

Тып экстэрматафілаў	Абазначэнне адаптациі
Тэрмафілы	Здольныя выжываць пры высокіх тэмпературах, ад + 40 °C.
Псіхрафілы (крыяфілы)	Выжываюць пры тэмпературах ніжэй за нуль.
Ацыдафілы	Оптымум росту гэтых мікраарганізмаў назіраецца ва ўмовах высокое кіслотнасці. Некаторыя здольныя жыць пры pH ніжэй за 3,0.
Алкаліфілы	Гэтая група арганізмаў насяляе пры лужкім (шчолачкім) pH у дыяпазоне ад 9 да 11.
Галафілы	Жывуць пры высокіх канцэнтрацыях соляў у навакольным асяроддзі. Здольныя да росту пры 32 % канцэнтрацыі NaCl (шмат якія мезафілы гінуць пры 1-2 %).
П'езафілы (барафілы)	Могуць насяляць асяроддзе пры ціску больш за 1000 атм.
Радыерэзістэнты	Насяляюць асяроддзе з вельмі высокім уздоўненем крытычнага выпарменняння.
Ксерофілы (сухалюбы)	Адаптаваліся да жыцця пры нізкай вільготнасці. Здольныя жыць пры актыўнасці вады ніжэй за 0,85 (у норме актыўнасці вады роўная 0,9-1).
Эндаліты	Здольныя жыць у камяніах і высакацвёрдых субстратах.

Табліца 2. Экалагічныя группы экстэрматафілаў

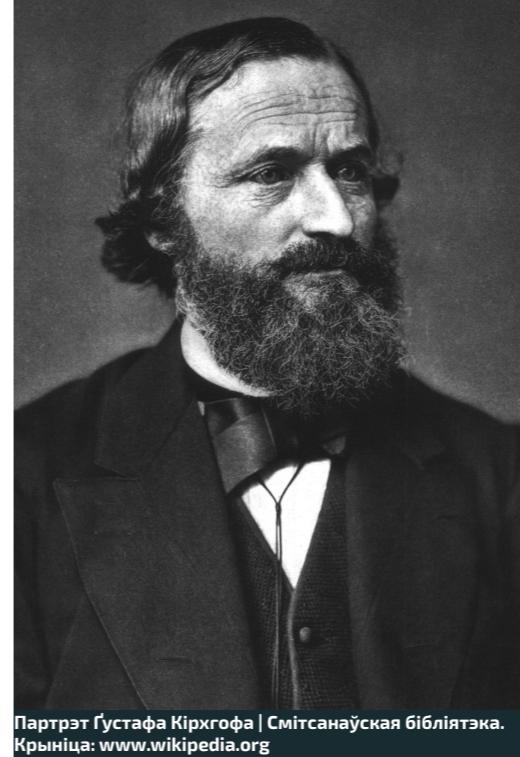
Жыццё можа прыстасавацца да вялікага ціску, які размазаў бы чалавека аб тоўшчу вады. А можа вытрымліваць ніzkія тэмпературы, пры якіх усе працэсы жыццяздейнасці спыняюцца. Існуюць археі і бактэрый, здольныя перажыць звышкіслыя і вельмі лужкія (або шчолачкія) асяроддзі. Здольныя перажываць засуху і засolenыя ландшафты мікробы гэтак жа існуюць. Усіх гэтых экстэрмалаў аб'ядноўвае з тэрматафіламі і радыерэзістэнтамі адно «але»: наяўнасці адаптациі толькі да аднаго тыпу ўмоваў часта недастатковая. Таму яны научыліся іх спалучаць і выжываць пры камбінацыі ўмоваў, застаючыся адначасова ўстойлівымі, напрыклад, да высокага ціску і крытычных тэмператураў. Разбяром, хто ёсьць хто і чаму яны могуць спалучаць некалькі стратэгіяў выжывання.

П'езафілаў, галоўных насельнікаў акіянічнага дна, не здзівіць адным толькі ціскам. Дно сусветных водаў спрэс пазбаўлене сонечнага святла, а таму там часта холадна. Шмат якія з іх абазначаюцца як п'езапсіхрафілы – яны спакойна перанясуць усе нягоды доннага жыцця. Холад і пару сотняў метраў вады для іх не перашкода. Акрамя таго, навукоўцы вылучылі яшчэ і п'езатэрматафілы: яны ўтвораюць касцяк экасістэмы глыбакаводных гідратэрмальных крыніц. Тэмпература каля іх складае прыкладна 120 °C, а ў самых крыніцах – каля 300 °C. Пекла ў чыстым выглядзе!

Устойлівасць да нізкае вільготнасці часта сустракаецца ў арганізмаў, гэтак жа прыстасаваных да высокага засоленасці.

Абодва віды мікраарганізмаў здольныя назапашваць раствораныя рэчывы, што дазваляе падтрымліваць высокі асматычны ціск і сінаваць у збедненым вільгакцю асяроддзі. Клеткі такіх мікраарганізмаў супраціўляюцца высыханню за кошт зняжэння спажывання энергіі і сінтэзу османтратэктараў². Гэта перадухіляе страту вады і павялічвае яе ўтриманне звязваннем з хімічнымі злучэннямі цытаплазмы, абараняе ДНК і бялкі. Яшчэ адзін спосаб выжываць – выключыць жгуцкі і перайсці на альтэрнатыўныя крываіцы АТФ. Такія арганізмы, здольныя выжываць пры камбінацыях некалькіх небяспечных фактараў, называюцца **поліэкстэрматафіламі**. Яны складаюць вялікую частку экстэрматафілаў.

Дарэчы, акрамя пракарыётаў і археяў да ксерофілаў адносяцца простыя эўкарыёты – цвільныя грыбы родаў *Aspergillus* і *Xerotyces*, досьціць блізкія сваякі мікрабіёты любое холадні. Калі вы хоць раз пакідалі на колькі месяцаў адкрыты слоік з засоленімі агуркамі або квашанаю капустаю, то маглі назіраць наступнае. На мяжы расолу і паветра ўтворыцца каламутная плёнка шэра-зялёна га колеру, якая паступова пакрывае саленні. Такія з'явы – вынік дзеянісці бактэрыяў роду *Bacillus* і *Clostridium*. Іх нельга строга класіфікаваць як экстэрматафілаў, затое можна аднесці да экстэрматалерантаваў. Такія арганізмы жывуць пераважна ў нармальных умовах, але могуць часткова адаптавацца і да небяспечнага асяроддзя. Ад экстэрматафілаў іх адрозніваюць нізкія

Партрэт Густафа Кірхгофа | Смітсанайская бібліятэка. Крыніца: www.wikipedia.org

для абмену інформацыяй, съцягваньня фільмаў ці супольных онлайн-гульняў суседзі, а то й уласна вы спалучалі дамы кабэлямі, ствараючы вялікія лякальныя сеткі. Менавіта ў такіх сітуацыях можна было ўжываць матрычную тэарэму Кірхгофа для павышэння стабільнасці ў сеткі, выкарыстоўваючы аналіз каркасных дрэваў графа. Каркасныя дрэвы дазваляюць выявіць вузкія месцы ў сетцы: напрыклад, калі значная колькасць дамоў спалучаная адным кабэлем. Даставаць наяўнасць матрычнае тэарэмы Кірхгофа дапамагала вызначыць аптымальная шляхі для дадавання новых кабэляў, што ў сваю чаргу спрыяла паляпшэнню працэздольнасці ўсіх сеткі забяспечвала раўнамерны і надзейны распаўсюд нагрузкі.

У 1930-х гадах тэрмін «граф» у сучасным яго разуменіні шырока распаўсюдзіўся дзякуючы працам вугорскага матэматыка **Дэнэша Кёніга** (*König Dénes*). Ён падмоцным уплывам лекцыяў аб проблеме чатырох фарбаў усё больш заглыбляўся ў тэорыю графаў. Ягоны ўнёсак, у тым ліку публікацыяў кнігі «Тэорыя канечных і бесканечных графаў», стаўся асноўным момантам у фармаванні гэтага дысцыпліны.

ЦІ ПРАКЛАДЗЕ НАЙКАРАЦЕЙШЫ МАРШРУТ З ГОМЛЯ Ў МЕНСК АЛЬГАРЫТМ ДЭЙКСТРЫ?

Наступным вызначальным этапам у развіцці наукаў пра графы, ужо прызнанага разьдзелу дыскрэтнае матэматыкі, сталася зьяўленне **альгарыту Дэйкстры**. Гэты мэтад, прапанаваны нідэрляндзкім навукоўцам Эдсхэрам Дэйкстрам (*Edsger Dijkstra*) у 1959 годзе, пропанаваў пошук найкарацейшых шляхоў ува ўзважаных, арыентаваных графах, дзе ўсе рэбрэ маюць адным шляхам.

Каркаснае дрэва графа – гэта падграф, што месціцца ўсе вяршыні зыходнага графа, але толькі мінімальна неабходную колькасць рэбраў, каб граф заставаўся злучным і пры гэтым на месціці цыклі. Іншымі словамі, каркаснае дрэва – гэта шкілет графа, што захоўвае яго структуру, але спрошчаны да дрэва.

Гэтае адкрыццё было важнае на толькі для тэорыі графаў, але й для практичнага дастасавання – як аналіз стабільнасці ў надзейнасці сетак, у тым ліку электрычных, дзе важна ведаць, колькімі альтэрнатыўнымі шляхамі магчыма перадаць электраэнэргію. Гэтак, праца Кірхгофа дала магутны інструмент для аналізу ў разуменіні складаных сеткавых систэм у разнастайных сферах.

Калі вы выраслі ў канцы 1990-х ці на мяжы тысячагодзьдзя, то, магчыма, памятаце эпоху павольнага інтэрнэту, калі

наступны важны парамэтар і ўмова – заўсякдзе граф. Уявім сабе, што на адным з участкаў паміж Гомлем і Менскам ёсьць аднабаковая дарога. У кантэксьце

²Османтратэктары – арганічныя малекулы з нейтральным зарядам, ураўноўваючы асматычны ціск паміж навакольным асяроддзем і цытаплазмой.

графа гэта азначае, што перасоўваньне магчымае толькі ў адным кірунку, і гэты кірунак мусіць быць дакладна ўказаны. Ува ўяўленыні графа гэтае рабро будзе скіраванае з аднае вяршыні ў другую, не дазваляючы руху ў адваротны бок. Арыентаванасць графа крытычна важная для дакладнага мадэльваньня рэальных умоваў перасоўваньня, у тым ліку аднабаковыя вуліцы, плыні рэк ці лягістичныя транспартавыя аблежаваныні.

Застаецца апошняя ўмова. Усе рэбры мусіць мець станоўчу вагу. Гэта сапраўды важны пункт, бо калі ўявіць, што мы выкарыстоўваем у якасці вагі рэбраў расход бэнзіну і што на адным участку дарогі паставілі дармовую бэнзастанцыю, то з гледзішча альгарыту найбольш аптымальна будзе зацыкліцца й бясконца атрымліваць дармовы бэнзін, бо гэта бясконца зъмяншае кошт маршруту. Аднак гэта ломіць агульную мэту альгарыту, бо нам усё-такі трэба дабрацца з Гомля ў Менск, і дармове паліва можа быць прыемным бонусам, але дакладна на можа быць самаметаю падарожжа, іначай нікага падарожжа й не будзе. Для графаў з адмоўнаю вагою рэбраў існуюць іншыя альгарыты – як **альгарытм Бэмэна – Форда** (*Richard Bellman, Lester Ford*), – адмыслова распрацаваныя для працы з такім выпадкамі.

Вернемся да нашай асноўнай задачы. Калі нам трэба знайсці найкарацейшы маршрут паміж Гомлем і Менскам, выкарыстоўваючы ў якасці вагі для рэбраў, напрыклад, час праезду па дарозе, альгарытм Дэйкстры будзе працаваць наступным чынам.

Для пачатку ініцыялізуем альгарытм. Ініцыялізацыя пачынаецца з вызначэння пачатковага пункту – напрыклад, скрыжаваныя вуліцаў Каліноўскага й Касцюшкі ў Гомлі, дзе метка адлегласці да сябе роўная нулю. Меткі ўсіх вяршыняў устанаўліваюцца як бясконцасць, што сымбалізуе адсутнасць інфармацыі пра даступныя маршруты на пачатковым этапе.

У працэсе працы альгарыту адбываецца пасльядоўны абыход вяршыняў, пачынаючы з тae, што мае мінімальну метку сярод ненаведаных. Тут гэта меркаваная адлегласць ад пачаткове вяршыні да выбранае вяршыні. Для кожнае такое вяршыні альгарытм аналізуе суседнія вяршыні, то бок скрыжаваныні, беспасярэдне злучаныя з актуальнаю вуліцаю. Напрыклад, вуліца Быкова, што злучае-

ца з вуліцаю Каліноўскага. Калі сума меткі актуальнае вяршыні (часу ад пачатковага пункту да вуліцы Каліноўскага) і вагі рабра (часу праезду па вуліцы Быкова) меншая ад меткі суседнія вяршыні (актуальная гэтае найкарацейшага часу да вуліцы Быкова), то метка суседнія вяршыні абнайляецца.

Гэтак, альгарытм дасльедуе граф, паступова абнайляючы інфармацыю пра найкарацейшыя шляхі ад пачатковага пункту да ўсіх астатніх вяршыняў. Пасля таго як усе вяршыні будуть наведаныя, працэс завяршаецца, і на аснове абноўленых метак можна вызначыць аптымальны шлях да Менску.

Выходзіць, што альгарытм Дэйкстры – ня проста абстрактны матэматычны інструмент, але й практичны мэтад, што дазваляе рашаць рэальныя задачы маршрутызацыі, улічваючы аблежаваныні, накладзеныя як вагою рэбраў, гэтак і іх арыентаванасцю.

Усё звязана з усім. Шлях разьвіцьця науکі пра графы можна таксама апісаць у выглядзе графа з пачатковым пунктам у моманце, калі Ойлер рагшыў задачу пра сем мастоў, і зь вялікім мноствам новых вяршыняў, якія штодня абрастаюць новымі вяршынямі, адкрываючы новыя грані й мэтады выкарыстаныя графаў у сучасным сьвеце.

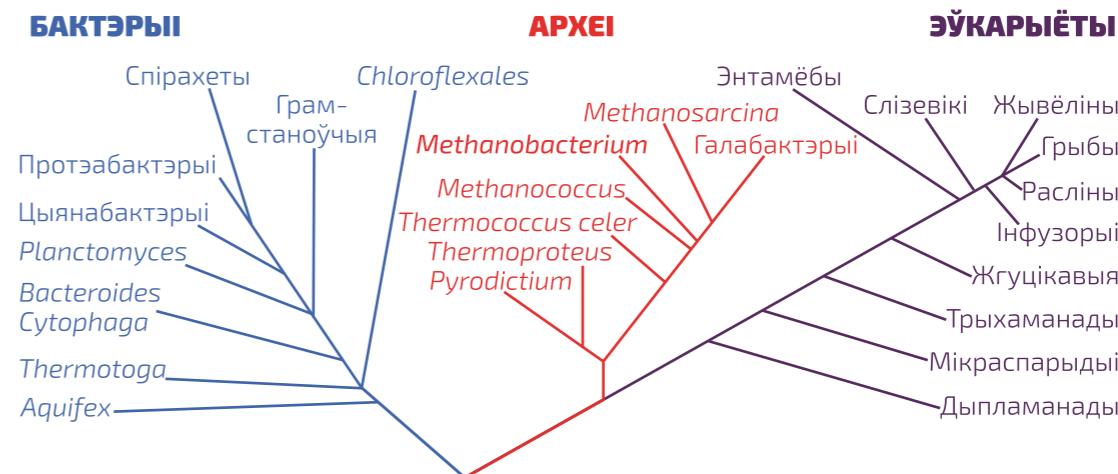
Калі я й бачыў далей за астатніх, то толькі стоячы на плячах гігантаў.²

КРЫНІЦЫ:

1. [https://en.wikipedia.org/wiki/Seven_Bridges_of_Königsberg](https://en.wikipedia.org/wiki/Seven_Bridges_of_K%C3%B6nigsberg)
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Four_color_theorem
3. [https://en.wikipedia.org/wiki/Kirchhoff's theorem](https://en.wikipedia.org/wiki/Kirchhoff%27s_theorem)
4. [https://en.wikipedia.org/wiki/Déjnes_König](https://en.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9jnes_K%C5%91nig)
5. [https://en.wikipedia.org/wiki/Dijkstra's algorithm](https://en.wikipedia.org/wiki/Dijkstra%27s_algorithm)

²If I have seen further than others, it is by standing upon the shoulders of giants. Аўтарства выразу прыпісваюць Ісааку Ньютону.

Філагенія жывых організмаў



Малюнак 1. Дрэва жывіцца Карла Ўоўза

матэрыялу. Наяўныя ў *T. aquaticus* альдалаза і *Taq-palімераза* дазваляюць захоўваць працэздольнасць бактэрый ў гарачых умовах.

Сапраўдным тытанам сярод тэрмофілаў уважаюць **археон-метанаген** *Methanopyrus kandleri* – яго аптымальны рост на зівраеца пры 98 °C. Яго таксама знайшли ў Елаўстоўнскім запаведніку.

Цікавая асаблівасць *T. aquaticus* і *D. radiodurans* – падабенства геномаў гэтых пракарыётаў. Што можа сведчыць пра разыходжанне шляху эвалюцыі адаптациі і, уласна, пра наяўнасць адзінага продка, які адаптаваўся да ідэнтычных умоваў. У 1970-х гадах Карл Ўоўз (Carl Woese) – бацька сучаснай філагенетыкі – створыць новы падыход у класіфікацыі ўсяго існага на планете, дрэва жывіцца. Гэты падыход дазваляе заўважыць, што тэрмофільныя бактэрый і археоны – у аснове дрэва жывіцца. Відавочна, гідратэрмальнае асяроддзе было харектэрнае і для іхнага продка.

Распрацаваная Ўоўзам канцепцыя дрэва жывіцца адкінула назад сістэму пяці святаў (або царстваў), пакінуўшы дзве імперыі (клеткаве і пазаклеткаве (вірусы) жывіцце) і тры дамены (бактэрый, археі і эўкарыёты). Візуалізацыя дрэва дастаткова выразна паказвае, што паміж двумя першымі даменамі прайшло не так шмат часу з аддзялення да апошняга агульнага продка. Не меней цікавае размежаванне экстрэмофільных галінак у бактэрый і архей. Тэрмофілы першых і гіпертэрмальныя крываецы Елаўстоўнскага запаведніку, донныя пласты акіянаў, тундравыя пустэльні Камчаткі – усё гэта натуральныя арэны для галодных гульняў эвалюцыі.

ХАЛОДНЫ, САЛЁНЫ, СУХІ І ПРЫЧЫМ ТУТ ЦІХАХОДКІ

Наагул магчымасць сустрэць жывіцце пры крытычна высокіх тэмпературах – напрыклад, у гейзерах – не такая ўжо рэдкая. Тое ж можна сказаць і пра іанізацыйнае выпраменяньне: мікраарганізмы прыстасаваліся жывіцце ў ядравых рэактарах. Абодва гэтыя сценары – толькі пара з вяліким варыяцый ўмоваў і іх камбінацыяў. Са з'яўленнем атмасфери на планете адбыўся падзел экалагічных нішай: утварыліся ландшафты, жывіцце на якіх лёгкім не здасца. Леднікі Грэнландыі, падземныя азёры Антарктыды, Мёртвае мора, гейзёры Ісландыі і ўжо згаданыя геатэрмальныя крываецы Елаўстоўнскага запаведніку, донныя пласты акіянаў, тундравыя пустэльні Камчаткі – усё гэта натуральныя арэны для галодных гульняў эвалюцыі.

Мезафіламі абазначаюць групы істотай, чые аптымальныя ўмовы жыцця роўныя чалавечым: тэмпература ў дыяпазоне 15–25 °C, pH = 7, наяўнасць кіслороду, нізкі ўзровень іанізавальнага выпраменявання і. д.

СЕКС НЕ ПАТРЭБЕН

Бактэрыі і археі – басполяя істоты, для атрымання новых генетычных ансамбляў ім не трэба чакаць з'яўлення новага пакалення. Яны выбирайаюць браць усё тут і цяпер. Кан'югация ўяўляе сабою прсты пракцэс пераносу плазміды (частцінкі генетычнага матэрыялу) ад аднае бактэрыі да другое з дапамогай адмысловых участкаў на мембранах клеткавай абалонкі і трубачкі, якая злучае іх. Перадача такім чынам генетычнага матэрыялу праходзіць хутчэй, чымся паланое размнажэнне, але не прыводзіць да з'яўлення нашадкаў.

Тым не менш гэта не адзіны спосаб набыць новыя прыкметы. Гэтак, бактэрыі могуць засвойваць ДНК праста з навакольнага асяроддзя шляхам трансформацыі. З дапамогай адмысловых фактараў кампетэнтнасці клеткі рыхтуюць вонкавае покрывае і звязваюць рэцептарамі чужую ДНК з навакольнага асяроддзя. Пазней нуклеаза – адмысловы гідролізавальны фермент – падзяляе фосфадыэфірную сувязь генетычнага матэрыялу. Адзін з невялікіх фрагментаў рэакцыі трапляе ў клетку, а потым убудоўваецца ў ДНК клеткі-гаспадара. Працэс доўжыцца каля паўгадзіны, але адбываецца з малою частатой.

Трэці спосаб – **трансдукцыя**. Хітры спосаб набыць новы геном складаецца ў перадачы ДНК паміж мікраарганізмамі праз віруснага пасярэдніка – фага (або бактэрыяфага, калі ён спецыялізуецца на бактэрыях). Здольны да трансдукцыі фагі выклікаюць фрагментацию геному да патрэбнага памеру. Адпаведная частцінка спадчыннага матэрыялу трапляе ў капсід галоўкі фага падчас трапляння віруса ў клетку і пачатку свайго размнажэння. Трансдукцыя – аномальны для віруса працэс, бо звычайна ў галоўку фага мае трапляць уласная ДНК віруса. Аднак часам разбурэнне храмасомы клеткі-носьбіткі прыводзіць да трапляння і яе ДНК у віrus. Далей клетка-носьбітка гіне, вызываючы вонкі вірусныя часцінкі, іх яшчэ называюць трансдукцыйнымі. Трапляючы ў новую клетку, трансдукцыйны фаг перадае ёй частку ДНК свайго па-

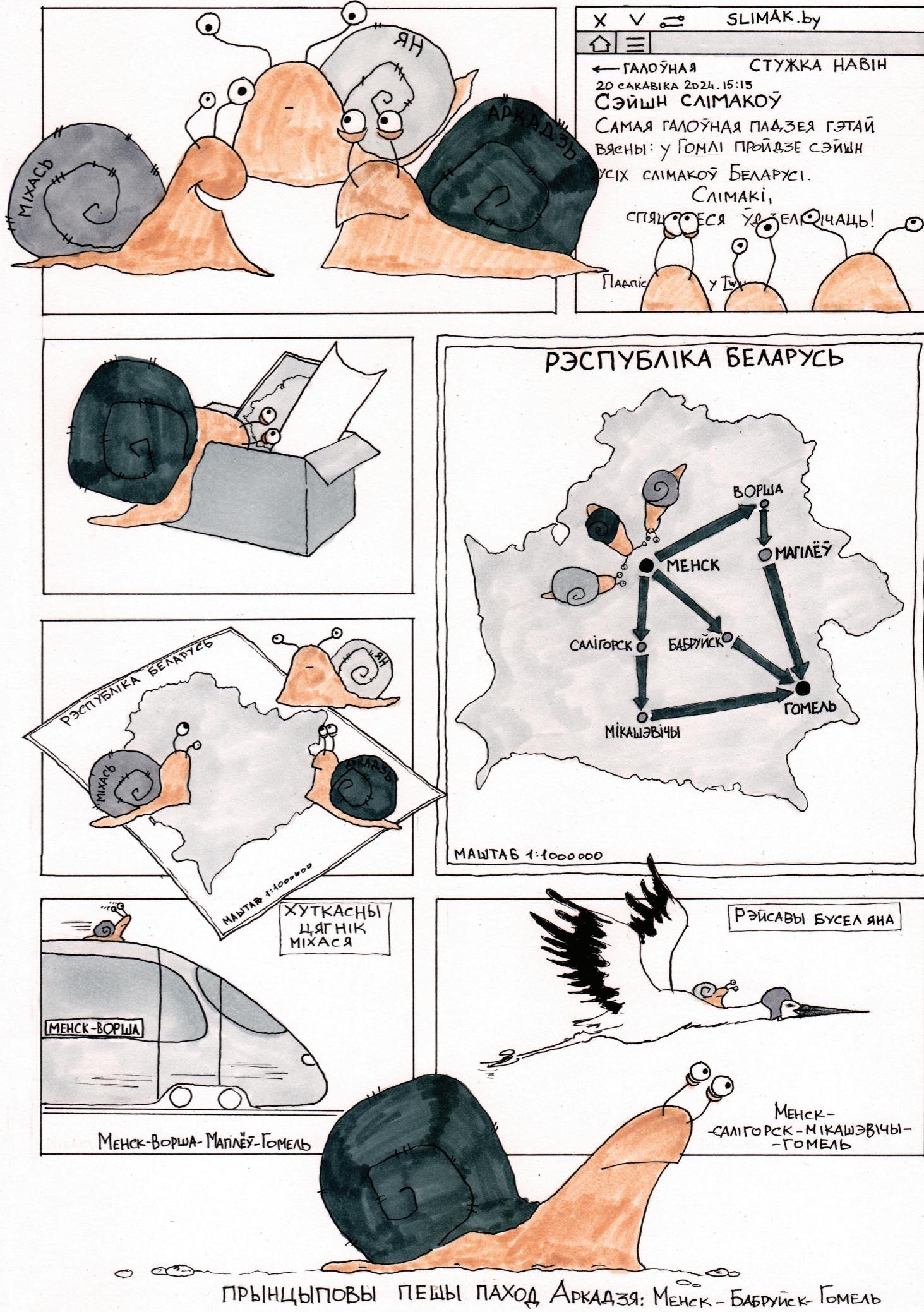
пярэдніка, і калі гэты фрагмент паспяхова інтэргуецца, то ў далейшым набывае здольнасць да рэплікацыі ды экспрэсіі сваіх уласцівасцяў. Часам новая часцінка не засвойваецца новаю клеткай і вольна перадаецца адной з дачынных клетак без якіх-кольків упływu. Такую няўдалую трансдукцыю называюць абартыўнай.

ГОНКА ЎЗБРАЕННЯ

Некалькі шляху набыцца ДНК, трывалыя ахоўныя абалонкі, прыстасавальная ферменты – прасунуты арсенал для простых істотай. Як жа так выйшла, што ў мікраарганізмаў столькі адаптациі? Адказ крецца ў Зямлі. Яна 3,5 мільярда гадоў таму, мякка кажучы, была не самым прыемным месцам: жорсткае іанізавальнае выпраменяванне Сонца і бескіслародны вакуум космасу знішчалі арганічныя малекулы ў першасным булёне – прадвесніку жыцця. Акалець маглі толькі тыя, хто набыў мантую з тлустых кропляў, прататып мембранаў. Але гэта ж пэўна не ўсё. Паводле адной з версіяў, стварэнне копій генетычнага матэрыялу дазваляе перанесці выпраменяванне і яго разбуральны уплыў на ДНК. А з акісяльным стрэсам, які супрадавджае іанізовальнае выпраменяванне, дапамогуць справіца спецыфічныя ферменты, накшталт супераксідисмутазы. Абодва метады – улюблёная тактыка выжывання радыёустойлівых арганізмаў. Радыерэзістэнтныя арганізмы здольныя вынесці жахлівия значэнні на лічыльніку Гайгера (Johannes Wilhelm "Hans" Geiger). Гэтак, для чалавека смяротная доза – прыблізна ў дыяпазоне 7–8 грэй, у той час як для *Deinococcus radiodurans* такія значэнні проста нікчэмныя. *D. radiodurans* здольны акалець пры дозах да 10 000 грэй.

Адной толькі ахоўнай абалонкі недастатковая: паверхня Зямлі была даўней захадодна. Шмат якія біяхімічныя працэсы не могуць працякаць пры такіх умовах. Акалелья былі і каля тэрмічных крыніц. Козыр у такіх умовах – тэрмастабільныя ферменты!

У 1975 годзе на тэрыторыі Елаўстоўскага запаведніку выявілі грамадмоўную бактэрыю (*Thermus aquaticus*). Магчыма, выяўленне чаргове бактэрыі засталося б без увагі. Тым не менш гэтае адкрыцце пераверне медыцыну і біялогію з ног на галаву. Бактэрыю выявілі ў гарачай крыніцы пры тэмпературы інактывациі арганічных малекулаў і генетычнага



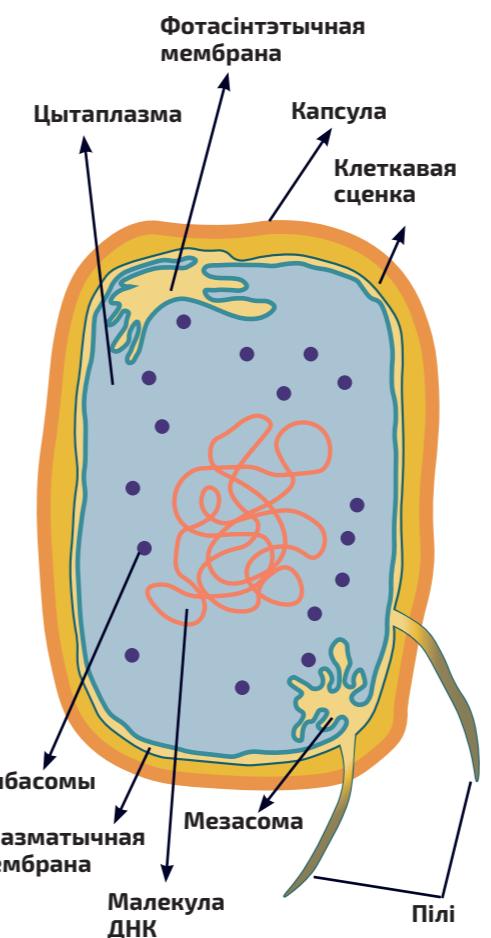
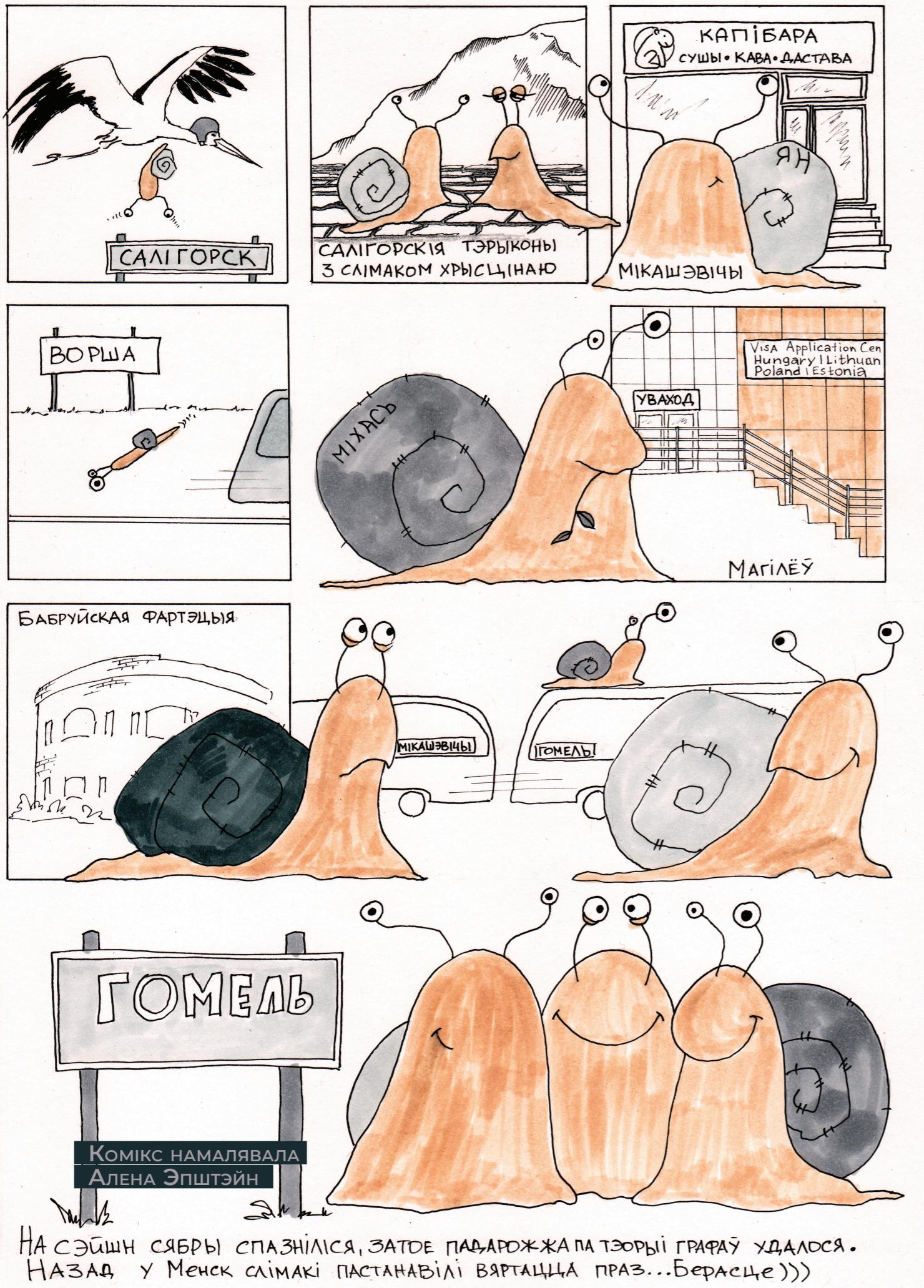


Таблица 1. Структура пракарыятычнае клеткі

Малекула ДНК. Яе часам называюць бактэрыйяльны храмасомай. Яна месціца генетычную інфармацию, праграмаваную клеткаю.

Капсула – першая лінія абароны клеткі. Лічыцца дадатковым пластом абароны ад навакольнага асяроддзя.

Клеткавая сценка – аснова вонкавага клеткавага пласта. Абмяжоўвае змесціва цытаплазмы. Складаецца з пептыдаглікану.

Плазматычна мембрана – нутраны пласт вонкавай абалонкі клеткі, найбліжэйшая да ДНК і нутраных арганоідаў.

Цытаплазма – вадкасць у клетцы, у ёй месціца ДНК, рыбасомы і арганоіды. Падтрымлівае нутраны баланс клеткі.

Рыбасомы служаць для біясінтэзу бялку, дзеяцца на некалькі тыпau. Складаюцца з вялікіх і малых субадзінак. Рыбасомы археяй складаюцца як эўкарыятычныя рыбасомы.

Мезасома – шматскладкаватая структура, яе дакладнае ролі да канца яшчэ не вызначылі. Магчыма, упłyвае на ўнутрымембранную функцыйную актыўнасць клеткі.

Фотасінтэтычна мембрана месціца ў вялікай колькасці па ўсёй клетцы. Характэрная для цыянабактэрыйяў і выкарыстоўваецца для фотасінтэзу.

Пілі – адмысловыя вырасты, неабходныя ў працэсе кан'югациі.

больш складаю структурай і новым арганоідам. Прыблізна тое ж адбылося і з пластыдамі – хларапластамі, храмапластамі і лейкапластамі. Лічыцца, што пластыды паходзяць ад старажытных цыянабактэрыйяў. Выканальныя функцыі і наяўнасць у пластыдаў уласнага геному – пластому, які нагадвае генакод цыянабактэрыйяў, можа служыць доказам тэорыі эндасімбіёзу. Мітахондрыі таксама маюць сваю ДНК, якая перадалася ад прodka.

Акрамя таго, эўкарыятычныя клеткі насяць у сабе складана ўладкаваны цытаплазмік. Клеткі эўкарыётаў большыя за ўсё астатнія праз ядро і арганелы. Таму маюць патрэбу ў трывалай і гнуткай структуры, здольнай дапамагаць транспартаваць сігналы малекулы, бялкі, ліпіды і іншыя рэчывы. Клеткі ж эўкарыётаў у момант фармавання складанага арганізму часта спецыялізуюцца. Яшчэ як стваловыя (або камбіяльныя) клеткі яны атрымліваюць адмысловы хімічны кектэйль з інструкцыяй, якія арганоіды і прыкметы развіваць, а якіх пазбавіцца. Менавіта гэтак у арганізме чалавека атрымліваюцца эryтрапоциты, гепатациты, нейроны ды

шмат якія іншыя клеткі, з якіх пасля фармуюцца тканкі і органы. Незалежнасць існавання такая фармацыя арганізму мяне ўзамен на больш прасунутую форму жыцця ў аптымальных умовах асяроддзя.

Прынцып «прасцей – лепш» дзейць і ў біялогіі. Падтрыманне гамеастазу¹ ў складаным арганізме патрабуе актывациі вялікае колькасці рэсурсаў і механізмаў выжывання. Часта іх увядзенне недастаткова хуткае, і гэта прыводзіць да смерці. Бактэріі ж выпрацавалі іншыя стратэгіі: як зазначалася вышэй, такімі ёсьць спораўтварэнне і прыстасавальныя мутацыі. Экстремафілы пастанавілі пепратварыць цяжкія ўмовы асяроддзя ў спрыяльнія для свайго вегетатыўнага існавання. Трапляючы ў агрэсіўнае асяроддзе, мезафільная бактэрія высушвае сябе і ўтварае палімерны комплекс пад вонкавую мембрану. Такая форма добрая, калі бактэрія часова застаецца ў неспрыяльных для сябе ўмовах і пазбаўленая ў іх здольнасці размножацца. Для паўнавартаснага існавання наяўнасць споры – хутчэй перашкода, чымся практическая прылада. І тут на сцэну выходзіць генетычна адаптация.

¹Гамеастаз – уласцівасць арганізму падтрымліваць стацісць нутранога асяроддзя.

Калі вам знаёмы тэрмін «экстремафіл», то, хутчэй за ўсё, вы ведаеце і пра ціхаходак – маленьких вадзяных мядзведзяў, здольных існаваць у любых умовах. Экстремафілы – гэта бактэрый, археі і некаторыя больш складаныя арганізмы з вялікім адаптацыйным патэнцыялам. Здольныя жыць у невыносных для шмат якіх істотаў умовах, яны падарылі нам ПЛР, цэль на станцыі «Мір» і новыя падыходы ў пошуку жыцця па-за Зямлёю. Дарэчы, вы ведаі, што ціхаходкі не гэтак магутны ў сваім выжыванні? А пры чым тут экстрематалеранты? Дзякуючы чаму арганізм здольны жыць у небяспечным асяроддзі? Якіх прадстаўнікоў гэтае касты вы можаце знайсці ў сябе ў холадні і чаго ад іх чакаюць астрабіёлагі? Разбярэмся!

КРЫХУ ГІСТОРЫИ

Як мяркуюць, простае мікробнае жыццё ўзнікла на Зямлі прыблізна 3,5 мільярда гадоў таму, гэты час называюць археем. На той момант, згодна з парадоксам слабога маладога Сонца, тэмпература на Зямлі была нізкай, а да ўзнікнення атмасферы заставалася паўтара мільярда гадоў. Здаецца, выжывыць у такіх умовах немагчыма. Аднак гэта не так. У параўнанні з раслінамі і жывёлінамі прасцейшыя арганізмы валодаюць вялікімі межамі лімітавальных фактараў за рахунак адсутнасці складанае клеткавое спецыялізацыі, прыстасаванасці да абмежаваных крыніцаў ежы, здольнасці хутка дзяліцца і назапашваць прыстасавальныя мутацыі, а таксама спораўтварэння.

На працягу амаль паўтара мільярда гадоў на планете кіравалі мікрабы і археі. Яны валодалі працэсамі ўтварэння атмасферы і ландшафту, а таксама змянілі баланс хімічных працэсаў і стварылі першую экасістэму, з якой выраслі ўсе астатнія. Гэты перыяд вызначыў развіццё ўсяго жыцця на планете і, магчыма, вызначае яго па-за нашаю планетаю.

Трохі базы. Простая пракарыётная клетка валодае сціплым наборам арганоідаў у параўнанні з больш прасунутай эўкарыятычнаю клеткаю. У клетках эўкарыётаў, то бок у нас з вамі, кожная клетка валодае канкрэтным наборам арганелаў для выканання спецыфічных функцыяў разам з іншымі клеткамі для жыццяздейнисці арганізму. У той жа час клеткі бактэрый цалкам аўтаномныя, у кожнай з іх ёсць

усё неабходнае для размнажэння, харчавання, дыхання і абароны: нітка ДНК, рыбасомы, клеткавая сцэнка і мембрany. Аднак не бактэрый адзінны ствараюць мікрасвет! Пазнаёмцеся з фаварытамі экстремальнай эвалюцыі.

ВІКІНГІ МІКРАСВЕТУ

Сярод мікраарганізмаў самая цікавая група істотаў – археі. Ад іншых населнікаў планеты іх адрознівае будова клеткавае сценкі і мембрanaу. Базавы фосфаліпідны біслой, як у бактэрый і эўкарыётаў, археі размянялі на манапластавы палімерны кампазіт. Замест астатку тлустае кіслаты ў гідрофобным хвосціку ў археяў – своеасаблівы швэдар з ізапреноідных ланцугоў. Дзякуючы манапласту археі атрымалі высокую шчыльнасць пакавання мембрanaу, выдатную ўстойлівасць да ўздзеяння тэмпературай і нізкую пранікальнасць для вады і іонаў звонку. Пры гэтым такая форма абалонкі застаецца гнуткай і дынамічнай рухомаю, нібыта жэле.

Першапачаткова археі былі прызнаныя выключна экстремафільнаю формою жыцця. Іх выявілі ў гарачых крыніцах і працяглы час знаходзілі ў месцах павышанае салёнасці, пры крытычных тэмпературах і ў нішах, пазбаўленых традыцыйных крыніцаў ежы. Археі-літатрофы (харчуючыя неарганічнымі субстанцыямі) – гэта метанагены, або нітрыфікальныя агенты, выкарыстоўваючы для атрымання энергіі рэакцыі акіслення вадароду, аміяку або серы. А галафілы (солеўстойлівые археоны) здольныя выкарыстоўваць сонечнае свяцло як крыніцу паліва. Шырокі дыяпазон харчовых крыніцаў адкрыў археям новыя гарызонты незвычайных і небяспечных экасістэм, а ўнікальная ахоўная абалонка дазволіла прыжыцца ў іх і заняць дамінантавыя пазіцыі ў гонцы адаптацыяй.

ПРАКАРЫЁТЫ VS ЭЎКАРЫЁТЫ

Калі простыя мікрабы могуць выжывыць пры высокай тэмпературе ці іанізавальнім выпраменяванні, то каму больш складаныя арганізмы – не? Магчыма, адказ крыецаў ў будове эўкарыётаў: такі тып клетак уяўляе сабою своеасаблівага мегазорду з бактэрый. Эндасіміятычная тэорыя сцвярджае, што мітхондрыі – энергетычныя станцыі клетак – паўсталі ў выніку выгаднае супрацы папярэдніка эўкарыётаў і мітхандрыйнае бактэрый. У выніку такое сувязі ўзнікае клетка з



КВАНТАВЫЯ ВЫЛІЧЭНЬНІ – 10¹, АЛЬБО КВАНТАВЫЯ ГЕЙТЫ ДЛЯ НУЛІКАЎ

ВОЛЬГА ОКРУТ



Ідэя і аўтарства ілюстрацыі
JANE Motn

Працягваючы аповед пра квантавыя кампютары, гэты артыкул я пастановіла прысьвяціць пытанню, як інфармацыю падаюць у квантавых кампютарах і як ёю можна маніпуляваць, каб рабіць вылічэні. У канцы я прапаную чытчу ляканічны агляд праграмнага забесьпячэння, якое выкарыстоўваецца для квантавых вылічэнняў і напісаныя квантавых алгарытмаў.

КЛЯСЫЧНЫ БІТ ІНФАРМАЦІІ І КВАНТАВЫ БІТ

У звычайных кампютарах інфармацыя падаецца ў выглядзе бітаў – пасыядоўнасці нулёў і адзінак. Напрыклад, каб выявіць лічбу 6 у двайковым выглядзе, мы пішам 110. У квантавых кампютарах інфармацыя падаецца кубітамі (квантавымі бітамі), якія пазначаюцца гэтак званымі кет-вэктарамі і бра-вектарамі (ад анг. bracket) згодна з абазначэннем квантавае мэханікі. Напрыклад, тая ж лічба 6, прэзентаваная вэктарам кет, можа быць запісаная як $|110\rangle$, або $|1\rangle|1\rangle|0\rangle$ у двайковым выглядзе (выбар залежыць ад зручнасці далейших вылічэнняў). Гэтае выяўленне азначае, што першы і другі кубіты – у стане $|1\rangle$, а трэці кубіт – у стане $|0\rangle$. Таксама сапраўдным будзе скарочанае абазначэнне $|b\rangle$ для сукупнасці некалькіх кубітаў. Пад кубітам трэба разумець матэматычную абстракцыю квантавага аб'екту – атама, палірываці съятла, электрона альбо нечага іншага.

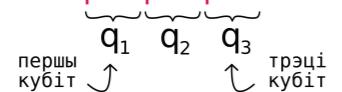
кубіт = q

звычайны кампутар:

$6_{10} = 110_2$

квантавы кампутар:

$|6\rangle = |110\rangle = |1\rangle|1\rangle|0\rangle$



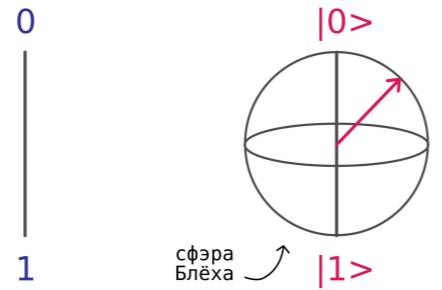
Малюнак 1. Адрозненне паміж звычайнім бітам і кубітам. Звычайна літара q з падпісадкам вызначае кубіт і яго нумар

Клясічны біт інфармацыі можа быць выяўлены геамэтрычна як адзінак даўжынёю 1. Кубіт уяўляе сабой усю трохмерную простору паміж клясічнай адзінкай і нулём ды вызначаецца як сфера радыусам 1. Яна атрымала назыву **сфера Блёха** ў гонар фізыка Фэлікса Блёха (Felix Bloch).

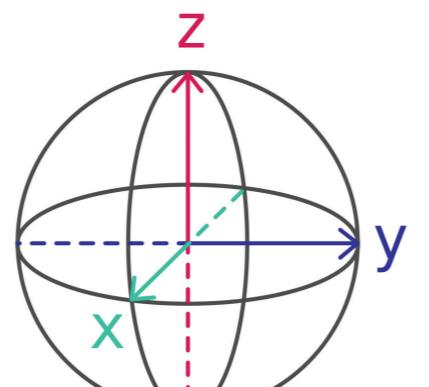
¹У большыні амэрыканскіх каледжаў – нумар уводнага курсу якой-кольквеек дысыпіліны: BIOL 101, CHEM 101 і г. д. У ЗША нумар «101» значыць «Уводзіны».

Гэтыя геамэтрычныя ўяўленыні дапамагаюць зразумець розынцу паміж клясічным бітам і кубітам. Клясічны біт можа быць толькі адзінкай альбо нулём, а кубіт можа прымчаць стан ня толькі адзінкі і нуля, а таксама можа быць любою кропкой на сферах Блёха. У сэнсе вылічэнняў гэта азначае, што кубіт уяўляе сабою бясконцае мноства розных станаў у адрозненіне ад біта, які можа прымчаць толькі два значэнні! Навукоўцы дасюль адзначана не пастановілі, дапамагае гэтая зява квантавым кампютарам рабіць вылічэнье хутчэй ці ніяк не ўпłyвае.

КЛЯСЫЧНЫ БІТ VS КУБІТ



Малюнак 2. Геамэтрычны санс звычайнага біта і кубіта. Зылева – звычайны біт, выяўлены як адзінак даўжынёю 1. Справа – кубіт у выглядзе сферы з радыусам 1, які можа прымчаць любое значэнне на гэтай сферы.



Малюнак 3. Сфера Блёха з каардынатнымі восямі

КВАНТАВЫЕ ГЕЙТАІ

Наяўнасці кубіта зь бясконцым мноствам станаў недастаткова, каб рабіць вылічэні квантавымі кампютарамі. Каб маніпуляваць такімі кубітамі і ствараць алгоритмы, неабходна вызначыць квантавыя апэрацыі з кубітамі, якія носяць назыву **квантавых гейтаі** (*quantum gate*, даслоўна ‘квантавая брамка’)², а таксама вызначыць уплыў квантавых гейтаў на кубіты. Гэтае жа, як кубіты – матэматычная абстракцыя квантавых аб'ектаў,



ЭКСТРЭМАЛЬНАЕ ТАНГА: ЯК ВЫЖЫЦЬ, КАЛІ ТЫ БАКТЭРЫЯ?

SN



Ідэя і аўтарства ілюстрацыі
настя ткачова

3. **Cirq.** Google далучыўся да гонкі стварэння квантавых камптараў і праграмнай інфраструктуры яшчэ ў 2014 годзе, пачаўшы з каманды для распрацоўвання квантавых камптараў. З таго часу каманда Google Quantum стварыла сваю Python-бібліятэку для маніпулявання квантавых камптараў, пабудавала квантавы камптар і заяўліла, што сталася адною зь першых кампаніяў у доказе перавагі квантавых камптараў над звычайнімі. Вядзецца пра эксперымент, які меўся паказаць, што квантавы камптары нашмат хутчэйшыя за звычайнія.

4. **Q#.** Зусім іншы, але варты ўвагі інструмент для квантавых вылічэнняў, распрацаваны Microsoft. Квантавая каманда Microsoft стаўіць перад сабою амбітную мэту – пабудаваць тапалягічны квантавы камптар, у якім інфармацыя будзе адлюстроўвацца спэцыяльным тыпам фэрміёнаў – Маярана. Тэорыя квантавай інфармацыі паказвае, што тапалягічныя квантавыя камптары здольныя працаваць беспамылкова і больш надзеішна. Тым ня менш навукоўцы яшчэ далёкія ад пабудовы практычнага тапалягічнага квантавага камптара. Акрамя стварэння ўласнага квантавага камптара, Microsoft распрацоўвае і падтрымлівае сваё праграмнае забесьпячэнне для маніпулявання квантавымі камптарамі. Усе праграмныя сродкі для кіравання квантавымі камптарамі напісаныя на мове праграмавання Q# (паводле аналёгіі з клясычнаю моваю праграмавання C#), спэцыяльна распрацаванай супольнасцю Microsoft як мова маніпуляцыі ў квантавымі камптарамі.

Усе думкі і погляды мае ўласныя ды не адлюстроўваюць думкі маіх цяперашніх, мінульых або будучых працадаўцаў.

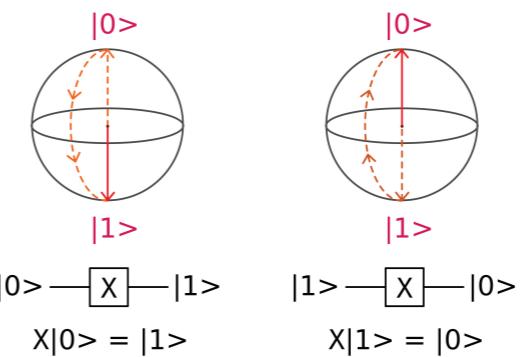
КРЫНІЦЫ:

1. Nielsen, Michael A., and Isaac L. Chuang. Quantum computation and quantum information. Cambridge university press, 2010
2. IBM Quantum Documentation on Qiskit: <https://docs.quantum.ibm.com/>
3. Xanadu Documentations on PennyLane: <https://docs.pennylane.ai/en/stable/>
4. Berenice Baker. Google Quantum Processor Demonstrates Quantum Supremacy. IOT World Today. July 4, 2023
5. Google Documentation on Cirq: <https://quantumai.google/cirq>
6. Introduction to Q# and Quantum Development Kit. Microsoft. <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/quantum/overview-what-is-qsharp-and-qdk>
7. Jennifer Langston. In a historic milestone, Azure Quantum demonstrates formerly elusive physics needed to build scalable topological qubits. Microsoft Source. March 14, 2022

квантавыя гейты – гэта матэматычная абстракцыя пасълядоўнасцяў электромагнітных імпульсаў, якія могуць зъмяніць стан кубітаў.

Найбольш важныя квантавыя гейты – X, Z, H, CX, CZ, CCX, SWAP. Запрашаю чытача да ведацца пра іх падрабязней. Перш як пачаць, я хацела б адзначыць: спосаб, якім я зъбіраюся апісваць квантавыя гейты, не адзіны. Іх можна апісаць з дапамогаю матрыцаў, а станы кубітаў – з дапамогаю вектараў дзякуючы лінейнай альгебре. Аднак я буду выкарыстоўваць мадэль з галіны інфарматыкі, яна больш спадружная, бо не патрабуе працяглых вылічэнняў.

Першы квантавы гейт – **X-гейт**. Гэта адзінай квантавая аперацыя, якая дакладна адпавядае клясычнай паразраднай аперацыі NOT: гейт X пераварочвае $|1\rangle$ да $|0\rangle$ і $|0\rangle$ да $|1\rangle$, як звычайні NOT зъмяніе адзінкі на нуль, а нуль – на адзінку. На сферы Блёха, X-гейты пераварочваюць стан кубіта з верхняга ўніверсалізму з ніжняга ўніверсалізму. Акрамя таго, што мы можам выявіць кубіт і яго стан на сферы Блёха, навукоўцы таксама распрацавалі гэтак званыя квантавыя схемы. На іх кубіт пазначаецца як кет-вектар $|>$, а квантавыя гейты – як квадрат зь літарай, якая ўжываецца для абазначэння назову гейта.

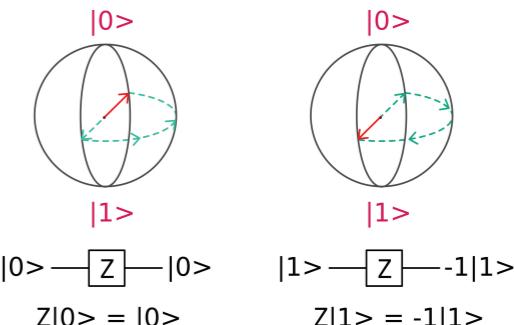


Малюнак 4. Зльева – вынік дзеяння X-гейта на стан $|0\rangle$, выяўлены як сфера Блёха, квантавая схема, а таксама матэматычны запіс. Справа – вынік дзеяння X-гейта на стан $|1\rangle$

Наступны квантавы гейт – **Z-гейт**. Калі Z-гейт дзеіць на стан $|0\rangle$, ён ніяк не зъмяніе яго. Пры дзеянні на $|1\rangle$ стан ён уводзіць лічбу -1 перад станам. Яна называецца фазавым каэфіцыентам і можа выкарыстоўвацца для адразненія іншых станаў. Напрыклад, мы можам пазначыць некаторую карысную для нас інфармацыю ў працэсе выкананьня альгартыму фазавым каэфіцыентам -1 , а пазней можам маніпуляваць пазнача-

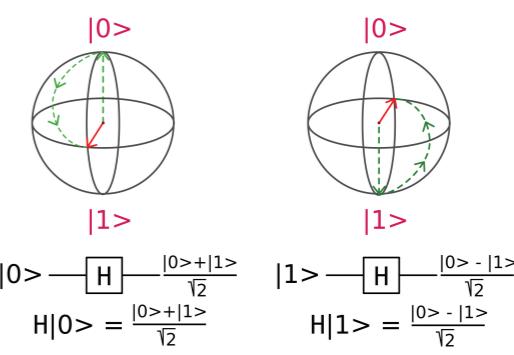
Чытальным слоўніку па інфарматыцы М. Савіцкага (2009). Асновах квантавых вылічэнняў (№ УД-7657/вуч.) – квантавыя гейты. Просім усіх засікаўленых – адмыслоўцаў, практикаў, лінгвістаў – далаўчыцца да абмеркавання адаптациі тэрміну quantum gate на беларускую мову: з'яўляючыся ў рэдакцыю зіну Ратыка, ці далаўчыўшыся да абмеркавання на адпаведную тэму ў суполцы «Толькі пра мову» ў Facebook. На гэты ж момант рэдакцыя і аўтарка палічылі мэтазгодным выкарыстаць адаптацию з ангельскай мовы. QR-код вядзе да абмеркавання.

най інфармацыяй, як нам захочацца. Гэта замест аднаго мы атрымліваем 4 біты інфармацыі, маючы толькі адзін кубіт!



Малюнак 5. Зльева – вынік дзеяння Z-гейта на стан $|0\rangle$, выяўлены як сфера Блёха, квантавая схема, а таксама матэматычны запіс. Справа – вынік дзеяння Z-гейта на стан $|1\rangle$

Наступны – **H-гейт**, яго называюць таксама гейтам Адамара ў гонар французскага матэматыка (Jacques Hadamard). Гэты гейт адыгрывае асаблівую ролю ў квантавых альгартымах, бо стварае роўную супэрпозыцыю станаў $|0\rangle$ і $|1\rangle$. Каб зразумець, што робіць H-гейт, прапаную чытачу ўявіць на імгненіне: вы кідаце манету – і яна застаецца круціцца ў паветры некаторы час. Пакуль манета круціцца ў паветры, вы ня можаце прадбачыць, упадзе яна галавою ці лікам. Хутчэй, вы прымяеце, што гэта адначасова (і галава, і лік) на гэты момант. У квантавых вылічэннях, калі кубіт застаецца ў супэрпозыцыі, мы можам выкарыстоўваць яго для адначасовага правярання квантавых альгартымаў для розных квантавых станаў. Гэта замест аднаго прагнозу мы атрымліваем два (або больш) розныя прагнозы з разьмеркаваннем імавернасці.



Малюнак 6. Зльева – вынік дзеяння H-гейта на стан $|0\rangle$, выяўлены як сфера Блёха, квантавая схема, а таксама матэматычны запіс. Справа – вынік дзеяння H-гейта на стан $|1\rangle$. Трэба заўажыць, што H-гейт выкарыстоўвае толькі верхнюю або ніжнюю палову прасторы на сферы Блёха

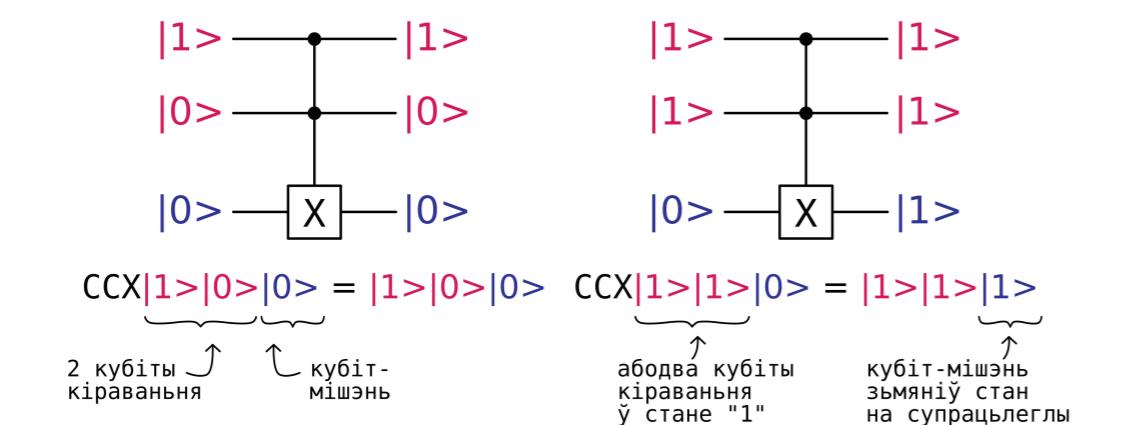
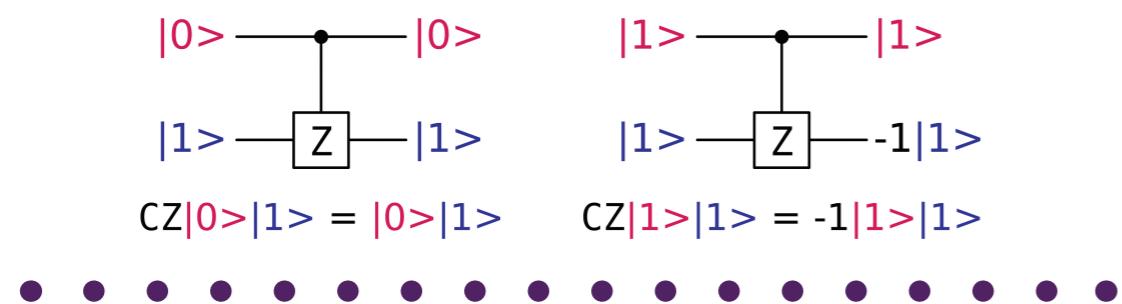
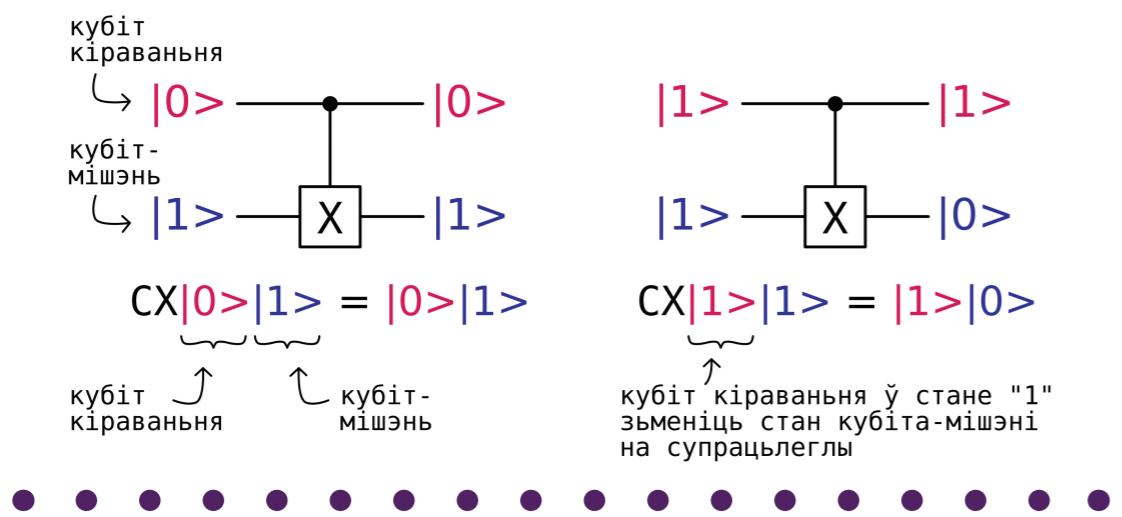
Тры гейты, якія мы абмеркавалі (X , Z , H) называюць таксама аднакубітавымі гейтамі, бо ўжываюцца толькі да аднаго



кубіта. Наступныя чатыры гейты – **CX**, **CZ**, **SWAP**, **CCX** – носяць назыву шматкубітавых і ўжываюца да двух альбо болей кубітаў.

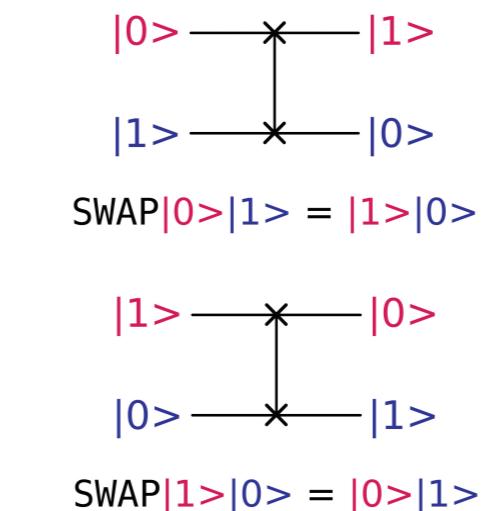
Літара **C** тут азначае «кіраваньне» (з англ. **Control**). Напрыклад, **CX** азначае гейт *Control-X* (кіраваньне-X). Гэта таксама азначае, што гейтам **CX**, **CZ** спартрэбіцца адзін кубіт кіраваньня і адзін кубіт-мішэнь. Калі кубіт кіраваньня – у стане

$|1\rangle$, кубіт-мішэнь зъмяняе свой стан паводле правілаў гейта *X* у выпадку гейта **CX** або паводле правілаў гейта *Z* у выпадку гейта **CZ**. Як можна было здагадацца, гейты **CCX** патрабуюць двух кубітаў кіраваньня і аднаго кубіта-мішэні. Калі абодва кубіты кіраваньня – у станах $|1\rangle$, то трэці кубіт зъмяняе свой стан паводле правіла *X*-гейта.



Малюнак 7. Вынік дзеяньня CX-, CZ- і CCX-гейтаў, выяўлены як квантавая схема і матэматычны запіс. Для шматкубітавых гейтаў сфера Блёха ўжо не можа адлюстраваць усіх станаў двух альбо болей кубітаў

Нарэшце гейт **SWAP** патрабуе для працы двух кубітаў і абменьвае станы абодвух кубітаў. Напрыклад, калі першы кубіт – у стане $|0\rangle$, а другі – у стане $|1\rangle$, пасля гейта **SWAP** першы кубіт будзе ў стане $|1\rangle$, а другі – у $|0\rangle$.



Малюнак 8. Вынік дзеяньня SWAP-гейта

Прапаную чытачу самастойна вызначыць выніковы стан для квантавае систэмы

$$X_2 Z_2 C X_{1,2} H_3 |0>|0>|0>.$$

Падказка: Запіс *X*, азначае, што *X*-гейт будзе ўпłyваць толькі на першы кубіт. Запіс *CX_{1,2}* азначае, што кубітам кіраваньня будзе першы кубіт, а кубітам-мішэнню – другі кубіт. Квантавыя гейты дзеюць зъlevа направа, першы дзеіць *X*, а апошні – *H*.

Адказ ніжэй³.

ПРАГРАМНЫЯ БІБЛІЯТЭКІ ДЛЯ КВАНТАВЫХ АЛЬГАРЫТМАЎ

Завяршаючы артыкул, прапаную агляд некалькіх праграмных інструментau для квантавых вылічэньяў і адукацыйных рэурсаў, папулярных у квантавай інжынэрый і навуковых суполках. Усе праграмныя інструменты адкрытыя і могуць выкарыстоўвацца аўдыторыяй з розным узроўнем навыкаў, пачынаючы з пачаткоўцай у квантавых вылічэньях і за канчваючы экспертамі й навукоўцамі. Акрамя таго, кожная супольнасць, якая распрацоўвае і падтрымлівае гэтую бібліятэку, таксама прапануе шырокі спектар навучальных дапаможнікаў, каб пачаць працу з квантавымі кампютарамі альбо пазнаёміцца з тэорыяй квантавых кампютараў больш падрабязна. Я да гэтага

моманту не знайшла свайго фаварыта, бо розныя праграмныя інструменты маюць перавагі і хібы. Прыналежнасць да кампаніі або навуковае лябараторыі не неабходная, каб пачаць выкарыстоўваць квантавае праграмнае забесьпчэнне. Кожны з дзеяйным адресам электроннае пошты можа зарэгістравацца і пачаць праграмаваць квантавыя кампютары задарма альбо за невялікія гроши (аднак хвіліны выкарыстання квантавага кампутара будзе абмежаваныя). Таксама ўсё праграмнае забесьпчэнне можна знайсці на GitHub-старонках кампаній, якія яго распрацоўваюць і падтрымліваюць.

1. **Qiskit.** Адна з самых папулярных і шырока карыстаных праграмных бібліятэк для квантавых вылічэньяў, распрацаваная IBM Quantum і напісаная на мове праграмаваньня Python. Дзякуючы шматлікім энтузіястам балышня тэхнічнае дакументацыі і навучальных матэрыялаў перакладзеная з ангельскай мовы на іншыя (у тым ліку нямецкая, польская, расейская). Аднак рэсурсы па-ангельску найбольш поўныя. Акрамя Qiskit, IBM Quantum забяспечвае доступ да сваіх квантавых кампутараў праз воблачныя сэрвісы. Напрыклад, можна зарэгістравацца на афіцыйным сайце IBM Quantum і пачаць больш дасканала знаёміца з квантавымі вылічэньямі і кампютарамі.

2. **Pennylane.** Распрацаваная і падтрымліваецца канадзкім стартапам у галіне квантавых вылічэньяў Xanadu. Як і Qiskit, Pennylane напісаны на мове Python. Першапачаткова Pennylane разглядаўся як інструмент для навукоўцаў ды інжынэраў машыннага навучання (то бок з дапамогаю квантавых кампутараў). Але на сёняння Pennylane ператварыўся ў вялізную суполку, якая вывучае разнастайны спектар квантавых альгарытмаў. Падобна да IBM Quantum, каманда Xanadu стварае шырокі спектар навучальных дапаможнікаў у квантавых вылічэньях, а таксама стварае свае фатонныя квантавыя кампютары, якія працуяць на сыватле, лазэрах і розных аптычных элементах.

³ $|1>|1>|0>+|1>|1>|0>\sqrt{2}$