



Космическа кардиология

Д-р Данаил Аврамов

Национална кардиологична болница

От първият полет на човек в космоса планетата Земя е направила вече 50 обиколки по своята орбита. Освен големите космически сили, като Русия, САЩ и Европейският съюз, своя космическа програма имат Япония, Китай, Индия, Бразилия, Иран, Южна и Северна Корея и много други страни. До 2012 г. се очаква да завърши строежът на Международната космическа станция (МКС), соваките вече са история, в план са първите пилотиран полети до Марс, които вероятно ще траят повече от 30 месеца.

Колкото и галечно да звучи това за обикновения земен жител, вече имаме и първите 7 официални космически туриста, а общият брой на космонавти, астронавти и тайконавти е над 520. Прекараното в космоса време е над 100 човекогодина, а средната продължителност на космическия полет е 30 дни. Само 4 човека досега са прекарвали в космоса повече от една година (рекордът от 437 дни е на Валери Поляков, дипломиран лекар, а рекордът за сумарен престой е на Сергей Крикальов – 803 дни).

През изминалите космически десетилетия са проведени безценни за човечеството научни експерименти, много от тях в областта на космическата биология, човешката физиология и медицината. Първите данни от Мир и Скайлаб се допълват и надграждат с по-точните данни от съвременните изследвания. Съвременните експерименти се предхождат от наземна симулация; често едновременно с опита в космоса се провежда и негов наземен аналог. Въпреки че много от биологичните, и в частност медицинските данни, особено от близкото минало, остават недостъпни, благодарение на международното сътрудничество вече се обменя значителна информация и се постига стандартизация на научните методи и протоколите на изследванията.

В космоса човешкото тяло е подложено на различна гравитация, екстремни промени в налягането и температурата, на вредни лъчения, магнитни полета, вибрации. Предизвикателство представлява и завръщането на адаптирания към космоса организъм на Земята. Това са проблемите, с които се занимава космическата медицина с помощта на фундаменталните данни, предоставени и от космическата физиология, започвайки от молекулно и клетъчно ниво. Много от натрупаната информация и направените открития намират своето приложение долу на Земята.

Основен проблем пред адаптацията на човека в космоса остава гравитацията.

През 4-те милиарда години от възникването на живота, цялата еволюция – от първия протомикроб до човека, е протичала при обичайната за земната повърхност гравитация 1 g (9.8 m/s^2). Когато говорим за близкия космос, достъпен до момента за човека, вместо за безтегловност е по-добре да се говори за микрогравитация. Това е гравитацията на обект, чието сумарно ускорение е много по-малко от наличното на земната повърхност.¹

Обикалящият в орбита космически кораб въщност е в условията на свободно падане, което поради липсата на триене с атмосферата е много продължително. На разстоянието на близка околоземна орбита гравитацията, изпитвана от стационарен обект, е намалена само с ~10% от тази на земната повърхност, но центробежните сили, породени от въртенето на кораба, я редуцират до минимум.

Освен намалената гравитация по време на полет, космонавтите са подложени при излитане и кацане на ускорения, които при първите космически апарати са достигали 6–8 g, а в съвременните са „само“ около 3 g. Да припомним, че вертикално ускорение от главата към краката 4–5 g обичайно води до загуба на зрение, а при 5.5–6 g – и на съзнание.

Ето как се променя външният вид на космонавта в условията на микрогравитация: Настъпва преразпределение на телесните течности – лицето отича, бръчките се изглаждат, набъбват шийните вени, намалява дебелината на краката и на талията. Ръстът се увеличава поради раздалечаване на гръбначните прешлени. Ставите започват да заемат ново неутрално положение – някъде около половината от ъгъла им на движение, затова колената са леко свити, а ръцете имат склонност да са протегнати напред, ако не се задържат с усилие – т. нар. поза на отпусната маймуна.

Преди първите космически полети на животни много учени са изказвали съмнение за възможността човек да оцелее при претоварванията при излитане и кацане, както и при липса на нормална гравитация. Изказвани са предположения, че в условията на микрогравитация ще се засегнат тежко основни жизнени функции като гълтане, уриниране, дефекация, чревната перисталтика, че в сърцето може да възникне кавитация или да се появят сериозни аритмии. Някои физиолози са смятали, че скелетните мускули и сърцето могат да отслабнат до толкова, че да направят връщането на Земята невъзможно.

По време на първите суборбитални и орбитални полети се събират данни от експериментални животни (кучета, маймуни, мишки, плъхове), които показват, че човек има потенциал да оцелее в космоса. В условията на безтегловност сърдечната и дихателната честота остават в норма, записите от ЕКГ и мониторирането на системното и пулмоналното АН също не показват отклонения. Непроменени остават способностите на животните да се справят с различни задачи. Предварителната лабораторна подготовка към шум и вибрации помага за адаптацията по време на полета.

Инструментална грешка показала наличие на аритмия при едно от експерименталните шимпанзета и само на временно откритие позволило полета на Джон Глен (първият американски астронавт, летял в орбита) да се състои. Програмата Мъркюри дава началото на пилотираните полети на НАСА. Стават ясни и първите истински предизвикателства към човешкото тяло, като чувствителната загуба на тегло.

Мисиите от програмата Джемини установяват и сигнификантна ортостатична хипотония след приземяване. По време на полета на Джемини 11 (септември 1966 г.) инцидент със завъртане на кораба позволява да се експериментира за пръв път и с изкуствена гравитация. След 8-дневен полет данните показват и спад от ~20% в общия брой на еритроцитите. Тези данни се потвърждават и от полетите Аполо (мисиите на САЩ до Луната) и налагат обширни наземни изследвания върху преразпределението на течностите в безтегловност. Астронавтите от Аполо се завръщат с намален физически капацитет, установява се намалена костна минерализация. За пръв път американските астронавти се сблъскват с проявите на космическата болест – предизвикано от движенията гадене и повръщане, описана преди това от съветските космонавти.

Тези епизоди от историята на космонавтиката бележат началото на предизвикателствата пред човешкото тяло по време на полет. И днес един от основните проблеми е пред късите и пред по-дългите космически мисии е сърдечно-съдовото декондициониране.

Потенциалните проблемите могат да се разделят на такива, свързани с усложнения от неразпознато преди полета заболяване (въпреки сериозния скрининг на пилотите) или да са свързани с очаквани по време на полета промени. Сърдечно-съдовата система леко понася условията на микрогравитация, функционирайки с достатъчен за тези условия капацитет, основните проблеми възникват при завръщане от полет и са свързани с ортостатична хипотония и силно намален функционален капацитет.

Първите прояви на ортостатизъм – умерено покачване на сърдечната честота, са наблюдавани още след мисиите Мюркюри. При мисиите Джемини вече има регистрирани синкопи. Първите аритмии са регистрирани след Аполо.

С ортостатизъм реагират над 2/3 от космонавтите, дори и след кратка мисия.² Проблемът става наис-

тина сериозен при пилотирано приземяване на космическите совалки. Първоначалните данни показват, че това е възможно само ако мисията е с продължителност до 2 седмици. Въвеждат се специални средства, които да поддържат пилота адекватен, като най-напред при излитане и кацане се прилагат тежки костюми с повишено налягане.

Степента на ортостатичната реакция е различна и зависи от индивидуалните особености на космонавта, продължителността на полета, времето, изминало от кацането и начините на изследване. За пълно възстановяване са нужни от дни до месец, пропорционално на продължителността на полета.³

Възстановяването на физическия капацитет обичайно отнема до седмица, като също е свързано с продължителността на престоя в космоса. Много съветски космонавти след дълъг престой на Салют и Мир не са могли да излязат самостоятелно от спускаемите апарати. Първите, изпитали на гърба си проблема, са Андриан Николаев и Виталий Севастьянов, след 17-денонощия полет на Съюз-9 те не могли 6 дни да станат на крака и били разнасяни на носилки. Това довело до временно прекъсване и на руската, и на американската космически програми. Като правило след 6-месечен полет се полагат седмици рехабилитация с дозирано натоварване, масаж, раздвижване в затоплен басейн.

За да минимализират ефекта на микрогравитацията, съвременните обитатели на Международната космическа станция започват физически упражнения още в началото на мисиите. Разработката на тези упражнения е започнала още на Мир и Скайлаб и благодарение на тях отговорът на сърдечната честота при тези космонавти не се променя съществено преди и след полета. За да предотвратят декондиционирането, космонавтите започват полета във форма, по-добра от обичайната, тренировката включва разнообразие от аеробни упражнения. Агресивна аеробна програма се провежда и в орбита, като за някои упражнения космонавтите трябва да са завързани на място. Да не забравяме, че на кораба няма душ. Руските космонавти използват специален костюм – „пингвин“, в който са разположени на определени места регулируеми ластиси, които поддържат нормалния мускулен тонус в безтегловност и предотвратяват изкривяването на позата.

Натоварването на МКС започва с едночасова тренировка от петия ден и постепенно достига 2.5 часа, от които чистата тренировка е час и половина. Обичайно е редуването на тредмил с велоергометър в различните дни, при достигане на 75–80% от максималната сърдечна честота.⁴

Все пак малко се знае за промените, които могат да настъпят в сърдечно-съдовата система при мисия, по-дълга от 9 месеца. При мисии с продължителност над година рискът за сериозно сърдечно-съдово събитие с екипажа на МКС се оценява на 1% годишно.

Какви са механизмите, по които възникват наблюдаваните нежелани явления? Налага се да припомним някои



основни физиологични положения, с които сме свикнали като даденост.

Кръвната плазма на средностатистически 70-килограмов човек съдържа около 3 литра вода, още 11 литра се съдържат в интерстициалните течности.

На Земята съществува значим градиент на налягането между главата и краката (средно артериално налягане 70 mmHg за главата, ~100 mmHg на нивото на сърцето и до 200 mmHg на нивото на краката). Основна причина за това е хидростатичното налягане на кръвта в изправено положение. По аналогични причини кръвотокът в горните отдели на белите дробове е по-малък от този в долните части, предизвиквайки разлика във вентилационно-перфузионното отношение.⁵ Гравитацията също така води до натрупване на повече кръв в долната част на тялото и затруднява нейното придвижване нагоре. Това връщане се подпомага от венозните клапи и движението на скелетната мускулатура.

Върху ортостатичните явления оказват влияние промените в преднатоварването, вискозитета на кръвта, промените в барорецепторната функция и във вегетативната нервна система.

Барорецепторното декондициониране е един от основните механизми на ортостатизма. При нулева гравитация е необходима много по-голяма разлика в съдовото налягане, за да се отключи същата промяна в СЧ, като при 1 g. След 8 ден на полета се увеличава сигнификантно сърдечната честота в покой, намалява промяната ѝ при определена стойност на натиск върху каротидния синус, както и нейната вариабилност.

Натрупват се все повече доказателства за участие на вестибуларния апарат в регулацията на АН.⁶

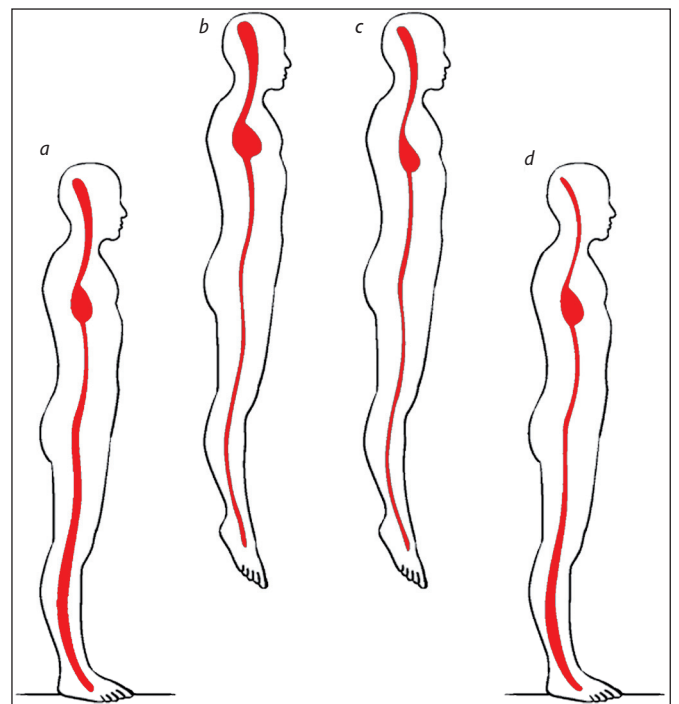
Отстраняването на създадения от гравитацията градиент в АН е свързано с преразпределение на кръвта и елиминиране на кръвна плазма.



Фиг. 1. По време на старта на „Съюз“ астронавтите са заели легнало по гръб положение в моделирани легла с повдигнати крака по-високо от главата. Това профилактира навлизане на кръв в краката по време на излитане и помага на сърцето да изпомпва кръв до останалата част на организма

За да могат космонавтите да понесат голямото претоварване от няколко g при излитане, те заемат хоризонтално положение, със сгънати под прав ъгъл колене и тазобедрени стави. Това става няколко часа преди излитането и може да продължи и след края на ускорението (фиг. 1). В такава позиция човек може да достигне за кратко при експеримент претоварване 21–35 g, а продължително може да понесе 8 g. При челен удар на кола със скорост 48 km/h (с въздушна възглавница) гръдният кош понася натоварване ~60 g. Повдигането на краката в описаната позиция води до увеличено преднатоварване на сърцето и съответно на сърдечния дебит, в началото ударният обем се увеличава от средно 75 на 90 ml. Увеличеният сърдечен дебит се намалява компенсаторно с отделяне на урина и намален прием на течности. Облеклото на астронавтите на совалките е от абсорбиращ материал и поема отделената евентуално урина. Някои астронавти не обичат памперсите и затова предварително жадуват 12 до 24 часа преди полет. Това обаче е свързано с дехидратация при достигането на орбитата, както и с невъзможност за бързи реакции при спешност, и евентуални синкопи при изправяне.

При достигане на орбита преразпределението на кръвта от краката към главата продължава, вече заради микрогравитацията (фиг. 2). Това обяснява описания по-горе оток на лицето и набъбването на шийните вени,



Фиг. 2. Движение на течностите по време на летене в космоса. а) На Земята, поради насочената надолу гравитация, лесно се осъществява кръвоснабдяване на долните крайници. б) Рано на борда кръвта се преразпределя към гърдите и главата, в резултат на което повече кръв навлиза в горната част на тялото. в) Това повишава активността на рецепторите, в резултат на което намалява обемът на течностите в тялото. Тялото функционира с по-малко течности и сърцето става по-малко. г) При връщане на астронавтите на Земята по-голямата част от кръвта се насочва надолу към краката, поради намаления общ обем кръв. Няма достатъчно кръв за цялата кръвоносна система. Това води до ортостатична хипотония

както и отока на назалната мукоза. Субективното усещане е като при настинка, главата се усеща набъбнала, носът е запушен, обонянието и вкусът са променени. Понякога се описва главоболие или напрежение в очите. От друга страна обиколката на краката може да намалее с 10 до 30%. В началния етап на полета космонавтите имат потиснато усещане за жажда. Няма обаче данни за увеличена диуреза по същото време.⁷

Как се променя вътресъдовото налягане по време на космическа мисия? Първото измерване на централно венозно налягане е било осъществено на Скайлаб през 1993 г., като астронавтът е имал предварително въведен катетър в долна празна вена в близост до ДП. Данните потвърждават повишеното ЦВН преди излитане, когато астронавтите са легнали с повдигнати колени, с допълнителното му повишаване при самото излитане. Минута след достигане на микрогравитация стойността му пада под изходната и докрая остава по-ниска от нормалната. Неочакваното понижаване на ЦВН в условията на микрогравитация се обяснява с повишен венозен кълмплайънс и увеличена сърдечна честота. Определянето на сърдечния дебит с помощта на респираторен анализ на маркиран газ показва неговото повишаване в първите дни на мисията, което, в съчетание с понижаването съдово налягане, означава намалена съдова резистентност при 0 г. Тези стойности са съпоставими с измерванията при седнал човек на Земята, може да се каже, че след една седмица в космоса сърдечно-съдовата система си почива.⁸

Преразпределянето на течностите активира барорецепторите и настъпва компенсаторно намаляване на течността в горната част на тялото. След няколко дни съдовият обем намалява, не само поради намаляния прием, но и поради повишеното излъчване. За 3–5 дни в космоса плазменото ниво се стабилизира на ниво, по-ниско с 22%. Учудващо е, че водата в тялото не намалява като цяло, за сметка на увеличеното вътреклетъчно съдържание.

Тези ефекти на микрогравитацията могат да бъдат симулирани наземно при продължителен престой в легло с по-ниско положение на главата (6 градуса наклон).

Артериалното налягане в орбита остава същото като на Земята в спокойно състояние. На Земята повишеният сърдечен дебит би довел до понижена симпатикова активност, в орбита всъщност нивата на норадреналин са значително по-високи. Това може да се обясни с намаляване на извънклетъчната течност в краката, както и с разширяването на гръдния кош при микрогравитация и увеличаване на обема на големите съдове и сърцето, което активира симпатикуса.

Много интересни резултати дават проведените в космоса ехокардиографии. Наблюдава се значимо увеличение на сърдечните обеми в ранната фаза на орбитален полет, следва постепенна адаптация на астронавта, съпроводена с намаляване на обемите, които достигат устойчиви стойности по-малки от земните. Това се обяснява с намаляния вътресъдов обем, намаленото след-

натоварване на сърцето при микрогравитация, както и с намалената физическа активност.

При кратки по време полети максималната кислородна консумация не се променя спрямо наземната, което показва, че описаните адаптивни промени са физиологични. От друга страна, физическите упражнения са най-сигурното средство за поддръжка на сърдечно-съдовата система по време на полет и за превенция на следполетния ортостатизъм. След повече от 30 до 90 дни полет обаче максималният физически капацитет забележимо спада, въпреки тях. Непосредствено след полета максималната кислородна консумация е понижена. Както беше посочено по-горе, физическият капацитет се възстановява за седмица при кратък полет и за до 1 месец при дълъг.

От първите космически полети сърдечните ритми са били оценявани като потенциално сериозен проблем. Освен при насочено мониториране, данни за сърдечния ритъм се получават и при употреба на специалните костюми за излизане извън кораба, както и при костюмите, прилагащи намалено налягане върху долната част на тялото. Това предполага мониторирането да се извършва често в условията на повишена активност, съответно ритмите в такива ситуации са повече. Частично те могат да бъдат обяснени със стрес и с нарушен електролитен баланс. По данни на Роскосмос за последните 10 години от експлоатацията на станция Мир са регистрирани 31 отклонения в ЕКГ и 75 аритмии.⁹

Възможен субстрат за аритмия може да се окаже и настъпването на сърдечна атрофия по описаните по-горе механизми, предполага се, че тя има прогресивен характер и до 12 седмица не се оформя плато.

След настъпилата в една или друга степен адаптация към условията на безтегловност, сърдечно-съдовата система понася ново предизвикателство – приземяването (фиг. 3). Тук съществуват два различни принципа – приземяване в легнало положение, като в руските спускаеми капсули (натоварването в този случай е в посока от гърдите към гърба) и приземяване в седнало положение, както кацат пилотите на американските совалки (натоварването е по оста глава – крака). Тези разлики идват от необходимостта соваката да бъде управлявана при приземяването си. Макар и малко, при кацането със совалка също има претоварване – до около 1.3–1.5 г. В условията на декондиционирана сърдечно-съдова система тези малки натоварвания също могат да доведат до загуба на съзнание (синкоп).

Процесът на приземяване е свързан с покачване на сърдечната честота и артериалното налягане. Това се случва и непосредствено след кацане. Всички астронавти-новаци след първото си приземяване се тестват за ортостатизъм. 27% от астронавтите в първия ден от приземяването достигат пресинкоп до 10 минути от ортостатичната проба. Най-очевидното сърдечно-съдово явление след приземяване е увеличената сърдечна честота, която трябва да компенсира дебита при намален съдов обем. Другите механизми за поддържане на ар-



териалното налягане, като вазоконстрикция и увеличен ударен обем, в тези случаи са по-малко ефективни.

Доколкото жените имат по-висока базална сърдечна честота и по-малко съдово съпротивление от мъжете, та са и по-склонни към ортостатични реакции. Практически всички жени синкопират при тестовете, дори след кратък полет.

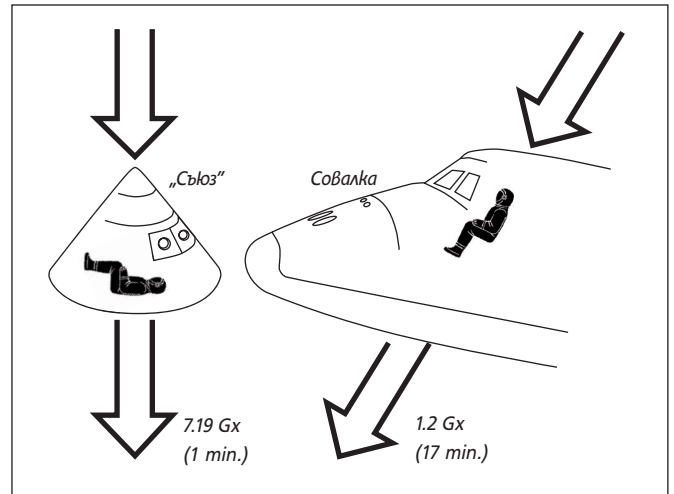
Оказва се, че при втория си полет със совалката Дискавър през 1998 г. Джон Глен, тогава на 77 години, е по-подготвен в сравнение с първият си полет на 40 (фиг. 4). След второто си завръщане на земята той стои здраво на краката си. Възрастта го е дарила с по-висока продукция на адреналин, помагаша му да запази съдовия си тонус. Сърдечният му дебит също е по-висок, вероятно поради засилено венозно връщане на кръвта.¹⁰

Ефектът от възстановяване на гравитацията при приземяване може да се имитира с устройство, понижаващо налягането в долната половина на тялото до ~60 mmHg под околното. Това може да се прави бързо, за 10 секунди, или бавно – за 10 минути. Упражненията могат да се правят на земята или в орбита, като хемодинамичните ефекти в орбита са много по-силно изразени. Съществуващите значими индивидуални различия в настъпващите промени, както и негодната индивидуална възпроизводимост, не дават възможност да се предвиди кои астронавти са склонни към синкоп след приземяване.

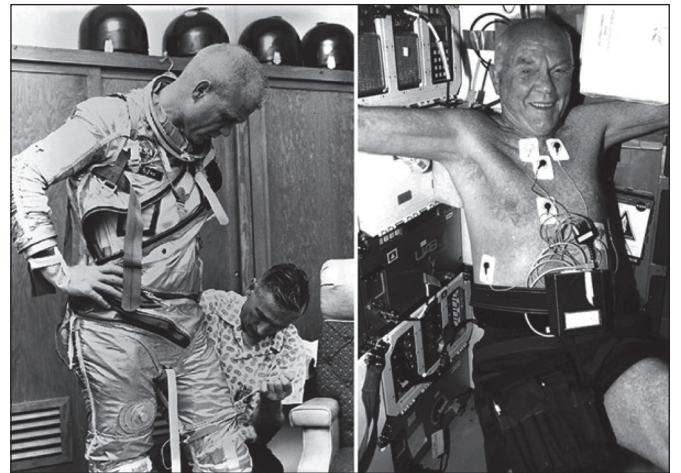
Пероралното приложение на мидодрин 2–4 часа след кацане е безопасно и с добър ефект върху ортостатичната хипотония.¹¹ В ранните мисии преди кацане астронавтите са изпивали литър вода и специални таблетки със соли, за да увеличат плазмения си обем. При кратки мисии това дава добър ефект, той обаче е слаб след по-дълъг престой в безтегловност.

В критичните периоди на излитане и приземяване астронавтите могат да прилагат антигравитационни костюми, които по същността си са балони, прикрепени в крачолите. Раздуването им води до наплив на кръв към горната половина на тялото. Руските космонавти за същата цел използват ластични препаски. Астронавт, прекарал в орбита над 30 дни, задължително се приземява легнал.

Сърдечно-съдовата система е неразделно свързана с дишането. Доколкото сериозни дихателни проблеми не са наблюдавани при безтегловност, проучванията в тази област са по-малко. Може да се каже, че по-равномерната белодробна перфузия при микрогравитация всъщност е подобрене на белодробната функция. Има предположение, че повишеният съдов пулмонален обем, промененото разпределение на кръвотока и на съдовия



Фиг. 3. Посока на g силите по време на кацане на капсулата „Съюз“ (ляво) и на космическата совалка (дясно). Ниските g сили се понесат, когато са по посоката на надлъжната ос на тялото (Gz), в успоредна посока на големите кръвоносни съдове



Фиг. 4. Джон Глен на възраст 77 години се връща от космоса със совалката, 37 години след първия си полет

тонус, могат да засегнат хронично белия гроб и десните сърдечни кухини.¹² Опасност могат да представляват и евентуалните резки промени в околното налягане, инхалацията на токсични пари и газове.

Всички описани сърдечно-съдови промени, свързани със съвременните космически полети, изглежда са обратими, без директен увреждащ ефект върху сърцето. Как би се отразила по-дълга мисия на способността за реадаптация към земната или марсианската гравитация? Може ли сърцето да атрофира при дълъг полет? Това са въпроси на бъдещето. Интересно е и как би се променило човешкото тяло, ако един ден човечеството трайно се засели в космоса. Може би не случайно рисуват извънземните с големи глави и тънки крачета.

Книгопис

1. Rogers MJB, Vogt GL, Wargo MJ *The Mathematics of Microgravity* 1997; Washington, DC: National Aeronautics & Space Administration, NASA Educational Brief EB.1997-02-119-HQ.

Пълната библиографска справка е на разположение в издателството и може да бъде представена при поискване.