в каком состоянии находится его электролитный баланс, кровяное давление, а также водный баланс. Определение показателей кальция указывает на функционирование костной системы человека. Обозначенные данные не носят исчерпывающий характер, что усиливает важность применения рассматриваемого в настоящем исследовании метода.

Наиболее точное прогнозирование посредством спектроскопии достигается при использовании частичной регрессии в отношении наименьших квадратов для исследуемых образцов сыворотки крови. Таким образом, искомые результаты прогнозирования электролитного баланса на основе показателей рассматриваемых химических элементов составили 0,61 %; 1,45 % и 3,80 % для сыворотки на предметных стеклах и 1,56 %; 7,47 % и 0,52 % на фильтровальной бумаге. При этом применение LIBS

на основе полученных показателей уточненного характера соотносится с требованием индекса обнаружения здоровья человека, под которым подразумеваются подтвержденные нормативные показатели после проведенного соответствующего медицинского осмотра. Чтобы сообщить о результатах на различных средах, в этой статье также представлено влияние предметных стекол и фильтровальной бумаги на прогнозируемые концентрации. При измерении LIBS необходимо выбирать подходящий носитель в зависимости от типа и концентрации целевого компонента. Использование портативного лазера для точного количественного анализа сыворотки также продемонстрировало в данной статье возможность использования портативного LIBS в клинической практике в режиме реального времени.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Носкин В.А. Лазерная корреляционная спектроскопия квазиупругого рассеяния. *Успехи физических наук*. 1987;153(10): 358–360.
2. Надеждинский А.И., Понуровский Я.Я. Работы по аналитическому использованию диодной лазерной спектроскопии в Институте Общей Физики РАН. *ЖАХ*. 2018;2(73):153–158.
3. Рогаткин Д.А, Дунаев А.В, Лапаева Л.Г. Метрологическое обеспечение методов и приборов неинвазивной медицинской спек-трофотометрии. *Медицинская техника*. 2010;(2):30–37.
4. Лапитан Д.Г., Рогаткин Д.А. Функциональные исследования системы микроциркуляции крови методом лазерной доплеровской флоуметрии в клинической медицине: проблемы и перспективы. *Альманах клинической медицины*. 2016;44(2):249–259. DOI: 10.18786/2072-0505-2016-44-2-249-259.
5. Соснин Д.Ю., Фалков Б.Ф., Ненашева О.Ю. Оценка правильности распознавания клеток системой автоматического анализа крови Vision Нема. *Уральский медицинский журнал*. 2012;105(13):131–135.
6. Илларионова Е.А., Сыроватский И.П. Фотометрия. *Теоретические основы метода. Практическое применение метода. Учебное пособие*. Иркутск; 2013. 83 с.
7. Соснин Д.Ю., Ненашева О.Ю., Кубарев О.Г. Автоматизированные системы анализа мазков крови и гематологические анализаторы – конкуренты или партнеры? *Лаборатория ЛПУ*. 2014;4:34–37.
8. *Гематологические анализаторы. Интерпретация анализа крови: Методические рекомендации*. М.-Тверь: «Издательство «Триада»; 2012.
9. Вебстер Дж. Г., Камышко И.В., Калашник Д.А. *Медицинские приборы. Разработка и применение*. М.: Медицинская книга; 2015. 720 с.
10. Комаров Г.Д. *Полисистемный саногенетический мониторинг*. М.: МИПКРО; 2001. 74 с.
11. Singh V.K., Rai A.K. Prospects for laser-induced breakdown spectroscopy for biomedical applications: a review. *Lasers Med Sci*. 2021;26(5):673–687.
12. Winnand P., Boernsen K.O., Bodurov G., Lammert M. Evaluation of electrolyte element composition in human tissue by laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS). *Sci Rep*. 2022;12(1):163–181.

REFERENCES

1. Noskin V.A. Laser correlation spectroscopy of quasielastic scattering. *Advances in physical sciences*. 1987;153(10):358–360. (In Russ.).

2. Nadezhdinsky A.I., Ponurovsky Ya.Ya. Work on the analytical use of diode laser spectroscopy at the Institute of General Physics of the Russian Academy of Sciences. *ZHAKH*. 2018;73(2):153–158. (In Russ.).
3. Rogatkin D.A., Dunaev A.V., Lapaeva L.G. Metrological support of methods and devices for non-invasive medical spectrophotometry. *Medical equipment*. 2010;(2):30–37. (In Russ.).
4. Lapitan D.G., Rogatkin D.A. Functional studies of the blood microcirculation system using laser Doppler flowmetry in clinical medicine: problems and prospects. *Almanac of Clinical Medicine*. 2016;44(2):249–259. DOI: 10.18786/2072-0505-2016-44-2-249-259. (In Russ.).
5. Sosnin D.Yu., Falkov B.F., Nenasheva O.Yu. Assessment of the correctness of cell recognition by the automatic blood analysis system Vision Hema. *Ural Medical Journal*. 2012;105(13):131–135. (In Russ.).
6. Illarionova E.A., Syrovatsky I.P. Photometry. *Theoretical foundations of the method. Practical application of the method. A textbook. Tutorial*. Irkutsk; 2013. 83 p. (In Russ.).
7. Sosnin D.Yu., Nenasheva O.Yu., Kubarev O.G. Automated blood smear analysis systems and hematology analyzers – competitors or partners? *Laboratoriya LPU*. 2014;4:34–37. (In Russ.).
8. *Hematological analyzers. Interpretation of blood tests: Guidelines*. M.-Tver: Triada Publishing House LLC; 2012. (In Russ.).
9. Webster J.G., Kamyshko I.V., Kalashnik D.A. *Medical devices. Development and application*. Moscoe, Meditsinskaya kniga; 2015. 720 p. (In Russ.).
10. Komarov G.D. *Polysystemic sanogenetic monitoring*. Moscow, MIPKRO; 2001. 74 p. (In Russ.).
11. Singh V.K., Rai A.K. Prospects for laser-induced breakdown spectroscopy for biomedical applications: a review. *Lasers Med Sci*. 2021;26(5):673–687.
12. Winnand P., Boernsen K.O., Bodurov G., Lammert M. Evaluation of electrolyte element composition in human tissue by laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS). *Sci Rep*. 2022;12(1):163–181.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Магомедова Сабина Владимировна, аспирантка
Дагестанского государственного технического
университета, Махачкала, Российская Федерация.
e-mail: djami_ramazanova@mail.ru

Sabina V. Magomedova, Postgraduate
Student, Dagestan State Technical
University, Makhachkala, the Russian
Federation.

Магомедсаидова Сарат Загидовна, старший
преподаватель кафедры радиотехники и
микроэлектроники Дагестанского государственного
технического университета, Махачкала, Российская
Федерация.
e-mail: sarat.66@mail.ru

Sarat Z. Magomedsaidova, Senior
Lecturer at the Department of Radio
Engineering and Microelectronics,
Dagestan State Technical University,
Makhachkala, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 27.10.2023; одобрена после рецензирования 05.12.2023;
принята к публикации 25.12.2023.*

*The article was submitted 27.10.2023; approved after reviewing 05.12.2023;
accepted for publication 25.12.2023.*