

# ИОНЖУУЛАГЧ ЦАЦРАГ ХҮНИЙ ЭД ЭС, ЭРҮҮЛ МЭНДЭД НӨЛӨӨЛӨХ НЬ

**М.Батмөнх**

*(Дубна хот дахь Цөмийн Шинжилгээний Нэгдсэн Институтийн  
Цацрагийн биологийн лаборатори, доктор)*

## **Товч агуулга**

Цацраг хаанаас гардаг, хүний биеийн эд эстэй харилцан үйлчлэхэд ямар процесс явагддаг, эсийн хамгаалах, засварлах, дасан зохицох механизмын талаар цацрагийн биологийн шинжлэх ухааны суурь ойлголтууд, судалгааны үр дүнгээс эхний хэсэгт өгүүлнэ. Дараагийн хэсэгт цацрагийг хэрэглээнд нэвтрүүлснээр хүний эрүүл мэндэд яаж нөлөөлдөг, хэмжээ нь ямар байхаар мутаци-хавдар үүсгэж, үр хөврөлд нөлөөлдөг, ямар байхаараа сөрөг нөлөөгүй талаар жишээ баримтуудаас дурдана.

## **1. Байгалийн цацраг. Эд эсийн хамгаалах болон засварлах систем**

Хаа сайгүй оршиж, аливаа биетийг бүрдүүлж байдаг хамгийн өчүүхэн зүйл бол атом. Агаар ус, сандал ширээ, алт төмөр, хүн амьтны эд эс гээд бүх зүйлс атомоос тогтдог. Атом нь нүдэнд харагдахгүй жижиг бөгөөд нэг сая атомыг зэрэгцүүлэхэд үсний ширхэгт ойртоно. Орчлон ертөнц, од гаригуудын нийт атомын 90%-ийг устөрөгчийн атом бүрдүүлдэг бол хүний биеийн 99% нь ердөө 4 төрлийн атомоос (устөрөгч, хүчилтөрөгч, нүүрстөрөгч, азотын атомууд) бүрддэг. Химийн элементийн үелэх системийн 118 атомоос 90 орчим нь байгаль дээр оршиж, 38 атом нь цацраг ялгаруулдаг. Тэдгээр атом нь дэлхий болон амьдрал үүссэн цагаас нар салхи, агаар ус, хөрс ургамал, хоол хүнсээр дамжин хүний биеийн нэг хэсэг байсаар ирсэн.

Цацраг туяа нь цахилгаан-соронзон долгион эсвэл масстай цэнэгт бөөмс байдаг. Тухайлбал, нар нь “массгүй” цэнэггүй хэт ягаан туяаны үүсгүүр болдог бол ундны ус, хөрс ургамал нь “масстай” цэнэгтэй альфа бөөмийн үүсгүүр, харин хүний биеийн зарим атомоос бета цацраг ялгардаг (Зураг 1). Атомууд нь протон, нейтрон, электроны тоогоороо ялгаатай ба атомоос хоёр протон, хоёр нейтронтой бөөм ялгарч байвал альфа задрал болдог. Харин электронууд (хасах, нэмэх цэнэгтэй) ялгарч байвал бета задрал, “массгүй” цэнэггүй цахилгаан соронзон долгион нь гамма задрал болдог.

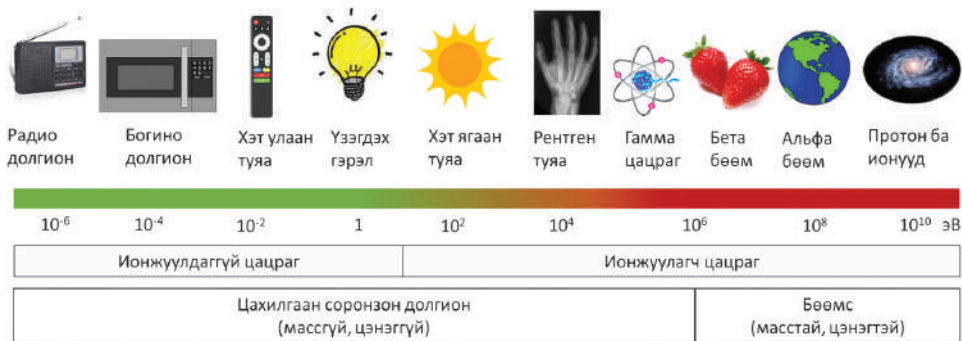
Тэгэхээр хүний бие гаднаасаа (нар, дэлхийгээс) болон дотроосоо (агаар ус, хоол хүнсээр дамжин) цаг үргэлж ионжуулагч цацрагт өртөж байдаг. Ионжуулагч цацрагийн биологийн объект (биомолекул,



эс, эд, организм, популяци) дээрх нөлөөллийг цацрагийн биологийн шинжлэх ухаан судалдаг. Нарны туяа (хэт ягаан) нь Д-витаминыг үүсгэх процессыг идэвхжүүлж, дархлааг сайжруулдаг ч хэтэрвэл арьс түлэгддэг шиг ионжуулагч цацрагийн эерэг ба сөрөг нөлөөг мэдвэл зохино. Ионжуулагч цацрагийн энерги нь дунджаар 10 электронвольт (эВ)-оос их бөгөөд атом, молекулаас электроныг нь салгах чадвартай (Зураг 1). Харин ионжуулдаггүй цацраг нь бага энергитэй бөгөөд эсийн бүтцэд нөлөөлдөггүй. Иймд цацраг гэж ионжуулагч цацрагийг нэрлэдэг. Биед шингэсэн цацрагийн энергийн хэмжээг тун гэх ба үүнийг Зиверт (Зв) нэгжээр илэрхийлдэг. Хүн нэг жилд дунджаар 2.4 мЗв (0.0024 Зв)-ийн хэмжээтэй байгалийн цацрагийн тунг авдаг (70 жилд 168 мЗв) бол зарим газар (Бразил, Энэтхэг, Иран, Хятад, Австрали) дунджаас 10-100 дахин өндөр цацрагтай байдаг. Тухайлбал, жил бүр 30,000 гаруй хүн амардаг Бразилийн Гуарапаригийн наран шарлагын газруудын элсэнд торийн атомын агууламж өндөр байдаг тул цацрагийн хэмжээ нэг жилд 175 мЗв хүрдэг. Мөн уулын халуун рашаантай Ираны Рам-Сер хотод цацрагийн хэмжээ нэг жилд 260 мЗв хүрдэг. Сансрын цацрагийн тун нэг жилд

0.3 мЗв байдаг бол энэ нь өндөрлөг газарт 1500 метр тутамд хоёр дахин нэмэгддэг. Зөвхөн хоол хүнс, ундны уснаас нэг жилд дунджаар 0.3 мЗв цацраг биед хуримтлагддаг. Тухайлбал, сүү, мах, талх, будаа, гадил гэх мэт бараг бүх органик бүтээгдэхүүнд байдаг Кали ( $^{40}\text{K}$ ) нь бета-цацраг ялгаруулдаг боловч нөгөө талаас хүний зүрх, булчигнуудын хэвийн ажиллагаанд шаардлагатай чухал элемент болдог. Жишээ нь: нэг ширхэг гадил идэхэд 0.0001 мЗв-ийн цацрагийн тунг авдаг бол гурван ширхэг тамхи татахад тийм тунг авдаг. Цацрагийн тун дэлхий дээр нэг цагт 1 гадил (0.0001 мЗв), 10 км өндөрт онгоцоор нисэх үеэр нэг цагт 30 гадил, 400 км-т олон улсын сансрын станц дээр 250 гадил байдаг бол Ангараг руу нисэх үеэр 750 гадил, харин Ангарагийн гадаргуу дээр нэг цагт 250 гадил болохыг тогтоосон байдаг. Улаанбаатараас Сөүл рүү 3 цаг нисэхэд 90 гадил идэх эсхүл 270 тамхи татахтай ижил тунг авдаг бол Сингапураас Нью-Йорк руу 18 цаг нисэхэд 550 орчим гадилын тунг авдаг. Өдөр тутмын өргөн хэрэглээний хүнсэнд байдаг байгалийн цацраг идэвхт атомуудыг доорх хүснэгтэд харууллаа.

Цацраг туяа нь хүний биеийн эд эс дэх зөвхөн атом молекултай л



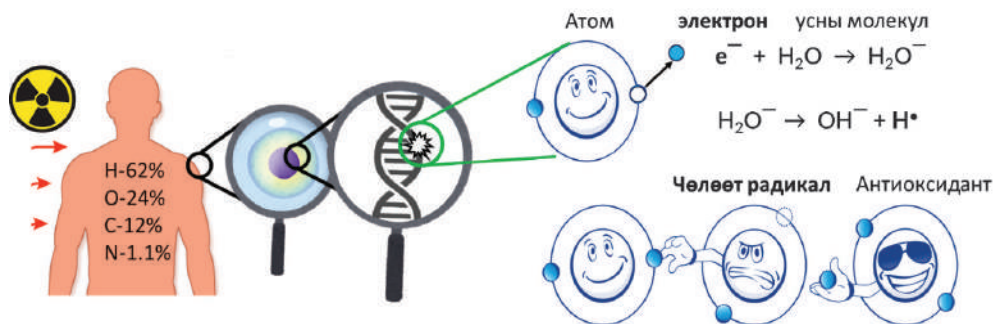
Зураг 1. Цацрагийн үүсгүүрүүд, цахилгаан соронзон долгион, цэнэгт бөөмс, тэдгээрийн энергийн хэмжээ



Хүнсний бүлэг	Байгалийн цацраг идэвхт атомууд
Сүү, сүүн бүтээгдэхүүн	$^{14}\text{C}$ , $^{40}\text{K}$ , $^{210}\text{Pb}$ , $^{210}\text{Po}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{234}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$
Төрөл бүрийн мах, махан бүтээгдэхүүн	$^{40}\text{K}$ , $^{210}\text{Pb}$ , $^{210}\text{Po}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{234}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$
Ус, цай, кофе зэрэг ундны зүйлс (Beverages)	$^{210}\text{Pb}$ , $^{210}\text{Po}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{238}\text{U}$
Бүр төрлийн гурил, будаа, овъёос, эрдэнэ шиш, арвайн гурил, гоймон, талх зэрэг үр тарианы бүлэг (Cereals)	$^{40}\text{K}$ , $^{210}\text{Pb}$ , $^{210}\text{Po}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ , $^{234}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$
Алим, гадил, усан үзэм, гүзээлзгэнэ, бөөрөлзгөнө зэрэг төрөл бүрийн жимс	$^{14}\text{C}$ , $^{210}\text{Pb}$ , $^{210}\text{Po}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ , $^{234}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$ , $^{40}\text{K}$
Төмс, лууван, сонгино, брокколи, улаан лооль, зэрэг хүнсний ногоон	$^{40}\text{K}$ , $^{210}\text{Pb}$ , $^{210}\text{Po}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ , $^{234}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$

харилцан үйлчилдэг бөгөөд атомоос электроныг нь цохиж гаргаснаар физикийн ионжих процесс болно (Зураг 2). Тэр электрон нь цаашаа эсийн доторх усны молекулуудыг (устөрөгчийн хоёр атом болон хүчилтөрөгчийн нэг атомын нэгдэл) ионжуулснаар чөлөөт радикалууд гэж нэрлэгддэг маш тогтворгүй ионуудыг шинээр үүсгэдэг. Учир нь хүний биеийн эд эсийн нийт массын 80% нь уснаас бүрддэг. Хүний эд эсэд нэг хоногт бий болдог чөлөөт радикалуудын тоо ойролцоогоор хэдэн тэрбум хүрдэг. Тэдгээр нь биомолекулуудын химийн холбоосыг тасалснаар эд эсийн бүтцэд эвдрэл үүсгэдэг. Хэдийгээр эс өөрийгөө хамгаалах буюу хоргүйжүүлэх систем

(антиоксидант болон уургийн молекулууд) нь үүссэн эвдрэлийн тоог хязгаарладаг ч нэг хоногт хүний эсийн удамшлын молекул (ДНХ)-д 1 сая хүртэл эвдрэл үүсдэг. ДНХ нь бүх амьд организмын эсэд байх бөгөөд тухайн эсийнхээ гүйцэтгэх үүрэг, хэлбэр хэмжээг тодорхойлдог хамгийн чухал биомолекул. Хүний ДНХ-ийн дарааллын 92%-ийг 1990-2003 онд тогтоосон бөгөөд үлдсэн хэсгийг 2022 онд тодорхойлсон. ДНХ нь (2 нм-ийн өргөнтэй, 2 м урттай) хүний бүх эсэд ижилхэн ба эсийн эзлэхүүний өчүүхэн хэсэг (0.2%) боловч тухайн төрлийн эсэд (арьсны, цусны, булчингийн, мэдрэлийн гэх мэт) тодорхой бүлэг генийг идэвхжүүлэх үүрэгтэй нарийн механизм ажиллаж



Зураг 2. Цацраг хүний биеийн эд эсийн молекул атомтой харилцан үйлчлэхэд үүсэх процесс

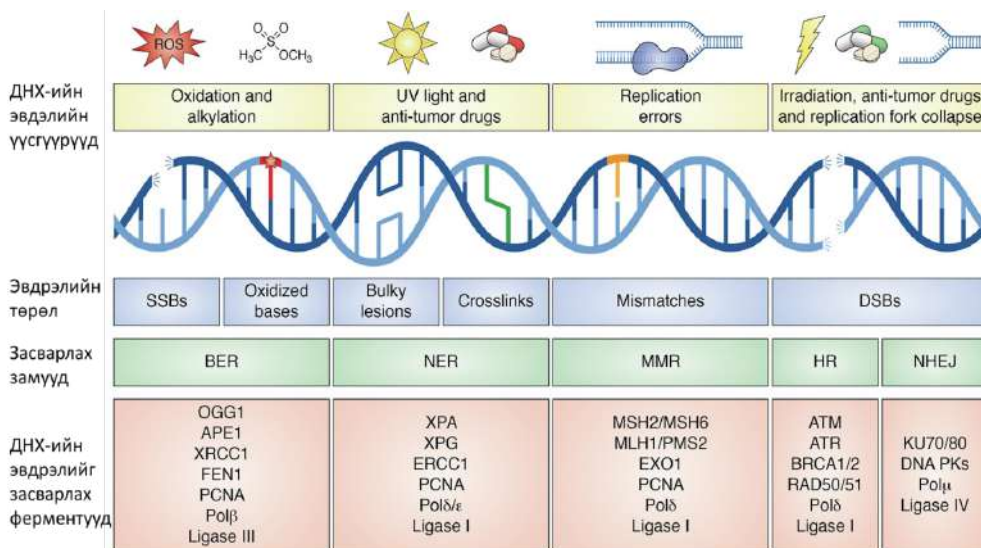


байдаг. Тухайлбал, GRIN бүлэг генүүд нейроны эсэд идэвхжиж, мэдээлэл дамжуулах хэсгийн рецепторуудыг бүтээх уургийн нийлэгжилтийн зааварчилгааг өгснөөр тархины хэвийн үйл ажиллагааг хангадаг.

Хамгийн энгийн нэг эст мөөгөнцрөөс эхлээд олон эст амьтад хүртэлх бүх амьд организм нь чөлөөт радикалуудыг хоргүйжүүлэх системээс гадна ДНХ-ийн засварлах (эдгэрэх) системээс бүрддэг болохыг 1960-1980 онд тогтоожээ. Энэхүү систем нь удамшлын молекулд үүссэн эвдрэлийг сэргээн засдаг олон төрлийн ферментүүдийг агуулдаг. Эдгээр ферментүүд нь ДНХ-ийн эвдэрсэн хэсгийг газар дээр нь олж засварлаад явдаг. Засварын явцад эсийн хуваагдлыг түр зогсоодог бөгөөд ДНХ-ийн эвдрэлийн төрөлд тохирсон өөр өөр ферментүүд өөр өөрөөр засварлах боловсронгуй механизмуудтай байдаг (Зураг 3). Тухайлбал, ДНХ-ийн хос мушгианы нэг утсанд эвдрэл үүссэн байвал тэр хэсгийг тайрч эрүүл хэсгээр сольдог. Хэрэв эсийг хуваагдалд орохоос өмнө ДНХ-ийн эвдрэл бүрэн засагдаагүй эсвэл алдаа гараад хоёр өөр хромосомын тасарсан хэсгийг хооронд нь нийлүүлсэн байвал тухайн эрүүл бус эсийг устгадаг. Энэ процесс нь дархлааны систем идэвхэжсэнээр эсвэл биологийн программчлагдсан механизм буюу апоптозоор (эс өөрийгөө устгах) явагддаг болохыг 1972 онд тогтоосон байна. Өөрөөр хэлбэл, бүх амьд организмын эд эс нь цацрагийн үйлчлэлийг хоргүйжүүлэх, үүссэн ДНХ-ийн эвдрэлийг засварлах, апоптоз болон гэмтсэн эсийг зайлуулах зэрэг хамгаалалтын системтэй. Зарим төрлийн эсүүд цацрагт илүү тэсвэртэй байдаг бол зарим нь мэдрэг байдаг. Судалгаагаар хүн болон амьтдын гэдсэнд байдаг E.coli бактериудын зарим төрөл нь ДНХ-ийн эвдрэлийг

засварлах чадвараараа 5 дахин илүү байдаг бол зарим төрөл нь 10 дахин бага байдаг. Гэхдээ энэ нь цацрагийн ионжуулах чадвараас хамаардаг (үүнийг өгүүллийн 3-р хэсэгт тайлбарлана). Өдөр тутамд хүний нийт эсийн 1 хувь нь шинэчлэгдэж байдаг бөгөөд тэр нь ойролцоогоор 330 тэрбум эс гэсэн үг. Арьсны эс дунджаар 14 хоногт шинэчлэгддэг бол цусны эс 3 сар тутамд шинэчлэгдэж байдаг.

Дэлхий дээр амьдрал үүссэн цагаас удамшлын молекул нь гаднын довтолгооноос өөрийгөө хамгаалах механизмаас гадна эволюцын явцад байгалийн цацрагтай дасан зохицож ирсэн байдаг. Бага тунгийн цацрагт амьд организмын дасан зохицох үзэгдлийг 1977 онд бактерийн эс дээр, 1984 онд хүний эс дээр ажигласан. Энэхүү дасан зохицох процесс нь дунджаар 300 мЗв (3 сая гадил)-ээс бага цацрагийн тунд ажилладаг болохыг тогтоожээ. Тухайн үед дасан зохицох механизмыг сайн ойлгоогүй байсан ч энэ нь эсийн хамгаалалтын системийг (антиоксидант) өдөөж, ДНХ-ийн нөхөн сэргээх чадварыг идэвхжүүлдэг болохыг 1994 онд тогтоожээ. Дэлхийн дунджаас 10-100 дахин өндөр байгалийн цацрагтай газар (Энэтхэг, Бразил, Иран, Япон гэх мэт) амьдардаг хүн болон амьд организмын эд эсэд өргөн хүрээний судалгаанууд хийгдсэн. Тухайлбал, байгалийн халуун рашаантай Мисаса болон Рам-Серын цацрагийн хэмжээ дэлхийн дунджаас их боловч тэндхийн оршин суугчдын дундах хорт хавдрын өвчлөлтийн хэмжээ нь бүх Японы болон Ираны дунджаас доогуур болохыг зарим судалгаа харуулсан байдаг. Энэ нь хэдийгээр дасан зохицох процесстэй холбоотой боловч хэмжилт туршилтын аргуудыг сайжруулж илүү нарийвчилсан судалгаа хийх шаардлагатай хэвээр



Зураг 3. Дотоод ба гаднын нөлөөгөөр үүсэх ДНХ-ийн эвдрэлийн төрөл, тэдгээрийг нөхөн сэргээх механизм болон ферментүүд

байгаа. Сонирхуулахад бага тунгийн (50-400 мЗв) гамма цацраг нь ялааны (*D. melanogaster*) дундаж наслалтыг уртасгаж байгааг харуулсан судалгаа 2015 онд PloS ONE сэтгүүлд хэвлэгдсэн. Байгалийн цацраг нь амьд организмын генийг өөрчилдөггүй ба тус ялааны 15,682 гений 76-д илэрсэн өөрчлөлт нь цацрагтай холбоогүй болохыг тогтоосон байдаг.

## 2. Цацрагийн зохиомол үүсгүүр ба тэдгээрийн нөлөө

100-аад жилийн өмнөөс багаж, тоног төхөөрөмжийн тусламжтайгаар хүний оролцоотойгоор ионжуулагч цацрагийг гарган авдаг болсон. Зохиомол үүсгүүрт рентген аппарат, бөөмийн хурдасгуур, цөмийн реактор зэрэг орно. Рентген туяаг 1896 оноос, цацраг идэвхт ради ( $^{226}\text{Ra}$ )-ийг 1900 оноос эмнэлгийн салбарт оношилгоо, эмчилгээнд өргөн хэрэглэж эхэлснээр хүн нэг жилд дунджаар 0.6 мЗв хэмжээтэй нэмэлт цацрагийг авдаг болсон. Тухайлбал, шүдний рентген зураг нэг удаа 50 гадилтай (0.005 мЗв) тэнцэх бол цээжний рентгений

тун 1000 гадил (0.1 мЗв), компьютер томографийн (10 мЗв) тун 100,000 гадилтай тэнцдэг.

Цацрагийг хэрэглээнд нэвтрүүлэх нь технологийн дэвшил боловч аюулгүйн норм, хэмжээ хяналтгүй ашиглах нь сөрөг нөлөөтэйг харуулсан жишээ баримт олон байдаг. Тухайлбал, 1935-1954 онд нурууны рентген хийлгэсэн 14,000 өвчтөн 3000 мЗв (30 сая гадил) тунг авсан бөгөөд 1970 оны байдлаар тэдний 80 нь хорт хавдраар нас барсан байна. 1952 оноос өмнө Ради эмчилгээний үеэр 9,000 мЗв тун авсан 900 өвчтөний 54 нь 1974 онд ясны хавдартай болжээ. Эдгээр эмчилгээ хийлгэсэн хүмүүсийн ихэнх нь эдгэрч байсан болохоор тухайн үед цацраг туяа нь үл үзэгдэх ид шид шиг санагдаж байж. Улмаар Ради сонирхол татаж гэр ахуйн бараа, гоо сайхан, хүнсний бүтээгдэхүүнүүд болон ургамлын бордоо, малын тэжээл гээд өргөн хэрэглээнд нэвтэрсэн. Үүнд: талх, шоколад, ундны ус, шүдний оо, нүүрний будаг, саван, тос, эм, рашаан зэрэгт цацрагтай Радийг нэмснээр хүний эрүүл мэндийг сайжруулж, эд





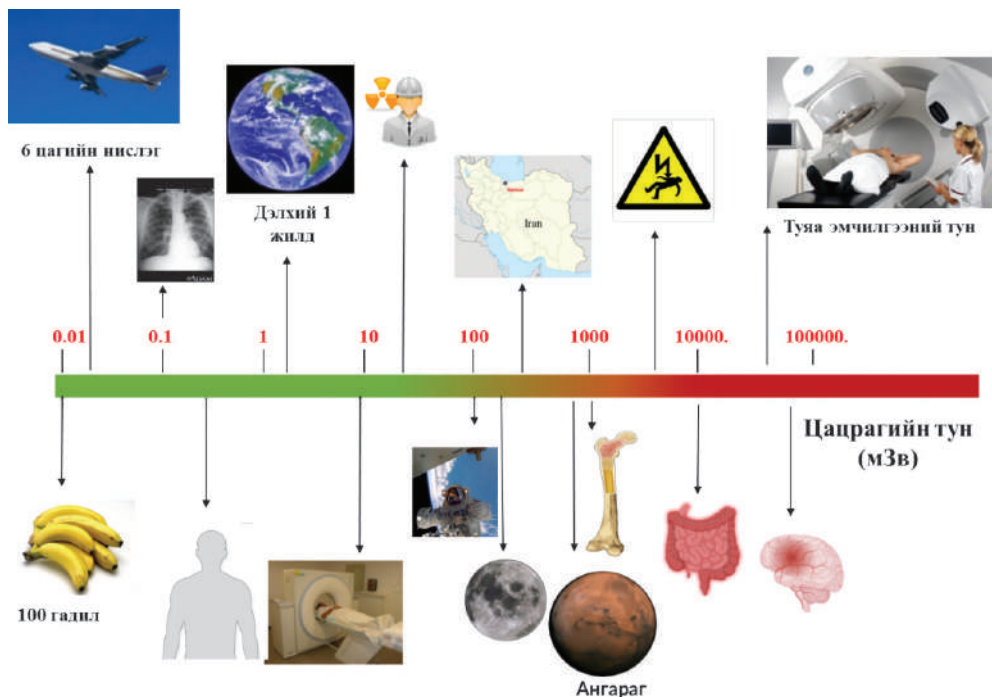
байхгүй бөгөөд харин сансарт нисэх үед л ийм тунг авах боломжтой.

1920-1968 оны хооронд ураны уурхайд ажиллаж байсан 4,100 уурхайчид урт хугацааны турш 60,000 мЗв хүртэл цацрагийн тунг авсан бөгөөд 1974 он гэхэд тэдний 134 нь уушгины хорт хавдартай болжээ. Мөн Чех, Франц, Канад, АНУ-ын судалгаанууд ураны уурхайн ажилчдын уушгины хорт хавдрын тохиолдол нэмэгдсэнийг харуулсан байдаг. Эдгээр үйл явдлуудын дараа Америкийн цацрагийн хамгааллын зөвлөлөөс цацрагтай орчинд ажилладаг хүмүүсийн нэг жилд авах тунгийн хэмжээг 1934 онд 730 мЗв гэж тогтоосон ба 1951 онд энэ тоог 153 мЗв болгон бууруулж шинэчлэн тогтоож байжээ.

1945 оны цөмийн бөмбөгдөлт, 1961 оны сансрын нислэг болон 1986 оны цөмийн осолтой холбоотойгоор хүний эрүүл мэндэд үзүүлэх цацрагийн нөлөөллийн талаар өргөн цар хүрээтэй судалгаанууд олон хийгдсэн. Эндээс цацрагийн биологийн шинжлэх ухаан эрчимтэй хөгжиж, эрдэмтэд цацрагаас хамгаалах аргуудыг эрчимтэй судалж эхэлсэн. Тухайлбал, Хиросима, Нагасакийн бөмбөгдөлтөд өртөж 3,000 мЗв хүртэл тун авсан 96,000 хүн, “хотод байгаагүй” 24,000, нийт 120,000 хүнийг насан туршид нь харьцуулан судлах урт хугацааны олон улсын хамтын судалгааг 1955 онд эхлүүлсэн байна. 2017 оны байдлаар тэдгээр хүмүүсийн 62% нь нас барсан бөгөөд 38% нь одоо ч амьдарч байгаа ажээ. Судалгаагаар 17,448 хүнд хорт хавдар илэрснээс зөвхөн 853 нь суурь үзүүлэлтээс хэтэрсэн цацраг туяатай холбоотой болохыг тогтоожээ. Хүний хорт хавдраар өвчлөх байгалийн суурь түвшин маш өндөр буюу эрэгтэйчүүдэд 40%, эмэгтэйчүүдэд 29% орчим байдаг. Мөн

бөмбөгдөлтийн үед жирэмсэн байсан 3,600 эмэгтэйд хийсэн судалгаагаар 8-15 долоо хоногтой үедээ 300 мЗв тун авсан эхийн хүүхдүүд мэдрэлийн болон хөдөлгөөний гажигтай, тархины хэвийн бус бүтэцтэй байгааг харуулжээ. Харин 8 долоо хоногоос өмнө эсвэл 25 долоо хоногийн дараа тийм цацрагт өртөхөд ямар ч нөлөө ажиглагдаагүй байна. Олон улсын цацрагийн хамгааллын комиссын (ICRP) 2000 оны дүгнэлтээс үзвэл 100 мЗв (1 сая гадилтай тэнцэх тун) хүртэл цацрагийн нөлөөнд урагт төрөлхийн гажиг үүсэх эрсдэл байхгүйг тогтоожээ.

Улмаар үр хөврөлийн эсэд болон хойч үеийнхэнд үзүүлэх цацрагийн нөлөөг тогтоохын тулд бөмбөгдөлтөөс амьд үлдсэн аав ээжээс төрсөн 77,000 хүүхдийг судалсан. Хачирхалтай нь эцэг эхийн аль нэг нь эсвэл хоёулынх нь авсан цацрагийн хэмжээнээс үл хамааран төрөлтийн гажиг, сэтгэцийн хомсдол зэрэг өвчлөл хүүхдэд илрээгүй. Улмаар хромосомын эмгэг болон полимели ч ажиглагдаагүй байна. Эдгээр хүмүүсийн зарим нь одоо 70 гаруй настай бөгөөд хорт хавдрын өвчлөл хяналттай харьцуулахад нэмэгдээгүй ажээ. Хэдийгээр цацраг нь эсийн амьдрах чадварт (survival) нөлөөхөөс гадна эсэд мутаци (хавдар) үүсгэх боломжтой хүчин зүйлсийн нэг боловч цацрагийн биологийн шинжлэх ухааны хувьд мутаци гэдэг бол хавдар. Илүү эрхтэнтэй төрөлтийг шинжлэх ухаанд полимели (polymelia) гэж нэрлэдэг бөгөөд маш ховор тохиолддог төрөлтийн гажиг. Шалтгаан нь ДНХ өөрийгөө хувилах үед алдаа (100 саяд 1 магадлалтайгаар) гардаг ба эсийн хуваагдал (ихэрлэх явц) зогссон тохиолдолд полимели үүсэх боломжтой. Өөрөөр хэлбэл цацрагийн нөлөөгөөр илүү эрхтэнтэй төрөлт (хурга, ишиг) гарахгүй, эсвэл кино



Зураг 6. Цацрагийн тун: 100 гадил, онгоцоор нисэх, цээжний рентген, хүнээс, дэлхийгээс, компьютер томограф хийлгэх үед, цацрагтай орчинд ажиллах аюулгүйн хэмжээ, олон улсын сансрын станц дээр 6 сар болох эсвэл Сар руу нисэхэд, байгалийн өндөр цацрагтай газар (жишээ нь Ираны Рам-Сер), Ангараг нисэхэд, ясны чөмөг болон гэдэс хэвлийд нөлөөлөх тун, туяа эмчилгээний тун, мэдрэлийн системд нөлөөлөх тун

“Халк”, “Гайхамшигт дөрөв”) дээр гардаг шиг супер хүчтэй мутант бий болохгүй гэсэн үг. Чернобылийн ослын дараа 70 км дотор 1987-2002 онд төрсөн 130 хүүхэд болон тэдний эцэг эхийг бүрэн судлаад үр хөврөлийн мутаци нэмэгдээгүй болох нь тогтоогдсон. Энэ судалгаа нь 2021 онд Science сэтгүүлд хэвлэгдсэн бөгөөд цацрагаас үүдэлтэй ДНХ-ийн эвдрэл удамшдаггүй гэдгийг харуулсан. Тус ослын үеэр 800-16,000 мЗв цацрагийн тун авсан 94 хүний 28 нь нас барсан бөгөөд бусдыг нь амжилттай эмчилсэн байдаг. Дараах жилүүдэд ялангуяа хүүхдийн бамбай булчирхайн хорт хавдар 1,500-аар нэмэгдсэн ч дийлэнх нь эмчлэгджээ. Чернобылийн тохиолдлоос ялгаатай нь 2011 оны Фукушимагийн ослын үеэр

цацрагаас үүдэлтэй нас барж, хавдар үүссэн тохиолдол бүртгэгдээгүй. Харин цунами 18,000 гаруй хүний аминд хүрч, 100,000 хүнийг нүүлгэн шилжүүлэхэд хүргэж, энэ үеэр 1,000 гаруй хүн (эм тариа, эмчилгээ нь тасарсны улмаас) амь үрэгджээ.

Дээрх түүхэн жишээнүүд нь ионжуулагч цацрагийн хүний эрүүл мэндэд үзүүлэх нөлөөг ойлгоход чухал баримт болсон.

Цацрагийн тун ямар хэмжээтэй байхад хүний биед яаж нөлөөлдөг талаар баримтуудыг нэгтгэхэд: жирэмсэн эхэд 100 мЗв хүртэл цацраг урагт аюулгүй ч түүнээс дээшээ бол үр хөврөлд нөлөөлөх магадлалтай (0.5%). 300 мЗв (3 сая гадилтай ижил)-ээс их тун нь ургийн өсөлтийг зогсоох, хөгжлийн гажиг үүсэх сөрөг нөлөөтэй.