УДК 548.3:545.05 *Оригинальная статья*

Закономерности разрушения фосфатов кальция в молочной кислоте

А.А. Проворкина, О.А. Голованова
ФГАОУ ВО «Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского»
644077, Россия, Омская область, Омск, пр. Мира, 55а
nastja-p@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.908

Аннотация: Современная регенеративная медицина и стоматология остро нуждаются в щадящих методах разложения кальций-фосфатных образований, а также в создании биоразлагаемых композиционных материалов на основе полимолочной кислоты и фосфатов кальция. В связи этим фундаментальные исследования в области процессов деградации фосфатов кальция в молочной кислоте приобретают большое значение для оптимизации методов синтеза биоразлагаемых имплантатов и профилактики кариеса. Целью данной работы являлось установление термодинамических и кинетических параметров реакции между гидроксиапатитом (фторапатитом) и молочной кислотой, а также механизма этого взаимодействия. Процессы деградации изучены методами термодинамического моделирования, прямой потенциометрии и рентгенофазового анализа. На основе проведённых расчётов построены термодинамические поверхности и установлены критические значения кислотности среды, при которых растворение фосфатов кальция термодинамически прекращается: максимальные значения pH составили 5,2 для гидроксиапатита и 4,5 для фторапатита. Экспериментально показано, что максимальная скорость деградации достигается в сильнокислой среде, где в растворе преобладает активная протонированная форма молочной кислоты. Выявлено, что процесс достаточно быстро достигает состояния равновесия благодаря эффекту самоингибирования, другими словами, достижению предельного наноразмера кристаллов. Предложен механизм реакции, который включает протонирование фосфатных групп кристаллической решётки и последующее хелатирование высвобождающихся ионов Ca^{2+} лактат-ионами, что предотвращает кинетическое торможение процесса. Совокупность полученных данных формирует базу для создания методов контролируемой резорбции биодеградируемых имплантатов и стоматологических материалов.

Ключевые слова: гидроксиапатит, фторапатит, молочная кислота, резорбция, термодинамическое моделирование.

Проворкина Анастасия Андреевна – преподаватель кафедры неорганической химии ФГАОУ ВО «Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского»
Голованова Ольга Александровна – д.г.-м.н., профессор, заведующий кафедрой неорганической химии ФГАОУ ВО «Омский Государственный Университет имени Ф.М. Достоевского»

Original paper

Patterns of calcium phosphate degradation in lactic acid

A.A. Provorkina, O.A. Golovanova
Omsk State University named after F.M. Dostoevsky, Omsk, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.908

Abstract: Modern regenerative medicine and dentistry are in urgent need of mild methods for the degradation of calcium phosphate deposits, as well as the development of biodegradable composite materials based on polylactic acid and apatites. In this context, fundamental studies on the degradation of apatites in lactic acid are of paramount importance for optimizing the synthesis of biodegradable implants and developing caries prevention strategies. The aim of this study was to determine the thermodynamic and kinetic parameters of the interaction between hydroxyapatite (fluorapatite) and lactic acid, as well as to elucidate the underlying reaction mechanism. The degradation processes were investigated using thermodynamic modeling, direct potentiometry, and X-ray diffraction analysis. Based on the performed calculations, thermodynamic surfaces were constructed, and the critical acidity thresholds at which apatite dissolution becomes thermodynamically unfavorable were

© А.А. Проворкина, О.А. Голованова, 2026

established: the maximum pH values were found to be 5,2 for hydroxyapatite and 4,5 for fluorapatite. Experimental results demonstrate that the maximum degradation rate is achieved in a strongly acidic medium, where the active protonated form of lactic acid predominates in the solution. It was revealed that the system reaches equilibrium rapidly due to a self-inhibition effect, which corresponds to crystals reaching a critical nanoscale size limit by the crystals. A reaction mechanism is proposed, involving the protonation of the phosphate groups within the crystal lattice followed by the chelation of the released Ca^{2+}-ions by lactate anions, which effectively prevents kinetic inhibition of the process. The obtained data provide a solid foundation for developing methods for the controlled resorption of biodegradable implants and dental materials.
Keywords: hydroxyapatite, fluorapatite, lactic acid, resorption, thermodynamic modeling.

Anastasiya A. Provorkina – Lecturer, Department of Inorganic Chemistry, Omsk State University named after F.M. Dostoevsky, ORCID: 0009-0005-7951-5924
Olga A. Golovanova – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Inorganic Chemistry, Omsk State University named after F.M. Dostoevsky, ORCID: 0000-0001-9995-5672

Поступила в редакцию/received: 01.08.2026; после рецензирования/revised: 20.09.2026; принята/accepted: 27.09.2026.

1. Введение

Фосфаты кальция, в первую очередь гидроксиапатит (ГА) $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ и фторапатит (ФГА) $Ca_{10}(PO_4)_6F_2$, являются основными неорганическими компонентами костной и зубной тканей млекопитающих, что объясняет их широкое применение в регенеративной медицине, ортопедии и стоматологии в композиционных материалах. Особый интерес исследователей последние годы привлекают биорезорбируемые композиты на основе полимолочной кислоты и фосфатов кальция, обеспечивающие контролируемую резорбцию и стимуляцию остеогенеза [1-2]. Однако деградация полилактида сопровождается локальным выделением молочной кислоты, что приводит к закислению микроокружения имплантата, развитию асептического воспаления и ускоренной резорбции материала [3]. В связи с этим понимание механизмов взаимодействия молочной кислоты с фосфатами кальция имеет критическое значение как для оптимизации состава биоразлагаемых имплантатов, так и для разработки стоматологических материалов, устойчивых к кариесогенной среде.

Известно, что изоморфное замещение гидроксильных групп на фторид-ионы в кристаллической решётке апатита существенно повышает его химическую устойчивость и снижает растворимость благодаря более плотной упаковке ионов [4-5]. Кинетические исследования растворения фторапатита показывают, что процесс описывается полиядерным механизмом с эффективным порядком реакции около 3, при этом поверхностная энергия при растворении (~42 мДж/м^2) значительно ниже, чем для процесса роста кристалла (120 мДж/м^2) [6]. Спектроскопические исследования подтверждают образование пассивирующего слоя на поверхности фторапатита в кислых средах, тормозящего дальнейшее растворение [7].

В отличие от минеральных кислот, слабые органические кислоты оказывают двойной эффект: выступают донорами протонов и одновременно лигандами, образующими хелатные комплексы с ионами Ca^{2+}, что смещает равновесие в сторону продуктов и предотвращает быстрое насыщение раствора [8]. Установлено, что скорость растворения гидроксиапатита в молочной кислоте зависит от концентрации недиссоциированной формы кислоты, способной проникать через гидратированный слой кристалла [9].

Тем не менее, количественная оценка кинетических и термодинамических параметров растворения фосфатов кальция именно в молочной кислоте, с учётом комплексообразования ионов кальция с лактат-ионами, остаётся недостаточно изученной. Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена отсутствием системных моделей, описывающих термодинамику и кинетику растворения фосфатов кальция в молочной кислоте. Разработка таких моделей позволит создать научно обоснованную базу для управления скоростью резорбции биоразлагаемых композитов, оптимизации методов синтеза стоматологических материалов и понимания фундаментальных механизмов деминерализации биогенных фосфатов кальция.

2. Экспериментальная часть

Получали ГА путем осаждения малорастворимого соединения из системы $Ca(NO_3)_2 - (NH_4)HPO_4 - NH_4OH - H_2O$ ($Ca/P = 1{,}70$ при $pH = 12{,}0$), ФГА из системы $Ca(OH)_2 - H_3PO_4 - HF$ по методике, описанной в работе [10].

Исследовали кинетику растворения синтезированных фосфатов кальция в молочной кислоте потенциометрическим методом на ионометре «И-160МИ» с использованием Ca-селективного электрода (поливинилхлоридный пленочный электрод с твердым внутренним контактом, «ЭЛИС-121Са»), параллельно фиксируя изменение pH системы. При постоянном перемешивании на магнитной мешалке фиксировали изменение концентрации ионов кальция в растворе и pH, которые свидетельствуют о растворении твердой фазы.

По кинетическим кривым предположили механизм взаимодействия МК и фосфатов кальция. Предложили термодинамические модели химической реакции.

3. Результаты и обсуждение

Для установления условий самопроизвольного протекания реакции и определения критических параметров процесса было проведено термодинамическое моделирование взаимодействия ГА (ФГА) с МК. Основываясь на литературных данных о механизмах растворения фосфатов

кальция в сильных кислотах [11, 12] предложили модели взаимодействия:

$$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 + 8HL \rightarrow 6CaHPO_4 + 4CaL_2 + 2H_2O;$$

$$Ca_{10}(PO_4)_6F_2 + 6HL \rightarrow 6CaHPO_4 + CaF_2 + 3CaL_2,$$

где HL – молочная кислота.

Ключевым отличием в механизме растворения ФГА от ГА является образование кислотоустойчивой фазы фторида кальция на поверхности кристалла.

При термодинамическом моделировании учли диссоциацию молочной кислоты, степень которой зависит от кислотности среды ($pK_a = 3{,}86$), и образование хелатного лактатного комплекса кальция ($\beta = 8{,}3$) [13]. С учетом вышеупомянутых условий рассчитали уравнение реакции в стандартных условиях и стандартную энергию Гиббса реакции (стандартные энергии Гиббса образования из справочника [14]):

$$1)\ Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_{2\ (solid)} + 8HL_{\ (solution)} \rightarrow 6CaHPO_{4\ (solid)} + 3{,}57CaL_{2\ (solution)} + 0{,}43Ca^{2+}{}_{(solution)} +$$

$$+0{,}86L^{-}{}_{(solution)} + 2H_2O_{(liquid)};$$

$$\Delta G^{\circ}{}_{x.p.\ ГА} = [6\cdot(-1675{,}4) + 3{,}57\cdot(-1886{,}2) + 0{,}43\cdot(-552{,}8) + 0{,}86\cdot(-664{,}1) + 2\cdot(-237{,}25)] -$$

$$-[-12674{,}2 + 8\cdot(-686{,}1)] = -1212{,}1 \text{ кДж/моль};$$

$$2)\ Ca_{10}(PO_4)_6F_{2\ (solid)} + 6HL_{\ (solution)} \rightarrow 6CaHPO_{4\ (solid)} + 2{,}68CaL_{2\ (solution)} + 0{,}32Ca^{2+}{}_{(solution)} +$$

$$+0{,}64L^{-}{}_{(solution)} + CaF_{2\ (solid)};$$

$$\Delta G^{\circ}{}_{x.p.\ ФГА} = [6\cdot(-1675{,}4) + 2{,}68\cdot(-1886{,}2) + 0{,}32\cdot(-552{,}8) + 0{,}64\cdot(-664{,}1) + (-1168{,}5)] -$$

$$-[-12979{,}4 + 6\cdot(-686{,}1)] = -761{,}0 \text{ кДж/моль}.$$

Таким образом, разрушение ГА термодинамически выгоднее чем растворения ФГА в молочной кислоте. На основе уравнения изотермы Вант-Гоффа вывели термодинамические выражения для расчёта энергии Гиббса реакций, позволяющие варьировать pH раствора и концентрацию ионов кальция в системе:

$$\Delta G_{x.p.\ ГА} = -1212{,}1 + 2{,}48\cdot(4\ln[Ca^{2+}] + 18{,}4\cdot[pH - 3{,}86]);$$

$$\Delta G_{x.p.\ ФГА} = -761{,}0 + 2{,}48\cdot(3\ln[Ca^{2+}] + 14{,}4\cdot[pH - 3{,}86]).$$

Результаты расчётов представлены в виде термодинамических поверхностей (см. рис. 1), которые показывают зависимость энергии Гиббса химической реакции от кислотности среды и концентрации свободных ионов Ca^{2+} в растворе.

Анализ термодинамических поверхностей позволил установить критические значения pH, при которых растворение фосфатов кальция термодинамически прекращается: для ГА $pH_{\max} = 5{,}2$, для ФГА $pH_{\max} = 4{,}5$. Полученные значения согласуются с литературными данными [4], скорость растворения ГА в молочной кислоте существенно зависит от концентрации недиссоциированной формы кислоты, которая преобладает при $pH < 3{,}84$.

Более высокая устойчивость ФГА в кислых средах объясняется образованием на поверхности кристалла кислотоустойчивой фазы фторида кальция, что подтверждается исследованиями, показавшими формирование вторичных твердых фаз ($CaHPO_4$ и CaF_2) при растворении фторапатита в кислотах.

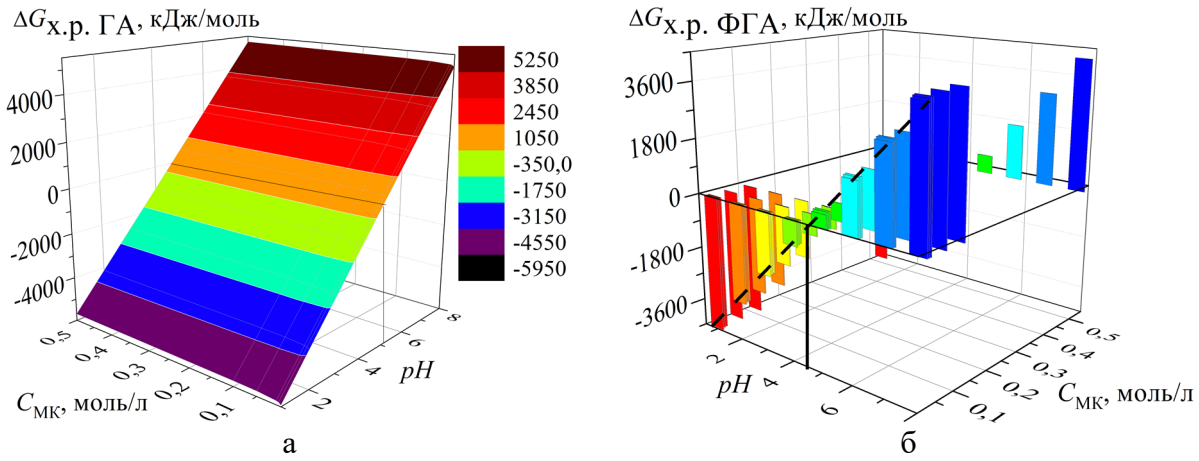

Рис. 1. Термодинамические поверхности: а – $\Delta G_{ГА} = f(C_{Ca^{2+}}, pH)$, б – $\Delta G_{ФГА} = f(pH, C_{Ca^{2+}})$.

Установлено, что рост pH, увеличение концентрации молочной кислоты, а также снижение концентрации ионов кальция в растворе приводит к увеличению энергии Гиббса химической реакции вплоть до прекращения процесса. При увеличении pH система резко достигает химического равновесия, и термодинамически процесс становится невозможным.

Кинетические кривые растворения гидроксиапатита и фторапатита в разбавленном (0,5 мМ) растворе молочной кислоты, моделирующем физиологическую концентрацию лактата в ротовой полости, демонстрируют резкую зависимость от кислотности среды. В сильно кислой среде ($pH < 4$) начальные участки кинетических кривых для обоих фосфатов кальция с высокой точностью описываются уравнением реакции первого порядка. Это свидетельствует о том, что лимитирующей стадией на начальном этапе является поверхностная химическая реакция, а не диффузия реагентов через приповерхностный слой. Экспериментально установленные начальные скорости растворения в кислой среде при физиологической концентрации кислоты – 1,0 ммоль/(л·мин) для ГА и 0,2 ммоль/(л·мин) для ФГА.

Полученные кинетические параметры и характер кривых полностью согласуются с предложенным механизмом взаимодействия и подтверждают его ключевые стадии:

$$Ca_{10}(PO_4)_6(OH) + 2HL \rightarrow Ca_{10}(PO_4)_6^{2+} + 2H_2O + 2L^-;$$

$$Ca_{10}(PO_4)_6^{2+} + HL \rightarrow Ca_{10}(PO_4)_5^{5+} + HPO_4^{2-} + L^- \Rightarrow 10Ca^{2+} + 6HPO_4^{2-} \rightarrow 6CaHPO_4.$$

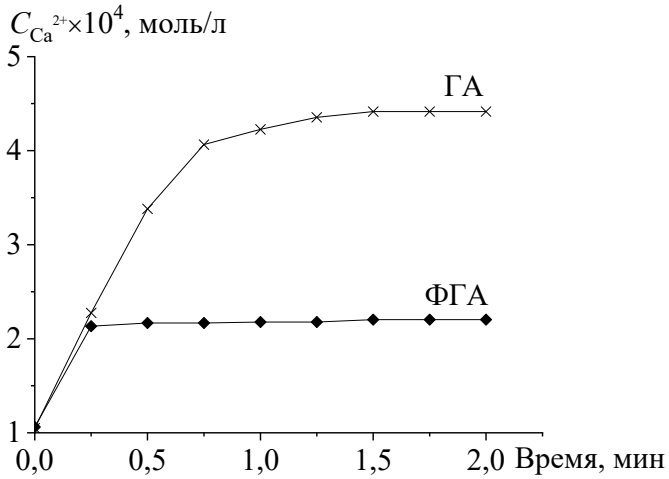

Рис. 2. Зависимость молярной концентрации ионов кальция в растворе от времени от начала растворения ГА и ФГА в 0,5 мМ растворе МК.

Во-первых, протекание реакции исключительно в кислой среде подтверждает, что активной атакующей частицей выступает недиссоциированная молекула молочной кислоты, способная протонировать фосфат-ионы кристаллической решетки. Во-вторых, сам факт устойчивого растворения фосфатов кальция в разбавленном растворе без мгновенной пассивации поверхности вторичными фосфатами кальция подтверждает ключевую роль хелатирования. Лактат-анионы связывают высвобождающиеся ионы Ca^{2+} в устойчивые растворимые комплексы, снижая их локальную активность у границы раздела фаз и термодинамически смещая равновесие в сторону продуктов.

Характерной особенностью кинетики обеих систем является чрезвычайно быстрое (в течение 1-2 минут) достижение равновесия несмотря на сохраняющуюся термодинамическую ненасыщенность объема раствора. Данное явление подтверждает эффект кинетического самоингибирования, обусловленный наноразмерными эффектами. По мере растворения размер кристаллов уменьшается до критического размера ямки травления (20-50 нм), после чего на поверхности физически не остается пространства для формирования новых активных центров [15].

Механизм реакции между апатитами и МК можно разложить на несколько стадий. На первом этапе протонированная форма молочной кислоты атакует поверхность кристалла, вызывая протонирование фосфат-ионов кристаллической решётки. На второй стадии высвобождающиеся ионы Ca^{2+} быстро хелатируются лактат-анионами с образованием устойчивого комплекса $[CH_3CH(OH)COO]_2Ca$, что предотвращает насыщение раствора свободными ионами кальция и смещает равновесие в сторону продуктов. Одновременно происходит образование вторичных твёрдых фаз на поверхности кристалла, таких как брушит $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$

или трикальцийфосфат $Ca_3(PO_4)_2$, а в случае ФГА на поверхности формируется защитный слой фторида кальция CaF_2 и растворение прекращается. Фосфаты кальция дополнительно протонируются, что пролонгирует растворение твердой фазы. Несмотря на то, что термодинамически процесс разрушения ГА выгоден, кинетическое торможение объясняется эффектом самоингибирования: при достижении критического размера кристаллов (20-50 нм) скорость растворения резко падает. Это явление объясняет устойчивость наноразмерных биогенных фосфатов кальция в физиологических средах [16].

Предложенный механизм взаимодействия объясняет двойную роль молочной кислоты: с одной стороны, она протонирует фосфат-ионы кристаллической решетки, с другой стороны, лактат-анионы хелатируют высвобождающиеся ионы кальция, образуя устойчивый комплекс. Это предотвращает насыщение раствора ионами кальция и смещает равновесие в сторону продуктов, поддерживая процесс термодинамически выгодным.

4. Заключение

В настоящей работе методами термодинамического моделирования и прямой потенциометрии установлены фундаментальные закономерности взаимодействия ГА и ФГА с молочной кислотой.

Показано, что процесс растворения термодинамически возможен исключительно в кислой среде: критические значения pH, при которых реакция прекращается, составляют 5,2 для ГА и 4,5 для ФГА. Кинетические исследования в разбавленных растворах (0,5 мМ - 0,5 М) демонстрируют, что в области процесс описывается уравнением реакции первого порядка. Начальная скорость растворения ГА превышает скорость растворения ФГА, что обусловлено образованием на поверхности последнего кислотоустойчивого пассивирующего слоя фторида кальция.

Предложенный механизм взаимодействия включает протонирование фосфат-ионов кристаллической решетки недиссоциированными молекулами молочной кислоты и последующее хелатирование высвобождающихся ионов Ca^{2+} лактат-анионами. Выявлено, что процесс быстро (в течение 1-2 минут) достигает равновесия вследствие эффекта кинетического самоингибирования, обусловленного достижением критического наноразмера кристаллитов. Полученные результаты создают теоретическую базу для управления резорбцией биодеградируемых имплантатов и разработки стоматологических материалов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-03-2025-469).

Библиографический список:

1. **da Silva, D.** Biocompatibility, biodegradation and excretion of polylactic acid (PLA) in medical implants and theranostic systems / D. da Silva, M. Kaduri, M. Poley et al. // Chemical Engineering Journal. – 2018. – V. 340. – P. 9-14.
2. **Borkowski, L.** Fluorapatite ceramics for bone tissue regeneration: Synthesis, characterization and assessment of biomedical potential / L. Borkowski, A. Przekora, A. Belcarz et al. // Materials Science and Engineering: C. – 2020. – V. 116. – Art. № 111211. – 10 p. DOI: 10.1016/j.msec.2020.111211.
3. **Dorozhkin, S.V.** Dissolution mechanism of calcium apatites in acids: a review of literature / S.V. Dorozhkin // World Journal of Methodology. – 2015. – V. 2. – I. 1. – P. 1-17. DOI: 10.5662/wjm.v2.i1.1.
4. **Avnimelech, Y.** Solubility and surface properties of finely divided hydroxyapatite / Y. Avnimelech, E.C. Moreno, W.E. Brown // Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A: Physics and Chemistry. – 1973. – V. 77A. – I. 1. – P. 149-155. DOI: 10.6028/jres.077A.008.
5. **McCann, H.G.** The solubility of fluorapatite and its relationship to that of fluorite / H.G. McCann // Archives of Oral Biology. – 1968. – V. 13. – I. 8. – P. 987-1001. DOI: 10.1016/0003-9969(68)90014-9.
6. **Christoffersen, J.** Kinetics of growth and dissolution of fluorapatite / J. Christoffersen, M.R. Christoffersen, T. Johansen // Journal of Crystal Growth. – 1996. – V. 163. – I. 3. – P. 295-303. DOI: 10.1016/0022-0248(95)00962-0.
7. **Chaïrat, C.** Fluorapatite surface composition in aqueous solution deduced from potentiometric, electrokinetic, and solubility measurements, and spectroscopic observations / C. Chaïrat, E.H. Oelkers, J. Schott, J.E. Lartigue // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2017. – V. 71. – I. 24. – P. 5888-5900. DOI: 10.1016/j.gca.2007.09.026.
8. **Margolis, H.C.** Kinetics of hydroxyapatite dissolution in acetic, lactic, and phosphoric acid solutions / H.C. Margolis, E.C. Moreno // Calcified Tissue International. – 1992. – V. 50. – I. 2. – P. 137-143. DOI: 10.1007/BF00298791.
9. **Tõnsuaadu, K.A** New perspective on fluorapatite dissolution in hydrochloric acid: thermodynamic calculations and experimental study / K. Tõnsuaadu, J. Kallas, R. Kuusik et al. // Inorganics. – 2021. – V. 9. – I. 8. – Art. № 65. – 11 p. DOI: 10.3390/inorganics9080065.
10. **Пат. 2406693 Российская Федерация, МПК C01B25/32.** Способ получения суспензии гидроксиапатита / Сабирзянов Н.А., Богданова Е.А., Хонина Т.Г.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела УрО РАН. – № 2008140563/15; заявл. 13.10.08; опубл. 20.12.10, Бюл. № 35. – 5 с.
11. **Hochrein, O.** On the molecular mechanisms of the acid-induced dissociation of hydroxyapatite in water / O. Hochrein, D. Zahn // Journal of Molecular Modeling. – 2011. – V. 17. – I. 6. – P. 1525-1528. DOI: 10.1007/s00894-010-0855-9.
12. **Xie, J.** Anisotropic crystal plane nature and wettability of fluorapatite / J. Xie, Q. Zhang, S. Mao et al. // Applied Surface Science. – 2019. – V. 493. – P. 294-307. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.06.195.
13. **Zakharov, N.A.** Synthesis and properties of hydroxyapatite – fluorapatite solid solutions / N. A. Zakharov, A. D. Aliev, V. V. Matveev et al. // Journal of Advanced Materials and Technologies. – 2023. – V. 8. – I. 2. – P. 120-129. DOI: 10.17277/jamt.2023.02.pp.120-129.
14. Термические константы веществ. – Режим доступа: https://www.chem.msu.ru/cgi-bin/tkv.pl?show=welcome.html. – 02.07.2026.
15. **Tang, R.** Size-effects in the dissolution of hydroxyapatite: an understanding of biological demineralization / R. Tang, L. Wang, G.H. Nancollas // Journal of Materials Chemistry. – 2004. – V. 14. – I. 14. – P. 2341-2346. DOI: 10.1039/b401097c.
16. **Tavoni, M.** Bioactive calcium phosphate-based composites for bone regeneration / M. Tavoni, M. Dapporto, A. Tampieri, S. Sprio // Journal of Composites Science. – 2021. – V. 5. – I. 9. – Art. № 227. – 27 p. DOI: 10.3390/jcs5090227.

References:

1. da Silva D., Kaduri M., Poley M. et al. Biocompatibility, biodegradation and excretion of polylactic acid (PLA) in medical implants and theranostic systems, *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 340, pp. 9-14. DOI: 10.1016/j.cej.2018.01.010.
2. Borkowski L., Przekora A., Belcarz A. et al. Fluorapatite ceramics for bone tissue regeneration: Synthesis, characterization and assessment of biomedical potential, *Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 116, art. no. 111211, 10 p. DOI: 10.1016/j.msec.2020.111211.
3. Dorozhkin S.V. Dissolution mechanism of calcium apatites in acids: a review of literature, *World Journal of Methodology*, 2015, vol. 2, issue 1, pp. 1-17. DOI: 10.5662/wjm.v2.i1.1.

4. Avnimelech Y., Moreno E.C., Brown W.E. Solubility and surface properties of finely divided hydroxyapatite, *Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A: Physics and Chemistry*, 1973, vol. 77A, issue 1, pp. 149-155. DOI: 10.6028/jres.077A.008.
5. McCann H.G. The solubility of fluorapatite and its relationship to that of fluorite, *Archives of Oral Biology*, 1968, vol. 13, issue 8, pp. 987-1001. DOI: 10.1016/0003-9969(68)90014-9.
6. Christoffersen J., Christoffersen M.R., Johansen T. Kinetics of growth and dissolution of fluorapatite, *Journal of Crystal Growth*, 1996, vol. 163, issue 3, pp. 295-303. DOI: 10.1016/0022-0248(95)00962-0. DOI: 10.1016/0022-0248(95)00962-0.
7. Chaïrat C., Oelkers E.H., Schott J., Lartigue J.E. Fluorapatite surface composition in aqueous solution deduced from potentiometric, electrokinetic, and solubility measurements, and spectroscopic observations, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, vol. 71, issue 24, pp. 5888-5900. DOI: 10.1016/j.gca.2007.09.026.
8. Margolis H.C., Moreno E.C. Kinetics of hydroxyapatite dissolution in acetic, lactic, and phosphoric acid solutions, *Calcified Tissue International*, 1992, vol. 50, issue 2, pp. 137-143. DOI: 10.1007/BF00298791.
9. Tõnsuaadu K., Kallas J., Kuusik R. et al. A new perspective on fluorapatite dissolution in hydrochloric acid: thermodynamic calculations and experimental study, *Inorganics*, 2021, vol. 9, issue 8, art. no. 65, 11 p. DOI: 10.3390/inorganics9080065.
10. Sabirzyanov N.A., Bogdanova E.A., Khonina T.G. *Sposob polucheniya suspenzii gidroksiapatita* [A method of obtaining a suspension of hydroxyapatite]. Patent RF, no. 2406693, 2010. (In Russian).
11. Hochrein O., Zahn D. On the molecular mechanisms of the acid-induced dissociation of hydroxyapatite in water, *Journal of Molecular Modeling*, 2011, vol. 17, issue 6, pp. 1525-1528. DOI: 10.1007/s00894-010-0855-9.
12. Xie J., Zhang Q., Mao S. et al. Anisotropic crystal plane nature and wettability of fluorapatite, *Applied Surface Science*, 2019, vol. 493, pp. 294-307. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.06.195.
13. Zakharov N.A., Aliev A.D., Matveev V.V. et al. Synthesis and properties of hydroxyapatite – fluorapatite solid solutions, *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 2023, vol. 8, issue 2, pp. 120-129. DOI: 10.17277/jamt.2023.02.pp.120-129.
14. Termicheskie konstanty veshchestv [Thermal constants of substances]. Available at: https://www.chem.msu.ru/cgi-bin/tkv.pl?show=welcome.html (accessed 07.06.2026). (In Russian).
15. Tang R., Wang L., Nancollas G.H. Size-effects in the dissolution of hydroxyapatite: an understanding of biological demineralization, *Journal of Materials Chemistry*, 2004, vol. 14, issue 14, pp. 2341-2346. DOI: 10.1039/b401097c.
16. Tavoni M., Dapporto M., Tampieri A., Sprio S. Bioactive calcium phosphate-based composites for bone regeneration, *Journal of Composites Science*, 2021, vol. 5, issue 9, art. no. 227, 27 p. DOI: 10.3390/jcs5090227.