
ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ

Л.А. Щербаченко, В.С. Борисов, Ю.Т. Эйне

Кафедра общей физики иркутского государственного университета
ул. Карла Маркса, 1, Иркутск, Россия, 664003

**В.Г. Лалетин, А.В. Белоногов, Е.С. Барышников,
П.А. Краснов, Н.Н. Давыдова,
О.Н. Грибачева**

Кафедра госпитальной хирургии с курсом онкологии
Иркутский государственный медицинский университет
Иркутский областной онкологический диспансер
ул. Красного восстания, 1, Иркутск, Россия, 664003

Исследованы особенности электрофизических свойств многокомпонентных гетерогенных систем, содержащих полярную жидкую фазу и электрически активные твердые включения, на примере венозной крови человека. Обнаружены естественные электретные свойства данной биологической системы, проявление которых обусловлено интенсивным накоплением зарядов на межфазных границах под действием внутреннего электрического поля. Особое внимание уделяется изменению структуры водной компоненты плазмы крови вблизи поверхности клеточных мембран. В области температур (20—220) °С обнаружены низкотемпературные максимумы тока, динамика которых одинакова для всех групп крови, и серия высокотемпературных пиков, отражающих индивидуальные свойства изучаемого биоэлектрета. Впервые введены электрофизические параметры, позволяющие наиболее полно охарактеризовать электрофизические свойства крови различных групп.

Ключевые слова: физические методы медицинской диагностики, термостимулированная спектроскопия, биофлюид, кровь человека, электретный эффект, ионный транспорт, клеточные мембраны, белки, связанная вода.

В последнее время большое количество публикаций посвящено изучению электретного эффекта и ионного транспорта в биологических объектах [1—5]. Вместе с тем на данный момент исследования влияния внутренних электрических полей биоэлектретов на их функционирование проведены недостаточно полно. В работах [1—5] получены некоторые результаты по изучению электретного эффекта в крови человека, которая, как известно, представляет собой один из главных объектов медицинской физики и биофизики. Кровь человека с физической точки зрения является конденсированной системой, состоящей из плазмы, которая содержит большое количество воды, и клеток крови, покрытых мембранами с высокоразвитой поверхностью. В зоне контакта клеточных мембран и водной компоненты плазмы реализуются процессы межфазного электрического взаимодействия между заряженными дефектами на поверхности твердой фазы и полярными молекулами воды, что приводит к накоплению в системе электретной энергии.

В данной работе исследуется термическое разрушение электретного состояния крови человека с целью выявления ее основных структурных особенностей.

Особое внимание уделяется изменению структуры жидкой фазы вблизи заряженной поверхности клеточных мембран в крови человека, а также изучению влияния физически неоднородной воды, в том числе и наиболее структурированной, на свойства данной системы.

Подготовка образцов и методика эксперимента. Объектом исследования является венозная кровь человека различных групп, взятая у доноров и классифицируемая согласно системе АВ0. Изучаемые образцы помещались в специально сконструированную ячейку, представляющую собой плоский конденсатор объемом $0,12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ с двумя алюминиевыми электродами, обработанными этиловым спиртом. Один из электродов дополнительно покрывался тонкой фторопластовой пленкой с высоким омическим сопротивлением. Промежуток времени между взятием пробы крови и началом измерений не превышал 15 минут.

Термостимулированные токи (ТСТ) в интервале температур от $20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $220 \text{ }^\circ\text{C}$ регистрировались с помощью высокоточного цифрового вольтметра-электронметра В7-49 с погрешностью измерения тока 10^{-15} А при линейном нагреве образца со скоростью, не превышающей 1 град/мин , и при отсутствии внешнего напряжения на электродах измерительной ячейки [6, 7]. В связи с этим динамика наблюдаемых спектров термостимулированных токов (ТСТ) зависит только от распределения внутренних электрических полей в исследуемой системе. Используемая нами экспериментальная методика имеет ряд преимуществ: 1) полученные термостимулированные спектры характеризуются значительной величиной тока порядка (10^{-8} — 10^{-7}) А, в то время как флуктуации тока составляют 10^{-12} А ; 2) низкая скорость нагрева (1 град./мин.) обеспечивает отсутствие градиентов температуры в исследуемых образцах, что является необходимым условием для получения информативных и достоверных токовых спектров; 3) начальная емкость и проводимость исследуемых образцов венозной крови контролировались методом диэлектрической спектроскопии и были строго идентичны для каждой группы крови.

Обсуждение экспериментальных результатов. Кровь человека с физической точки зрения является коллоидной системой, состоящей из полярной жидкой матрицы (плазмы и цитоплазмы) и взвешенных в ней как нейтральных (белки, аминокислоты), так и электрически активных твердых включений (красные кровяные тельца) [4]. В связи с тем, что красные кровяные тельца имеют размеры порядка нескольких микрон и характеризуются высокой объемной концентрацией, суммарная площадь контакта заряженной поверхности мембран этих клеток и полярной жидкой фазы достигает значительной величины. Это обуславливает высокую интенсивность межфазного электрического взаимодействия между зарядами на поверхности твердой фазы и полярными молекулами жидкой среды, приводящего к возникновению внутреннего электрического поля в изучаемой системе. Под действием этого поля на межфазных границах происходит неоднородное изменение структуры жидкой компоненты крови человека и появление в ней областей связанной воды [6—9].

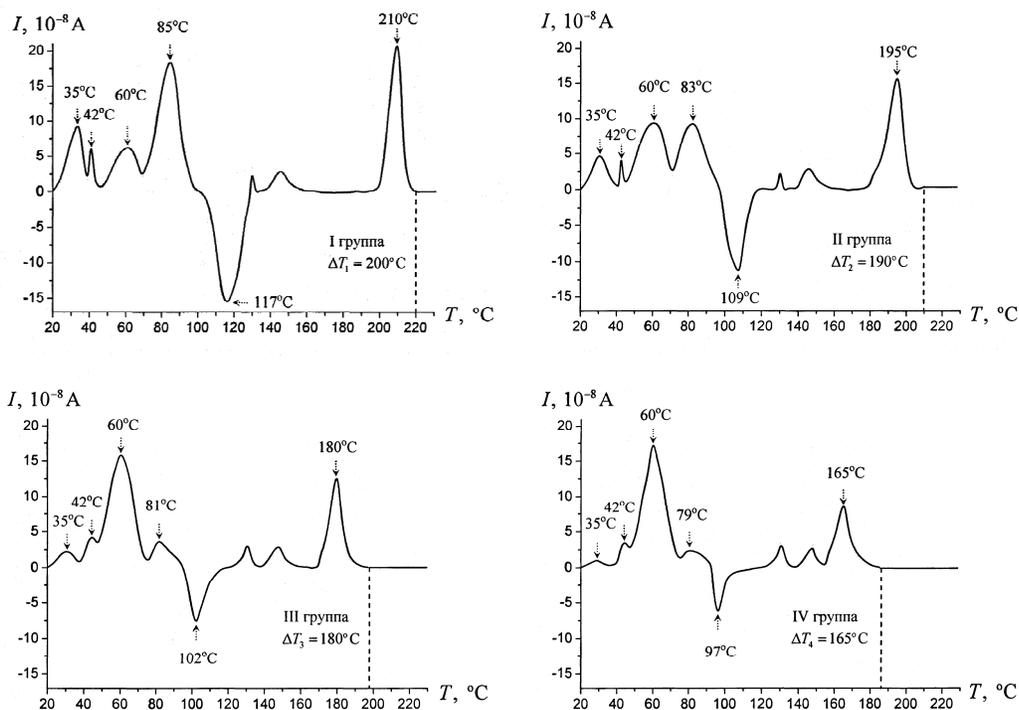


Рис. 1. Токковые термограммы венозной крови I—IV групп

На рис. 1 представлены токовые термограммы венозной крови человека I—IV групп, характеризующиеся наличием серии локальных максимумов тока, что свидетельствует о накоплении и термическом высвобождении объемного заряда в данном биофлюиде и проявлении его электретных свойств. При нагреве изучаемой системы происходит диссоциация молекул водной компоненты, а также термический выход заряженных дефектов из потенциальных ловушек твердой фазы в жидкую среду. Образующиеся при этом свободные ионы движутся под действием внутреннего электрического поля в каналах ионной проводимости и образуют термостимулированный ток. Поскольку до начала процесса термоактивации свободные ионы являлись частью структуры исследуемой системы, динамика термостимулированных токов позволяет изучать структурные особенности всей системы в целом, а также ее отдельных компонентов.

Возникновение термостимулированных токов в рассматриваемой коллоидной системе при отсутствии внешнего напряжения на электродах является доказательством образования внутренней разности потенциалов между этими электродами, наличия каналов ионной проводимости, а также свободных носителей заряда, источником которых являются как полярная матрица, так и заряды на поверхности твердой фазы. Формирование изолированных максимумов на полученных спектрах (рис. 1) связано с релаксацией носителей заряда определенного типа, которые входят в структуру рассматриваемой системы.

На токовых термограммах венозной крови четко выражены две температурные области (см. рис. 1). В низкотемпературной области (20—70) °C наличие

токовых максимумов при температурах $T_1 = 35\text{ }^\circ\text{C}$ и $T_2 = 60\text{ }^\circ\text{C}$ связывается нами с накоплением зарядов вблизи поверхности клеточных мембран под действием внутреннего электрического поля, а также со структурными особенностями водной компоненты крови человека [1—4]. Особо отметим, что динамика и температурное положение этих максимумов неизменны и не зависят от группы крови.

Максимум термостимулированного тока при $35\text{ }^\circ\text{C}$ для крови I группы почти на порядок превышает аналогичный максимум для IV группы, что свидетельствует о большей концентрации зарядов (ионов свободной воды), накопленных на межфазных границах и в объеме исследуемой системы. Мы считаем, что увеличение амплитуды максимума тока при $35\text{ }^\circ\text{C}$ для крови I группы связано с наличием максимальной концентрации молекул свободной воды в данной системе.

Релаксационный максимум при постоянной температуре $60\text{ }^\circ\text{C}$ (см. рис. 1), не зависящей от группы крови, связывается с наличием структурированной воды в данной биологической системе [2—4]. Под действием электрического поля, создаваемого поверхностью клеточных мембран, молекулы воды, непосредственно контактирующие с ней, образуют упорядоченную структуру. При температуре $60\text{ }^\circ\text{C}$ происходит переход связанной воды в объемное состояние в связи с тепловым разупорядочением молекул жидкой фазы. Установлено, что наибольшая интенсивность токового максимума при этой температуре наблюдается для крови IV группы. В связи с этим мы отмечаем, что в коллоидной системе крови человека IV группы количество воды, находящейся в связанном состоянии, является наибольшим по сравнению с другими группами. В свою очередь, наиболее сильное изменение структуры жидкой фазы в крови IV группы является доказательством более высокой электрической активности клеточных мембран для этой группы. Подтверждением этого является повышение энергии активации носителей заряда в указанной области температур от $0,48\text{ эВ}$ до $0,59\text{ эВ}$ в ряду I—IV групп, что обусловлено увеличением энергии закрепления указанных зарядов за счет взаимодействия с поверхностью твердой фазы. Как следует из рис. 1, ширина температурного интервала релаксации термостимулированных токов уменьшается в ряду I—IV групп от $\Delta T_1 = 200\text{ }^\circ\text{C}$ до $\Delta T_4 = 165\text{ }^\circ\text{C}$, что обусловлено наименьшей концентрацией молекул свободной воды в крови человека IV группы.

Термостимулированный ток небольшой величины, релаксация которого наблюдается на спектрах ТСТ в интервале температур $(41\text{—}44)\text{ }^\circ\text{C}$ (см. рис. 1), предположительно обусловлен разрушением наименее устойчивой четвертичной структуры белков плазмы, таких как альбумины, глобулины и фибриноген. Четвертичная структура, представляющая объединение нескольких молекул с третичной организацией, ответственна за проявление некоторых специфических функций белков, например, переноса кислорода к тканям.

В области более высоких температур $(70\text{—}210)\text{ }^\circ\text{C}$ обнаружена серия разнополярных максимумов тока, которые в отличие от низкотемпературных проявляют зависимость от группы крови. Мы полагаем, что наличие этих максимумов на спектрах ТСТ изучаемой коллоидной системы связано с термическим разру-

шением различных уровней структуры белков крови, индивидуальных для каждой группы.

Интенсивная релаксация заряда в интервале температур (79—85) °С, вероятно, объясняется термической денатурацией белков крови и разрушением их третичной структуры, что согласуется с результатами, полученными в работах [1—4]. Этот процесс, как известно, сопровождается разрывом преимущественно нековалентных π -связей, образующихся между атомами серы двух различных аминокислот в полипептидной цепи белка, в результате чего в жидкую среду попадают свободные ионы и заряженные группы.

Следующая серия изолированных максимумов тока отрицательной полярности в области температур (87—120) °С, по всей видимости, обусловлена разрушением вторичной структуры молекул белков, которая формируется за счет образования водородных связей между остатками карбоксильной и аминной групп разных аминокислот [10]. Выявлено, что температурное положение максимума тока в интервале (87—120) °С соответствует 117 °С (I группа), 109 °С (II группа), 102 °С (III группа) и 97 °С (IV группа). Полярность данного максимума тока для I, II и IV групп отрицательна, а для III группы может быть как отрицательной, так и положительной.

Высокотемпературный изолированный максимум тока, наблюдаемый в области (165—210) °С, предположительно связан с термическим распадом первичной структуры белков за счет разрыва прочных ковалентных σ -связей между аминокислотами. Температурное положение указанного максимума тока соответствует 210 °С (I группа), 195 °С (II группа), 180 °С (III группа) и 165 °С (IV группа), что позволяет судить о большей термической устойчивости полипептидных цепей белков крови I группы.

Таким образом, температурное положение и амплитуда максимумов тока в области температур (70—210) °С уменьшаются в ряду I—IV групп, что обусловлено отличием порядка чередования аминокислот в полипептидной цепи белков для различных групп крови. В связи с этим появляется возможность определения группы крови посредством анализа положения, амплитуды и полярности указанных высокотемпературных пиков, что согласуется с полученными ранее результатами [1—3].

На основании экспериментальных результатов электротно-термического анализа вычислены основные электрофизические параметры, наиболее полно отражающие динамику деполяризации исследуемой системы и её физические свойства [6, 11]. К ним относятся: время релаксации τ , энергия активации U , частотный фактор ω_0 и плотность σ носителей электротного заряда. Время релаксации соответствует среднему времени, необходимому для термического разрушения электротного состояния системы, и определяется по ширине ΔT пикового максимума тока:

$$\tau = \frac{\Delta T}{\beta}. \quad (1)$$

Энергия активации носителей заряда U в окрестности температуры некоторого максимума характеризует вероятность выхода заряженных дефектов из по-

тенциальных ловушек твердой фазы изучаемой системы при данной температуре. Величина U рассчитывалась по температурному положению T_{\max} и ширине ΔT максимума тока в соответствии с выражением:

$$U = \frac{k [T_{\max}]^2}{\Delta T}, \quad (2)$$

где k — постоянная Больцмана.

Частотный фактор ω_0 соответствует средней частоте колебаний ионов в потенциальных ловушках и вычисляется по формуле:

$$\omega_0 = \frac{\beta}{\Delta T} \exp\left(\frac{T_{\max}}{\Delta T}\right). \quad (3)$$

Плотность термически освобожденного заряда σ характеризует концентрацию структурных дефектов в указанных ловушках и вычисляется по площади, заключенной под кривой термотока:

$$\sigma = \frac{1}{\beta S} \int_{T_n^{(1)}}^{T_n^{(2)}} I(T') dT', \quad (4)$$

где $\beta = 1$ град./мин. — скорость нагрева, $T_n^{(1)}$ и $T_n^{(2)}$ — нижняя и верхняя температурные границы релаксации носителей заряда n -го типа, $S = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ — площадь поверхности электродов ячейки.

Для образцов крови I—IV групп в соответствии с выражениями (1—4) вычислены параметры U , τ и σ , которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Электрофизические параметры носителей электрнетного заряда в крови человека

$T_{\max}, \text{ }^\circ\text{C}$	Группа крови	U , эВ	τ , 10^2 с	σ , Кл/м ²
35	I	0,66	6,0	0,34
	II	0,70	4,7	0,13
	III	0,73	4,3	0,05
	IV	0,75	4,0	0,03
60	I	0,48	8,5	0,31
	II	0,52	9,3	0,52
	III	0,56	10,0	0,91
	IV	0,59	11,2	1,23

Анализ полученных количественных показателей τ , U и σ обнаруживает их зависимость от группы крови (табл. 1). При температуре 35 °C плотность электрнетного заряда σ уменьшается в ряду I—IV групп крови на порядок, что свидетельствует об уменьшении концентрации молекул свободной воды в плазме. Энергия активации и плотность носителей заряда при температуре 60 °C возрастают в ряду I—IV групп крови в связи с увеличением электрической активности клеточных мембран и повышением концентрации молекул связанной воды.

Система параметров τ , U , ω_0 и σ может использоваться для идентификации группы крови и описания ее индивидуальных физико-химических свойств.

Выводы

1. Увеличение амплитуды максимума тока при 35 °С для крови I группы связано с наличием в ней наибольшей концентрации молекул свободной воды. В то же время уменьшение амплитуды этого максимума для крови IV группы свидетельствует о наличии в ней минимальной концентрации объемной воды. Подтверждением этого является увеличение ширины температурного интервала реализации термотоков для образцов крови I группы ($\Delta T_1 = 200$ °С) по сравнению с остальными группами: $\Delta T_2 = 190$ °С, $\Delta T_3 = 180$ °С, $\Delta T_4 = 165$ °С. Увеличение амплитуды максимума тока при 60°С для крови IV группы свидетельствует о наличии в ней большего количества связанной воды по сравнению с остальными группами. Этот факт обусловлен меньшей концентрацией молекул объемной воды и более высокой электрической активностью клеточных мембран в крови IV группы.

2. В интервале температур (20—220) °С обнаружены низкотемпературные максимумы тока, динамика которых не зависит от группы крови, а также серия высокотемпературных пиков, являющихся структурно зависимыми. Максимумы тока в области температур (20—70) °С отражают электрофизические свойства крови человека, общие для всех групп, и характеризуют структурные особенности водной компоненты плазмы и цитоплазмы. Динамика высокотемпературных максимумов тока строго индивидуальна для каждой группы крови и зависит от химического состава и строения белков крови. В ряду I—IV групп крови наблюдается сдвиг этих максимумов в низкотемпературную область.

3. Авторами впервые введены электрофизические параметры, наиболее полно характеризующие основные физические свойства крови каждой группы: время релаксации τ , энергия активации U , частотный фактор ω_0 и плотность σ носителей электретоного заряда.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Pinchuk L.S., Goldade V.A., Sessler G.M., Kravtsov A.G., Zotov S.V., Tsvetkova E.A.* Electret-thermal analysis of blood. *Medical Engineering & Physics*. June, 2002. — V. 24, Issue 5. — P. 361—364.
- [2] *Pinchuk L., Kravtsov A., Zotov S.* Thermally stimulated depolarization of human blood // *Technical Physics*. — 2001. — V. 46. — № 5. — P. 620—622(3).
- [3] *Hansma H.G.* // *Ann. Amer. Society for Cell Biology*. 47th Annual Meeting. — 2007. — P. 19.
- [4] *Щербаченко Л.А., Борисов В.С., Максимова Н.Т. и др.* Электретный эффект и процессы электропереноса в дисперсных системах органического и неорганического происхождения // *Журнал технической физики*. — 2009. — Т. 79. — Вып. 9. — С. 129—137.
- [5] *Gaur M.S., Tiwari R.K., Prashant Shukla et al.* // *J. Trends Biomater. Artif. Organs*. — 2007. — V. 21(1). — P. 8—13.
- [6] *Борисов В.С., Марчук С.Д., Ежова Я.В. и др.* Особенности накопления и релаксации термостимулированного заряда в гетерогенных системах диспергированных слюд // *Вестник НГУ. Серия: Физика*. — 2008. — Т. 3. — Вып. 4. — С. 33—39.
- [7] *Карнаков В.А., Борисов В.С., Щербаченко Л.А. и др.* Термоактивационная спектроскопия тонких прослоек воды // *Известия вузов — физика*. — 2008. — Т. 51. — № 8. — С. 57—60.

- [8] *Борисов В.С., Щербаченко Л.А.* Особенности состояния термодинамического равновесия тонкой водной пленки, находящейся в электрическом поле активных центров поверхности кристалла слюды // *Физика твердого тела*. — 2009. — Т. 51. — Вып. 12. — С. 2394—2399.
- [9] *Борисов В.С., Карнаков В.А., Щербаченко Л.А. и др.* Особенности поляризации тонких пленок воды в поле активной поверхности кристалла слюды // *Физика твердого тела*. — 2008. — Т. 50. — Вып. 6. — С. 980—985.
- [10] *Шульц Г., Ширмер Р.* Принципы структурной организации белков. — М.: Мир, 1982. — 360 с.
- [11] *Sessler G.M.* (ed) «Electrets» (Morgan Hill (CA): (Laplacian Press). — 1999. — Vol. 1. 3rd Ed. — 431 p.

SPECIFIC FEATURES OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF MULTICOMPONENT HETEROGENEOUS SYSTEMS

L.A. Scherbachenko, V.S. Borisov, Yu.T. Eine

Chair of general physics
Irkutsk state university
Karla Marksa str., 1, Irkutsk, Russia, 664003

**V.G. Laletin, A.V. Belonogov, E.S. Baryshnikov,
P.A. Krasnov, N.N. Davydova, O.N. Gribacheva**

Irkutsk state medical university
Irkutsk Regional Oncological Hospital
Chair of hospital surgery with a course
Krasnogo vosstania str., 1, Irkutsk, Russia, 664003

Electrophysical properties of multicomponent heterogeneous systems containing polar liquid phase and electrically active inclusions are investigated while the study of human blood. It was found that the examined biological system has electret properties which are related to accumulation of interphase charges in the presence of inner electric field. Special attention is paid to the analysis of change of structure of water component in plasma near the interfaces. The existence of low-temperature current maximums whose dynamics is the same for all groups of blood and high-temperature current maximums which characterize individual properties of the biofluid in the range of temperatures (20—220) °C has been established. For the first time electrophysical parameters that describe physical properties of human blood thoroughly are determined.

Key words: physical methods of medical diagnostics, thermally stimulated spectroscopy, biofluid, human blood, electret effect, ion transport, cell membranes, proteins, bound water.