УДК 620.22–617.3: 661.635.41; 54.057: 542.468 *Оригинальная статья*

Влияние способа синтеза на функциональные характеристики материалов на основе ультрадисперсного гидроксиапатита

Н.А. Сабирзянов[1], Е.А. Богданова[2], В.М. Скачков[1], С.А. Бибанаева[1], И.С. Медянкина[1]
[1]ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»
620078, Россия, Екатеринбург, ул. Первомайская, 91
[2]АО «Гиредмет»
111524, Россия, Москва, ул. Электродная, 2
skachkov@ihim.uran.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.954

Аннотация: Целью настоящей работы было автоклавное получение ультрадисперсного гидроксиапатита и сопутствующих продуктов синтеза, в частности материала гидроксиапатит-пирофосфат кальция также пригодного для изготовления фармацевтических композиций, лекарственных средств и препаратов. В ходе работы проведена аттестация полученных соединений с использованием современных физико-химических методов: рентгенофазового анализа, дифференциально-термического анализа, сканирующей электронной микроскопии и др. Оценено влияние способа синтеза на функциональные характеристики автоклавного гидроксиапатита (фазовая стабильность, термическая устойчивость и пр.) и проведено сопоставление экспериментальных данных со свойствами гидроксиапатита, полученного осаждением из раствора. Исследована возможность использования полученных автоклавным способом материалов в качестве высокотемпературной биокерамики. Получены данные о влиянии температуры обжига на линейные параметры, потерю массы и прочностные характеристики образцов. Оценено соответствие пределов прочности исследуемых образцов на сжатие требованиям, предъявляемым к материалам для имплантатов.

Ключевые слова: биоматериалы, гидроксиапатит, синтез, автоклав, осаждение из раствора, функциональные свойства, прочностные характеристики.

Сабирзянов Наиль Аделевич – д.т.н., главный научный сотрудник, заведующий лабораторией химии гетерогенных процессов, ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»
Богданова Екатерина Анатольевна – к.х.н., ведущий научный сотрудник лаборатории материалов и технологий четвертого энергетического перехода, АО «Гиредмет»
Скачков Владимир Михайлович – к.х.н., старший научный сотрудник лаборатории химии гетерогенных процессов, ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»
Бибанаева Светлана Александровна – научный сотрудник лаборатории химии гетерогенных процессов, ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»
Медянкина Ирина Сергеевна – к.х.н., научный сотрудник лаборатории перспективных функциональных материалов для химических источников тока, ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»

Original paper

Influence of synthesis method on functional characteristics of materials based on ultradispersed hydroxyapatite

N.A. Sabirzyanov[1], E.A. Bogdanova[2], V.M. Skachkov[1], S.A. Bibanaeva, I.S. Medyankina[1]
[1]Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia
[2]JSC «Giredmet», Moscow, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.954

Abstract: The aim of this work was the autoclave production of ultradispersed hydroxyapatite and by-products of the synthesis, in particular a calcium hydroxyapatite-pyrophosphate material, also suitable for the manufacture of pharmaceutical compositions, drugs, and preparations. In the course of the work, the obtained compounds were certified using modern physicochemical methods: X-ray phase

© Н.А. Сабирзянов, Е.А. Богданова, В.М. Скачков, С.А. Бибанаева, И.С. Медянкина, 2026

analysis, differential thermal analysis, scanning electron microscopy, etc. The effect of the synthesis method on functional characteristics of autoclave hydroxyapatite (phase stability, thermal stability, etc.) was assessed and a comparison of the experimental data with the properties of hydroxyapatite obtained by precipitation from solution was carried out. The possibility of using the materials obtained by the autoclave method as high-temperature bioceramics was investigated. Data were obtained on the effect of firing temperature on the linear parameters, weight loss and strength characteristics of the samples. Compliance of the compressive strength limits of the studied samples with the requirements for implant materials was also assessed.
Keywords: biomaterials, hydroxyapatite, synthesis, autoclave, precipitation from solution, functional properties, strength characteristics.

Nail A. Sabirzyanov – Dr. Sc., Chief Researcher Laboratories of heterogeneous processes chemistry, Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS, ORCID: 0000-0002-0304-8160
Ekaterina A. Bogdanova – Ph. D., Leading Researcher, Laboratory of materials and technologies of the fourth energy transition, JSC «Giredmet», ORCID: 0000-0002-6947-5368
Vladimir M. Skachkov – Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of heterogeneous processes chemistry, Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS, ORCID: 0000-0003-2551-3235
Svetlana A. Bibanaeva – Researcher, Laboratories of heterogeneous processes chemistry, Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS, ORCID: 0000-0002-1181-8735
Irina S. Medyankina – Ph. D., Researcher, Laboratory of promising and functional materials for CCS, Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS, ORCID: 0000-0002-8636-3755

Поступила в редакцию/received: 27.07.2026; после рецензирования/revised: 24.08.2026; принята/accepted: 01.09.2026.

1. Введение

Гидроксиапатит (ГАП) – $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ – представляет собой соединение фосфата кальция и в настоящее время активно изучаемое благодаря своей универсальности и разнообразию применения в биомедицине, экологии, пищевой промышленности, в области гетерогенного катализа, очистки от загрязняющих веществ и связывании токсичных металлов [1-3].

Несмотря на признанную эффективность ГАП, его промышленное применение во многих из указанных выше отраслях по-прежнему ограничено. Основные препятствия связаны со сложностью и дороговизной существующих процессов синтеза, которые часто требуют дорогостоящих реагентов, длительных этапов очистки или высокого энергопотребления [1-3]. Синтез гидроксиапатита – сложный процесс, включающий в себя широкий спектр методов от химического осаждения до биомиметических подходов [4-8]. На практике преобладает синтез ГАП из водных растворов, особенно если это касается получения материалов медицинского назначения, поскольку данный способ является наиболее «чистым» [2, 4].

Ранее авторами были разработаны технологически простые способы получения биоактивного наноструктурированного ГАП высокой степени чистоты [9, 10], основанные на методе осаждения из растворов, но существенным недостатком предложенных методов являлся малый выход конечного продукта, что способствовало поиску новых эффективных

методов синтеза. В этой связи был разработан перспективный, благодаря технологической простоте и экономичности, автоклавный способ получения гидроксиапатита, позволяющий получать кристаллический материал с соотношением $n(Ca)/n(P)$, близким к стехиометрическому 1,67, обеспечивающий достаточный выход продукта [11, 12].

Исследования показали, что разработанный авторами способ позволяет получать ультрадисперсный ГАП, схожий по своим поверхностным характеристикам с осажденным ГАП [12], однако полный комплекс физико-химических исследований ГАП, полученного автоклавным способом проведен не был, в то время как известно, что способ синтеза ГАП оказывает существенное влияние на его свойства [2, 4]. Таким образом, целью настоящей работы стало изучение влияния способа синтеза на функциональные характеристики ГАП (фазовая стабильность, термическая устойчивость, прочностные характеристики) и оценка возможности его использования в качестве материалов медицинского назначения, в том числе и высокотемпературной биокерамики.

Разработанный авторами автоклавный способ синтеза ГАП [11] позволяет влиять на состав конечного продукта и в зависимости от температуры, времени синтеза и концентрации исходных компонентов получать не только стехиометрический ГАП, но и материал $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 - Ca_2P_2O_7$ [12]. Данный композит также представляет интерес с точки зрения его использования в медицинской практике. Присутствие пирофосфата кальция не снижает биоактивность материала, $Ca_2P_2O_7$ имеет сходную с ГАП биологическую реакцию на формирование новой кости, потенциально поддается биологическому разложению и является одним из промежуточных продуктов минерализации кости [13]. Поэтому в данной работе наряду со стехиометрическим ГАП, полученным осаждением из раствора, и автоклавным ГАП, будут проведены сравнительные испытания образцов автоклавного ГАП, содержащего пирофосфат кальция $Ca_2P_2O_7$ (10 масс.% и 50масс.%).

2. Экспериментальная часть

Исследуемый в работе ГАП получали двумя способами. В первом случае стехиометрический наноразмерный ГАП $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ (средний диаметр частиц $d_{av} \sim 20$ нм [14]) получали осаждением из раствора согласно [9, 10]. Во втором случае взаимодействие осуществляли в автоклаве (Parr 4560 (США) объем 450 см^3, температура до 300°С и давление до 20 МПа) путем медленного введения в водную суспензию гидроксида кальция, массовое соотношение $Ca(OH)_2 : H_2O = 1:(10-20)$,

соответствующего количества 10-20 % раствора фосфорной кислоты (H_3PO_4), до соблюдения мольного соотношения $Ca(OH)_2 : H_3PO_4 = 5:3$ при постоянном перемешивании [11].

Разработанный авторами автоклавный способ синтеза [11] предполагает получение различных целевых продуктов в зависимости от концентрации фосфорной кислоты и температурных режимов проведения реакции. Стехиометрический ГАП состава $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ получали при использовании в качестве исходного компонента раствора фосфорной кислоты с концентрацией 10% и температуре синтеза 4-8°С. Образцы состава $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 - 10\% Ca_2P_2O_7$ и $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 - 50\% Ca_2P_2O_7$ получали при использовании раствора фосфорной кислоты с концентрацией 20% при температуре синтеза в своем пике 9°С и 10-25°С соответственно.

Формование таблеток из исследуемых порошковых образцов массой 0,5-1,0 г проводили одноосным двусторонним прессованием без введения связующего в цилиндрической стальной пресс-форме диаметром 10 мм на гидравлическом ручном прессе без выдержки при комнатной температуре и давлении прессования 20 МПа. Обжиг прессовок производили в муфельной печи Nabertherm L 9/11 в интервале температур 200-1200°С с шагом 200°С при скорости нагрева 10°С/мин с выдержкой 1 час в воздушной атмосфере, охлаждение до комнатной температуры проводилось с печью.

Состав исследуемых образцов в широком интервале температур (25-1200°С) контролировали посредством рентгенофазового анализа «Stadi-P» (Stoe, Германия), ДРОН-2,0; излучение $CuK\alpha$, интервал углов $10° \le 2\Theta \le 70°$, шаг съемки 0,03, идентификация фаз с помощью картотеки Powder Diffraction File JCPDSD-ICDD PDF2 [15]). Морфологию поверхности полученных продуктов изучали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JSM–6390 LA, JEOL (коэффициент увеличения от 5 до 300000, разрешающая способность 3,0 нм при 30 кВ). Поверхностные характеристики оценивали методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ) на анализаторах площади поверхности SORBI-MS (МЕТА, Россия) и Gemini VII 2390 V1.03, Micromeritics (США). Дифференциальный термический анализ (ДТА) проводили на термоанализаторе THERMOSKAN-2 (Аналитприбор, Россия) при скорости нагрева 10°С/мин в тонкостенных кварцевых тиглях до 800°С в воздушной среде.

Измерение микротвердости композиционных материалов методом Виккерса проводили на микротвердомере ПМТ-3М (Россия) с нагрузкой 0,98 Н (100 г) и временем нагружения 10 с. Усадку прессовок при спекании оценивали по изменению геометрических параметров с помощью

микрометра МК 0-25 мм.

Предел прочности на сжатие определяли при комнатной температуре на электромеханической универсальной испытательной машине Liangong Group CMT-5L (КНР) с автоматическим управлением и обработкой данных на ПК программой MaterialTest 3.0, класс точности 0,5, максимальная нагрузка 5 кН (~500 кг). Скорость перемещения траверсы нагружающего устройства составляла 1 мм/мин. Сжатию подвергались образцы цилиндрической формы (высота h – 5,0±2,0; диаметр ∅ – 10,0±1,0 мм) после высокотемпературной обработки при 1000 и 1200°С.

3. Обсуждение результатов

Исходные образцы и образцы, отожженные при различных температурах (200-1200°С), были охарактеризованы рентгенофазовым анализом (РФА). Данные РФА (см. рис. 1 а) указывают на то, что исходные исследуемые образцы, полученные в автоклаве при различных условия, как и стехиометрический осажденный ГАП, представляют собой слабо закристаллизованную фазу апатита (см. рис 2), о чем свидетельствуют широкие, не интенсивные дифракционные пики, являющиеся характерной особенностью наноразмерного ГАП. Последующая температурная обработка приводит к увеличению степени кристалличности образцов (см. рис. 1 б-г) и изменению фазового состава. Так при температуре 800°С в образце $Ca_{10}\left(PO_4\right)_6\left(OH\right)_2 - 50\% Ca_2P_2O_7$ наряду с заданными компонентами обнаруживаются следовые количества (менее 5%) фосфатов кальция различного состава.

При температуре 1000°С термическую стабильность и заданный фазовый состав сохраняет только ГАП, полученный автоклавным способом. Осажденный ГАП частично разлагается (~50%) на трикальций фосфат (ТКФ) – $Ca_3(PO_4)_2$, что согласуется с литературными данными [2].

В исследуемых образцах ГАП–10% $Ca_2P_2O_7$ и ГАП–50% $Ca_2P_2O_7$ после обжига при 1000°С также обнаруживается присутствие фазы ТКФ (~10%). После термообработки при 1200°С исследуемые образцы имеют идентичный фазовый состав, отличаясь только количественным соотношением фаз ГАП и ТКФ. В образцах ГАП–10% $Ca_2P_2O_7$ и ГАП–50% $Ca_2P_2O_7$ пирофосфат кальция полностью заменяется ТКФ согласно заданной стехиометрии. Содержание ТКФ в образце ГАП, полученном автоклавным способом, не превышает 10%, тогда как образец осажденного ГАП почти полностью переходит в ТКФ. Полученные данные позволяют сделать вывод, что автоклавные способы синтеза могут положительно сказаться на биоактивности материала, сохраняющего целевую фазу ГАП в составе даже при высокотемпературной обработке.

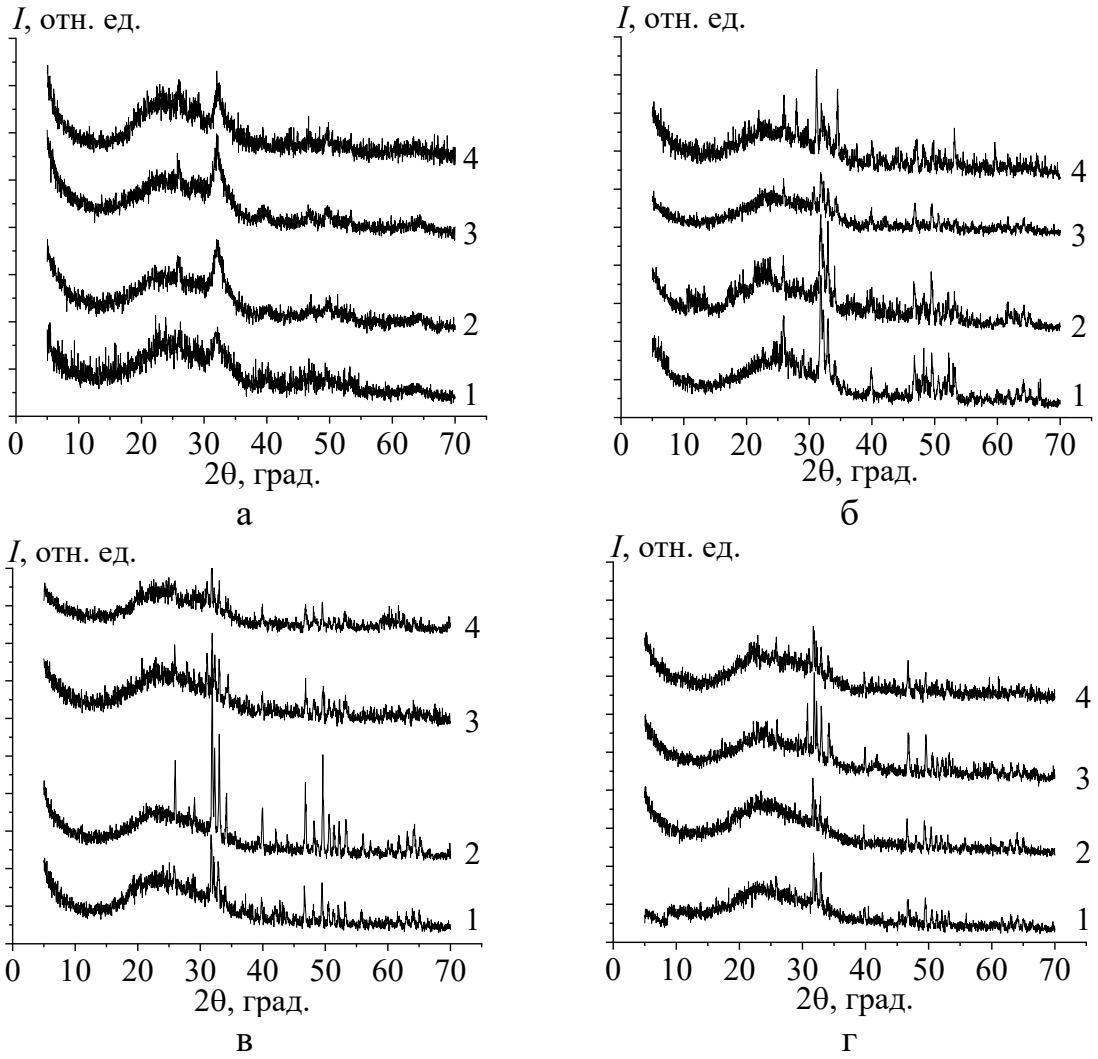
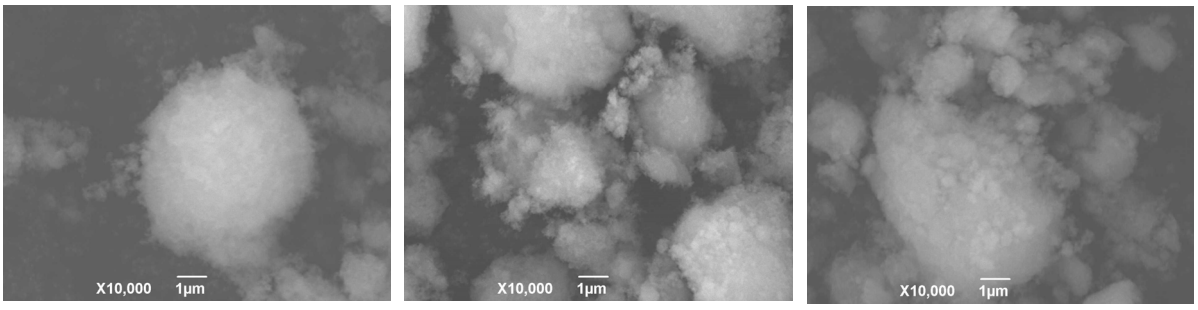


Рис. 1. Результаты РФА исследуемых образцов в зависимости от температуры: а – 25°С, б – 800°С; в – 1000°С; г – 1200°С. Образцы: 1 – ГАП–10% $Ca_2P_2O_7$, полученный в автоклаве, 2 – ГАП, полученный в автоклаве; 3 – ГАП, полученный осаждением из раствора; 4 – ГАП–50% $Ca_2P_2O_7$, полученный в автоклаве.



а б в

Рис. 2. Морфология исследуемых образцов: а – $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 - 10\% Ca_2P_2O_7$ (автоклав), б – $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ (автоклав); в – $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ (осажденный).

Температурное поведение исследуемых образцов также было изучено с использованием дифференциально-термического анализа

(см. рис. 3 и Таблицу 1). Термограммы всех исследуемых материалов указывают на один значимый эндотермический эффект, обусловленный потерей воды, протекающий в зависимости от состава образца в температурном диапазоне ~50-300°C и сопровождающийся для исследуемых образцов потерей ~10-15% массы от исходной. Обнаруженные посредством РФА фазовые превращения протекают постепенно в процессе обжига и не сопровождаются выраженными эффектами на кривых ДТА.

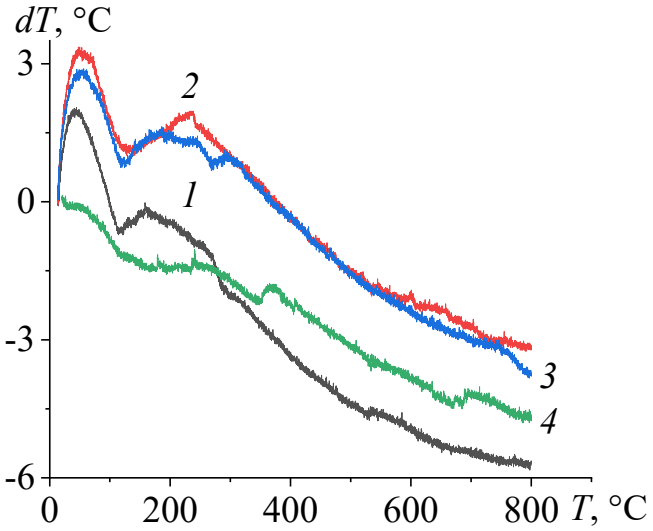


Рис. 3. Результаты ДТА исследуемых образцов: 1 – ГАП–10% $Ca_2P_2O_7$, полученный в автоклаве, 2 – ГАП, полученный в автоклаве; 3 – ГАП, полученный осаждением из растворов; 4 – ГАП–50% $Ca_2P_2O_7$, полученный в автоклаве.

Таблица 1. Характеристики термических эффектов исследуемых образцов (T_1 – температура начала термического эффекта, T_2 – температура окончания термического эффекта, L – удельная теплота термического эффекта).

Исследуемый образец	Характеристики термических эффектов		
	T_1,°C	T_2,°C	L, Дж/г
$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 - 10\% Ca_2P_2O_7$	50	158	41,31
	269	315	5,37
$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ (автоклав)	68	236	84,89
$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ (осажденный)	52	183	28,40
	250	295	3,27
$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 - 50\% Ca_2P_2O_7$	68	248	68,39
	302	368	11,19
	633	701	9,68

Исходные образцы вне зависимости от способа и условий синтеза обладают хорошо развитой пористой поверхностью (см. Таблицу 2). Однако, термическая обработка, сопровождающаяся убылью массы (см. рис. 4 а) и уплотнением материала, приводит не только изменению линейных параметром таблетированных образцов (см. рис. 4 б), но и к

значительному снижению площади удельной поверхности и пористости. Так после отжига при 1000-1200°С ГАП, полученный осаждением из раствора, полностью спекается, а удельная поверхность образцов, полученных в автоклаве, не превышает 10 м^2/г. После высокотемпературной обработки наиболее развитую площадь удельной поверхности из всех исследуемых образцов удается сохранить образцу ГАП, полученному автоклавном способом.

Таблица 2. Характеристики поверхности исходных образцов (25°С).

Исследуемый образец	Площадь удельной поверхности S_{red}, м^2/г	Средний диаметр пор, нм	Средняя ширина пор, нм	Объем пор V_p, см^3/г
$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 - 10\% Ca_2P_2O_7$	73,98	2,94	7,51	0,00006
$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ (автоклав)	50,37	3,99	6,59	0,00286
$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ (осажденный)	45,54	5,25	7,75	0,00597
$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 - 50\% Ca_2P_2O_7$	26,40	3,87	6,03	0,00305

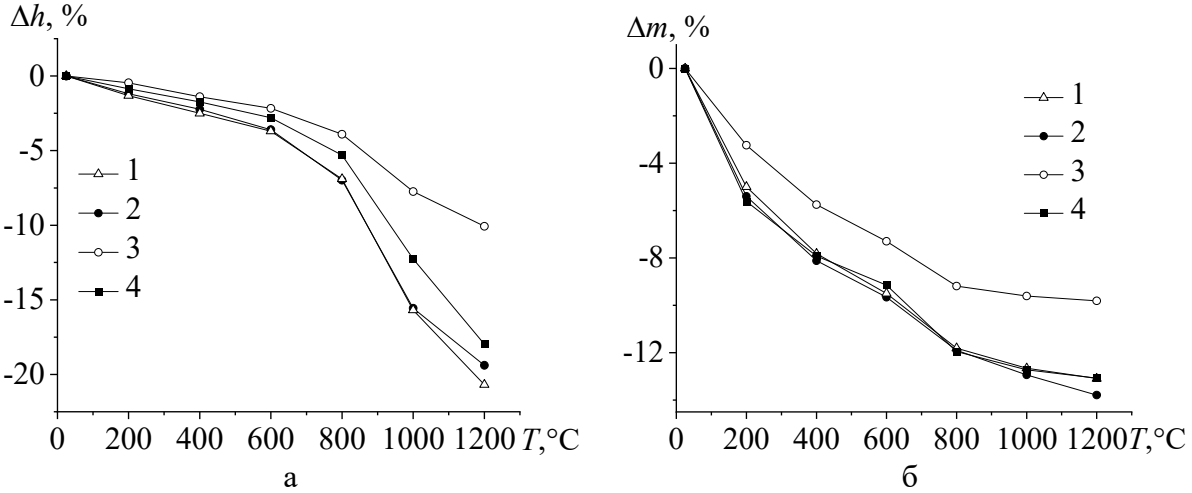


Рис. 4. Изменение параметров исследуемых образцов в процессе обжига: а – убыль массы, б – линейная усадка. Номера образцов соответствуют рис. 1.

Известно, что по сравнению с другими несущими керамическими композитами и металлами, такими, например, как титановые сплавы, ГАП обладает худшими механическими характеристиками и подвержен разрушению, что ограничивает его применение в полностью функциональных протезах [2, 4, 16]. Однако ГАП обладает выдающимися биомеханическими свойствами, в том числе высокой прочностью на разрыв и сжатие [4, 17], что было экспериментально подтверждено в настоящей работе.

Установлено, что автоклавный способ синтеза ГАП позволяет получать материалы, которые по прочностным характеристикам в области температур 600-1200°С существенно превосходят стехиометрический

ГАП, полученный осаждением из растворов (см. рис. 5), сохраняя при этом, согласно данным РФА, целевой фазовый состав.

Было оценено влияние способа и условий синтеза на предел прочности образцов ГАП на сжатие. Предел прочности на сжатие для всех исследуемых образцов составил ≥ 500 МПа, что соответствует требованиям, предъявляемым к прочностным характеристикам материалов имплантатов (см. Таблицу 3).

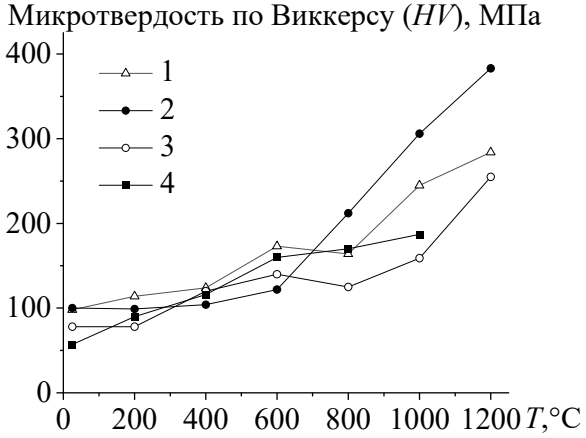


Рис. 5. Изменение микротвердости исследуемых образцов в процессе обжига. Номера образцов соответствуют рис. 1.

Таблица 3. Значения пределов прочности на сжатие σ_c различных материалов.

Материал	σ_c, МПа
Кости	170-215 [18-20]
Дентин	350-432 [21, 22]
Зубная эмаль	363-540 [21, 22]

4. Заключение

В ходе работы автоклавным способом синтеза были получены ультрадисперсные гидроксиапатит и сопутствующие продукты синтеза $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 - Ca_2P_2O_7$ (содержание пирофосфата кальция 10 масс.% и 50 масс.%). Изучено влияние способа синтеза на фазовую стабильность, термическую устойчивость и удельную поверхность полученных материалов. Проведен сравнительный анализ экспериментальных данных со свойствами ГАП, полученного осаждением из раствора. Показано, что ГАП, полученный в автоклаве, как и материал $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 - 10\% Ca_2P_2O_7$, в отличие от осажденного ГАП, термически стабилен, сохраняет фазовый состав даже при 1200°C, что положительно скажется на биоактивности материала. Кроме того, предложенный авторами автоклавный способ синтеза ГАП позволяет получать материалы, которые по прочностным характеристикам существенно превосходят стехиометрический ГАП, а пределы прочности на сжатие исследуемых образцов отвечают

требованиям, предъявляемым к материалам для имплантатов, что делает их перспективными материалами для дальнейшего исследования с целью применения в медицинской практике.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием и планами НИР ИХТТ УрО РАН (№ 124020600007-8).

Библиографический список:

1. **Adhikara, G.** Bovine hydroxyapatite for bone tissue engineering: Preparation, characterization, challenges, and future perspectives / G. Adhikara, A.P. Maharani, A. Puspitasari et al. // European Polymer Journal. – 2024. – V. 214. – Art. № 113171. – 12 p. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2024.113171.
2. **Баринов, С.М.** Биокерамика на основе фосфатов кальция / С.М. Баринов, В.С. Комлев. – М.: Наука, 2006. – 204 с.
3. **Bouzar, B.** Sustainable reuse of mineral waste: synthesis and comprehensive characterization of hydroxyapatite (HAP) / B. Bouzar, N.-E. Abriak, M. Benzerzour // Green Technologies and Sustainability. – 2026. – V. 4. – I. 2. – Art. № 100315. – 20 p. DOI: 10.1016/j.grets.2025.100315.
4. **Mysorea, T.H.M.** Apatite insights: From synthesis to biomedical applications / T.H.M. Mysorea, A.Y. Patil, C. Hegde, et al. // European Polymer Journal. – 2024. – V. 209. – Art. № 112842. – 19 p. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2024.112842.
5. **Yang, C.-C.** Hydrothermal synthesis of hydroxyapatite nanoparticles using biosurfactant and application on mesenchymal stem cells / C.-C. Yang, P.-Y. Lin, G. Dey et al. // Ceramics International. – 2025. – V. 51. – I. 14. – P. 19091-19101. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.02.088.
6. **An, G.-H.** Fabrication and characterization of a hydroxyapatite nanopowder by ultrasonic spray pyrolysis with salt-assisted decomposition / G.-H. An, H.-J. Wang, B.-H. Kim, et al. // Materials Science and Engineering: A. – 2007. – V. 449-451. – P. 821-824. DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.436.
7. **Han, J.-K.** Synthesis of high purity nano-sized hydroxyapatite powder by microwave-hydrothermal method / J.-K. Han, H.-Y. Song, F. Saito, B.-T. Lee // Materials Chemistry and Physics. – 2006. – V. 99. – I. 2-3. – P. 235-239. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2005.10.017.
8. **Liu, J.** The influence of pH and temperature on the morphology of hydroxyapatite synthesized by hydrothermal method / J. Liu, X. Ye, H. Wang, et al. // Ceramics International. – 2003. – V. 29. – I. 6. – P. 629-633. DOI: 10.1016/S0272-8842(02)00210-9.
9. **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.
10. **Пат. 2652193 Российская Федерация, МПК C01B25/32.** Способ получения суспензии апатита / Богданова Е.А., Сабирзянов Н.А., Скачков В.М.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела УрО РАН. – № 2017113484; заявл. 19.04.17; опубл. 25.04.18, Бюл. № 12. – 5 с.
11. **Пат. 2839844 Российская Федерация, МПК C01B25/32.** Способ получения аморфного гидроксиапатита / Богданова Е.А., Сабирзянов Н.А., Скачков В.М. и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела УрО РАН. – № 2025102289; заявл. 04.02.2025; опубл. 13.05.2025, Бюл. № 14. – 9 с.
12. **Скачков, В.М.** Изучение возможности автоклавного получения ультрадисперсного гидроксиапатита. Оценка влияния технологических параметров на состав конечного продукта / В.М. Скачков, К.И. Сабанин, И.С. Медянкина и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2025. – Вып. 17. – С. 752-763. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.752.
13. **Lin, F.-H.** Mechanical properties and histological evaluation of sintered β-$Ca_2P_2O_7$ with $Na_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$ addition / F.-H. Lin, C.-C. Lin, C.-M. Lu et al. // Biomaterials. – 1995. – V. 16. – I. 10. – P. 793-802. DOI: 10.1016/0142-9612(95)99642-Y.
14. **Bogdanova, E.A.** Formation of nanodimensional structures in precipitated hydroxyapatite by fluorine substitution / E.A. Bogdanova, V.M. Skachkov, I.S. Medyankina et al. // SN Applied Sciences. – 2020. – V. 2. – I. 9. – Art. № 1565. – 7 p. DOI: 10.1007/s42452-020-03388-5.
15. Powder Diffraction File JCPDS-ICDD PDF-2 (Set 1-47). (Release, 2016). – Режим доступа: www.url: https://www.icdd.com/pdf-2/. – 15.02.2026.

16. **Swain, S.** Mechanical, electrical, and biological properties of mechanochemically processed hydroxyapatite ceramics / S. Swain, R. Bhaskar, M.K. Gupta et al. // Nanomaterials. – 2021. – V.11. – I. 9. – Art. № 2216. – 12 p. DOI: 10.3390/nano11092216.
17. **Shuai, C.** Characterization and bioactivity evaluation of (polyetheretherketone/polyglycolicacid)-hydroyapatite scaffolds for tissue regeneration / C. Shuai, C. Shuai, P. Wu et al. // Materials. – 2016. – V. 9. – I. 11. – Art. № 934. – 13 p. DOI: 10.3390/ma9110934.
18. **Schmidt-Nielsen, K.** Scaling: why is animal size so important? / K. Schmidt-Nielsen. – Cambridge: Cambridge University Press, 1984. – 241 p.
19. **Currey, J.D.** Mechanical properties of vertebrate hard tissues / J.D. Currey // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. – 1998. – V. 212. – Part H. – P. 399-411. DOI:10.1243/0954411981534178.
20. **Аврунин, А.С.** О физической природе жесткости и прочности костной ткани / А.С. Аврунин, Б.Е. Мельников, Л.К. Паршин и др. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2010. – № 31 (106). – С. 205-210.
21. **Зайцев, Д.В.** Деформация и разрушение человеческого дентина / Д.В. Зайцев, С.С. Григорьев, О.В. Антонова и др. // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 6. – С. 37-44.
22. **Зайцев, Д.В.** Прочностные свойства дентина и эмали зубов человека при одноосном сжатии / Д.В. Зайцев, П.Е. Панфилов // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21. – Вып. 3. – С. 802-804. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-802-804.

References:

1. Adhikara G., Maharani A.P., Puspitasari A. et al. Bovine hydroxyapatite for bone tissue engineering: Preparation, characterization, challenges, and future perspectives, *European Polymer Journal*, 2024, vol. 214, art. no. 113171. 12 p. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2024.113171.
2. Barinov S.M., Komlev V.S. *Biokeramika na osnove fosfatov kal'tsiya* [Calcium phosphate bioceramics]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 204 p. (In Russian).
3. Bouzar B., Abriak N.-E., Benzerzour M. Sustainable reuse of mineral waste: synthesis and comprehensive characterization of hydroxyapatite (HAP), Green Technologies and Sustainability, 2026, vol. 4, issue 2, art. no. 100315, 20 p. DOI: 10.1016/j.grets.2025.100315.
4. Mysorea T.H.M., Patil A.Y., Hegde C., et al. Apatite insights: from synthesis to biomedical applications, *European Polymer Journal*, 2024, vol. 209, art. no. 112842, 19 p. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2024.112842.
5. Yang C.-C., Lin P.-Y., Dey G. et al. Hydrothermal synthesis of hydroxyapatite nanoparticles using biosurfactant and application on mesenchymal stem cells, *Ceramics International*, 2025, vol. 51, issue 14, pp.19091-19101. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.02.088.
6. An G.-H., Wang H.-J., Kim B.-H. et al. Fabrication and characterization of a hydroxyapatite nanopowder by ultrasonic spray pyrolysis with salt-assisted decomposition, *Materials Science and Engineering: A*, 2007, vol. 449-451, pp. 821-824. DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.436.
7. Han J.-K., Song H.-Y., Saito F., Lee B.-T. Synthesis of high purity nano-sized hydroxyapatite powder by microwave-hydrothermal method, *Materials Chemistry and Physics*, 2006, vol. 99, issue 2-3, pp. 235-239. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2005.10.017.
8. Liu J., Ye X., Wang H. et al. The influence of pH and temperature on the morphology of hydroxyapatite synthesized by hydrothermal method, *Ceramics International*, 2003, vol. 29, issue 6, pp. 629-633. DOI: 10.1016/S0272-8842(02)00210-9.
9. 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).
10. Bogdanova E.A., Sabirzyanov N.A., Skachkov V.M. *Sposob polucheniya suspenzii apatita* [A method of obtaining a suspension of apatite]. Patent RF, no. 2652193, 2018. (In Russian).
11. Bogdanova E.A., Sabirzyanov N.A., Skachkov V.M. et al. *Sposob polucheniya amorfnogo gidroksiapatita* [Method of producing amorphous hydroxyapatite]. Patent RF, no. 2839844, 2025. (In Russian).
12. Skachkov V.M., Sabanin K.I., Medyankina I.S. et al. Izuchenie vozmozhnosti avtoklavnogo polucheniya ultradispersnogo gidroksiapatita. Otsenka vliyaniya tekhnologicheskikh parametrov na sostav konechnogo produkta [Study of the possibility of autoclave production of ultrafine hydroxyapatite. Assessment of the effect of technological parameters on the composition of the final product], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2025, issue 17, pp. 752-763. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.752. (In Russian).
13. Lin F.-H., Lin C.-C., Lu C.-M. et al. Mechanical properties and histological evaluation of sintered β-$Ca_2P_2O_7$ with $Na_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$ addition, *Biomaterials*, 1995, vol. 16, issue 10, pp. 793-802. DOI: 10.1016/0142-9612(95)99642-Y.

14. Bogdanova E.A., Skachkov V.M., Medyankina I.S., et al. Formation of nanodimensional structures in precipitated hydroxyapatite by fluorine substitution, *SN Applied Sciences*, 2020, vol. 2, issue 9, art. no. 1565, 7 p. DOI: 10.1007/s42452-020-03388-5.
15. Powder Diffraction File JCPDS-ICDD PDF-2 (Set 1-47). (Release, 2016). – Режим доступа: www.url: https://www.icdd.com/pdf-2/. – 15.02.2026.
16. Swain S., Bhaskar R., Gupta M.K. et al. Mechanical, electrical, and biological properties of mechanochemically processed hydroxyapatite ceramics, *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, issue 9, art. no. 2216, 12 p. DOI: 10.3390/nano11092216.
17. Shuai C., Shuai C., Wu P. et al. Characterization and bioactivity evaluation of (polyetheretherketone/polyglycolicacid)-hydroyapatite scaffolds for tissue regeneration, *Materials*, 2016, vol. 9, issue 11, art. no. 934, 13 p. DOI: 10.3390/ma9110934.
18. Schmidt-Nielsen K. *Scaling: why is animal size so important?* Cambridge, Cambridge University Press, 1984, 241 p.
19. Currey J.D. Mechanical properties of vertebrate hard tissues, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1998, vol. 212, part H, pp. 399-411. DOI: 10.1243/0954411981534178.
20. Avrunin A.S., Melnikov B.E., Parshin L.K. et al. O fizicheskoj prirode zhestkosti i prochnosti kostnoj tkani [On the physical nature of bone tissue rigidity and strength], *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta [St. Petersburg State Polytechnical University Journal]*, 2010, no. 31(106), pp. 205-210. (In Russian).
21. Zaitsev D.V., Grigoriev S.S., Antonov O.V. et al. Deformatsiya i razrushenie chelovecheskogo dentina [Deformation and destruction of human dentin], *Deformatsiya i Razrushenie materialov [Deformation and Fracture of Materials]*, 2011, vol. 6, pp. 37-44. (In Russian).
22. Zaitsev D.V., Panfilov P.E. Prochnostnye svojstva dentina i emali zubov cheloveka pri odnoosnom szhatii [Strength properties of human dentin and enamel under uniaxial compression], *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Tambov University Reports. Series Natural and Technical Sciences]*, 2016, vol. 21, issue 3, pp. 802-804. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-802-804. (In Russian).