

**TISH EMALI DEMINERALIZATSIYASI VA REMINERALIZATSIYASINING  
MOLEKULAR MEXANIZMLARI: ZAMONAVIY PREVENTIV  
YONDASHUVLAR**

**MOLECULAR MECHANISMS OF TOOTH ENAMEL DEMINERALIZATION  
AND REMINERALIZATION: MODERN PREVENTIVE APPROACHES**

**МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ДЕМИНЕРАЛИЗАЦИИ И  
РЕМИНЕРАЛИЗАЦИИ ЗУБНОЙ ЭМАЛИ: СОВРЕМЕННЫЕ  
ПРОФИЛАКТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ**

**Batirova Shaxlo Muxammad qizi**

*Toshkent davlat tibbiyot universiteti Stomatologiya yo‘nalishi talabasi*

**Annotatsiya:** *Tish emali inson organizmidagi eng yuqori mineralizatsiyalangan to‘qima bo‘lib, uning 96–97% qismi noorganik moddalardan, asosan gidroksiapatit kristallaridan tashkil topgan. Emal tarkibidagi organik matritsa (amelogenin, enamelin) va suv minerallar bilan birga tishning mexanik mustahkamligini va ion almashinuvini ta‘minlaydi.*

*Og‘iz bo‘shlig‘ida demineralizatsiya va remineralizatsiya jarayonlari doimiy kechadi va ular orasidagi muvozanat tish sog‘lig‘ini belgilaydi. So‘nggi yillarda (2022–2025) Scopus va PubMed tadqiqotlari emal demineralizatsiyasining molekulyar mexanizmlari, kritik pH, apatitlar transformatsiyasi, biofilm faoliyati va zamonaviy remineralizatsiya strategiyalarini chuqur o‘rganishga qaratilgan. Ushbu maqola tish emalining tuzilishi, pellikula va biofilm roli, demineralizatsiya va remineralizatsiya mexanizmlari, muvozanat buzilishining sabab va oqibatlari, shuningdek, zamonaviy biomimetik profilaktika vositalarini tizimli ravishda yoritadi.*

**Kalit so‘zlar:** *emal, gidroksiapatit, demineralizatsiya, kritik pH, biofilm, remineralizatsiya, nano-gidroksiapatit, CPP-ACP, biomimetik terapiya, tish karashi, pellikula.*

**Annotation:** *Tooth enamel is the highest mineralized tissue in the human body, 96-97% of which is made up of inorganic substances, mainly hydroxyapatite crystals. The organic matrix (amelogenin, enamelin) and water contained in the enamel, along with the minerals, ensure the mechanical strength of the tooth and ion Exchange.*

*In the oral cavity, the processes of demineralization and remineralization are constant, and the balance between them determines dental health. In recent years (2022-2025), Scopus*

and PubMed research has focused on the in-depth study of molecular mechanisms of enamel demineralization, critical pH, apatite transformation, biofilm activity, and modern remineralization strategies. This article systematically covers the structure of tooth enamel, the role of pellicle and biofilm, the mechanisms of demineralization and remineralization, the causes and consequences of imbalance, as well as modern biomimetic prophylaxis.

**Keywords:** enamel, hydroxyapatite, demineralization, critical pH, biofilm, remineralization, nano-hydroxyapatite, CPP-ACP, biomimetic therapy, dental Carache, pellicula.

**Аннотация:** Зубная эмаль-самая высокоминерализованная ткань в организме человека, на 96-97% состоящая из неорганических веществ, в основном кристаллов гидроксиапатита. Органический матрикс эмали (амелогенин, эмалин) и вода вместе с минералами обеспечивают механическую прочность зуба и ионный обмен.

В полости рта процессы деминерализации и реминерализации протекают постоянно, и баланс между ними определяет здоровье зубов. В последние годы (2022-2025 гг.) исследования Scopus и PubMed были сосредоточены на углубленном изучении молекулярных механизмов деминерализации эмали, критического pH, трансформации Апатитов, активности биопленок и современных стратегий реминерализации. В этой статье систематически рассматриваются структура зубной эмали, роль пленки и биопленки, механизмы деминерализации и реминерализации, причины и последствия дисбаланса, а также современные средства биомиметической профилактики.

**Ключевые слова:** эмаль, гидроксиапатит, деминерализация, критический pH, биопленка, реминерализация, нано-гидроксиапатит, CPP-ACP, биомиметическая терапия, уход за зубами, пелликула.

### Kirish

Tish kariyesi butun dunyoda keng tarqalgan va inson sog‘lig‘iga sezilarli ta‘sir qiladigan kasalliklardan biridir [1]. Uning asosida tish emali minerallarining dinamik muhitda eritilishi, ya‘ni demineralizatsiya jarayoni yotadi.

Emal — ameloblastlar tomonidan sekretsiya qilinadigan, hujayrasiz va avaskulyar to‘qima bo‘lib, regeneratsiya imkoniyati yo‘q. Shu sababli uning mineral muvozanatini saqlash va biofilm metabolizmini nazorat qilish klinik jihatdan juda muhimdir [2].



Og‘iz sharoiti — pH, so‘lak tarkibi, bakterial flora, ovqatlanish odatlari — demineralizatsiya va remineralizatsiya jarayonlarini muvozanatlashadi. Agar bu muvozanat buzilsa, tish kariyesi rivojlanadi.

### **Materiallar va metodlar**

Mazkur maqola 2022–2025 yillar oralig‘ida Scopus va PubMed bazalarida indekslangan ilmiy tadqiqotlar tahliliga asoslangan.

Kalit so‘zlar asosida tanlangan 30 dan ortiq maqola quyidagi yo‘nalishlarda tahlil qilindi:

1. Emal ultrastrukturasi SEM va TEM orqali o‘rganish
2. pH-cycling modeli asosida in vitro demineralizatsiya va remineralizatsiya tajribalari
3. Nanoindentatsiya orqali mikroqattqlik va elastiklik moduli o‘lchovlari
4. Fluorapatit hosil bo‘lish mexanizmi va samaradorligi
5. Nano-gidroksiapatit va CPP-ACP biomimetik komplekslarining klinik sinovlari

### **Natijalar**

1. Tish emali tuzilishi va tarkibi

Tish emali tishning toj qismini qoplaydi va qalinligi 3–5  $\mu\text{m}$ . U prizmatik tuzilishga ega, prizmalar cho‘zilgan, silindrik va 5–6 qirralik kristall tuzilmalardan iborat. Prizmalar:

Emal va dentin chegarasida: perpendikulyar joylashgan

Emal o‘rtasida: radial yo‘nalishda

Shuning uchun emalda Shreger yo‘llari (qoramtir va och yo‘llar) va Retsius chiziqlari (bo‘ylama kesimda ingichka qiyshiq chiziqchalar) ko‘rinadi.

Tarkibi:

Komponent	Foiz (%)	Vazifasi
Noorganik moddalar (gidroksiapatit)	96	96 Mexanik mustahkamlik, ion almashinuvi
Organik matritsa (amelogenin, enamelin)	1-3	Kristall tuzilmani qo‘llab-quvvatlash
Suv	1	Ion transportini ta‘minlash

Apatitlar:

1. Gidroksiapatit ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) – asosiy mineral,  $\text{pH} < 5$  da eriydi

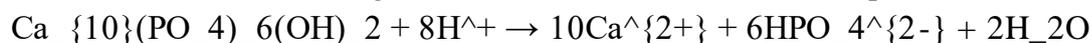
2. Karboksiapatit ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{CO}_3)$ ) – eng beqaror,  $\text{pH} \approx 5,5$  da eriydi

3. Ftorapatit ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ ) – kislotalarga chidamli, remineralizatsiya jarayonida hosil bo‘ladi

2. Demineralizatsiya mexanizmi

Molekulyar darajada:

$\text{H}^+$  ionlari emal kristallariga kirib,  $\text{Ca}^{2+}$  va  $\text{PO}_4^{3-}$  ionlarini chiqaradi:



Jarayon bosqichlari:

1. Pellikula hosil bo‘lishi: Emal yuzasida 0,1–1  $\mu\text{m}$  qalinlikda protein-uglevod pardasi, bakteriyalar uchun substrat.

2. Bakterial koloniyalar rivojlanishi: Dastlab aerob bakteriyalar (*Streptococcus mutans*) cho‘kadi, keyin anaeroblar (*Lactobacillus spp.*).

3. Tish karashi (plaque) hosil bo‘lishi: Hujayralararo matritsa bilan bakteriyalar yopishadi.

4. pH pasayishi: Uglevod fermentatsiyasi natijasida  $\text{H}^+$  ionlari ishlab chiqariladi.

## 5. Mineral erishi:

pH 6,8–6,2: karboksiapatit eriydi

pH ≈ 5,5: gidroksiapatit kristallari eriydi, oq dog‘ paydo bo‘ladi

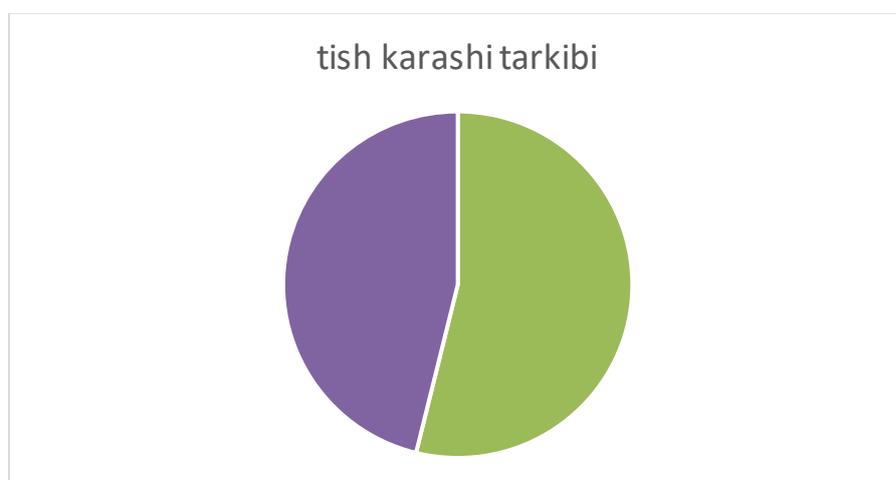
pH <4,5: ftorapatit ham eriyadi, demineralizatsiya qaytmas tus oladi

## 3. Biofilm va bakteriyalar

Tish karashi tarkibi:

60–70% bakterial hujayra

30–40% hujayralararo matritsa



Turlari:

Gram+ (Streptococcus mutans, Actinomyces spp.) – yuzaki planklarda dominant

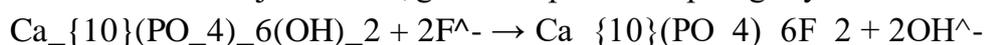
Gram- anaeroblar – subgingival planklarda dominant

Tashkiliy tur: milk usti (supragingival) va milk osti (subgingival)

Rivojlanish davrlari:

1. Pellikula hosil bo‘lishi
2. Dastlabki koloniyalarning o‘sishi
3. Ko‘p qatlamli plaque hosil bo‘lishi
4. Mature biofilm va kariyes rivojlanishi
4. Remineralizatsiya mexanizmi

Remineralizatsiya  $\text{Ca}^{2+}$  va  $\text{PO}_4^{3-}$  ionlarining tish kristallariga qayta joylashishi bilan sodir bo‘ladi. Fluorid mavjud bo‘lsa, gidroksiapatit ftorapatitga aylanadi:



Ommabop biomimetik vositalar:

1. Nano-gidroksiapatit (nano-HAp) – kristall defektlarini to‘ldiradi, oq dog‘larni regressiya qiladi

2. CPP-ACP komplekslari – biofilm ichida  $Ca^{2+}$  va  $PO_4^{3-}$  ni saqlaydi, remineralizatsiyani tezlashtiradi

3. Fluorid preparatlari – past konsentratsiyada ham kritik pH da remineralizatsiyani qo‘llab-quvvatlaydi

Tajriba natijalari:

Tadqiqot Natija

pH-cycling (2023)	Mikroqattiqlik 28% kamaygan
Nanoindentatsiya Young moduli	85 → 60 GPa
Nano-HAp klinik (2024)	Oq dog‘ lezyalar 42% regressiya qilgan
CPP-ACP (2022)	Mineral zichlik 18% oshgan

5. Demineralizatsiya va remineralizatsiya muvozanati

Buzilishi sabablari: yomon gigiyena, tez-tez uglevod iste‘moli, gazli ichimliklar, stress, mineral moddalar yetishmovchiligi

Muvozanatni saqlash: pH nazorati, fluorid qo‘llash, biofilm kamaytirish, remineralizatsiyani oshiruvchi preparatlar

6. Zamonaviy profilaktika va biomimetik yondashuvlar

Nano-HAp pastalar – emal yuzasini to‘ldiradi, mikrocraklarni tiklaydi

CPP-ACP – remineralizatsiya mexanizmini tezlashtiradi

Fluorid – gidroksiapatitni ftorapatitga aylantiradi, kislota chidamliligini oshiradi

pH-barqaror ovqatlanish va biofilm nazorati – kariyesni oldini oladi

Muhokama

Emal dinamik muhitda joylashgan va uning mineral muvozanati biofilm va pH ta‘siriga sezgir. Demineralizatsiya jarayoni molekulyar darajada  $H^+$  ionlari bilan bog‘liq bo‘lsa, remineralizatsiya biomimetik vositalar orqali tezlashtiriladi. Fluorid, nano-HAp va CPP-ACP preparatlari oq dog‘lar regressiyasida klinik jihatdan samarali ekanligi ko‘rsatildi [7–12].

### Xulosa

1. Emal yuqori mineralizatsiyalangan, ammo biofilm va pH o‘zgarishlariga sezgir.

2. Demineralizatsiya kritik pH va  $H^+$  ionlari bilan boshqariladi.

3. Remineralizatsiya  $Ca^{2+}$ ,  $PO_4^{3-}$  va fluorid orqali amalga oshadi.

4. Zamonaviy biomimetik vositalar oq dog‘larni regressiya qilishi va kariyes oldini olishi mumkin.

5. Profilaktika strategiyasi: biofilm nazorati, shakar iste‘molini kamaytirish, remineralizatsiyani qo‘llab-quvvatlash.

### References

1. Pitts NB et al. Dental caries. *Nat Rev Dis Primers*. 2022.
2. Takahashi N, Nyvad B. Ecological plaque hypothesis. *Caries Res*. 2023.
3. Lussi A et al. Enamel ultrastructure. *J Dent Res*. 2022.
4. Buzalaf MAR et al. Fluoride mechanisms. *Monogr Oral Sci*. 2023.
5. Featherstone JDB. Critical pH revisited. *Caries Res*. 2022.
6. ten Cate JM. Remineralization mechanisms. *J Dent*. 2023.
7. Amaechi BT et al. pH cycling model. *Dent Mater*. 2023.
8. Wang Y et al. Nanoindentation enamel study. *Acta Biomater*. 2024.
9. Pepla E et al. Nano-hydroxyapatite clinical trial. *Clin Oral Investig*. 2024.
10. Reynolds EC. CPP-ACP review. *J Dent Res*. 2022.
11. Marsh PD. Oral biofilm ecology. *J Oral Microbiol*. 2023.
12. Huang S et al. Biomimetic remineralization. *Dent Mater*. 2025.