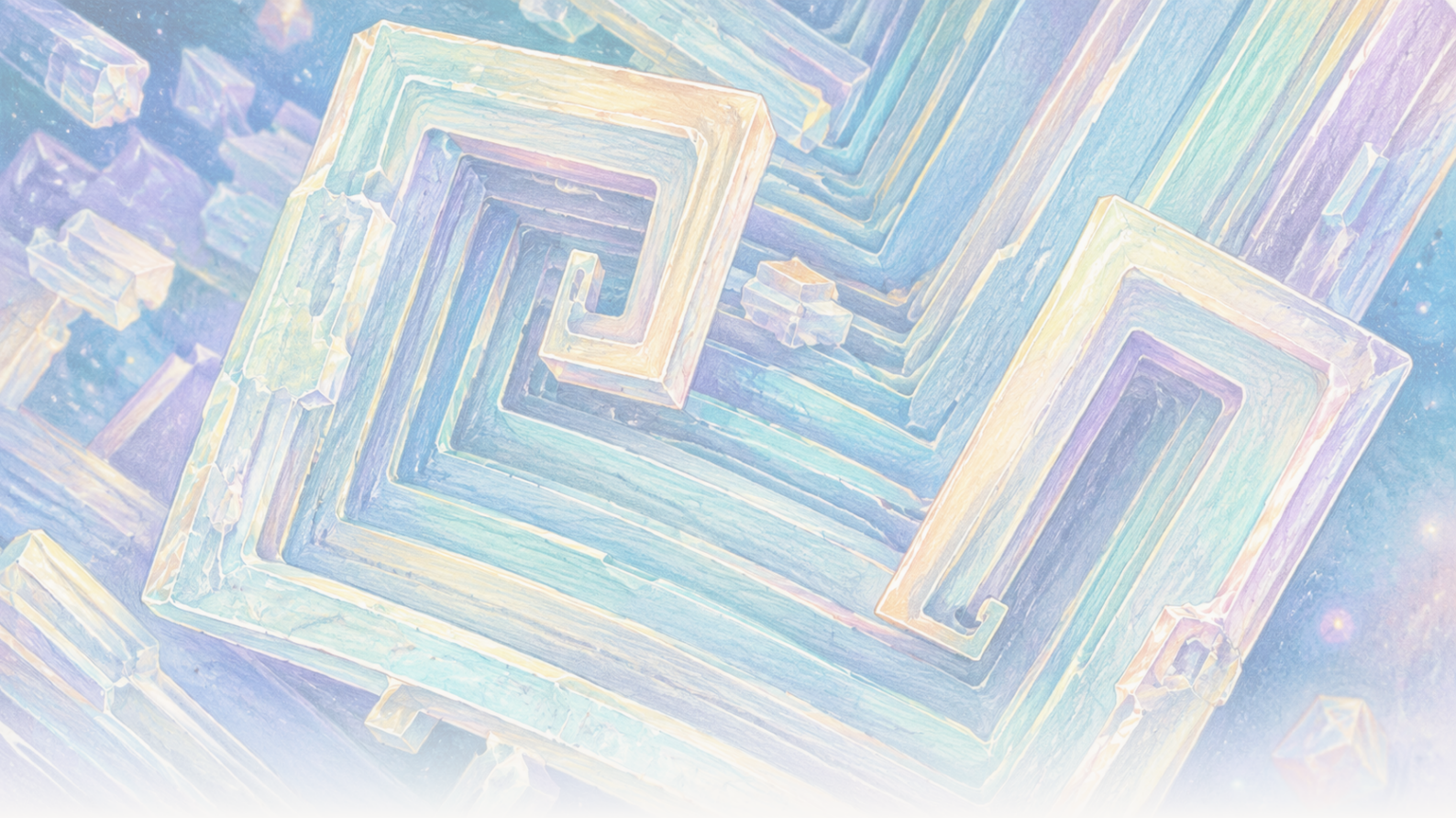


The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

На арбіце кухонная соль вырасла ў полыя кубы. Гравітацыя змяніла расол, а не соль

Сярод крышталёў хларыду натрыю, вырашчаных на Міжнароднай касмічнай станцыі, былі полыя ступеньчатыя кубы памерам ад 2 да 8 міліметраў. Артыкулы падтрымліваюць тлумачэнне праз перанос: звычайнае асяданне і плынь дзякуючы плавучасці былі моцна прыгнечаныя, а на раннім этапе росту дамінавала дыфузія. Рашотка не ператварылася ў новую форму солі, і эксперыменты не ўстанаўліваюць прамысловы працэс.

Written by Matteo · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Matteo and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Comparison of sodium chloride hopper cubes grown under microgravity and terrestrial conditions*, Donald Pettit and Pietro Fontana, npj Microgravity 5, 25 (2019) · DOI: 10.1038/s41526-019-0085-0

На арбіце звычайная кухонная соль вырасла ў полыя ступеньчатыя кубы

Крышталі выглядалі амаль архітэктурна: квадратныя рамкі ўнутры квадратных рамак, а іх грані прыступкамі паглыбляліся ўсярэдзіну.

Яны складаліся са звычайнага хларыду натрыю — таго самага рэчыва, што і кухонная соль. Незвычайным быў не матэрыял, а расол вакол яго.

На Зямлі крышталь, які расце ў аб'ёме вадкасці сантыметровага маштабу, можа апускацца, дакранацца да сценкі або паверхні і спрыяць узнікненню адрозненняў у шчыльнасці, што прымушаюць раствор цыркуляваць. На Міжнароднай касмічнай станцыі звычайнае асяданне і плынь, выкліканая плавучасцю, былі моцна прыгнечаныя. Некаторыя крышталі солі заставаліся ва ўзважаным стане дастаткова доўга, каб павольна і больш сіметрычна вырасці ў **полыя ступеньчатыя кубы**, або лейкападобныя крышталі, з рэбрамі ад 2 да 8 міліметраў.

Тры артыкулы, апублікаваныя ў 2011, 2015 і 2019 гадах, апісваюць гэтыя эксперыменты. Разам яны даюць наглядны ўрок фізікі пераносу: змяненне таго, як растворанае рэчыва дасягае крышталя, можа змяніць яго бачную форму, не змяняючы атамнай структуры.

Гэтыя працы не паказваюць, што космас стварае ідэальныя крышталі, не ўстанаўліваюць прамысловы працэс і не адкрываюць новы від солі.

Як куб становіцца полым ступеньчатым крышталём

Звычайны крышталь хларыду натрыю мае кубічнае размяшчэнне атамаў. **Лейкападобны крышталь** застаецца кубічным, але яго куты і рэбры растуць хутчэй за цэнтры граней. У выніку на кожнай грані ўзнікае полая ступеньчатая ўпадзіна, нібы куб спачатку будуе каркас, а ўжо потым збіраецца запоўніць сцены.

Пазнейшы прыклад з МКС наглядна паказвае такі рост, але служыць толькі кантэкстам, а не доказам з трох артыкулаў пра хларыд натрыю. На выяве і пакадравай здымцы Дональда Пэціта ніжэй паказаны **хларыд калію**, іншая соль, якая ў мікрагравітацыі фарміруе ступеньчатыя полыя і скруткападобныя структуры.

[figure_pair pending]

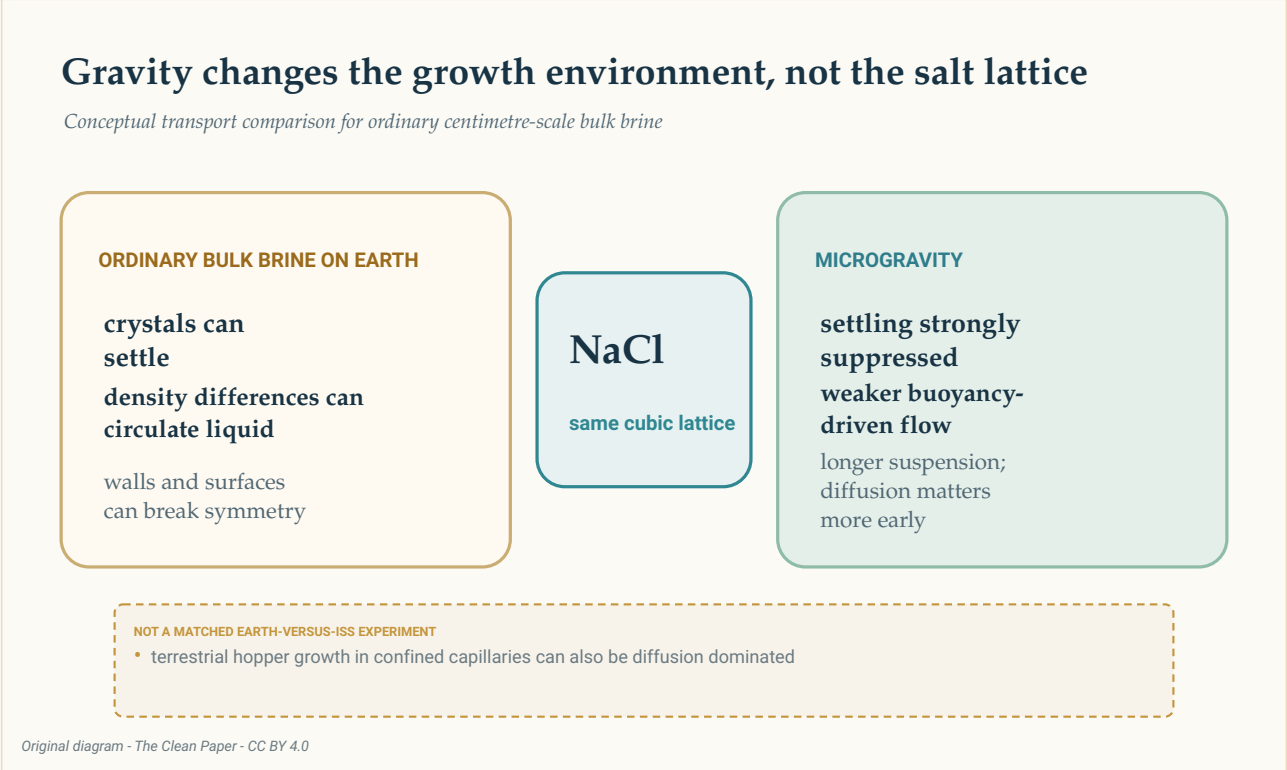
Дзве сканавальныя электронныя мікрафатаграфіі скруткападобных полых крышталёў хларыду калію, вырашчаных на борце МКС. Гэтыя пазнейшыя выявы служаць кантэкстнымі прыкладамі марфалогіі; гэта не ўзоры хларыду натрыю і не вымярэнні з даследаванняў 2011, 2015 або 2019 гадоў, якія абмяркоўваюцца ў артыкуле.

[video pending]

Пазнейшая пакадравая здымка росту полага крышталя хларыду калію ў тонкай воднай плёнцы ў мікрагравітацыі. Яна ілюструе пераважны рост рэбраў і кутоў, але не паказвае эксперыменты або даныя па хларыдзе натрыю, прааналізаваныя ў артыкуле.

Крышталі растуць з **перанасычанага расолу** — салёнай вады, якая змяшчае больш растворанага хларыду натрыю, чым магла б утрымліваць у раўнавазе пры гэтых умовах. Іоны натрыю і хлору павінны прайсці праз вадкасць і далучыцца да паверхні крышталя.

Ёсць два асноўныя спосабы іх пераносу. **Дыфузія** — выпадковы малекулярны рух, які пераносіць растворанае рэчыва ўздоўж градыенту канцэнтрацыі без цыркуляцыі ўсёй вадкасці. **Канвекцыя** — рух самой вадкасці. Пры звычайнай гравітацыі невялікія адрозненні тэмпературы або канцэнтрацыі могуць змяняць шчыльнасць і выклікаць цыркуляцыю дзякуючы плавучасці. Крышталі таксама могуць **седыментаваць**, то-бок асядаць у вадкасці.



Канцэптуальнае параўнанне паказвае тую самую рашотку хларыду натрыю ў двух асяроддзях. У звычайным аб'ёме расолу на Зямлі магчымыя асяданне, цыркуляцыя дзякуючы плавучасці і кантакт з паверхняй; мікрагравітацыя моцна прыгнятае першыя два працэсы, дазваляючы даўжэй заставацца ва ўзважаным стане і павялічваючы ролю дыфузіі на ранніх стадыях росту. Гэта не быў парны эксперымент Зямля—МКС з аднолькавымі ўмовамі.

The Clean Paper CC BY 4.0

Эксперымент праводзіўся на Міжнароднай касмічнай станцыі — арбітальнай лабараторыі з мікрагравітацыяй. Слова **мікрагравітацыя** не азначае поўнай адсутнасці гравітацыі. У артыкуле 2019 года паведамлялася пра рэшткавае паскарэнне прыкладна ў 1,2 мільённай долі зямнога паскарэння свабоднага падзення, або 1,2 мікра-g, а таксама

пра павольны цыклічны рух вадкасці. Асяроддзе змяніла баланс працэсаў пераносу, але не зрабіла расол ідэальна нерухомым.

Павольны шлях да кубоў міліметровага памеру

Даследаванне 2019 года было прысвечана полым кубам, якія выраслі падчас выпарэння вады з расолу на МКС. Даўжыня рэбраў складала **ад 2 да 8 міліметраў**. Хуткасць росту знаходзілася ў дыяпазоне **ад 0,34 да 1,0 мікраметра за хвіліну** — прыкладна **ад 0,49 да 1,44 міліметра за суткі** — з сярэднім значэннем **0,68 мікраметра за хвіліну** і стандартным адхіленнем 0,23.

Пры такой сярэдняй хуткасці рабро даўжынёй 8 міліметраў фарміравалася б прыкладна тыдзень. Гэта разліковая ацэнка, а не пакадравае вымярэнне кожнай стадыі росту аднаго крышталя.

Аўтары ацанілі перанасычэнне як меншае за **1,002**. У прыведзенай імі літаратуры пра наземныя эксперыменты полыя крышталі раслі пры значна большым перанасычэнні — вышэй за 1,45 — з хуткасцю ад 10 да 110 мікраметраў за секунду цягам секунд або хвілін і звычайна дасягалі памераў менш за 250 мікраметраў.

Параўнанне інфарматыўнае, але ўмовы не былі парнымі. Крышталі з МКС і даныя наземнай літаратуры не паходзілі з адначасова праведзеных, ідэнтычных наземнай і арбітальнай галін аднаго эксперыменту. Побач з гравітацыяй маглі мець значэнне розныя ёмістасці, межы падзелу і метады.

Таму найбольш надзейны кантраст мае апісальны характар: у гэтых назіраннях на МКС полыя кубы павольна раслі пры нізкім перанасычэнні цягам дзён або тыдняў і дасягалі міліметровага маштабу.

Спачатку пераважала дыфузія; пазней плынь усё яшчэ магла ўплываць

У артыкуле 2019 года выкарысталі **лік Пекле**, каб параўнаць перанос дзякуючы руху вадкасці з пераносам дзякуючы дыфузіі. Значэнне меншае за адзінку азначае, што важнейшая дыфузія; значэнне большае за адзінку паказвае, што можа пераважаць аб’ёмны рух вадкасці.

> **Суадносіны, а не перамыкач**
>
> Лік Пекле параўноўвае дзве хуткасці пераносу. Ён не дзеліць свет на ідэальна нерухомую вадкасць ніжэй за адзінку і чыстую канвекцыю вышэй за адзінку.

> Тут значэнне змянялася з памерам крышталя і ацэнкай хуткасці навакольнага расолу. Найменшыя крышталі відавочна знаходзіліся ў рэжыме, дзе дамінавала дыфузія; найбуйнейшы крышталь у большай пасудзіне мог увайсці ў рэжым, дзе істотным станавіўся павольны рух вадкасці.

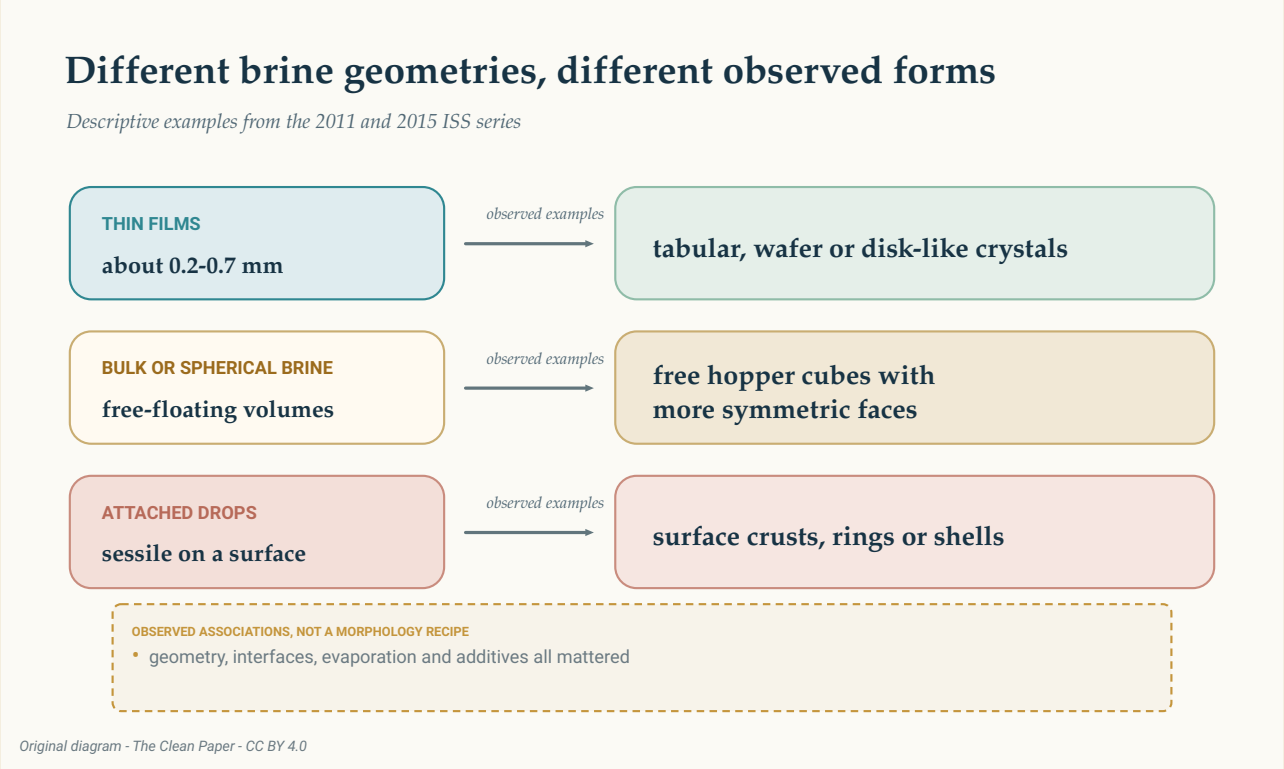
У невялікіх кроплях памерам каля 0,8 сантыметра ацэнены лік Пекле павялічваўся прыкладна ад **0,0004** каля моманту зараджэння да **0,03** пры канчатковым вымераным памеры. Дыфузія заставалася дамінуючай.

У крышталізатарах памерам 2–3 сантыметры ацэнка павялічвалася прыкладна ад **0,05** для зародка дыяметрам 50 мікраметраў да **4** для рабра даўжынёй 4 міліметры. На раннім этапе па-ранейшаму дамінавала дыфузія, але пазней унёсак мог рабіць павольны цыклічны рух.

Таму сцвярджэнне «мікрагравітацыя ліквідавала канвекцыю» было б няправільным. Звычайная цыркуляцыя дзякуючы плавучасці і асяданне былі моцна аслабленыя, але рэшткавае паскарэнне і вымераны рух захоўваліся.

Форма вадкасці таксама мела значэнне

Артыкул 2011 года і артыкул 2015 года пашырылі карціну. У іх апісана крышталізацыя солі ў тонкіх плёнках, таўсцейшых слаях вадкасці, прыкладна сферычных аб'ёмах расолу і кроплях, прымацаваных да паверхні.



Тры рады падсумоўваюць прыклады, якія назіраліся ў дасье: тонкія плёнкі з пласціністымі або дыскападобнымі формамі, аб'ёмны ці сферычны расол з вольнымі полымі кубамі і прымацаваныя кроплі з коркамі, кольцамі або абалонкамі. Гэта апісальныя сувязі, а не рэцэпт ці гарантыя выніку.

The Clean Paper CC BY 4.0

У даследаванні 2011 года тонкія плёнкі таўшчынёй прыкладна ад 0,2 да 0,7 міліметра давалі тонкія пласцінкі і таблітчатыя крышталі. Вольна плаваючыя аб'ёмы расолу дазвалялі фарміравацца больш сіметрычным бакавым граням і полым кубам.

Назіранні 2015 года уключалі тонкія слаі таўшчынёй ад 0,2 да 0,7 міліметра, таўсцейшыя слаі каля 4–6 міліметраў і прымацаваныя паўсферычныя кроплі дыяметрам прыкладна ад 20 да 32 міліметраў. Сярод апісаных форм былі таблітчатыя полыя крышталі, кубы, дыскападобныя крышталі, дэндрыты, кольцы і абалонкі. У адной серыі назіранняў даданне поліэтыленгліколю прыгнятала ўтварэнне полых крышталёў.

Аўтары характарызавалі працу 2015 года як назіранні з выкарыстаннем няўлічаных расходных матэрыялаў у пазаслужбовы час экіпажа, а не як строгую праграмную даследчую працу. Прыклады паказваюць, што значэнне мелі геаметрыя вадкасці, межы падзелу, выпарэнне і дабаўкі. Яны не задаюць дэтэрмінаванага рэцэпту, паводле якога пэўная форма ёмістасці гарантуе пэўную форму крышталя.

Рашотка не ператварылася ў новую форму солі

Крытычна важна адрозніваць **крышталічную структуру** і **марфалогію**.

Структура — гэта паўторнае размяшчэнне атамаў. Марфалогія — бачная знешняя форма. Нейтронная дыфракцыя ў артыкуле 2011 года не выявіла змены структуры хларыду натрыю або параметраў элементарнай ячэйкі ў параўнанні з наземнымі ўзорамі. Арбітальныя ўзоры таксама змяшчалі **ўключэнні расолу** — маленькія кішэні раствору, захопленыя ўнутры крышталя.

Таму вялікі і сіметрычны выгляд не з'яўляецца доказам большай чысціні або адсутнасці дэфектаў. Ніводны артыкул у дасье не паведамляе пра вышэйшую хімічную чысціню, лепшыя механічныя ўласцівасці або прыдатнасць для канкрэтнай прылады.

Гравітацыя дзейнічала ўскосна. Яна змяняла асяданне, цыркуляцыю вадкасці, арыентацыю і кантакт з паверхнямі. Яна не змяніла трываласць сувязяў у хларыдзе натрыю і не стварыла новую атамную фазу.

Чаму гэтыя эксперыменты могуць і не могуць навучыць

Артыкулы падтрымліваюць тлумачэнне праз перанос: моцнае прыгнечанне звычайнага асядання і плыні дзякуючы плавучасці дазволіла некаторым крышталям даўжэй

заставацца ва ўзважаным стане і павольна расці ў больш сіметрычных умовах. Вымераныя памеры, хуткасці і формы з'яўляюцца непасрэднымі назіраннямі; перанасычэнне, гісторыя росту і лікі Пекле ўтрымліваюць ацэненыя значэнні; параўнанне з Зямлёй часткова абапіраецца на іншыя апублікаваныя эксперыменты.

Для ўсяго дасье няма адзінага агульнага назоўніка. Яно аб'ядноўвае асобныя крышталі, крышталізатары і адабраныя прыклады з трох артыкулаў. Звядзенне іх у адзін вынік стварыла б ілжывае ўражанне адзінага аднароднага эксперыменту, якога не было.

У даследаваннях таксама адсутнічаюць даныя, патрэбныя для заяў пра вытворчасць. Яны не вымяраюць прадукцыйнасць, сабекошт, энергаспажыванне, выхад, надзейнасць або карысныя ўласцівасці матэрыялу. Серыя 2015 года была разведвальнай. Наземныя параўнанні не былі парнымі кантролямі. А вялікі або візуальна ўражальны крышталь не абавязкова лепшы для практычнага прымянення.

Прыродныя саляныя адклады могуць змяшчаць полыя кубы сантыметровага памеру, часам узважаныя ў насычаным расолам глеі. Артыкул 2019 года прапануе магчымую аналогію з павольным ростам, дзе дамінуе дыфузія. Гэта цікавае параўнанне, але не доказ таго, што прыродныя і арбітальныя полыя крышталі ўтвараюцца паводле аднаго механізму.

Кароткі вынік

Сярод крышталёў солі, якія выраслі падчас выпарэння расолу на Міжнароднай касмічнай станцыі, былі полыя ступеньчатыя кубы памерам ад 2 да 8 міліметраў. Артыкулы падтрымліваюць тлумачэнне праз працэсы пераносу: мікрагравітацыя моцна прыгнятала звычайнае асяданне і плынь дзякуючы плавучасці, дазваляючы крышталям павольна расці і даўжэй заставацца ва ўзважаным стане, у той час як на раннім этапе пераважала дыфузія. На марфалогію таксама ўплывалі геаметрыя вадкасці, межы падзелу, выпарэнне і дабаўкі. Нейтронная дыфракцыя не выявіла новай структуры хларыду натрыю, а ўключэнні расолу захоўваліся. Гэта абмежаваны прыклад з матэрыялазнаўства, а не доказ таго, што космас стварае ідэальныя крышталі або забяспечвае прамысловы працэс.

Праверка без перабольшанняў

Што паказваюць артыкулы: у некалькіх геаметрыях расолу на МКС выраслі полыя кубы хларыду натрыю міліметровага маштабу і іншыя марфалогіі. Полыя кубы ў працы 2019 года павольна раслі пры нізкім ацэненым перанасычэнні, прычым на раннім этапе дамінавала дыфузія.

Што з'яўляецца інтэрпрэтацыяй: моцнае змяншэнне асядання і плыні дзякуючы

плавучасці дазволіла даўжэй захоўваць узважаны стан і забяспечыла больш сіметрычны рост. На позняй стадыі ў большым крышталізатары мог уплываць павольны рух вадкасці.

Чаго яны не паказваюць: новай атамнай формы солі, чысцейшых або бездэфектных крышталёў, парнага выпрабавання Зямля—МКС, універсальнай перавагі мікрагравітацыі або камерцыйнага вытворчага працэсу.

Галоўныя абмежаванні: тры розныя даследаванні з рознай геаметрыяй і адабранымі прыкладамі; міжартыкульныя параўнанні з наземнымі працамі; ацэненыя параметры пераносу; разведвальныя, непраграмныя часткі дасье; адсутнасць эканамічных паказчыкаў працэсу і выпрабаванняў уласцівасцяў.

Наколькі ўпэўненым можа быць звычайны чытач? Высокая ўпэўненасць у тым, што апісаныя арбітальныя формы і павольны рост рэальныя. Умераная ўпэўненасць у тлумачэнні праз перанос як найлепшым агульным апісанні назіранняў. Вельмі нізкая ўпэўненасць у любым сцвярджэнні, якое ператварае гэтыя эксперыменты з соллю ў агульнае абяцанне касмічнай вытворчасці.

Крыніцы

Pettit and Fontana, Comparison of sodium chloride hopper cubes grown under microgravity and terrestrial conditions, npj Microgravity 5, 25 (2019)
https://doi.org/10.1038/s41526-019-0085-0

Fontana, Schefer and Pettit, Characterization of sodium chloride crystals grown in microgravity, Journal of Crystal Growth 324, 207-211 (2011)
https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2011.04.001

Fontana, Pettit and Cristoforetti, Sodium chloride crystallization from thin liquid sheets, thick layers, and sessile drops in microgravity, Journal of Crystal Growth 428, 80-85 (2015)
https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2015.07.026