

**ФАРМАЦЕВТИЧЕСКАЯ ХИМИЯ, ФАРМАКОГНОЗИЯ/PHARMACEUTICAL CHEMISTRY,
PHARMACOGNOSY**DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.60> EDN: STCIQZ**АСКОРБИНОВАЯ КИСЛОТА — КЛЮЧЕВОЙ КОМПОНЕНТ ГОМЕОСТАЗА СИНОВИАЛЬНОЙ
ЖИДКОСТИ**

Научная статья

Будко Е.В.¹, Ямпольский Л.М.^{2,*}, Разинькова Е.М.³¹ORCID : 0000-0001-8861-7491;^{1, 2, 3} Курский государственный медицинский университет, Курск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (yampolsky.leonid[at]yandex.ru)

Предложена: 21.03.2026; Принята: 06.07.2026; Опубликовано: 17.07.2026

Аннотация

Структурные отклонения в составе синовиальной жидкости, сопряжены с возникновением артропатий. В работе сделан вывод, что гомеостаз синовии основан на универсальной буферной системе «аскорбиновая кислота — аскорбат ион — аскорбат радикал — дегидроаскорбиновая кислота», способной одновременно поддерживать кислотно-основной и окислительно-восстановительный баланс. Для ее описания применен квантово-химический подход в сочетании с результатами потенциометрического исследования. Восстановление способности к самоорганизации данной буферной системы — путь к компенсации патологических состояний в синовиальной жидкости. Важнейшим стабилизирующим фактором буферной системы является координационное взаимодействие с ионами металлов с образованием комплексных соединений. Разработка медицинского средства, восстанавливающего гомеостаз синовиальной жидкости, может быть основана на введении структурных элементов буферной системы аскорбиновой кислоты для формирования стабильного равновесия, нормализации метаболических процессов.

Ключевые слова: аскорбиновая кислота, дегидроаскорбиновая кислота артрит, синовиальная жидкость, буферная система, квантово-химическое моделирование.

ASCORBIC ACID — A KEY COMPONENT IN THE HOMEOSTASIS OF SYNOVIAL FLUID

Research article

Budko Y.V.¹, Yampolskii L.M.^{2,*}, Razinkova Y.M.³¹ORCID : 0000-0001-8861-7491;^{1, 2, 3} Kursk State Medical University, Kursk, Russian Federation

* Corresponding author (yampolsky.leonid[at]yandex.ru)

Suggested: 21.03.2026; Accepted: 06.07.2026; Published: 17.07.2026

Abstract

Structural abnormalities in the composition of synovial fluid are associated with the development of arthropathy. The work concludes that synovial homeostasis is based on a universal buffer system 'ascorbic acid – ascorbate ion – ascorbate radical – dehydroascorbic acid', capable of simultaneously maintaining both acid-base and redox balance. A quantum-chemical approach, combined with the results of potentiometric studies, was used to describe this system. Restoring the self-organisation capacity of this buffer system is the key to compensating for pathological conditions in the synovial fluid. The most important stabilising factor in the buffer system is the coordination interaction with metal ions, leading to the formation of complex compounds. The development of a medical product that restores the homeostasis of synovial fluid could be based on the introduction of structural elements of the ascorbic acid buffer system to establish a stable equilibrium and normalise metabolic processes.

Keywords: ascorbic acid, dehydroascorbic acid, arthritis, synovial fluid, buffer system, quantum chemical modelling.

Введение

Количество и разнообразие заболеваний суставов, приводящих к деформирующим последствиям, растет быстро, а возраст лиц страдающих ими снижается [1], [2]. Ключевой точкой развития артропатий является нарушение метаболических процессов в синовиальной жидкости, обеспечивающей подвижность суставов, их питание, амортизацию нагрузочных колебаний и т.п. Нормальная физиология синовии как таковой, означает в первую очередь pH в пределах 7,4–7,6, устойчивую буферность среды, стандартный диапазон реологических колебаний, макро/микроэлементный баланс, словом тот гомеостатический бионеорганический базис, в котором протекают метаболические процессы в здоровом организме.

В работе [3] в качестве фактора, необходимого для нормализации функционирования сустава в физиологических условиях, указана аскорбиновая кислота (АК), входящая в состав синовиальной жидкости. Ее участие в многочисленных метаболических процессах широко известно [4], [5]. При значениях pH, соответствующих физиологическим нормам синовии аскорбиновая кислота находится в нескольких равновесных состояниях: собственно восстановленной формы кислоты, ее моно-натриевой соли, окисленной формы — дегидроаскорбиновой

кислоты (ДГАК) и промежуточной формы — короткоживущей структуры с характеристиками радикала (аскорбат — радикал).

Физиологическая роль солевой формы аскорбиновой кислоты проявляется, в частности, во всасывании и транспорте АК через натрий-зависимые ко-транспортеры: SVCT1 и SVCT2 — мембранные белки, отвечающие за ее активный захват [6], [7]. Окисленная форма — ДГАК, в свою очередь, выступает в качестве транспортируемой формы, которая с участием GLUT1 или GLUT3 (Glucose Transporter) накапливается в клетках в высоких концентрациях даже при ее ограниченном поступлении [8].

Роль аскорбиновой кислоты в стабилизации равновесия в синовии в литературе обсуждена недостаточно. Специфической функцией является гидроксирование остатков лизина и пролина при синтезе коллагена в синовиальной жидкости [9], [10]. Для активации пролил-4-гидроксилазы и лизил-гидроксилазы необходимо присутствие α -кетоглутарата, кислорода, Fe^{2+} и, собственно, АК. Кислота и ее моноводяная соль обеспечивают переход Fe^{3+} в Fe^{2+} , при этом АК присутствует в системе в качестве лиганда, стабилизируя возбужденное состояние гидроксилаз [5], [11]. Таким образом, АК работает и как восстановитель Fe^{3+} и как стабилизатор Fe^{2+} .

Основной компонент, обеспечивающий вязкость и смазывающие свойства синовиальной жидкости — гиалуроновая кислота — образует ось гигантской молекулы протеогликана [12]. АК участвует в гомеостазе гиалуроновой кислоты через ингибирование гиалуронидазы — фермента, который катализирует деградацию молекулы [13]. В то же время аскорбиновая кислота косвенно участвует в присоединении глюкуроновой кислоты и N-ацетилглюкозамина к растущей цепи гиалуроновой кислоты благодаря прямому воздействию на гиалуронат-синтазы, причем HAS1 способствует выводу сформировавшихся цепей гиалуроновой кислоты в межклеточное пространство.

Раскрытие механизма действия АК в водных растворах имеет принципиальное значение для описания гомеостаза синовиальной жидкости. В качестве рабочих подходов используем потенциометрию и методы квантовой химии [14], что позволит сочетать экспериментальные данные с результатами моделирования равновесных форм АК, особенностей их функционала и возможности участия в поддержании общего равновесия в водном растворе. В перспективе, данные знания позволят разработать медицинское средство, способное восстановить гомеостаз синовиальной жидкости, нарушенный при артропатиях, достичь устойчивой ремиссии на длительный период.

Отсюда, целью настоящей работы является демонстрация полифункциональности аскорбиновой кислоты — Н-кислоты, основания, окислителя, восстановителя и лиганда — в составе универсальной буферной системы синовиальной жидкости.

Методы и принципы исследования

Для проведения потенциометрического исследования растворы аскорбиновой кислоты, марки «РМ Инжиниринг», CAS 50-81-7, Китай, готовили в разведениях от 5% до 0,005% методом отдельных навесок и методом разведений в деионизированной воде. Раствор гидроксида натрия готовили из стандарт-титра в деионизированной воде непосредственно перед исследованием. Дегазация растворов проводилась методом барботирования азотом.

Потенциометрические измерения проводились на рН-метре/иономере ИТАН «Томьяналит». В электродную ячейку включен стеклянный комбинированный электрод ЭСК-10605.

Для проведения квантово-химического моделирования, расчета количественных характеристик молекулярных систем избраны стандартные методы *ab initio* — Хартли-Фок (RHF) и пост Хартли-Фок (MP2), которые чередовали с расчетами по теории плотности функции (DFT) B3LYP. В качестве граничного, использован полуэмпирический метод RPM6 (табл. 1). Расчеты проводили для изолированных систем и в режиме «solvation» для среды «вода» в режиме «FREQ» и «FOPT». В качестве исходного объекта в квантово-химическом исследовании избрана левовращающая аскорбиновая кислота, ее солевая и окисленная формы.

Таблица 1 - Характеристики примененных программных методов расчета

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.60.1>

Метод расчета	RHF	RMP2	RB3LYP	RPM6
Тип расчета	FREQ	FREQ	FREQ	FOPT
Базис	6-31G	6-31G	6-31G	ZDO

Основные результаты

По результатам проведенного нами потенциометрического алкалометрического исследования АК [15] проведено сопоставление кривой титрования в координатах pH(V) с ее производной первого порядка, что позволило определить участки с постоянной скоростью течения процесса независимо от изменения объема титранта — признаки буферности системы. Показано существование четырех структурных форм, непосредственно участвующих в поддержании равновесности раствора аскорбиновой кислоты в течение процесса. Сопоставление результатов эксперимента с литературными данными [13] показывает, что в качестве равновесных форм принимаются собственно восстановленная форма АК, аскорбат ион, аскорбат радикал и ДГАК.

Результаты потенциометрического исследования растворов АК в разведениях от 5% до 0,005% (растворы готовили методом отдельных навесок и методом разведений) (рис. 1), показали нелинейность зависимости pH растворов от логарифма концентрации аскорбиновой кислоты: зона явной стабилизации значений pH в диапазоне малых концентраций аскорбиновой кислоты отражает формирование системы с буферными свойствами. Система ведёт себя как классический раствор слабой кислоты и pH раствора отражает возникновение баланса между восстановленной

формой АК и аскорбат анионом без учета окислительно-восстановительных процессов, несомненно, присутствующих в более сложных системах на базе аскорбиновой кислоты в составе синовиальной жидкости. Разные способы приготовления раствора дают схожие pH-профили. Значения pH на графике в диапазоне 2–4,5 близки к показателю константы кислотности ($pK_{a1} \approx 4.17$), что типично для буферных растворов аскорбиновой кислоты.

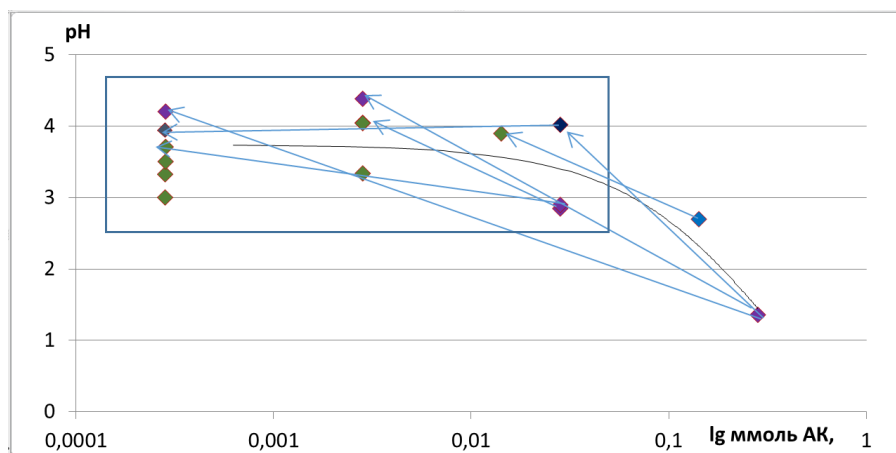


Рисунок 1 - Потенциметрическая зависимость pH от логарифма концентрации аскорбиновой кислоты в водных растворах, приготовленных методом разведения (*этапы разведения показаны стрелками*) из исходных растворов 0,5, 0,2 и 0,05 моль/л без доступа стороннего кислорода, в деионизированной водной среде

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.60.2>

Расширение структурных представлений о АК за счет квантово-химического моделирования методом RPM6 в водной среде (рис. 2) позволило выявить следующее: увеличение прочности ковалентной связи кислорода с углеродом (C3) кольца восстановленной формы АК за счет формирования полуторной связи на фоне разрушения сопряженной с ней ковалентной связи «O-H».

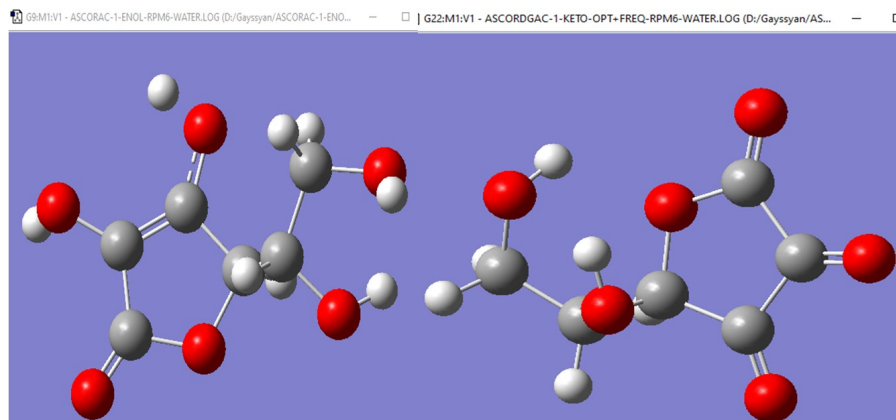


Рисунок 2 - Оптимизация структур АК (*слева*) и ДГАК (*справа*) методом RPM6

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.60.3>

Перераспределение электронной плотности аскорбиновой кислоты в водной среде отражает предпосылки к последующей полной ионизации до аскорбат иона, что соответствует полученным ранее потенциметрическим данным. В результате, наблюдаем усиление полярности связей C–O и C–H; повышение реакционной способности гидроксильных групп. Благодаря положительному мезомерному эффекту (+M) гидроксильные группы повышают электронную плотность в сопряженной системе, отрицательный мезомерный эффект (-M) от карбонила смещает электронную плотность от соседних атомов, создавая динамическое равновесие между резонансными структурами (перераспределение электронной плотности). Причем, при pH 7,5 депротонирование должно усиливать мезомерный эффект за счет возможности миграции отрицательного заряда по сопряженной системе, увеличивать нуклеофильную активность молекулы.

Сопоставляя индукционные и мезомерные процессы в молекуле аскорбата натрия отметим, что индукционный и мезомерный эффекты в области карбонила: –I (оттягивание электронов) и –M (акцептирование электронов) усиливают электрофильный характер углерода C=O; в области гидроксильных групп: +M (донор эффект) и –I (оттягивание электронов) создают баланс между нуклеофильной и электрофильной реакционной способностью: гидроксильные группы (особенно ендольные) —преимущественно нуклеофилы, в то время, как карбонильный углерод (C=O) представляет собой электрофильный центр.

Таким образом, индуктивный эффект поддерживает полярность и локализацию зарядов, влияя на реакционные центры, а мезомерный эффект обеспечивает эффект сопряжения, что стабилизирует анион аскорбата, сохраняя способность к координационным взаимодействиям и лёгкость его окисления. В то же время возникает некоторая стабилизация системы за счёт натрия. При визуализации оптимизированной структуры аскорбата натрия в водной среде, катион расположился строго под лактонным кольцом, т.к. в этом месте наблюдается наибольшее скопление электронной плотности. Практически в водной среде в присутствии иона натрия формируется ионный ассоциат.

Результат расчета состояния дегидроаскорбиновой кислоты в водной среде (рис. 2) показал определенную устойчивость ДГАК. В условиях синовиальной жидкости проявит себя –М-эффект карбонильных групп ДГАК, способный создать распределённые электрофильные центры; что усиливает реакционную способность молекулы, ускоряя её гидратацию, полукетализацию и, возможный, последующий гидролиз. Исходя из данной структуры, сочетание –М- и –I-эффектов определяет потенциальную биологическую судьбу ДГАК: её основной окислительно-восстановительный потенциал, возможности транспортировки, восстановления и потенциального распада в составе синовиальной жидкости. Отметим, что для устойчивости дегидроаскорбиновой кислоты более комфортной может быть слабокислая среда на уровне pH 6,8–6,9. С повышением pH ДГАК становится менее стабильной, что повышает ее реакционный потенциал, необходимый для стабилизации метаболических процессов в синовии. Таким образом, –М- и –I-эффекты в сочетании с метаболическими особенностями синовиальной жидкости напрямую управляют химическим потенциалом, биологической активностью ДГАК.

Далее были проведены квантово-химические расчеты при введении в исходный файл двух и трех молекул. В качестве примера приведем визуализацию расчета пары «Аскорбат — Na и ДГАК» методом RHF. Как видно на рис. 3, катион встраивается между двумя молекулами, формируя «слоистую» структуру ионной системы с ассоциированными анионами, т.е. ионный ассоциат.

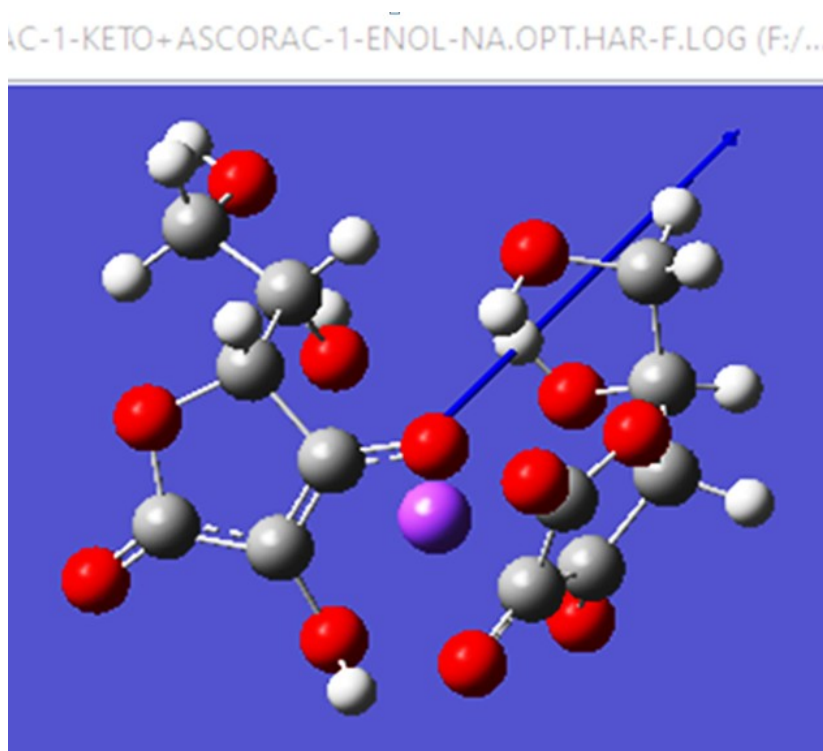


Рисунок 3 - Оптимизация строения системы аскорбата натрия и ДГАК методом Хартри-Фока (RHF)
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.60.4>

Данная система представляет собой равновесный обратимый процесс перехода «аскорбат натрия — дегидроаскорбиновая кислота» и отражает эффективный короткодействующий редокс-буфер с высокой реакционной способностью, играющий ключевую роль в поддержании окислительно-восстановительного гомеостаза в составе синовиальной жидкости.

В тройной системе аскорбиновая кислота, аскорбат натрия и дегидроаскорбиновая кислота после расчетов равновесной структуры в водной среде методом RPM6 также прошли изменения. Аскорбиновая кислота преобразуется в аскорбат натрия за счет потери иона водорода и формирования полуторной связи C-O (рис. 4 слева). Аскорбат-ион окисляется до аскорбат радикала (рис. 4 справа) с двумя полуторными связями C-O. Хотя сама ДГАК структурно никак не изменилась (рис. 4 центр), привлекает внимание расположение иона натрия строго напротив лактонного кольца дегидроаскорбиновой кислоты в качестве уравнивающего фактора всей трехкомпонентной системы. Эти структурные преобразования показывают возможность параллельного и одновременного протекания окислительно – восстановительной и ионообменной буферизации, иначе говоря, формирование универсальной буферной системы.

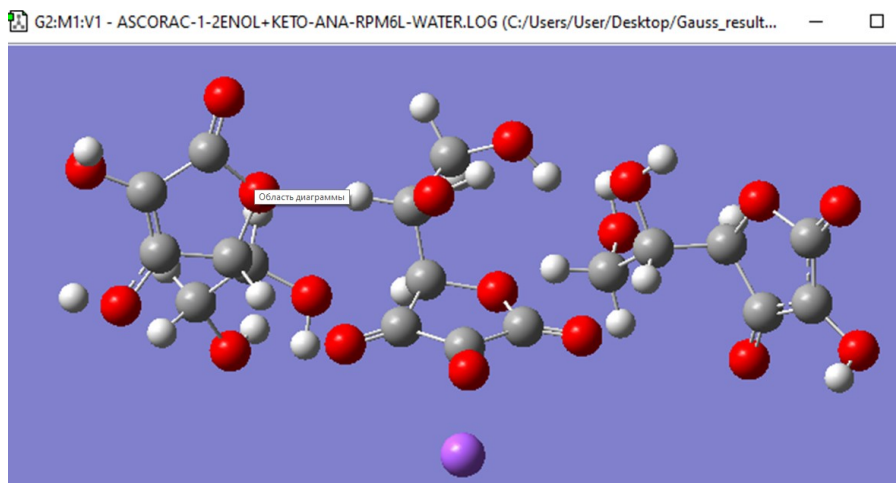


Рисунок 4 - Оптимизация тройной системы АК – АК-Na – ДГАК методом RPM6
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.60.5>

На рисунке 5 приведена диаграмма, позволяющая проследить тенденции изменения энергетических состояний равновесных систем в условиях изоляции и водной среды. Наибольшей энергетической устойчивостью обладают трехкомпонентные системы, причем самой устойчивой оказалась система, обладающая наибольшей разнообразностью: «аскорбиновая кислота — аскорбат натрия — дегидроаскорбиновая кислота». Интересно, что соотношение двух восстановленных молекул аскорбиновой кислоты к одной молекуле дегидроаскорбиновой кислоты обладает большей энергетической устойчивостью (равновесностью), чем обратное соотношение одной молекулы восстановленной аскорбиновой кислоты к двум молекулам дегидроаскорбиновой кислоты. Последняя система явно более активна и менее равновесна в водной среде. Отметим, что участие ДГАК, вообще говоря, ведет к повышению энергии системы, что необходимо для восполнения запасов аскорбата натрия и аскорбиновой кислоты, в том числе, в условиях появления в системе сторонних компонентов и процессов, развития окислительного стресса.

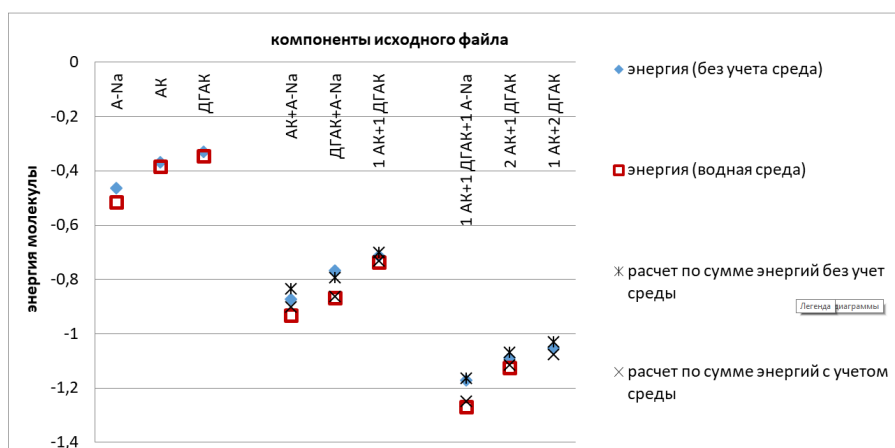


Рисунок 5 - Изменение энергии индивидуальных (аскорбиновая кислота (АК), аскорбат натрия (А-Na), дегидроаскорбиновая кислота (ДГАК), двухкомпонентных и трехкомпонентных смесей в изолированном состоянии и в водной среде методом RPM6
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.60.6>

Обсуждение

Динамическое равновесие между формами АК за счет объединения редокс и ионообменного процессов обеспечивает этой буферной системе стабильность, необходимую для поддержания гомеостаза и, в то же время активное участие в окислительно-восстановительных и протолитических процессах. Например, в синовиальной жидкости необходимо учитывать более широкую возможность окисления, особенно в присутствии ионов $\text{Fe}^{2+}/\text{Cu}^{2+}$, возможное влияние на осмолярность и ионный баланс сторонних компонентных факторов.

Таким образом, максимальное компонентное разнообразие системы «аскорбиновая кислота — аскорбат ион — аскорбат радикал — дегидроаскорбиновая кислота» обеспечивает наибольшую энергетическую устойчивость и стабильность в широком диапазоне pH:

- аскорбиновая кислота (pKa ~4,17) — буферизация в кислой зоне;
- аскорбат-ион — в нейтральной/слабощелочной зоне;
- дегидроаскорбиновая кислота — стабилизация при сдвиге в щелочную сторону,

что, в целом, обеспечивает стабильность синовиальной жидкости (рН ~7,3–7,6).

При этом, компенсационный редокс потенциал этой системы позволяет стабилизировать величину ЭДС синовиальной жидкости, несмотря на сторонние, например, метаболические процессы с признаками патологии.

Отсюда, компенсационная система «аскорбиновая кислота — аскорбат ион — аскорбат радикал — дегидроаскорбиновая кислота» выгладит предпочтительнее, например, при необходимости стабилизации постоянных гипоксических воздействий, опасных развитием процессов анаэробного распада: ростом уровня свободных радикалов, что сопровождается развитием артропатий различного генеза.

Нарушение равновесности, тем более компонентности данной системы ведет к развитию патологических процессов, чему часто не придают значение во врачебной практике при выборе тактики лечения, оптимального протокола. Понимание механизмов действия универсальной буферной системы позволяет разработать медицинские средства, способствующие ее восстановлению: реконструкция макро/микроэлементного баланса среды, лигандного состава, рН среды и соответствующего буферного обеспечения.

Заключение

Тот факт, что у пациентов с артритом в синовиальной жидкости повышается содержание аскорбиновой кислоты с одновременным ее снижением в крови говорит о необходимости АК для восстановления гомеостаза. При этом возникает аномально высокое соотношение окисленной формы АК к восстановленной (до 80%). При общем дефиците аскорбиновой кислоты наблюдается нарушение целостности синовиальной жидкости, сопряженных с ней хрящевых тканей, а накопление окисленной формы в конечном итоге ведет к метаболическим изменениям в синтезе коллагена, гиалуроновой кислоты и т.д.

Данные представления позволяют сформировать универсальный базис для разработки трансдермально вводимой композиции, способной адаптироваться в составе ферментативного комплекса синовиальной жидкости. Конструирование медицинских средств, способных создать условия для ремиссии при артрите должно быть основано на реконструкции отдельных компонентов универсальной буферной системы «аскорбиновая кислота — аскорбат ион — аскорбат радикал — дегидроаскорбиновая кислота». Это позволит восстановить самоорганизующие свойства эволюционно сформированного механизма, одновременного поддержания кислотно-основного и окислительно-восстановительного равновесия (гомеостаза) в условиях изменчивого воздействия внешних и внутренних факторов.

Именно многокомпонентность и равновесность стабилизирующей системы обеспечивает ее полифункциональность. Квантово-химическое моделирование позволяет представить себе структурные особенности буферной системы: энергетические характеристики компонентов, способность к стабилизации за счет координационного взаимодействия с микроэлементами. Учитывая, что без соблюдения этих принципов стандартные медицинские средства мало эффективны, Понимание механизма действия буферной системы аскорбиновой кислоты позволяет разработать способ нормализации метаболических процессов с адекватным буферным сопровождением. Решение данной задачи возможно с применением квантово-химических методов, позволяющих рассчитать оптимальную молекулярную структуру, способную, будучи введенной в синовию, активизировать позитивную модификации метаболических процессов.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.60.7>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Community of Reviewers of the International Research Journal

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.60.7>

Список литературы / References

1. Чилилов А.М. Эпидемиология ревматоидных артритов в Российской Федерации в 2015–2024 гг. / А.М. Чилилов, В.В. Люцко, А.С. Стерликов и др. // Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики. — 2025. — 3. — С. 485–504. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=83070152> (дата обращения: 09.04.26).
2. Галушко Е.А. Распространенность ревматических заболеваний в России / Е.А. Галушко, Е.Л. Насонов // Альманах клинической медицины. — 2018. — 1. — С. 32–39. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32785644> (дата обращения: 28.04.26). — DOI: 10.18786/2072-0505-2018-46-1-32-39
3. Chang Z. Ascorbic acid provides protection for human chondrocytes against oxidative stress / Z. Chang, L. Huo, P. Li et al. // Molecular Medicine Reports. — 2015. — 5. — P. 7086–7092. — URL: <https://www.spandidos-publications.com/10.3892/mmr.2015.4231/abstract> (accessed: 28.04.26). — DOI: 10.3892/mmr.2015.4231
4. Xiao M. The Multiple Roles of Ascorbate in the Abiotic Stress Response of Plants: Antioxidant, Cofactor, and Regulator / M. Xiao, Z. Li, L. Zhu et al. // Frontiers in Plant Science. — 2021. — 12. — P. 598173. — DOI: 10.3389/fpls.2021.598173
5. Figueroa-Méndez R. Vitamin C in Health and Disease: Its Role in the Metabolism of Cells and Redox State in the Brain / R. Figueroa-Méndez, S. Rivas-Arancibia // Frontiers in Physiology. — 2015. — 6. — P. 6:397. — URL: <https://www.frontiersin.org/journals/physiology/articles/10.3389/fphys.2015.00397/full> (accessed: 21.03.26). — DOI: 10.3389/fphys.2015.00397



6. Rex T.S. Modulation of microglia activation by the ascorbic acid transporter SVCT2 / T.S. Rex, F.E. Harrison, A.L. Marino // *Brain, Behavior, and Immunity*. — 2024. — 120. — P. 557–570. — DOI: 10.1016/j.bbi.2024.07.003
7. Salazar K. Role of vitamin C and SVCT2 in neurogenesis / K. Salazar, N. Jara, E. Ramírez // *Frontiers in Neuroscience*. — 2023. — 17. — URL: <https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2023.1155758/full> (accessed: 13.03.26). — DOI: 10.3389/fnins.2023.1155758
8. Стрельченко Е.А. Исследование влияния витамина С на физиологические системы человека / Е.А. Стрельченко // *Научные труды Кубанского государственного технологического университета*. — 2019. — 1. — С. 319–330. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36944395> (дата обращения: 09.04.26).
9. Шатнюк Л.Н. Метаболизм витаминов и микроэлементов в процессах биосинтеза коллагена / Л.Н. Шатнюк, В.Б. Спиричев // *Вопросы питания*. — 2017. — 4. — С. 45–53.
10. Потехина Ю.П. Структура и функции коллагена / Ю.П. Потехина // *Российский остеопатический журнал*. — 2016. — 1-2. — С. 87–99. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28125308> (дата обращения: 09.04.26).
11. Figueroa-Méndez R. Vitamin C in Health and Disease: Its Role in the Metabolism of Cells and Redox State in the Brain / R. Figueroa-Méndez, S. Rivas-Arancibia // *Frontiers in Physiology*. — 2025. — 6. — P. 397. — DOI: 10.3389/fphys.2015.00397
12. Srinivasan S. Hyaluronic Acid: A Comprehensive Review of Its Osteogenic Potential and Diverse Biomedical Applications / S. Srinivasan, A. Vijayalekha, S. Anandasadagopan // *Current Pharmacology Reports*. — 2025. — 11. — P. 28. — DOI: 10.1007/s40495-025-00408-z
13. Díaz I. Interaction between the L-Ascorbic Acid and the HO₂ Hydroperoxyl Radical: An Ab Initio Study / I. Díaz, J.G. Ali, J. Ramirez de Arellano Niño Rincon et al. // *Crystals*. — 2023. — 13. — P. 1135. — DOI: 10.3390/cryst13071135
14. Boudreaux M.A. Structure and reactivity of amino acid–water complexes: a quantum chemical study / M.A. Boudreaux, A.K. Singh, R.N. Zare // *Journal of Physical Chemistry A*. — 2017. — 27. — P. 5277–5288. — URL: <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Mary-K-Boudreaux-2050969027> (accessed: 09.04.26).
15. Разинькова Е.М. Аскорбиновая кислота – элемент гомеостаза в синовиальной жидкости / Е.М. Разинькова, Л.М. Ямпольский, Леонид Ямпольский. // *Биотехнология и биомедицинская инженерия : сборник научных трудов по материалам XV Международной научно-практической конференции, посвящённой 90-летию Курского государственного медицинского университета и памяти профессора Л.П. Лазуриной*; под ред. В.А. Липатов, Ю.Э. Азарова — Курск: Университетская книга, 2025. — С. 415–417. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=88879892>. (дата обращения: 09.04.26).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Chililov A.M. E'pidemiologiya revmatoidny'x artritov v Rossijskoj Federacii v 2015–2024 gg. [Epidemiology of rheumatoid arthritis in the Russian Federation in 2015–2024] / A.M. Chililov, V.V. Lyuczko, A.S. Sterlikov et al. // *Modern Problems of Healthcare and Medical Statistics*. — 2025. — 3. — P. 485–504. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=83070152> (accessed: 09.04.26). [in Russian]
2. Galushko E.A. Rasprostranennost' revmaticeskix zabolevanij v Rossii [Prevalence of rheumatic diseases in Russia] / E.A. Galushko, E.L. Nasonov // *The Almanac of Clinical Medicine*. — 2018. — 1. — P. 32–39. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32785644> (accessed: 28.04.26). — DOI: 10.18786/2072-0505-2018-46-1-32-39 [in Russian]
3. Chang Z. Ascorbic acid provides protection for human chondrocytes against oxidative stress / Z. Chang, L. Huo, P. Li et al. // *Molecular Medicine Reports*. — 2015. — 5. — P. 7086–7092. — URL: <https://www.spandidos-publications.com/10.3892/mmr.2015.4231/abstract> (accessed: 28.04.26). — DOI: 10.3892/mmr.2015.4231
4. Xiao M. The Multiple Roles of Ascorbate in the Abiotic Stress Response of Plants: Antioxidant, Cofactor, and Regulator / M. Xiao, Z. Li, L. Zhu et al. // *Frontiers in Plant Science*. — 2021. — 12. — P. 598173. — DOI: 10.3389/fpls.2021.598173
5. Figueroa-Méndez R. Vitamin C in Health and Disease: Its Role in the Metabolism of Cells and Redox State in the Brain / R. Figueroa-Méndez, S. Rivas-Arancibia // *Frontiers in Physiology*. — 2015. — 6. — P. 6:397. — URL: <https://www.frontiersin.org/journals/physiology/articles/10.3389/fphys.2015.00397/full> (accessed: 21.03.26). — DOI: 10.3389/fphys.2015.00397
6. Rex T.S. Modulation of microglia activation by the ascorbic acid transporter SVCT2 / T.S. Rex, F.E. Harrison, A.L. Marino // *Brain, Behavior, and Immunity*. — 2024. — 120. — P. 557–570. — DOI: 10.1016/j.bbi.2024.07.003
7. Salazar K. Role of vitamin C and SVCT2 in neurogenesis / K. Salazar, N. Jara, E. Ramírez // *Frontiers in Neuroscience*. — 2023. — 17. — URL: <https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2023.1155758/full> (accessed: 13.03.26). — DOI: 10.3389/fnins.2023.1155758
8. Strel'chenko E.A. Issledovanie vliyaniya vitamina S na fiziologicheskie sistemy' cheloveka [Investigation of the effect of vitamin C on human physiological systems] / E.A. Strel'chenko // *Scientific papers of the Kuban State Technological University*. — 2019. — 1. — P. 319–330. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36944395> (accessed: 09.04.26). [in Russian]
9. Shatnyuk L.N. Metabolizm vitaminov i mikroe'lementov v processax biosinteza kollagena [Metabolism of vitamins and trace elements in collagen biosynthesis processes] / L.N. Shatnyuk, V.B. Spirichev // *Nutrition issues*. — 2017. — 4. — P. 45–53. [in Russian]
10. Potexina Yu.P. Struktura i funkcii kollagena [The structure and functions of collagen] / Yu.P. Potexina // *Russian Osteopathic Journal*. — 2016. — 1-2. — P. 87–99. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28125308> (accessed: 09.04.26). [in Russian]



11. Figueroa-Méndez R. Vitamin C in Health and Disease: Its Role in the Metabolism of Cells and Redox State in the Brain / R. Figueroa-Méndez, S. Rivas-Arancibia // *Frontiers in Physiology*. — 2025. — 6. — P. 397. — DOI: 10.3389/fphys.2015.00397
12. Srinivasan S. Hyaluronic Acid: A Comprehensive Review of Its Osteogenic Potential and Diverse Biomedical Applications / S. Srinivasan, A. Vijayalekha, S. Anandasadagopan // *Current Pharmacology Reports*. — 2025. — 11. — P. 28. — DOI: 10.1007/s40495-025-00408-z
13. Díaz I. Interaction between the L-Ascorbic Acid and the HO₂ Hydroperoxyl Radical: An Ab Initio Study / I. Díaz, J.G. Ali, J. Ramirez de Arellano Niño Rincon et al. // *Crystals*. — 2023. — 13. — P. 1135. — DOI: 10.3390/cryst13071135
14. Boudreaux M.A. Structure and reactivity of amino acid–water complexes: a quantum chemical study / M.A. Boudreaux, A.K. Singh, R.N. Zare // *Journal of Physical Chemistry A*. — 2017. — 27. — P. 5277–5288. — URL: <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Mary-K-Boudreaux-2050969027> (accessed: 09.04.26).
15. Razin'kova E.M. Askorbinovaya kislota – e'lement gomeostaza v sinovial'noj zhidkosti [Ascorbic acid is an element of homeostasis in the synovial liquids] / E.M. Razin'kova, L.M Yampol'skij, Leonid Yampol'skij. // *Biotechnology and biomedical Engineering : a collection of scientific papers based on the materials of the XV International Scientific and Practical Conference dedicated to the 90th anniversary of Kursk State Medical University and the memory of Professor L.P. Lazurina*; edited by V.A. Lipatov, Yu.E'. Azarova — Kursk: Universitetskaya kniga, 2025. — P. 415–417. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=88879892>. (accessed: 09.04.26). [in Russian]