



VILNIAUS UNIVERSITETAS

MEDICINOS FAKULTETAS

Medicina

Anesteziologijos ir reanimatologijos klinika, Klinikinės medicinos institutas

Mindaugas Titas Činčikas, VI kursas, 3 grupė

VIENTISŲJŲ STUDIJŲ MAGISTRO BAIGIAMASIS DARBAS

Anestezija ir tvarumas: inhaliaciniai anestetikai

Anesthesia and Sustainability: Inhalation Anesthetics

Darbo vadovas

Dr. Diana Gasiūnaitė

Klinikos vadovas

Prof. (HP) dr. Jūratė Šipylaitė

Vilnius. 2025

Studento elektroninio pašto adresas: titas.cincikas@mf.stud.vu.lt

TURINYS

TURINYS.....	2
Santrumpos.....	3
SANTRAUKA.....	4
SUMMARY.....	5
1. ĮVADAS.....	7
2. DARBO METODIKA.....	7
3. KLIMATO KAITOS POVEIKIS ŽMOGAUS SVEIKATAI.....	8
4. TVARUMO PROBLEMA ANESTEZILOGIJOJE.....	9
5. DAŽNIAUSIAI NAUDOJAMI INHALIACINIAI ANESTETIKAI IR JŲ SAVYBĖS.....	10
5.1. Farmakologinės inhaliacinių anestetikų savybės.....	11
5.2. Inhaliaciniai anestetikai kaip šiltnamio dujos.....	13
5.3. Inhaliaciniai anestetikai kaip ozono sluoksnį ardančios dujos.....	16
5.4. Inhaliacinių anestetikų poveikį aplinkai lemiančios savybės.....	17
6. INHALIACINIAI ANESTETIKAI KAIP RIZIKOS VEIKSNYS OPERACINĖJE.....	17
7. TVARUS INHALIACINIŲ ANESTETIKŲ NAUDOJIMAS.....	19
7.1. Desflurano ir N ₂ O pašalinimas iš klinikinės praktikos.....	20
7.2. Dujų srauto pritaikymas skiriant inhaliacinius anestetikus.....	21
7.3. Totalioji intraveninė anestezija.....	23
7.4. Inhaliacinių anestetikų surinkimo ir reflektavimo sistemos.....	24
7.5. Ksenonas, kaip alternatyvus inhaliacinis anestetikas.....	27
8. TVARUMO DIEGIMAS KLINIKINĖJE PRAKTIKOJE.....	28
8.1. Personalo supažindinimas su tvarumu anesteziologijoje.....	28
8.3. Personalo įtraukimas į tvarumo procesų diegimą.....	29
8.4. Vadovų įsitraukimo svarba ir bendradarbiavimas tarp ligoninės struktūrų.....	29
8.5. Emisijų skaičiavimas.....	30
9. TVARIOS ANESTEZIJOS SVARBA.....	30
10. APIBENDRINIMAS.....	31
11. IŠVADOS.....	31
12. REKOMENDACIJOS.....	32
13. LITERATŪROS ŠALTINIAI.....	33
14. PRIEDAI.....	42
14.1. Lentelė, apibūdinanti kokybės gerinimo intervencijas gydymo įstaigose.....	42

Santrumpos

DNR - deoksiribonukleorūgštis

ESAIC - Europos anesteziologų ir reanimatologų asociacija (*angl. European society of anesthesia and intensive care*)

GABA_A - gama aminosviesto rūgšties A tipo receptoriai

GWP - visuotinio atšilimo potencialas (*angl. global warming potential*)

IPCC - Tarpvvyriausybė klimato kaitos komisija (*angl. Intergovernmental Panel on Climate Change*)

LCA - gyvavimo ciklo įvertinimas (*angl. life cycle assessment*)

LOPL - Lėtinė obstrukcinė plaučių liga

MAK - minimali alveolinė koncentracija

NMDA - N-metil-D-aspartato receptoriai

SANTRAUKA

Darbo pagrindimas

Inhaliaciniai anestetikai išlieka svarbiais anesteziologų naudojamais medikamentais bendrajai nejautrai sukelti. Vis dėlto didėja susirūpinimas jų poveikiu aplinkai, nes šios medžiagos pasižymi stipriomis šiltnamio efektą skatinančiomis savybėmis. Taikydami tikslingas priemones anesteziologai gali reikšmingai sumažinti inhaliacinių anestetikų sukeltą taršą ir taip prisidėti prie klimato kaitos problemos sprendimo.

Tyrimo tikslas ir uždaviniai

Darbo tikslas – įvertinti inhaliacinių anestetikų poveikį aplinkai ir išnagrinėti galimus būdus jį sumažinti. Uždaviniai: įvertinti tvarumo svarbą anesteziologijoje, apžvelgti inhaliacinių anestetikų savybes, lemiančias jų poveikį aplinkai, aptarti šių medikamentų sukeltą žalą su jais dirbantiems medikams, pristatyti tvarius bendrosios anestezijos metodus, aptarti jų įgyvendinimą klinikinėje praktikoje.

Tyrimo metodai

Atlikta literatūros apžvalga. Straipsniai buvo atrinkti iš „PubMed“ ir „Google Scholar“ duomenų bazių, vadovaujantis raktiniais žodžiais bei temų aktualumu. Taip pat remtasi anesteziologų draugijų išleistomis gairėmis bei dokumentais.

Rezultatai

Literatūros apžvalga parodė, kad desfluranas ir N_2O yra labiausiai aplinkai kenksmingi anestetikai. Tam įtakos turi jų farmakologinės savybės, ilgaamžiškumas atmosferoje ir spinduliavimo efektyvumas. Be to, nustatytas neigiamas poveikis operacinėje dirbančių medikų sveikatai. Šių medžiagų atsisakymas, mažo srauto anestezija, totaliosios intraveninės anestezijos taikymas ir dujų surinkimo sistemos gali sumažinti poveikį aplinkai. Tvarių praktikų diegimas priklauso nuo darbuotojų edukacijos, įsitraukimo bei palaikymo iš vadovų ir ligoninės administracijos.

Išvados

Nors inhaliaciniai anestetikai sudaro tik 2% viso sveikatos sistemos CO₂ pėdsako, jų poveikis klimato kaitai yra reikšmingas. Anesteziologų indėlis yra svarbus kuriant tvarią klinikinę praktiką. Sąmoningas anestetiko pasirinkimas, mažo dujų srauto bei pažangių technologijų taikymas yra pagrindinės priemonės mažinant inhaliacinių anestetikų žalą aplinkai.

Raktažodžiai: inhaliaciniai anestetikai, tvarumas, šiltnamio dujos, anestezija

SUMMARY

Justification of the Work

Inhalational anesthetics remain important pharmacologic agents used by anesthesiologists to induce general anesthesia. However, there is growing concern about their environmental impact, as these substances have strong greenhouse gas properties. By implementing targeted measures, anesthesiologists can significantly reduce the pollution caused by inhalational anesthetics and thus contribute to addressing the problem of climate change.

Aim and Objectives

The aim of this study is to evaluate the environmental impact of inhalational anesthetics and to explore possible ways to reduce it. Objectives: to assess the importance of sustainability in anesthesiology; to review the properties of inhalational anesthetics that determine their environmental impact; to discuss the harm these substances cause to healthcare professionals working with them; to present sustainable general anesthesia methods; and to examine their implementation in clinical practice.

Research Methods

A literature review was conducted. Articles were selected from the "PubMed" and "Google Scholar" databases, based on keywords and the relevance of the topics. Guidelines and documents issued by anesthesiology societies were also consulted.

Results

The literature review revealed that desflurane and nitrous oxide (N₂O) are the most environmentally harmful anesthetics. This is due to their pharmacological properties, atmospheric longevity, and radiative efficiency. In addition, a negative impact on the health of operating room personnel was identified. Eliminating these substances, using low-flow anesthesia, applying total intravenous anesthesia, and implementing gas scavenging systems can reduce environmental impact. The adoption of sustainable practices depends on staff education, engagement, and support from leadership and hospital administration.

Conclusions

Although inhalational anesthetics account for only 2% of the total carbon footprint of the healthcare system, their impact on climate change is significant. The contribution of anesthesiologists is important in creating sustainable clinical practice. Conscious selection of anesthetic agents, low fresh gas flow, and the application of advanced technologies are key measures in reducing the environmental harm caused by inhalational anesthetics.

Keywords: inhalational anesthetics, sustainability, greenhouse gases, anesthesia

1. ĮVADAS

Tvarumas – tai kompleksinė sąvoka, apimanti įvairias žmogaus veiklos sritis ir grindžiama ekologinių, ekonominių bei socialinių veiksnių pusiausvyra (1). Tvariai veikiant atsižvelgiama ne tik į dabartinius poreikius, bet ir siekiama užtikrinti ilgalaikį išteklių, aplinkos bei visuomenės gerovės išlaikymą ateities kartoms. Nors anksčiau didesnis dėmesys šiam reiškiniui skirtas ekonomikoje ir aplinkosaugoje, šiais laikais tai tampa vis aktualesniu reiškiniu ir kitose srityse, taip pat ir medicinoje (2). Tvarumas šioje srityje gali reikšti sveikatos priežiūros paslaugų teikimą taip, kad būtų mažinamas poveikis aplinkai ir kuo mažiau eikvojami gamtiniai ištekliai, bet tuo pačiu užtikrinta kokybiška pacientų priežiūra (3).

Manoma, kad pasaulyje sveikatos apsauga atsakinga už maždaug 4,4-5,2% visų šiltnamio dujų emisijų (4–6). Yra paskaičiuota, jog operacinė medicina gali sugeneruoti nuo 20% iki 33% visų ligoninės išskiriamų CO₂ emisijų (7), didelę dalį kurių sukelia būtent inhaliaciniai anestetikai (8). Bendras inhaliacinių anestetikų sukeltas poveikis vertinant visame žmogaus veiklos kontekste nėra didelis - Jungtinės Karalystės duomenimis bendra šių medikamentų sukeliamas tarša sudaro 2% visos sveikatos sektoriaus taršos (9). Nors suminis inhaliacinių anestetikų poveikis aplinkai mažas, anesteziologai gali reikšmingai prisidėti prie šių medžiagų sukeltamo žalingo poveikio aplinkai mažinimo.

Inhaliacinių anestetikų žala aplinkai kyla iš jų, kaip šiltnamio dujų poveikio atmosferoje ir taip pat jų ardančio ozono sluoksnį poveikio. Šio darbo tikslas - išanalizuoti inhaliacinių anestetikų poveikį aplinkai ir apžvelgti būdus, kuriais galima mažinti jų sukeliamą taršą.

Pagrindiniai šio darbo uždaviniai:

1. Įvertinti tvarumo svarbą anesteziologijoje.
2. Išanalizuoti inhaliacinių anestetikų poveikį aplinkai, atsižvelgiant į jų fizikochemines ir farmakologines savybes.
3. Įvertinti inhaliacinių anestetikų poveikį su jais dirbantiems medikams.
4. Apžvelgti rekomendacijas, kurios padėtų sumažinti neigiamą inhaliacinių anestetikų poveikį aplinkai, ir šių rekomendacijų įgyvendinimo būdus.

2. DARBO METODIKA

Buvo ieškoma mokslinės literatūros, kurioje nagrinėjamas klimato kaitos poveikis žmonių sveikatai, inhaliacinių anestetikų farmakokinetika ir jų poveikis aplinkai, tvarumo principų taikymas anesteziologijoje. Ieškota ir kritiškų straipsnių, keliančių diskusijas dėl šios temos aktualumo.

Taip pat ieškota moksliniai darbų ir gairių, kuriose pateikiamos rekomendacijos, kaip sumažinti inhaliacinių anestetikų sukeltą taršą, lyginami skirtingi bendrosios anestezijos metodai.

Straipsnių paieškai naudotos „Google scholar“ ir „Pubmed“ duomenų bazės. Paieškos laukelyje naudoti žodžiai ir žodžių junginiai po vieną ir juos kombinuojant: „*Climate change*“, „*Anesthetic gases*“, „*Inhalational anesthetics*“, „*Volatile anesthetics*“, „*Sustainability*“, „*Education*“, „*Fresh gas flow*“, „*Waste gas scavenging system*“, „*Total intravenous anesthesia*“. Peržiūrėtos gairės ir rekomendacijos publikuotos tokių institucijų kaip Europos anesteziologijos ir intensyviosios terapijos draugija (ESAIC), Amerikos anesteziologų draugija (ASA), Karališkasis anesteziologų koledžas (RCoA) ir kitos. Papildomai naudoti ir kiti patikimi informacijos šaltiniai, kaip Nacionalinės vandenynų ir atmosferos administracijos (NOAA) publikuota informacija apie šiltnamio dujas. Aktualių temai straipsnių taip pat ieškota pirminėje paieškoje rastų straipsnių bei gairių šaltiniuose. Atrinkta mokslinė literatūra, išleista per paskutinius dešimt metų anglų kalba. Senesnėms publikacijoms išimtyms darytos šiais atvejais:

1. Atrinkti straipsniai, kurie padėtų analizuoti inhaliacinių anestetikų tvarumo raidą istorinėje perspektyvoje.
2. Aktualios darbo temai publikacijos, daug kartų cituojamos kitų autorių, taip parodant jų reikšmingumą šioje srityje.
3. Publikacijos, pristatančios aktualią ir unikalią, naujesniuose tyrimuose nepublikuotą informaciją.

3. KLIMATO KAITOS POVEIKIS ŽMOGAUS SVEIKATAI

Klimato kaita sukelia daugybę iššūkių ir problemų, tiesiogiai ir netiesiogiai veikiančių žmogaus sveikatą. Didėjanti šiltnamio dujų koncentracija atmosferoje didina vidutinę temperatūrą planetoje, o tai lemia ekstremalius oro reiškinius, tokius kaip karščio bangos, sausras, potvyniai, uraganai ir kiti (10–12). Vis geriau suvokiant klimato kaitos pasekmes, dėmesys šiai problemai žmogaus sveikatos kontekste auga. Tyrimai rodo, kad 1991–2018 metais apie 37% su perkaitimu susijusių mirčių globaliai gali būti siejamos su žmogaus sukelta klimato kaita (13). Ateityje šios problemos

aktualumas didės – prognozuojama, kad, nesiimant veiksmingų priemonių, mirštamumas dėl kylančios temperatūros Europoje iki 2099 metų gali padidėti apie 50% ir lemti daugiau nei 2 milijonus mirčių (14).

Klimato kaita ypatingai neigiamai veikia pažeidžiamiausias visuomenės grupes, tokias kaip maži vaikai, vyresnio amžiaus žmonės bei lėtinėmis ligomis sergantys pacientai (15–18). Šios asmenų grupės dėl fiziologinių, morfologinių ir elgesio ypatumų sunkiau prisitaiko prie kintančių aplinkos sąlygų, todėl jų organizmas jautriau reaguoja į ekstremalią šilumą. Karščio poveikis lemia vidinės temperatūros kilimą, kuris sukelia didesnį stresą organizmui dėl intensyvėjančio metabolizmo ir padidėjusio deguonies poreikio (19). Kaip atsaką šiluminiam stresui autonominė nervų sistema skatina periferinę vazodilataciją ir prakaitavimą, taip siekiant atiduoti šilumą į aplinką ir sumažinti vidinę temperatūrą (20,21). Tačiau padidėjęs širdies darbas, būtinas palaikyti kraujotaką esant periferinei vazodilatacijai, gali sukelti širdies funkcijos nepakankamumą (22). Galbūt dėl to kardiovaskulinėmis ligomis sergantys žmonės karščio bangų metu miršta dažniausiai (15). Karštis taip pat gali sukelti lėtinių kvėpavimo takų ligų paūmėjimą. Tyrimo atlikto Jungtinėje Karalystėje duomenimis nustatyta, kad kiekvienas 1°C temperatūros padidėjimas virš 23,2°C padidina pacientų, sergančių LOPL hospitalizacijos riziką 1,47% (23).

Netiesioginis klimato kaitos poveikis sveikatai gali apimti įvairias sritis kaip infekcinių ligų plitimą arba dažnesnes ir sunkesnes alergines reakcijas. Šylant klimatui, plečiasi ligas pernešančių vektorių, tokių kaip uodai ir erkės, arealas, didėja jų pernešamų ligų paplitimas (24,25). Be to, klimato pokyčiai prisideda prie ilgesnių žiedadulkių sezonų ir didesnės jų koncentracijos, o tai lemia padažnėjusias ir intensyvesnes alergines reakcijas (26).

Čia pateikti su klimato kaita susijusių sveikatos problemų pavyzdžiai neapima visų šios globalios problemos aspektų ir skirti tik suteikti kontekstą tvarumo medicinoje svarbai. Kadangi inhaliaciniai anestetikai prisideda prie šiltnamio efekto, tvarus jų panaudojimas yra vienas iš būdų padedančių sumažinti pasekmes žmogaus sveikatai. Atsižvelgiant į būsimus sveikatos iššūkius, būtina suprasti šių medžiagų poveikį klimato sistemai ir ieškoti tvaresnių anestezijos būdų.

4. TVARUMO PROBLEMA ANESTEZIOLOGIJOJE

Į tvarios klinikinės praktikos problemą dėmesys atkreiptas ir anesteziologijoje. 2023 metais išleista Europos anesteziologų ir reanimatologų draugijos „Glazgo tvarumo anesteziologijoje ir intensyviojoje terapijoje deklaracija“ įvardija prioritetines sritis, kuriose siekiama sumažinti

klinikinės anesteziologijos ir reanimatologijos poveikį aplinkai (27). Tai dokumentas, kurio pagrindą sudaro Helsinkio paciento saugumo deklaracija (28) ir kuris apibrėžia, kokie veiksmai Europos anesteziologų požiūriu yra adekvatūs ir pasiekiami, siekiant tvarumo šiuolaikinėje anesteziologijoje. Deklaracijoje didelis dėmesys skiriamas pokyčiams, apimantiems inhaliacinių anestetikų naudojimą klinikinėje praktikoje: skatinama siekti visiškai minimalaus šių medžiagų vartojimo, o kai kurias jų pašalinti iš klinikinės praktikos. Taip pat rekomenduojama siekti naudojamų medžiagų perdirbimo ir pakartotinio naudojimo.

Geriau suprasti inhaliacinių anestetikų poveikį aplinkai padeda gyvavimo ciklo vertinimo (*angl. Life Cycle Assessment, LCA*) metodas, leidžiantis visapusiškai įvertinti šių medikamentų poveikį aplinkai – nuo jų gamybos iki utilizavimo. LCA leidžia nustatyti, kurios gyvavimo ciklo grandys yra reikšmingiausios ekologiniu požiūriu. Tyrimai rodo, kad didžiausią poveikį aplinkai sukelia tiesioginės anestetikų dujų emisijos, siejamos su jų klinikiniu naudojimu (29). Šis etapas atsakingas už 88–95 % viso jų sukeliama anglies pėdsako (30), todėl emisijų mažinimas yra svarbiausia kryptis siekiant tvaresnės anestezijos praktikos.

Rekomendacijos tvarumo atžvilgiu išplėstos 2024 ESAIC tvarumo sutarimo dokumente (31). Jame tvarumas anesteziologijoje vertinamas keturiais aspektais:

1. Tiesioginių emisijų
2. Energijos optimizacijos
3. Atliekų tiekimo ir tvarkymo grandinės
4. Anesteziologija užsiimančiųjų psichologinės gerovės

Nors trys iš keturių aspektų vertina anesteziologijos praktiką pagal jos sukeliama CO₂ pėdsaką, tvarumo kontekste dėmesys skiriamas ir anesteziologams, vertinama jų psichoemocinė gerovė. Dėmesys personalui, dirbančiam su inhaliaciniais anestetikais svarbus - kaip bus aptarta vėliau, šios medžiagos gali turėti neigiamą poveikį gydytojams, kurie jas skiria pacientams.

Susirūpinimas anesteziologijos poveikiu aplinkai stebimas globaliai. 2021 m. Pasaulio anesteziologų draugijų federacija išleido deklaraciją apie aplinkosauginiu požiūriu tvarios anestezijos principus (32). Panašias rekomendacijas yra išleidusi ASA (33) ir RCoA kartu su Australijos ir Naujosios Zelandijos anesteziologų koledžu (34).

5. DAŽNIAUSIAI NAUDOJAMI INHALIACINIAI ANESTETIKAI IR JŲ SAVYBĖS

2023 m. „European Journal Anaesthesiology and Intensive Care” publikuotame tyrime Gonzalez-Pizarro ir kolegos pristatė tarptautinės anesteziologų apklausos duomenis: tarp respondentų, dažniausiai pacientams pritaikomas anestezijos planas remiasi bendra nejautra, kuri pasiekama naudojant inhaliacinius anestetikus (35). Renkantis inhaliacinį anestetiką, šioje apklausoje pirmenybę anesteziologai linkę teikti sevofluranui (83%), desfluranui (10%) bei izofluranui (6%). Nors tyrimas tarptautinis, ir jame atsispindi daugelio šalių bei gydymo įstaigų praktikos ypatybės, panašūs rezultatai gauti ir kituose mažesnės geografinės apimties tyrimuose apžvelgiančiuose anesteziologijos praktiką Vokietijoje, Australijoje ir Naujojoje Zelandijoje (36,37).

5.1. Farmakologinės inhaliacinių anestetikų savybės

Šiuo metu plačiai naudojami inhaliaciniai anestetikai pasižymi naudingomis farmakologinėmis savybėmis. Tai greitai per kvėpavimo takus į kraujotaką patenkančios, centrinę nervų sistemą paveikiančios ir iš organizmo pašalinamos dujos. Nors tai dažniausiai anestezijos palaikymui operacijos metu naudojami medikamentai, jie taip pat gali būti naudojami bendrosios nejautos indukcijai, ilgalaikiai pacientų sedacijai (pavyzdžiui reanimacijos skyriuose) ar kaip nuskausminamoji priemonė procedūrų metu (N_2O odontologijoje, akušerijoje).

Inhaliacinio anestetiko sukelta bendroji nejautra pasireiškia tada, kai terapinė jo koncentracija pasiekama centrinėje nervų sistemoje (38). Pirmiausia ji turi būti pasiekta paciento alveolėse esančiame dujų mišinyje ir kraujo plazmoje. Šių procesų greitis priklauso nuo kraujo/dujų pasiskirstymo koeficiento, kuris yra atvirkščiai proporcingas nejautos indukcijos greičiui (38). Kadangi tiesiogiai terapinės koncentracijos centrinėje nervų sistemoje pamatuoti negalima, inhaliaciniai anestetikai pacientui dozuojami pagal alveolėse pasiekiamą anestetiko koncentraciją. Šiai koncentracijai matuoti pasitelkiamas minimalios alveolinės koncentracijos (MAK) rodiklis. Kuo mažiau tirpus kraujyje yra inhaliacinis anestetikas, tuo greičiau jis gali patekti į centrinę nervų sistemą ir pasiekti joje savo terapinę koncentraciją. Mažas afinitetas kraujui yra naudinga vaisto savybė, kadangi tokius inhaliacinius anestetikus naudojant geriau kontroliuojama anestezijos indukcija ir pabudimas po operacijos (39).

Kitas svarbus farmakokinetinis šių medžiagų aspektas yra jų tirpumas riebaluose, apibūdinamas riebalų/kraujo pasiskirstymo koeficientu. Šis indeksas koreliuoja su inhaliacinio anestetiko stiprumu (*potency*) (40) ir dažniausiai yra atvirkščiai proporcingas jo veikimo greičiui. Inhaliaciniai anestetikai riebaliniame organizmo kompartimente būna labai tirpūs, bet taip pat lėčiau į jį patenka ir jį lėčiau palieka dėl mažesnės šio audinio vaskuliarizacijos (38). Klinikinėje praktikoje

riebalų/kraujo pasiskirstymo koeficientas daugiausia nulemia pabudimo po bendrosios nejautos greitį. Kuo ilgiau naudojami inhaliaciniai anestetikai, tuo daugiau laiko jie turi pasiskirstyti paciento riebaliniame audinyje - dėl to mažesnio riebalų/kraujo pasiskirstymo koeficiento medikamentai yra naudingesni pacientams turintiems daug riebalinio audinio ir ilgų chirurginių intervencijų metu (38,39).

Pasiekę centrinę nervų sistemą pakankamomis koncentracijomis inhaliaciniai anestetikai sukelia savo poveikį, tačiau tikslus jų veikimo mechanizmas nėra iki galo išaiškintas (41). Prie numanomų centriniame nervų sistemoje inhaliacinių anestetikų veikiamų taikinių priskiriami inhibiciniai GABA_A ir glicino receptoriai, ir sužadina NMDA, nikotininiai acetilcholino, kalio kanalų ir įtampas kontroliuojami natrio ir kalcio kanalų receptoriai (42). Ypač svarbi šių vaistų savybė - inhaliaciniai anestetikai organizme beveik neskaidomi. Žmogaus organizme metabolizuojama tik 5% sevoflurano (veikiant citochromo P450 2E1 fermentui (43)), 0.2% izoflurano ir 0.02% desflurano (29). Dėl to didžioji dalis panaudotų medikamentų išskiriami į aplinką ir kaupiasi kaip šiltnamio dujos.

Pasirenkant aptartus medikamentus, taip pat turi būti atsižvelgta į jų sukeliamas nepageidaujamas reakcijas. Dėl savo potencialo veikti daugelį taikinių nervų sistemoje ir organizme, inhaliaciniai anestetikai kartu su pageidaujamu anestezijos poveikiu gali sukelti daug šalutinių sisteminių reiškinių (42). Dažniausiai halogeninti anestetikai pasižymi kraujotakos ir kvėpavimo sistemas veikiančiomis savybėmis - jie linkę sukelti hipotenziją, sumažėjusį miokardo kontraktiliškumą ir kvėpavimo depresiją (41,44). Azoto suboksidas skirtingai negu kiti čia minimi inhaliaciniai anestetikai sukelia "difuzinę hipoksiją", reiškinį, kuomet N₂O staigiai paliekant kapiliarus paciento alveolėse sumažėja deguonies koncentracija (45). Halogeninti inhaliaciniai anestetikai gali sukelti gyvybei pavojingą būklę, vadinamą piktybine hipertermija (41). Tai reta, genetinių paciento savybių nulemta būklė, kurią išprovokuoja inhaliaciniai anestetikai ir depoliarizuojantys raumėnų relaksantai. Kita komplikacija, bendra daugeliui inhaliacinių anestetikų, yra pooperacinis pykinimas ir vėmimas (46).

Supratimas apie inhaliacinių anestetikų farmakologines savybes, ypač apie jų farmakokinetikos principus ir jų sukeliamas nepageidaujamas reakcijas yra svarbus veiksnys, leidžiantis įvertinti jų naudos ir rizikos santykį kokybiškos pacientų priežiūros bei tvarumo kontekste. Intervencijos metu naudojamas anestetikas gali būti pasirenkamas atsižvelgus į tokias jo savybes kaip eliminacijos greitis ar galimos nepageidaujamos reakcijos, o jos priklauso nuo konkretaus inhaliacinio anestetiko ir jo farmakologinio profilio. Pavyzdžiui, desflurano pasirinkimas taikant bendrąją anesteziją nutukusiems pacientams lemia reikšmingai greitesnį jų pabudimą po operacijos lyginant su sevofluranu (47).

1 lentelė: Santykiniai dydžiai apibūdinantys inhaliacinių anestetikų pasiskirstymą skirtinguose audinių kompartmentuose ir fazėse. MAK - minimali alveolinė koncentracija. Paveikslas adaptuotas pagal Clar et al. (2025) (41) ir Khan et al. (2014) (38).

Anestetikas	MAK (%)	Kraujo/dujų pasiskirstymo koeficientas	Smegenų/kraujo pasiskirstymo koeficientas	Lipidų/dujų pasiskirstymo koeficientas
N ₂ O	>100	0,47	1,1	104
Izofluranas	1,4	1,4	2,6	91
Desfluranas	6–7	0,42	1,3	26
Sevofluranas	2,0	0,69	1,7	47

5.2. Inhaliaciniai anestetikai kaip šiltnamio dujos

Žemės atmosfera yra dujų sluoksnis, supantis mūsų planetą ir sudarantis sąlygas gyvybei egzistuoti. Nors šiltnamio dujos, prie kurių priskiriami ir daugelis klinikinėje praktikoje naudojamų inhaliacinių anestetikų, sudaro ypač mažą dalį atmosferos, jų kiekis taip pat yra svarbus tinkamoms gyvybei klimato sąlygoms sudaryti (48).

Šiltnamio dujos - tai dujos, galinčios sugerti nuo žemės paviršiaus atspindėtą spinduliuotę, priklausančią infraraudonųjų spindulių spektrui (šiluminę energiją), ir galinčios ją išspinduliuoti atgal į atmosferą (49). Šiai grupei cheminių junginių tarpusavyje palyginti vartojamas terminas „visuotinio atšilimo potencialas” (*angl. - GWP, global warming potential*). Tai santykinis dydis, kuris išreiškia, kiek konkrečios dujos prisideda prie klimato atšilimo lyginant su tokia pačia mase CO₂ per apibrėžtą laiko intervalą (50). Kuo didesnis dujų GWP indeksas, tuo daugiau, lyginant su tokia pačia mase CO₂, yra sulaikoma šiluminės energijos atmosferoje. Minėtas indeksas varijuoja priklausomai nuo dviejų kintamųjų - molekulės sugebėjimo absorbuoti šiluminę energiją (spinduliavimo efektyvumo) ir jos gyvavimo atmosferoje laiko (ilgaamžiškumo).

Molekulės spinduliavimo efektyvumas ir jos kaip šiltnamio dujų stiprumas tiesiogiai priklauso nuo jos sugeriamo infraraudonojo spektro dalies (51). Kuo mažiau panašaus spektro spinduliuotės sugeria kitos atmosferos dujos (pavyzdžiui CO₂ ar H₂O), tuo labiau prie šiltnamio efekto prisideda molekulė, absorbuojanti spinduliuotę iš šios spektro dalies (52). Inhaliaciniai anestetikai išskyrus N₂O kaip tik ir pasižymi tuo, jog sugeria mažai kitų junginių absorbuojamą infraraudonojo spektro dalį (48). N₂O, kaip klimato dujų reikšmingumą, galima sieti su šių dujų ilgaamžiškumu.

Skaiciuojant GWP, šiltnamio dujų suminis poveikis klimato atšilimui vertinamas ilgalaikėje arba trumpalaikėje perspektyvoje (pavyzdžiui 20, 100 ar 500 metų). Kadangi dauguma inhaliacinių anestetikų atmosferoje suyra greičiau negu pagrindinės šiltnamio dujos CO₂ (išskyrus N₂O, kurio ilgaamžiškumas atmosferoje gali siekti apie 109 metus), didžiausias GWP indeksas šioms dujoms stebimas matuojant jų poveikį atmosferoje per 20 metų. Kuo ilgesnį laiko intervalą matuoti suminiam šių dujų poveikiui pasirinkime, tuo mažesniu GWP inhaliaciniai anestetikai dažniausiai pasižymi.

$$GWP_{dujų} = \frac{\int_0^T a_{dujų} \times C_{dujų}(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} \times C_{CO_2}(t) dt}$$

GWP-visuotinio atšilimo potencialas; a-dujų spinduliavimo efektyvumas; C-nuo dujų ilgaamžiškumo priklausanti jų skilimo atmosferoje funkcija. T-laiko intervalas, kuriam skaičiuojamas suminis dujų poveikis. Formulė adaptuota pagal 2001 m. IPCC gaires (53).

Inhaliacinių anestetikų savybės, susijusios su jų poveikiu aplinkai, aprašomos jau 20 a. antroje pusėje. 1989 m. Brown ir kolegės ištyrė halogenintų anestetikų gyvavimo troposferoje laiką atsižvelgdamas į jų reakcijos su OH radikalais greitį (54). OH radikalas yra pagrindinis daugelio organinių junginių destrukciją atmosferoje sukeliantis reagentas, susiformuojantis, kai fotolizės paveiktų O₃ bei NO₂ skilimo produktai reaguoja su atmosferoje esančiu H₂O (51). Atsižvelgus į eksperimentinį modelį (Brown ir kt.) buvo nustatyta, kad atmosferoje halotanas, enfluranas ir izofluranas išlieka atitinkamai 2, 6 ir 5 metus (54). Nors šiuo metu nei halotanas, nei enfluranas plačiai nebenaudojami, tai viena pirmųjų publikacijų, kuriose inhaliaciniai anestetikai diferencijuojami pagal jų ilgaamžiškumą atmosferoje ir svarstomas jų poveikis aplinkai. 1999 m. Langbein ir kolegės ištyrė didesnio kiekio inhaliacinių anestetikų ilgaamžiškumą atsižvelgdami ir į kitus jo trukmę galėjusius lemti veiksnius (55). Į tyrimą buvo įtraukti desfluranas ir sevofluranas. Inhaliacinių anestetikų ilgaamžiškumas atmosferoje vertintas atsižvelgiant į jų reakcijos su OH radikalais greitį ir į ultravioletinių spindulių (UV) sukeliamą fotolizę. Detalesnis ilgaamžiškumo atmosferoje tyrimas atliktas, kadangi manyta, jog inhaliaciniai anestetikai gali suirti savaime juos veikiant UV spinduliais. Atsižvelgiant į minėtus reiškinius buvo nustatyta, kad tirti inhaliaciniai anestetikai atmosferoje išsilaiko nuo 4,0 iki 21,4 metų. Šiuo metu manoma, kad pagrindinė halogenintų inhaliacinių anestetikų skilimo atmosferoje priežastis yra jų paveikimas OH radikalais ir tik vienintelis N₂O reikšmingais kiekiais skyla dėl

fotolizės stratosferoje (51). Halogeninti anestetikai nėra skaidomi tokiu būdu, dėl to, kad jie nesugeria aktyviosios spinduliuotės (56).

Nuo pat GWP skaičiavimo pradžios pasirodo vis nauji išmatavimai tiems patiems atmosferos junginiams - tarp jų ir inhaliaciniams anestetikams. Toks šio indekso kintamumas priklauso nuo keleto veiksnių (51):

- 1) Tobulėja metodai kuriais apskaičiuojamas tiek junginių ilgaamžiškumas atmosferoje, tiek jų spinduliavimo efektyvumas.
- 2) Keičiantis šių medžiagų koncentracijai atmosferoje, kinta ir jų poveikis klimatui.
- 3) Referentinio junginio – anglies dioksido (CO₂) – savybės nėra pastovios ir laikui bėgant kinta, taip pat paveikdamos kitų medžiagų GWP vertinimą.

Jau minėtas GWP indeksas nėra vienintelis būdas skaičiuoti inhaliacinių anestetikų poveikį klimatui, nors mokslinėje literatūroje šiuo tikslu tikriausiai naudojamas dažniausiai. Pavyzdžiui Ryan and Nielsen pateikia ne tik GWP₂₀, bet ir labiau su klinicine praktika susijusį anglies dioksido ekvivalentą (*angl. - carbon dioxide equivalent, CDE*) taip pat apskaičiuojamą 20 arba 100 metų (57). Tai dydis, kuris parodo, kokį kiekį CO₂ atitinka konkretus inhaliacinis anestetikas, naudojimas vieną valandą išlaikant MAK apibrėžtomis standartinėmis sąlygomis.

$$CDE_{20} = GWP_{20} \times IA \text{ kiekis}^*$$

**apskaičiuojamas atsižvelgiant į dujų kiekį, reikalingą palaikyti konkretaus inhaliacinio anestetiko minimalią alveolinę koncentraciją 1 val. Ryan and Nielsen (57) daro prielaidą, kad bendroji anestezija atliekama 20-40 metų pacientui, palaikant pastovią anestetiko koncentraciją, 20 °C temperatūroje, panašioms pacientams, palaikant 0.5-2.0 l/min. dujų srautą.*

CDE 20-čiai metų apskaičiuotas trims anestetikams - sevofluranui, izofluranui ir desfluranui. Desfluranas išskiriamas kaip labiausiai taršus plačiai klinikinėje praktikoje dar vartojamas anestetikas - viena valanda jo naudojimo klinikinėje praktikoje išskiria anestetiko kiekį, kuris atitinka 187,186 kilogramus CO₂. Izofluranas savo taršumu daugiau nei dešimt kartų mažiau taršus (15,551 kg), o sevofluranas mažiausiai taršus halogenintas anestetikas iš anksčiau minėtų (6,980 kg).

Kaip jau užsiminta, anksčiau galvota, kad yra keletas svarbių inhaliacinių anestetikų destrukciją atmosferoje lemiančių veiksnių - reakcija su OH radikalais, fotolizė bei atmosferiniai reiškiniai, padedantys išvalyti atmosferą, pavyzdžiui, išplovimas iš atmosferos su lietumi. Vėlesni tyrimai parodė, kad pagrindinis mechanizmas vis dėl to yra reakcija su OH radikalais (halogeniniams anestetikams), fotolizės vaidmuo inhaliacinių anestetikų skilime atmosferoje minimalus (išskyrus N₂O), o skystoji arba sausoji depozicija iš atmosferos veikia daugiausiai kai kuriems inhaliacinių anestetikų skilimo produktams, o ne jiems patiems (51,56).

2 lentelė: Pateikti dažniausiai klinikinėje praktikoje naudojamų inhaliacinių anestetikų gyvavimo atmosferoje laikai, radiacinis efektyvumas, GWP₂₀ ir GWP₁₀₀ ($W m^{-2} ppb^{-1}$) – spinduliavimo efektyvumas, rodantis, kiek papildomos šilumos (vatais vienam kvadratiniam metrui) sulaikoma atmosferoje, kai dujų koncentracija padidėja viena dalimi milijarde (ppb – parts per billion). Lentelė adaptuota pagal 2021 m. IPCC AR6 gaires (58).

Inhaliacinis Anestetikas	Gyvavimo atmosferoje laikas (metais)	Spinduliavimo efektyvumas ($W m^{-2} ppb^{-1}$)	GWP ₂₀	GWP ₁₀₀
N ₂ O	109	0.0032	273	273
Sevofluranas	1.9	0.308	702	195
Izofluranas	3.5	0.426	1930	539
Desfluranas	14.1	0.464	7020	2590

5.3. Inhaliaciniai anestetikai kaip ozono sluoksnį ardančios dujos

Inhaliacinių anestetikų poveikis aplinkai nesibaigia jų, kaip šiltnamio dujų suminiu poveikiu atmosferoje. Kadangi didesnė dalis klinikinėje praktikoje naudojamų anestetikų yra halogeninti, dalis jų gali veikti kaip ozono sluoksnį ardančios dujos. Tokiu poveikiu pasižymi cheminiai elementai, į kurių sudėtį įeina Cl ir Br atomai (59) - tarp dažniausiai vartojamų anestetikų, tokie yra izofluranas ir halotanas. Turi praeiti laiko, kol molekulė pakyla iki stratosferos ir ten sukelia žalingą

poveikį (90% ozono atmosferoje išsidėstę 15-50 km nuo žemės paviršiaus (59)). Dėl sąlyginai trumpo daugelio inhaliacinių anestetikų gyvavimo atmosferoje laiko, tik maža dalis halogenintų anestetikų pasiekia stratosferą ir ten pasižymi ardančiu ozono sluoksnį poveikiu (60). Nors anksčiau jau aptartas azoto suboksidas (N_2O) nėra halogenintas anestetikas, jis irgi priskiriamas prie ozoną ardančių medžiagų. Kaip ir kiti inhaliaciniai anestetikai, jis nepakitęs pašalinamas iš paciento organizmo. Tačiau skirtingai nei jie, N_2O atmosferoje yra mažai reaktyvus ir pasižymi ilgu gyvavimo atmosferoje laiku (109 metai). Jau anksčiau aptarta ozono ypatybė reikšmingais kiekiais skilti atmosferoje dėl fotolizės atsakinga ir už chemines reakcijas, kurioms vykstant skaidomos ozono molekulės (61). Būtent N_2O laikomas labiausiai 21 amžiuje ozono sluoksnį ardančiomis dujomis (62).

5.4. Inhaliacinių anestetikų poveikį aplinkai lemiančios savybės

Taikant inhaliacinius anestetikus medicinos praktikoje jų galutinis poveikis aplinkai priklauso nuo dviejų dedamųjų, apibūdinančiųjų konkretų vaistą:

1. Fizikocheminių inhaliacinio anestetiko savybių (GWP_{20} arba GWP_{100}).
2. Farmakokinetinių inhaliacinio anestetiko savybių.

Svarbi yra konkrečių inhaliacinių anestetikų farmakokinetika, kuri dažniausiai nulemia, koks kiekis medžiagos pateks į aplinką, ir fizikocheminės jų savybės, kurios rodo santykinį poveikį aplinkai. Reikia pastebėti, kad taršiausias čia aprašomas inhaliacinis anestetikas desfluranas turi ne tik aplinkai nepalankiausią fizikocheminį profilį (GWP_{20} 7020), bet dėl sąlyginai mažo stiprumo (MAK 6%), reikia didesnio kiekio šio inhaliacinio anestetiko, kad būtų palaikoma bendroji nejautra.

Didelę reikšmę lyginant inhaliacinius anestetikus taršumo aspektu turi jų ilgaamžiškumas atmosferoje. Nors sevoflurano, izoflurano ir desflurano spinduliavimo efektyvumas skiriasi palyginti nedaug ($0,308-0,464 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ppb}^{-1}$), jų gyvavimo atmosferoje trukmė labai varijuoja – nuo 1,1 iki 14,1 metų. Galima teigti, kad desfluranas yra pats taršiausias plačiai naudojamas inhaliacinis anestetikas, daugiausia dėl jo ilgo gyvavimo atmosferoje – daugiau nei 14 metų. N_2O , nors ir pasižymi ypač mažu spinduliavimo efektyvumu, atmosferoje išsilaiko ilgiausią laiką (109 metus).

Iš šiame darbe aprašomų inhaliacinių anestetikų N_2O yra išskirtinis pagal tai, kaip yra naudojamas klinikinėje praktikoje. Dėl savo silpnų anestetiko savybių (MAK >100%) šios dujos nenaudojamos bendrai nejautrai sukelti be kitų inhaliacinių anestetikų. Kartu su jais, N_2O dujų mišinyje sudaro

50-70% (45), todėl sukeltos sąlyginai didelės emisijos ir žala aplinkai. LCA tyrimai, vertinantys inhaliacinių anestetikų poveikį aplinkai, pabrėžia, kad tarša aplinkai reikšmingai sumažėtų, jeigu N_2O nebūtų naudojamas kaip sudėtinė dujų mišinio dalis kartu su kitais anestetikais (29,63).

6. INHALIACINIAI ANESTETIKAI KAIP RIZIKOS VEIKSNYS OPERACINĖJE

Tvarumas neapsiriboja vien aplinkos tausojimu – jis apima ir žmogų, be kurio negalima įsivaizduoti tolesnio proceso tęsimo. Nors ESAIC 2024 išskiria būtent psichoemocinę gerovę (31), siekiant tvaraus veikimo anesteziologijoje svarbu atsižvelgti ir į somatinę anesteziologų sveikatą.

Inhaliaciniai anestetikai gali pasižymėti poveikiu ne tik pacientams, kuriems yra skiriami, bet ir gydytojams, kurie su jais dirba. Pavojus specialistams, dirbantiems su šiomis medžiagomis, daugiausiai kyla dėl ilgalaikio darbo aplinkoje, kurioje gali būti išskiriami inhaliaciniai anestetikai. Tyrimai rodo, kad tokia ekspozicija gali turėti neigiamų pasekmių, ypač jei nėra užtikrintos pakankamos aplinkos kontrolės priemonės (64). Pastebima, kad ilgalaikis kontaktas su inhaliaciniais anestetikais sukelia padidėjusį oksidacinį stresą, DNR pažeidimus ir gali sukelti genotoksinį bei citotoksinį poveikį (65–68).

Musak ir kolegų atliktame retrospektyviniame kohortiniame tyrime pastebėta, jog tarp asmenų, kurie savo profesinėje aplinkoje susiduria su inhaliaciniais anestetikais, dažniau galima rasti chromosomų ir chromatidžių aberacijų (67). Figueiredo ir kolegų atliktame tyrime tirtas inhaliacinių anestetikų poveikis asmenims, kurių darbo vietoje užterštumas izofluranu daugiau nei penkis kartus viršijo tarptautines rekomendacijas (vidutinė koncentracija – 11 ppm) (68). Dirbančiųjų šiose sąlygose grupėje stebėtas reikšmingas citotoksinis poveikis bei padidėjęs genetinis nestabilumas iš burnos gleivinės paimtose ląstelėse. Reikšmingai didesnė DNR pažeida, vertinta kometos testu, nustatyta jaunesniems darbuotojams, turintiems didesnę savaitinį darbo krūvį, ir vyresniems darbuotojams, turintiems ilgesnę profesinės ekspozicijos trukmę.

Inhaliacinių anestetikų poveikis reprodukcinei sveikatai išlieka diskusijų objektu, tačiau moksliniai tyrimai rodo galimą riziką. Oliveira su bendraautorais sisteminėje apžvalgoje nustatė, kad kai kurie stebimieji tyrimai parodė reikšmingą sąsają tarp profesinės ekspozicijos inhaliaciniais anestetikais ir savaiminio aborto, ypač tarp darbuotojų, dirbančių ilgesnį laiką ir aplinkoje be dujų surinkimo ar ventiliacijos sistemų (69). Panašias išvadas pateikė ir García-Álvarez su bendraautorais, nurodydami, kad kai kuriuose tyrimuose stebėta padidėjusi savaiminių persileidimų

rizika tarp sveikatos priežiūros specialistų. Didžiausią reikšmę tam turėjo darbo trukmė, o už anestetikų pašalinimą atsakingų sistemų nebuvimas dar labiau didino nepageidaujamų baigčių riziką (70). Geriausios kokybės tyrimai nerado statistiškai reikšmingos sąsajos tarp ekspozicijos ir nepageidaujamų nėštumo baigčių, ypač kai darbo aplinkoje buvo naudojamos efektyvios dujų pašalinimo sistemos (70). Vis dėlto rizikos grupių asmenims rekomenduojama vengti tiesioginio kontakto su inhaliaciniais anestetikais. Siekiant tiksliau įvertinti jų poveikį, ypač esant neadekvačiai ventiliacijai ar pašalinimo sistemų nebuvimui, reikalingi nauji aukštos kokybės moksliniai tyrimai.

Be genetinių ir reprodukcinių padarinių, inhaliaciniai anestetikai gali turėti ir kitokį poveikį su jais dirbančiam personalui. Tyrimai rodo, kad trumpalaikė ekspozicija anestetikams, ypač esant nepakankamai ventiliacijai ar apsaugos priemonėms, gali būti siejama su tokiais simptomais kaip galvos skausmas, nuovargis, mieguistumas, pykinimas ir kognityvinių funkcijų sulėtėjimas (71). Kai kuriuose tyrimuose taip pat pastebėti kepenų fermentų aktyvumo pokyčiai, rodantys galimą hepatotoksinį poveikį (72). Šis poveikis siejamas su sevofluranu, kurio nedidelė dalis yra metabolizuojama citochromo P450 2E1 fermentų sistemos (43), ekspresuojamos kepenyse. Nors šie pokyčiai dažniausiai būna nežymūs, jų kumuliacinis poveikis nėra visiškai ištirtas. Įdomu ir tai, kad yra aprašyta ligoninės darbuotojų priklausomybės nuo halogenintų inhaliacinių anestetikų atvejų (73).

Panašu, kad žalingas poveikis kumuliuojasi ir yra labiau išreikštas, kai aplinkoje aptinkamas didesnis inhaliacinio anestetiko kiekis ir personalas ilgiau dirba šioje aplinkoje. Dauguma aprašytų tyrimų nagrinėjo inhaliacinių anestetikų poveikį patalpose, kuriose naudojant šiuos vaistus nebuvo užtikrintas jų surinkimas ar pašalinimas. Tokiais atvejais, dėl savo darbo vietos ir pobūdžio, labiausiai nukentėti galintis personalas yra anesteziologai ir anestezistai (74). Atsižvelgiant į galimas rizikas, labai svarbu užtikrinti tinkamą darbo aplinkos saugą – efektyvias ventiliacijos ir dujų surinkimo sistemas. Net kai šios sistemos yra įdiegtos, jų priežiūra ir efektyvumas gali skirtis, todėl reikėtų nuolat vertinti ir tobulinti darbo sąlygas, kad būtų sumažinta ekspozicija (64). Apibendrinant galima teigti, kad inhaliacinių anestetikų poveikis sveikatos priežiūros darbuotojams kelia pagrįstą susirūpinimą. Svarbu užtikrinti visas tinkamas prevencines priemones, kai yra dirbama su šiomis medžiagomis.

7. TVARUS INHALIACINIŲ ANESTETIKŲ NAUDOJIMAS

2023 m. publikuotoje Glazgo deklaracijoje inhaliacinių anestetikų taršumo problemą siūloma spręsti orientuojantis į dvi veiksmų grupes (27). Rekomendacijos apima:

- 1) mažesnę inhaliacinių anestetikų naudojimą bendrai ir specifinių inhaliacinių anestetikų (N_2O ir desflurano) pašalinimą iš klinikinės praktikos,
 - 2) modernių technologijų, padedančių užtikrinti cirkuliarių inhaliacinių anestetikų gyvavimo ciklą arba sugavimą ir suskaidymą, diegimą į klinikinę praktiką.
- Kitos deklaracijos, rekomendacijos ir straipsniai, apžvelgiantys šių medžiagų taršumo problemą, taip pat siūlo šiuos ir kitus jos sprendimo būdus (33,34,75–77).

3 Lentelė. Tvarų inhaliacinių anestetikų naudojimą skatinančios rekomendacijos.

Tvarų inhaliacinių anestetikų naudojimą skatinančios rekomendacijos
Desflurano ir azoto suboksido pašalinimas iš klinikinės praktikos
Mažo ir minimalaus srauto anestezijos naudojimas
Alternatyvių anestezijos būdų pasirinkimas (TIVA, regioninė anestezija)
Klinikinių sprendimų paramos sistemų diegimas
Inhaliacinių anestetikų sugavimo ir reflektavimo technologijų diegimas klinikinėje praktikoje
Naujų inhaliacinių anestetikų, kaip ksenonas, naudojimas

Šių metodų ir technologijų diegimas į klinikinę praktiką yra perspektyvus - teoriniu modeliu apskaičiuota, kad atsisakant N_2O , naudojant minimalų dujų srautą kartu su anestetikų surinkimo sistemomis, sevofluranas nebūtų daugiau taršus negu totalioji intraveninė anestezija su propofoliu (63).

7.1. Desflurano ir N_2O pašalinimas iš klinikinės praktikos

Pirmasis žingsnis, kurį turėtų žengti sveikatos įstaigos, norinčios turėti tvaresnę anestezilogijos praktiką - desflurano ir azoto suboksido atsisakymas. Tai leistų reikšmingai sumažinti šių medžiagų sukeltą aplinkos taršą. Vollmer ir kolegės išmatavę skirtingose žemės vietose atmosferoje aptinkamų inhaliacinių anestetikų koncentracijas nustatė, kad bendrai jos atitinka 3.1 ± 0.6 milijonų tonų CO_2 ir už 80% šių emisijų atsakingas būtent desfluranas (78). Šios dujos taip pat pasižymi didžiausia savikaina iš visų plačiai naudojamų inhaliacinių anestetikų. Dėl to šio medikamento atsisakymas naudingas ir iš finansinės pusės (76,79).

Pasauliniu mastu desfluranas užima antrą arba trečią vietą tarp inhaliacinių anestetikų, pasirenkamų bendrajai nejautrai (35). Tarp priežasčių, dėl kurių desfluranas naudojamas klinikinėje praktikoje nepaisant jo didelės kainos ir žalingo poveikio aplinkai dažniausiai nurodoma greita veikimo

pradžią ir greitas paciento pabudimas po anestezijos bei gydytojų pripratimas dirbti su šiuo anestetiku (36,37).

Dėl ypač didelio MAK (>100) N_2O negali būti naudojamas kaip vienintelis anestetikas, kuriuo sukeliamas bendroji nejautra. Šių dujų emisijos susijusios su jų naudojimu analgezijai pradedant metu bei jų tiekimu kartu su halogenintais anestetikais operacinėje (45). Hu ir kt. apskaičiavo, kad nebenaudojant N_2O dujų mišinyje kartu su sevofluranu, pasiekiamas didžiausias CO_2 pėdsako sumažinimas lyginant su kitomis intervencijomis (63).

Išsivysčiusiose valstybėse desflurano ir N_2O naudojimas retėja ir vis daugiau gydymo įstaigų atsisako šių anestetikų (80,81). Talbot ir kolegos nustatė, kad 2014-2023 desflurano poveikis aplinkai, išreikštas CO_2 ekvivalentu, aukštų pajamų valstybėse sumažėjo perpus (nuo 2180 iki 1053 kton CO_2e), o vidutinių ir mažų pajamų valstybėse augo (nuo 127 iki 355 kton CO_2e) (30). Nepaisant šių tendencijų, aukštų pajamų valstybėse desflurano sunaudojimas 2023 buvo apie 3 kartus didesnis negu vidutinių ir žemų pajamų valstybėse kartu sudėjus. Į šių medžiagų poveikį aplinkai dėmesį atkreipia ir tarptautinės organizacijos - Europos Sąjunga planuoja desfluraną uždrausti nuo 2026 metų sausio, taikant išlygą išskirtiniais atvejais (82).

Atsisakyti desflurano ir N_2O – tai vienas efektyviausių ir paprasčiausių būdų mažinti anestezijos poveikį klimatui. Tai ne tik ekologiškai atsakingas, bet ir ekonomiškai naudingas sprendimas. Šios medžiagos turėtų būti naudojamos tik išimtinėms, mediciniškai pagrįstoms situacijoms, kai jos geriausiai atitinka paciento interesą.

7.2. Dujų srauto pritaikymas skiriant inhaliacinius anestetikus

Vienas iš svarbiausių parametru, kurį anesteziologas gali reguliuoti siekdamas mažinti inhaliacinių anestetikų sunaudojimą, yra dujų srauto dydis. Jis nurodo, koku greičiu dujų mišinys tiekiamas į kvėpavimo kontūrą ir iš jo pašalinamas. Esant dideliame dujų sraute, pacientas ventiliuojamas nuolat atsinaujinančiu mišiniu, dėl ko vyksta intensyvi patiekiamų anestetikų apykaita ir padidėja jų suvartojimas. Sumažinus šviežių dujų srautą, dalis jau įkvėptų dujų grįžta pacientui, todėl sumažėja ir inhaliacinių anestetikų suvartojimas. Kadangi didžioji dalis anestetikų išsiskiria nepakitę per kvėpavimo takus, mažas dujų apykaita leidžia efektyviau panaudoti anestetiką.

Mažą ar minimalų dujų srautą operacijos metu galima naudoti po intraveninės indukcijos atlikimo ir palaikant narkozę. Feldman atliko skaičiavimus, įrodančius, jog pasirinkus 1 l/min vietoje 2 l/min dujų srautą palaikymo fazės metu, per 35 metų karjerą gali būti sutaupyta apie 18 900 litrų inhaliacinių anestetikų (83).

Dujų srauto reguliavimas priklauso nuo įvairių veiksnių: gydymo įstaigoje nusistovėjusių įpročių, naudojamos anestezijos aparatūros, klinikinės situacijos (pvz., kai ventiliuojant pacientą yra dujų nuotėkis), anestezijos etapo ir kitų. Nors minimalios tėkmės anestezija (kai dujų srautas <1 l/min) yra žinoma praktika, ją tarptautiniu mastu taiko mažiau nei pusė anesteziologų, o tik 15 % šią metodiką naudoja reguliariai (35). Dažniausiai nurodomos priežastys, dėl kurių vengiama šio metodo, yra pakartotinė CO_2 inhaliacija, hipoksijos rizika, galimas inkstų pažeidimas dėl junginio A bei anglies monoksido susidarymas. Kad būtų užtikrintas paciento saugumas, Rübsam ir kolegos siūlo taikyti ≤ 1 l/min šviežių dujų srautą tik tais atvejais, kai yra minimalūs nuotėkiai iš kvėpavimo kontūro, monitoruojamos įkvėpto ir iškvėpto deguonies, anglies dvideginio ir įkvepiamų anestetikų koncentracijos bei naudojamas integruotas anglies dvideginio absorbentas (48).

Praeityje sevofluraną vengta naudoti taikant mažos tėkmės anestezijos metodiką dėl susirūpinimo galimu junginio A toksiniu poveikiu. Šis junginys susidaro, kai kvėpavimo konture sevofluranas reaguoja su CO_2 absorbcijos granulėmis (84). Nors gyvūnų modeliuose nustatytas junginio A nefrotoksiškumas (85), klinikinių tyrimų metu toksinis poveikis žmonėms nebuvo įrodytas (86). Todėl šiuo metu manoma, kad junginys A žmonėms nėra toksiškas, ypač kai naudojami šiuolaikiniai, mažiau reaktyvūs CO_2 absorbentai (79).

Mažas šviežių dujų srautas ne visada yra geriausias pasirinkimas, nes jo tinkamumas priklauso nuo konkretaus bendrosios nejaunos etapo. Indukcijos metu tikslinga taikyti didesnę dujų srautą, kadangi sumažinus jį (pvz., iki 0,5–1,0 l/min), reikšmingai sulėtėja tikslinės MAK pasiekimas alveolėse, o tai gali lemti ilgesnę narkozės pradžią. Pažymėtina, kad šiuolaikinėje klinikinėje praktikoje inhaliaciniai anestetikai indukcijai taikomi retai – dažniausiai vaikų anesteziologijoje arba specifinėmis klinikinėmis aplinkybėmis (87). Mažo srauto anestezijos naudojimas taip pat galimas iškart po intraveninės indukcijos. Rübsam ir kolegos teigia, kad naudojant mažo srauto įsotinimą po standartinės intraveninės indukcijos (2 mg/kg propofolio), ne tik galima sumažinti naudojamo inhaliacinio anestetiko kiekį, bet ir išvengti per daug gilios narkozės (48).

Anestezijos palaikymo metu tikslinga kiek įmanoma mažinti inhaliacinio anestetiko tiekimą pacientui, sumažinant dujų srautą (83). Būtent šiame etape priimami sprendimai lemia tiek į aplinką patenkančio inhaliacinio anestetiko kiekį, tiek paciento pabudimo trukmę. Mažas dujų srautas taip pat kondicionuoja pacientui patiekiamą dujų mišinį (sušildo ir drėkina dujas) (48). Anesteziologas turėtų įvertinti ventiliacijos parametrus (dujų srautą, minutinę ventiliaciją, garintuvo nustatymus) bei operacijos trukmę, kad pasiektų optimalų balansą tarp paciento saugumo, savalaikio jo pabudimo ir aplinkos tausojimo (83).

Vienas iš būdų, galinčių padėti optimizuoti inhaliacinių anestetikų naudojimą klinikinėje praktikoje, yra skaitmeninių sprendimų, tokių kaip klinikinės sprendimų paramos sistemos, integravimas į anesteziologo darbo vietą. Šios informacinės technologijos, sujungtos su anestezijos aparatais,

realiuoju laiku stebi inhaliacinių anestetikų tiekimą ir informuoja anesteziologą, kai viršijamas iš anksto nustatytas šviežių dujų srauto dydis. Klinikiniai tyrimai rodo, kad tokių sistemų naudojimas padeda reikšmingai sumažinti šviežių dujų srautą ir atitinkamai sumažinti anestetikų suvartojimą (88,89). Jos veikia kaip elgseną formuojantis veiksnys – pašalinus šias sistemas, anesteziologai dažnai grįžta prie anksčiau taikytų, mažiau efektyvių metodų (89). Sėkmingas jų diegimas gydymo įstaigose prisideda ne tik prie racionalesnio anestetikų vartojimo, bet ir prie jų emisijų mažinimo bei su tuo susijusio poveikio aplinkai sumažinimo (88).

Taigi, šviežių dujų srauto mažinimas yra labai svarbus veiksnys, kuriant tvarią anesteziologijos praktiką. Tai priemonė, kurią savo klinikiniame darbe galėtų taikyti kiekvienas anesteziologas. Mažo srauto anestezija (<1 l/min), tinkamai parinkus klinikinės sąlygas ir užtikrinus reikiamą monitoravimą, leidžia efektyviau panaudoti anestetiką ir pagerinti dujų mišinio savybes.

Skaitmeninės klinikinių sprendimų paramos sistemos padeda realiuoju laiku stebėti dujų srautą ir skatina racionalesnį anestetikų naudojimą, prisidedant prie tvaresnės ir saugios anestezijos praktikos.

7.3. Totalioji intraveninė anestezija

Vienas iš būdų sumažinti inhaliacinių anestetikų sukeltą taršą - visai nesirinkti šių medikamentų bendrajai nejautrai sukelti. TIVA (*angl. Total Intravenous Anaesthesia*) – tai anestezijos palaikymo metodas, kuriuo siekiama išlaikyti pacientą bendrojoje nejautroje nenaudojant inhaliacinių anestetikų (90). Šiam tikslui pasiekti naudojamas hipnotiko, opioido ir raumenų relaksanto derinys. TIVA leidžia tiksliai kontroliuoti anestezijos gylį ir dažnai pasižymi greitesniu paciento pabudimu po operacijos bei rečiau pasireiškiančiomis pykinimo ir vėmimo komplikacijomis negu inhaliacinė anestezija (91). TIVA dažnai naudojama pacientams, kuriems yra kontraindikacijų inhaliacinei anestezijai, arba kai siekiama geresnės pooperacinės savijautos.

Tarptautinės apklausos duomenimis, didžioji dalis anesteziologų savo klinikinėje praktikoje pirmenybę teikia inhaliaciniams anestetikams (64%) ir tik mažuma (23%) bendrajai nejautrai atlikti labiau linkę rinktis TIVA. Taip pat nustatyta, kad inhaliaciniai anestetikai dažniausiai taikomi bendrosios, pediatriinės, širdies ir krūtinės chirurgijos srityse, o TIVA dažniausiai pasirenkama neurochirurgijoje (35).

Totaliajai intraveninei anestezijai dažniausiai taikomas propofolio ir fentanilio derinys, kuris, lyginant su inhaliaciniais anestetikais, nepasižymi didelėmis gyvavimo ciklo metu sukeliamomis emisijomis. Jeigu propofolio gamybai būtų naudojami atsinaujinantys energijos ištekliai, net ir

ankstesnė Hu ir kolegų prielaida apie mažesnę sevoflurano taršumą (63) būtų neteisinga. Visgi reikia paminėti, kad propofolis taip pat siejamas su žalingu poveikiu aplinkai. 1% šio vaisto išskiriamas su šlapimu ir kaupiasi biosferoje, kur akumuliuojasi vandens telkiniuose ir pasižymi toksišku poveikiu ten gyvenantiems organizmams (63).

Prancūzijoje atlikto tyrimo metu (92) Bernat su kolegomis palygino dviejų ligoninių bendrosios nejautos metu išskiriamas CO₂ emisijas. Vienoje iš ligoninių bendroji nejautra buvo atliekama vien tik taikant TIVA, o kitoje – ši metodika sudarė 31 % visų bendrosios nejautos atvejų. Tyrimo rezultatai parodė, kad įstaigoje, kurioje naudota tik TIVA, vienos bendrosios nejautos metu išskiriamas CO₂ ekvivalentas siekė 2,42 kg. Tuo tarpu ligoninėje, kur taikytos tiek intraveninės, tiek inhaliacinės technikos, vienos bendrosios nejautos metu vidutiniškai susidarydavo net 48,85 kg CO₂ emisijų. Šie duomenys įrodo, kad TIVA gali būti tvaresnė alternatyva bendrosios nejautos palaikymui, reikšmingai sumažinanti tiesiogines su anestezija susijusias anglies dvideginio emisijas.

Totalioji intraveninė anestezija taip pat pasižymi pacientui naudingais privalumais. Kaip jau minėta, TIVA siejama su mažesne pooperacinio pykinimo ir vėmimo rizika (93), o tai ženkliai pagerina paciento komfortą ir gali sutrumpinti atsigavimo po operacijos laiką. Be to, kai kurie tyrimai rodo, kad propofolis, dažniausiai naudojamas TIVA metu, gali turėti neuroprotekcinę savybę (94) bei sumažinti pooperacinio skausmo intensyvumą (95). Totalios intraveninės anestezijos metu skiriami medikamentai taip pat nepasižymi tokiais inhaliacinių anestetikų sukeliamomis komplikacijomis kaip piktybinė hipertermija ir QT intervalo prailgėjimas, todėl gali būti skirti pacientams, priklausantiems su šiomis būklėmis susijusioms rizikos grupėms (90). Intraveninė anestezija leidžia tiksliau kontroliuoti anestetikų koncentraciją organizme, o tai ypač svarbu pacientams su padidinta komplikacijų rizika. Taigi ne vien mažesnis anglies dioksido pėdsakas, bet ir propofolio farmakologinės savybės daro TIVA patraukliu pasirinkimu renkantis bendrosios anestezijos metodą.

Totalioji intraveninė anestezija (TIVA) išsiskiria kaip viena iš tvarių alternatyvų bendrosios nejautos palaikymui, padedanti reikšmingai sumažinti su anestezija susijusias CO₂ emisijas. Be to, šis metodas pasižymi palankiu saugumo profiliu ir klinikiniais privalumais, todėl gali būti naudingesnis pasirinkimas kai kuriems pacientams. Dalis išsivysčiusių pasaulio šalių jau grindžia savo anesteziologijos praktiką ne inhaliaciniais anestetikais, o būtent TIVA metodika atliekama bendrąja nejautra.

7.4. Inhaliacinių anestetikų surinkimo ir reflektavimo sistemos

Svarbiausia emisijų mažinimo priemonė naudojant inhaliacinius anestetikus – jau aptarti konkretūs veiksmai: apriboti desflurano ir N₂O naudojimą, taikyti minimalų dujų srautą, kai įmanoma, rinktis alternatyvius anestezijos būdus. Užtikrinus šias praktikas, galimi technologiniai sprendimai, toliau mažinantys inhaliacinių anestetikų emisijas. Šiame kontekste ypač aktualios tampa įvairios anestetikų surinkimo ir pašalinimo technologijos. Jos gali prisidėti ne tik prie operacinėje dirbančio personalo apsaugos nuo inhaliacinių anestetikų poveikio, bet ir padėti mažinti šių medžiagų emisijas bei užtikrinti efektyvesnę jų naudojimą.

Inhaliacinių anestetikų pašalinimui iš operacinės dažniausiai taikomi du būdai: anestetikų pašalinimo sistema (angl. *scavenging*) ir operacinės kondicionavimo sistema (64). Pastaroji, nors ir nėra specialiai tam skirta, taip pat prisideda prie inhaliacinių anestetikų pašalinimo iš darbo aplinkos bei bendro oro kokybės palaikymo. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad priešingai nei manyta anksčiau, inhaliaciniai anestetikai operacinėje nesikaupia vien ties grindimis, bet pasiskirsto erdvėje kūgio forma vertikalčiai ir geriausiai pašalinami oro srautui tekant iš lubų link grindų per visą patalpą (96). Dėl to yra svarbi vienakryptės laminarinės oro srovės ventiliacija – tokia sistema užtikrina kryptingą oro judėjimą nuo lubų link grindų, taip efektyviau pašalindama inhaliacinius anestetikus iš operacinės erdvės ir mažindama personalo ekspoziciją jiems. Inhaliacinių anestetikų pašalinimo sistemos, prijungiamos prie anestezijos aparato, yra skirtos surinkti paciento iškvėptas anestetikų dujas iš kvėpavimo kontūro (97). Nors šios sistemos padeda užtikrinti personalo saugumą, inhaliacinių anestetikų taršumo problemos jos nesprendžia. Kai kurie autoriai taip pat atkreipia dėmesį, kad aktyvios inhaliacinių anestetikų pašalinimo sistemos naudojimas nulemia didžiules CO₂ emisijas dėl elektros energijos, kuri sunaudojama užtikrinti jų veikimą (98). Alternatyvos, tokios kaip efektyvios anestetikų surinkimo sistemos, galėtų padėti spręsti šią problemą.

Inhaliacinių anestetikų surinkimo (angl. *capture*) sistemos gali būti laikomos pažangiu sprendimu, siekiant mažinti šių medžiagų poveikį aplinkai bei užtikrinti saugesnes darbo sąlygas medicinos personalui. Šiuo metu komerciškai prieinamos tokios sistemos kaip „Deltasorb®“ (Blue-Zone Technologies), „SID“ (SageTech Medical) ir „CONTRAfluran™“ (Baxter/ZeoSys) (98). Tai prietaisai naudojantys filtrus, pagamintus iš aktyvintos anglies arba kitų adsorbuojančių medžiagų, leidžiančių efektyviai sulaikyti inhaliacinius anestetikus. Šių sistemų veikimo principai nėra iki galo aiškūs, nes gamintojai taiko užpatentuotas technologijas ir nepateikia išsamios informacijos apie jų konstrukciją (99). Moderniose sistemose surinkti anestetikai gali būti utilizuojami arba perdirbami, taip prisidedant prie tvaresnės anestezijos praktikos (100).

Nepaisant jų inovatyvumo, inhaliacinius anestetikus surenkančių sistemų efektyvumas išlieka diskusijų objektu. Klinikinėje praktikoje jų veiksmingumas gali ženkliai skirtis priklausomai nuo tokių veiksnių kaip naudojamas dujų srautas, anestezijos trukmė ar paciento fiziologinės savybės (98). Hinterberg su kolegomis atliktas tyrimas parodė, kad „CONTRAfluran™“ sistema surenka tik apie 25 % operacijos metu panaudoto desflurano (101). Autoriai pažymėjo, kad didžioji dalis desflurano pasišalina iš paciento jau po ekstubacijos, todėl sumažinti nuostolius galima tik trumpinant anestetiko skyrimo laiką (101,102). Mažesnis nei 50% efektyvumas taip pat pastebėtas „CONTRAfluran™“ sistemą naudojant surinkti sevofluraną ir taikant minimalų dujų srautą (103).

Kalmar ir bendraautoriai, komentuodami Hinterberg ir kolegų atliktą tyrimą, atkreipė dėmesį į metodologines problemas ir pabrėžė, kad operacijos metu surinkimo prietaisai pasižymi dideliu efektyvumu, kurį vertinant nereikėtų atsižvelgti į inhaliacinį anestetiką, išskiriamą į aplinką, kai sistema nebenaudojama (104). Pasak jų, tinkamai naudojant sistemą, iki 90 % sugauto anestetiko gali būti perdirbta pakartotiniam naudojimui, o nesurinkta dalis sunaikinama aplinkai nekenksmingu būdu. Autoriai laikosi pozicijos, kad kiekvienas būdas sumažinti emisijas, yra savaime reikšmingas.

Kitame neseniai išleistame tyrime nagrinėtas „Deltasorb®“ surinkimo sistemos efektyvumas klinikinėje praktikoje - buvo nustatyta, kad tik 5% operacijos metu panaudoto sevoflurano buvo surinkta ir perdirbta (105). Tai rodo, kad klinikinėje praktikoje pasiekiamas efektyvumas gali būti gerokai mažesnis nei nurodoma teoriniuose modeliuose. Iki šiol atlikta nedaug tyrimų, vertinančių šių sistemų efektyvumą realiomis operacinės sąlygomis. Taip pat trūksta patikimų duomenų apie jų gyvavimo ciklą ir ilgalaikį poveikį aplinkai (99).

Inhaliacinių anestetikų reflektoriai – dar viena moderni sistema, leidžianti sumažinti inhaliacinių anestetikų sunaudojimą. Tai prietaisai, kurie leidžia ne tik surinkti paciento iškvėptus inhaliacinius anestetikus, bet ir sugrąžinti juos į kvėpavimo kontūrą. Šios sistemos dažniausiai pritaikomos intensyviojoje terapijoje, kai reikalinga ilga paciento sedacija, tačiau yra tyrimų aprašančių sėkmingą jų naudojimą operacinėse (106). Kaip tokių technologijų pavyzdžius galima pateikti „AnaConDa™“ arba „Mirus™“ (107). Naudojant jas, keičiantis parcialiniam slėgiui kvėpavimo kontūre vyksta inhaliacinio anestetiko adsorbcija iškvėpimo metu ir desorbcija įkvėpimo metu. Kaip ir anestetikų surinkimo sistemose, molekulės sulaiko selektyvūs molekuliniai sietai iš aktyvintos anglies arba aliumosilikatų, kurie leidžia atskirti būtent inhaliacinius anestetikus. Bomberg su kolegomis teigia, kad šios sistemos gali grąžinti pacientui 80-90% iškvėpto inhaliacinio anestetiko (107). Kadangi inhaliacinis anestetiko papildymas vykdomas atsižvelgus į aparate nustatytą

koncentraciją naudojant infuzinę pompą, ši technologija leidžia ventiliuoti pacientus didele dujų srove ir sunaudoti minimalius kiekius medikamento.

Aplinkosauginiu požiūriu itin svarbu efektyviai naudoti inhaliacinius anestetikus ir sumažinti jų emisijas. Jų surinkimas ir perdirbimas galėtų reikšmingai prisidėti prie neigiamo poveikio aplinkai mažinimo. Nors įprastos inhaliacinių anestetikų pašalinimo (*scavenging*) ir kondicionavimo sistemos užtikrina operacinės personalo saugumą, jos nesprendžia inhaliacinių anestetikų taršumo problemos. Be to, tokių sistemų veikimas dažnai susijęs su didelėmis energijos sąnaudomis ir papildomomis CO₂ emisijomis. Alternatyvą galėtų sudaryti modernesnės technologijos – anestetikų surinkimo ir reflektavimo sistemos, kurios ne tik padėtų sumažinti inhaliacinių anestetikų emisijas, bet ir leistų efektyviau juos naudoti. Inhaliacinių anestetikų surinkimo sistemų taikymas klinikinėje praktikoje šiuo metu yra ribotas, nes trūksta išsamių klinikinių tyrimų, vertinančių jų efektyvumą operacinėse. Tokie tyrimai galėtų prisidėti prie šių technologijų tobulinimo bei platesnio jų pritaikymo medicinos praktikoje. Reflektavimo sistemos išsiskiria efektyvumu ir tinka naudoti esant dideliame dujų srautui, todėl turi reikšmingą potencialą klinikiniam pritaikymui. Kol modernios anestetikų surinkimo ir reflektavimo technologijos dar nėra plačiai įdiegtos, emisijų mažinimas turėtų būti grindžiamas prieš tai aprašytomis rekomendacijomis.

7.5. Ksenonas, kaip alternatyvus inhaliacinis anestetikas

Atsižvelgiant į jo poveikį aplinkai, ksenonas gali būti vertinamas, kaip tvari alternatyva įprastai naudojamiems inhaliaciniams anestetikams. Skirtingai negu halogeninti anestetikai, ksenonas natūraliai egzistuoja atmosferoje ir nėra sintetinas cheminiu būdu, todėl jo išgavimas nesukelia papildomos ekologinės taršos dėl gamybos proceso ar pavojingų šalutinių produktų (108). Skirtingai negu klinikinėje praktikoje naudojami inhaliaciniai anestetikai, jis taip pat neprisideda prie šiltnamio efekto (109). Tyrimai taip pat rodo, kad ksenono atliekinių dujų koncentracija operacinėje aplinkoje yra gerokai mažesnė nei, pavyzdžiui, azoto suboksido (N₂O), kas sumažina ilgalaikę medicinos personalo ekspoziciją šioms dujoms (110).

Ksenonas pasižymi unikalia farmakokinetika: itin mažu kraujo-dujų tirpumo koeficientu (0.115), kuris lemia greitą indukciją bei atsigavimą po anestezijos (111). Tai itin svarbu tvariam sveikatos priežiūros organizavimui – sumažėja paciento buvimo operacinėje trukmė. Kartu pastebėtas mažesnis hemodinaminės destabilizacijos dažnis, o tai leidžia efektyviau panaudoti išteklius ir mažina papildomų vaistų poreikį (111).

Vis dėlto, ksenono plačiam pritaikymui trukdo didelė kaina, susijusi su jo išgavimo ir tiekimo sudėtingumu. Siekiant spręsti šią problemą, plėtojamos dujų surinkimo ir refleksijos technologijos, tokios kaip selektyvios membranos ar adsorbciniai filtrai, leidžiantys sumažinti sunaudojamų dujų kiekį ir padidinti naudojimo efektyvumą (112).

8. TVARUMO DIEGIMAS KLINIKINĖJE PRAKTIKOJE

Anksčiau aptartos tvaraus inhaliacinių anestetikų naudojimo rekomendacijos apima daugiausiai praktiškai pritaikomas priemones, kurios sumažintų aplinkos taršą naudojant šias medžiagas. Kad būtų pasiektas šis tikslas, būtina įgyvendinti tvarumą skatinančias kokybės gerinimo iniciatyvas gydymo įstaigų lygmeniu, o tai reikalauja abipusio įsipareigojimo iš klinikinėje praktikoje dirbančių anesteziologų, ir iš ligoninės vadovybės. Efektyvus klinikinėje praktikoje nusistovėjusiu įpročių keitimas reikalauja sisteminio požiūrio į problemą. Europos anesteziologų draugija pateikia konkrečias rekomendacijas, kuriomis vadovaujantis galima pereiti prie atsakingesnės aplinkai anestezijos (31). Rekomenduojama gydymo įstaigų lygmeniu pasirinkti mažesnį GWP turinčius anestetikus, skirti asmenis, kurie būtų atsakingi už tvarumo įdiegimą konkrečioje įstaigoje, sekti sunaudojamų anestetikų kiekį bei vykdyti šias praktikas diegiančias kokybės gerinimo iniciatyvas.

8.1. Personalo supažindinimas su tvarumu anesteziologijoje

Atsižvelgiant į tai, kad medicinos studijų ir rezidentūros metu dažnai nesuteikiama pakankamai žinių apie tvarumą medicinoje (31), reikalingas papildomas specialistų švietimas šioje srityje. Kai klinikistų edukacijos ir įtraukimo į tvarios anestezijos panaudojimą procesas atliekamas nuosekliai, galima tikėtis gerų rezultatų. Tyrimo, atlikto „Charité“ sveikatos įstaigų tinkle duomenimis 2017-2023 metais, vykdant tęstinę edukaciją tvarios anestezijos tema, su inhaliacinių anestetikų naudojimui susijusios CO₂ emisijos sumažintos 90%, reikšmingai sumažėjo išlaidos, skirtos šių medikamentų įsigijimui (80). Pokytis buvo pasiektas atsisakant desflurano bei dažniau renkantis mažiau taršius inhaliacinius anestetikus bei alternatyvius anestezijos būdus, kaip totaliąją intraveninę ar regioninę anesteziją. Medicinos personalo supažindinimas su inhaliacinių anestetikų poveikiu aplinkai ir būdais jį mažinti nagrinėjamas ir daugelyje kitų kokybės gerinimo tyrimų, atliktų įvairiose gydymo įstaigose (80,113–118).

Supažindinti medikus su tvarumo anesteziologijoje aktualumu ir įgyvendinimu galima įvairiais būdais. Gydymo įstaigose gali būti rengiamos paskaitos (80), taikomas individualus specialistų apmokymas. Pavyzdžiui, Park ir bendraautoriai parodė, kad net 30 minučių individualaus pokalbio su anesteziologu gali užtekti, kad tiriamosios grupės desflurano naudojimas sumažėtų 50% (113).

Iniciatyvinės grupės gali parengti rekomendacijas skatinančias tvarumo principų taikymą konkrečioje gydymo įstaigoje bei informacines kampanijas (80,119). Personala galima informuoti ir įvairiais nekontaktiniais būdais - ženklinti inhaliacinių anestetikų garintuvus informaciniais lapeliais, darbo vietoje pateikti QR kodus su nuorodomis į edukacinį turinį (115), pakabinti plakatus, kuriuose aptariama tvarumo anesteziologijoje svarba ir rekomendacijos (114). Taip pat svarbi nuo pačios gydymo įstaigos nepriklausanti edukacija, pavyzdžiui medikų dalyvavimas konferencijose ir kongresuose. Moksliniai tyrimai anesteziologijos tvarumo srityje ne tik didina juos rengiančių specialistų kompetencijas, bet ir gali informuoti kolegas bei padėti siekti konkrečių pokyčių klinikinėje praktikoje įgyvendinimo (80).

8.3. Personalo įtraukimas į tvarumo procesų diegimą

Norint pasiekti reikšmingų ilgalaikių pokyčių, neužtenka vien anesteziologų edukacijos tvarumo tema - reikalingas pokytis organizacijos kultūroje (31,116). Ilgalaikiai ir reikšmingi pokyčiai galimi tik pakeitus ligoninėse dirbančiųjų požiūrį į tvarumo svarbą. Tam reikalingi veiksmai, kurie paskatintų dirbančiųjų bendruomenės elgesio pokytį ir įsitraukimą į vykdomus procesus. Kad tvarios anesteziologijos rekomendacijos taptų nauja klinikinio darbo norma, kokybės gerinimo tyrimuose siūlomos kompleksinės priemonės. Svarbu sukurti atvirą erdvę diskusijoms apie vykstančius procesus, sekti ir dalintis su anesteziologais, kaip diegiamos priemonės padeda įgyvendinti išsikeltus taršos mažinimo tikslus. Progresas gali būti aptariamas komandos susitikimų metu, siunčiant darbuotojams elektroninius laiškus ar diskutuojant internetiniuose forumuose (116). Kai kuriose publikacijose aprašytas ir tiesioginis grįžtamasis ryšys tvarumo rekomendacijas įgyvendinantiems anesteziologams (118).

8.4. Vadovų įsitraukimo svarba ir bendradarbiavimas tarp ligoninės struktūrų

Tvarumo diegimui anesteziologijoje itin svarbus gydymo įstaigų administracijos bei vadovaujančias pareigas užimančių asmenų aktyvus įsitraukimas ir tarpinstitucinis bendradarbiavimas. Tyrimai rodo, kad reikšmingiausias poveikio aplinkai mažinimas dažnai pasiekiamas ribojant tam tikras praktikas. Tokios vadinamosios „iš viršaus į apačią“ (angl. *top-down*) intervencijos apima, pavyzdžiui, desflurano ir azoto suboksido (N₂O) pašalinimą, mažesnio numatytojo šviežio dujų srauto taikymą, klinikinį sprendimų paramos sistemų diegimą bei kitas priemones (80,114,118). Schwiethal ir kolegų pabrėžia anesteziologijos skyrių vadovų vaidmenį skatinant tvarumą – analizuojant CO₂ emisijų pokyčius nustatyta, kad reikšmingiausias emisijų sumažėjimas buvo pasiektas būtent tuomet, kai skyrių vadovai priėmė sprendimą visiškai atsisakyti desflurano (80).

Bracco ir Bozzer atkreipia dėmesį į tarpinstitucinio bendradarbiavimo svarbą – jų atveju sprendimas atsisakyti desflurano buvo priimtas po aktyvių diskusijų tarp anesteziologų ir formalaus pasiūlymo ligoninės vaistų komisijai. Sutarus dėl šio žingsnio, desfluranas buvo pašalintas iš vaistų sąrašo, o jo tiekimas nutrauktas. Po šio sprendimo įgyvendinimo, bendros su inhaliacinių anestetikų naudojimu susijusios anglies dioksido emisijos sumažėjo 66 %, o neigiamų pasekmių pacientams nebuvo užfiksuota (81).

8.5. Emisijų skaičiavimas

Inhaliacinių anestetikų sukeltų emisijų apskaičiavimas ir sekimas leidžia tiksliau įvertinti šios problemos mastą bei įgalina objektyviai įvertinti pritaikomas aplinką tausojančias priemones (118). Tikslinga analizuoti ne tik ilgalaikes emisijų tendencijas – pavyzdžiui, mėnesines ar metines inhaliacinių anestetikų emisijas – bet ir trumpesnio laikotarpio duomenis, tokius kaip emisijos per valandą ar minutę operacijos metu. Toks požiūris leidžia nuosekliau suprasti bendrosios neįtautos inhaliaciniais anestetikais efektyvumą nepriklausomai nuo konkrečiu laikotarpiu atliekamų anestezijų apimtys (116).

9. TVARIOS ANESTEZIJOS SVARBA

Nors globalinio atšilimo problema yra itin reikšminga, kyla diskusijų, ar inhaliacinių anestetikų vartojimo ribojimas klinikinėje praktikoje yra prasmingas. Kai kurie autoriai teigia, kad šių medžiagų indėlis į bendrą žmogaus veiklos poveikį klimatui yra toks minimalus, jog į jį neturėtų būti atsižvelgta anesteziologijos praktikoje (120). Šį požiūrį iš dalies patvirtina ir tvarumo principus palaikantys gairių bei mokslinių publikacijų autoriai (27,56). Vis dėlto vyrauja nuomonė, kad nors anesteziologo indėlis į klimato kaitos mažinimą yra nedidelis, jis vis tiek turi prasmę (27), kadangi klimato kaita yra globali problema, reikalaujanti kompleksinio sprendimo.

Mortimer su kolegomis siūlo tvarumą vertinti kaip vieną iš esminių kokybiškos sveikatos priežiūros komponentų, pateikdami tiek etinius, tiek praktinius argumentus (121). Praktiniu požiūriu, užtikrinamas medicinos sistemos ilgalaikiškumas, nes protingai naudojami ištekliai ir atsižvelgiama į darbuotojų gerovę. Etniu požiūriu, tvarumas yra svarbus dėl atsakomybės ateities kartoms – mažinant poveikį aplinkai, rūpinamasi jų sveikata. Be to, tvaresnės inhaliacinių anestetikų alternatyvos dažnai yra ir ekonomiškai naudingesnės, todėl galima efektyviau paskirstyti išteklius nepakenkiant sveikatos priežiūros kokybei (122).

Galiausiai svarbu pabrėžti, kad tvarumo principų taikymas turi būti suderintas su individualia klinicine paciento situacija. Šie principai tampa prasmingi tik tada, kai jų taikymas neprieštaruja individualiems paciento poreikiams ir netrukdo priimti jam palankių sprendimų.

10. APIBENDRINIMAS

Inhaliaciniai anestetikai yra neatsiejama šiuolaikinės anestezilogijos dalis, tačiau jų poveikis aplinkai vis dažniau vertinamas kaip reikšmingas klimato kaitos veiksnys. Šios dujos veikia kaip stiprios šiltnamio efektą sukeliančios medžiagos, o kai kurios iš jų pasižymi ozono sluoksnį ardančiomis savybėmis. Nors jų sukuriamą emisijų dalis sveikatos sistemoje yra sąlyginai nedidelė, įrodyta, kad dėl savo ilgaamžiškumo atmosferoje bei spinduliavimo efektyvumo šios medžiagos sukelia neproporcingai didelę aplinkos taršą.

Svarbu pažymėti, kad inhaliacinių anestetikų poveikį aplinkai lemia ne tik jų cheminė sudėtis, bet ir klinikiniai sprendimai. Anesteziologo naudojamas anestezijos metodas, pasirenkamas medikamentas ir dujų srauto parametrai tiesiogiai veikia į aplinką išskiriamų inhaliacinių anestetikų kieki. Todėl medikų vaidmuo šioje grandyje yra esminis – jie gali sumažinti poveikį aplinkai atsisakydami desflurano ir N_2O , pereidami prie mažesnio srauto anestezijos bei rinkdamiesi alternatyvius metodus, tokius kaip totalioji intraveninė anestezija ar regioninė nejautra, kai tai kliniškai pagrįsta.

Tvarumas anestezilogijoje – tai neatsiejama kokybiškos ir atsakingos medicinos praktikos dalis, reikalaujanti ne tik elgsenos pokyčių ar technologinių sprendimų, bet ir sisteminio požiūrio. Svarbi nuosekli personalo edukacija, vadovų įsitraukimas, inhaliacinių anestetikų emisijų sekimas. Tvari praktika skatina atsakomybę ateities kartoms, racionaliai naudoja išteklius ir padeda kurti kokybišką bei ilgalaikę sveikatos sistemą. Esminė tvarios medicinos praktikos prielaida – tvarūs sprendimai suderinti su individualia paciento klinicine situacija ir atitinkantys aukščiausius gydymo kokybės standartus.

11. IŠVADOS

1. Tvarumo svarbos anestezilogijoje įvertinimas: Kad būtų sumažintas sveikatos sektoriaus poveikis aplinkai būtina laikytis tvarumo principų. Anestezilogija pasižymi dideliu taršumu perioperaciniu laikotarpiu, todėl šioje srityje egzistuoja tvaresnės praktikos poreikis. Klimato kaitos

grėsmės ir jų sąsajos su visuomenės sveikata pagrindžia būtinybę atsakingai naudoti inhaliacinius anestetikus ir pasirinkti mažiau taršias alternatyvas.

2. Inhaliacinių anestetikų poveikis aplinkai: Inhaliaciniai anestetikai pasižymi šiltnamio efektą skatinančiomis savybėmis ir ozono sluoksnio ardymu. Jų poveikį klimatui lemia cheminė sudėtis, skilimo trukmė atmosferoje bei farmakokinetiniai ypatumai. Desfluranas ir N₂O išsiskiria kaip labiausiai taršūs junginiai, lemiantys didžiausias emisijas lyginant su CO₂. N₂O taip pat reikšmingai prisideda prie ozono sluoksnio ardymo.

3. Inhaliacinių anestetikų poveikis medicininiam personalui: Inhaliacinių anestetikų ilgalaikė ekspozicija medicinos personalui siejama su oksidaciniu stresu, DNR pažeidimais, galimu genotoksiniu ir citotoksiniu poveikiu. Nors tiesioginis ryšys su nepageidaujamomis nėštumo baigtimis nėra galutinai įrodytas, tyrimai rodo didesnę riziką nesaugioje darbo aplinkoje. Todėl būtina reguliariai vertinti darbo sąlygas ir taikyti prevencines priemones darbuotojų sveikatai apsaugoti.

4. Inhaliacinių anestetikų neigiamo poveikio aplinkai mažinimo būdai ir jų įgyvendinimas: Rekomenduojama pašalinti iš praktikos labiausiai taršius anestetikus, taikyti mažo ar minimalaus srauto anesteziją bei naudoti inhaliacinių anestetikų nereikalaujančius anestezijos metodus. Diegti pažangias technologijas anestetikų surinkimui bei jų naudojimo optimizavimui klinikiniam tyrimams patvirtinus jų efektyvumą. Kad klinikinėje praktikoje pritaikomos tvarumo rekomendacijos duotų ilgalaikių rezultatų, svarbu mokyti personalą, didinti darbuotojų ir vadovaujančio personalo įtraukimą į vykstančius kokybės gerinimo procesus bei sekti emisijas, kurios išskiriamos naudojant inhaliacinius anestetikus.

12. REKOMENDACIJOS

Siekiant tvarumo anesteziologijos klinikinėje praktikoje reikėtų atsižvelgti į šiuos aspektus:

1. Pašalinti desfluraną ir N₂O iš kasdienės klinikinės praktikos, ypač kai yra saugios ir mažiau taršios alternatyvos (pvz., sevofluranas, TIVA).
2. Taikyti mažo (<1 l/min) ir minimalaus (<0.5 l/min) šviežio dujų srauto technikas operacijos metu, ypač anestezijos palaikymo fazėje. Tokiu būdu galima reikšmingai sumažinti sunaudojamų anestetikų kiekį.

3. Skatinti totaliosios intraveninės anestezijos (TIVA) naudojant propofolį, taikymą tada, kai tai kliniškai įmanoma. Ši technika pasižymi mažesniu CO₂ pėdsaku negu bendroji nejautra naudojant inhaliacinius anestetikus.
4. Plėtoti regioninės anestezijos technikas tada, kai tai įmanoma, siekiant sumažinti ar visai išvengti inhaliacinių anestetikų naudojimo.
5. Pritaikius kitas rekomendacijas, apsvarstyti anestetikų surinkimo ar reflektavimo sistemų diegimą į klinikinę praktiką. Šių sistemų naudojimas gali padėti papildomai sumažinti inhaliacinių anestetikų poveikį aplinkai ir padidinti jų naudojimo efektyvumą.
6. Pagalvoti apie klinikinių sprendimų paramos sistemų diegimą į klinikinę praktiką, kad būtų užtikrinti tvarūs elgesio modeliai tarp darbuotojų, dirbančių su inhaliaciniais anestetikais.
7. Skatinti specialistų edukaciją tvarumo klausimais – įtraukti tvarumo temas į anesteziologų mokymus ir paskirti atsakingus asmenis, koordinuojančius tvarumo iniciatyvas gydymo įstaigoje.
8. Stebėti ir analizuoti metinį inhaliacinių anestetikų suvartojimą, apskaičiuoti suvartojimą per vieną bendrosios nejautos valandą ar minutę, įvertinti alternatyvių metodų taikymo dažnį.
9. Tvarumo tikslai turi būti derinami su pacientų saugumu ir poreikiais – tvarumas turi būti priemonė kokybiškai ir atsakingai medicinos praktikai, bet ne tikslas pats savaime.

13. LITERATŪROS ŠALTINIAI

1. Purvis B, Mao Y, Robinson D. Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. *Sustain Sci*. 2019 May 1;14(3):681–95.
2. Gilcrease GW, Lembo D, Ricceri F, Sciascia S. Why should we teach about sustainability in medical schools? The MedInTo initiative. *Front Clim* [Internet]. 2024 Nov 26 [cited 2025 Apr 6];6. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/climate/articles/10.3389/fclim.2024.1483198/full>
3. Sherman JD, Thiel C, MacNeill A, Eckelman MJ, Dubrow R, Hopf H, et al. The Green Print: Advancement of Environmental Sustainability in Healthcare. *Resour Conserv Recycl*. 2020 Oct 1;161:104882.
4. Andersen MPS, Nielsen OJ, Sherman JD. The Global Warming Potentials for Anesthetic Gas Sevoflurane Need Significant Corrections. *Environ Sci Technol*. 2021 Aug 3;55(15):10189–91.

5. Pichler PP, Jaccard IS, Weisz U, Weisz H. International comparison of health care carbon footprints. *Environ Res Lett*. 2019 May;14(6):064004.
6. Karliner J, Slotterback S, Boyd R, Ashby B, Steele K. Environmentally sustainable health systems: a strategic document [Internet]. 2019 Sep [cited 2025 Apr 1]. Available from: <https://www.arup.com/insights/healthcares-climate-footprint/>
7. Wyssusek KH, Foong WM, Steel C, Gillespie BM. The Gold in Garbage: Implementing a Waste Segregation and Recycling Initiative. *AORN J*. 2016;103(3):316.e1-316.e8.
8. MacNeill AJ, Lillywhite R, Brown CJ. The impact of surgery on global climate: a carbon footprinting study of operating theatres in three health systems. *Lancet Planet Health*. 2017 Dec;1(9):e381–8.
9. NHS G. Greener NHS » Delivering a ‘Net Zero’ National Health Service [Internet]. 2020 [cited 2025 Feb 26]. Available from: <https://www.england.nhs.uk/greenernhs/publication/delivering-a-net-zero-national-health-service/>
10. Amato GD, Akdis C. Global warming, climate change, air pollution and allergies [Internet]. 2020 [cited 2024 Nov 3]. Available from: <https://www.authorea.com/users/343764/articles/470355-global-warming-climate-change-air-pollution-and-allergies?commit=95f251274e2fe121e5fdb58b3c67fefaa041a4a>
11. Mucci SV, Bafirman, Neldi H, Syafrianto D, Rahman D, Zarya F. Global Warming Towards Human Health: A Literature Review. *J Penelit Pendidik IPA*. 2023 Dec 25;9(SpecialIssue):267–74.
12. Rossati A. Global Warming and Its Health Impact. *Int J Occup Environ Med*. 2016 Dec 10;8(1):7.
13. Vicedo-Cabrera AM, Scovronick N, Sera F, Royé D, Schneider R, Tobias A, et al. The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nat Clim Change*. 2021 Jun;11(6):492–500.
14. Masselot P, Mistry MN, Rao S, Huber V, Monteiro A, Samoli E, et al. Estimating future heat-related and cold-related mortality under climate change, demographic and adaptation scenarios in 854 European cities. *Nat Med*. 2025 Jan 27;1–9.
15. Bunker A, Wildenhain J, Vandenberg A, Henschke N, Rocklöv J, Hajat S, et al. Effects of Air Temperature on Climate-Sensitive Mortality and Morbidity Outcomes in the Elderly; a Systematic Review and Meta-analysis of Epidemiological Evidence. *EBioMedicine*. 2016 Apr;6:258–68.
16. Paterson SK, Godsmark CN. Heat-health vulnerability in temperate climates: lessons and response options from Ireland. *Glob Health*. 2020 Mar 30;16(1):29.
17. Ebi KL, Capon A, Berry P, Broderick C, Dear R de, Havenith G, et al. Hot weather and heat extremes: health risks. *The Lancet*. 2021 Aug 21;398(10301):698–708.
18. Kazi DS, Katznelson E, Liu CL, Al-Roub NM, Chaudhary RS, Young DE, et al. Climate Change and Cardiovascular Health: A Systematic Review. *JAMA Cardiol*. 2024 Aug 1;9(8):748–57.

19. Henderson MET, Brayson D, Halsey LG. The cardio-respiratory effects of passive heating and the human thermoneutral zone. *Physiol Rep*. 2021 Aug 19;9(16):e14973.
20. Cramer MN, Jay O. Biophysical aspects of human thermoregulation during heat stress. *Auton Neurosci*. 2016 Apr 1;196:3–13.
21. Crandall CG, González-Alonso J. Cardiovascular function in the heat-stressed human. *Acta Physiol*. 2010;199(4):407–23.
22. Boyette LC, Manna B. Physiology, Myocardial Oxygen Demand. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 [cited 2025 Mar 26]. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK499897/>
23. Konstantinoudis G, Minelli C, Vicedo-Cabrera AM, Ballester J, Gasparrini A, Blangiardo M. Ambient heat exposure and COPD hospitalisations in England: a nationwide case-crossover study during 2007–2018. *Thorax*. 2022 Nov 1;77(11):1098–104.
24. Kurane I. The Effect of Global Warming on Infectious Diseases. *Osong Public Health Res Perspect*. 2010 Dec 1;1(1):4–9.
25. Shuman EK. Global climate change and infectious diseases. *Int J Occup Environ Med*. 2011 Jan;2(1):11–9.
26. Luschkova D, Traidl-Hoffmann C, Ludwig A. Climate change and allergies. *Allergo J Int*. 2022 Jun 1;31(4):114–20.
27. Buhre W, De Robertis E, Gonzalez-Pizarro P. The Glasgow declaration on sustainability in Anaesthesiology and Intensive Care. *Eur J Anaesthesiol EJA*. 2023 Jul;40(7):461.
28. ESAIC [Internet]. 2023 [cited 2025 Mar 14]. Helsinki Declaration on Patient Safety in Anaesthesiology. Available from: <https://esaic.org/patient-safety/helsinki-declaration-on-patient-safety-in-anaesthesiology/>
29. Sherman J, Le C, Lamers V, Eckelman M. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Anesthetic Drugs. *Anesth Analg*. 2012 May;114(5):1086.
30. Talbot A, Holländer HC, Bentzer P. Greenhouse gas impact from medical emissions of halogenated anaesthetic agents: a sales-based estimate. *Lancet Planet Health*. 2025 Mar 1;9(3):e227–35.
31. Gonzalez-Pizarro P, Brazzi L, Koch S, Trinks A, Muret J, Sperna Weiland N, et al. European Society of Anaesthesiology and Intensive Care consensus document on sustainability: 4 scopes to achieve a more sustainable practice. *Eur J Anaesthesiol EJA*. 2024 Apr;41(4):260.
32. White SM, Shelton CL, Gelb AW, Lawson C, McGain F, Muret J, et al. Principles of environmentally-sustainable anaesthesia: a global consensus statement from the World Federation of Societies of Anaesthesiologists. *Anaesthesia*. 2022;77(2):201–12.
33. The Environmental Impact of Inhaled Anesthetics [Internet]. [cited 2025 Feb 20]. Available from: <https://www.asahq.org/about-asa/governance-and-committees/asa-committees/environmental-sustainability/greening-the-operating-room/inhaled-anesthetics>
34. Your anaesthetic and the environment | The Royal College of Anaesthetists [Internet]. [cited

- 2025 Feb 26]. Available from:
<https://www.rcoa.ac.uk/patients/about-anaesthesia-perioperative-care/your-anaesthetic-environment>
35. Gonzalez-Pizarro P, Koch S, Muret J, Trinks A, Brazzi L, Reinoso-Barbero F, et al. Environmental sustainability in the operating room: A worldwide survey among anaesthesiologists. *Eur J Anaesthesiol Intensive Care*. 2023 Aug;2(4):e0025.
 36. Koch S, Samwer C, Rossaint R, Coburn M, Pecher S, Schuster M, et al. Survey regarding routine use of anaesthetic techniques and knowledge of their environmental impact in Germany 2020. *Eur J Anaesthesiol EJA*. 2022 Mar;39(3):282.
 37. McGain F, Bishop JR, Elliot-Jones LM, Story DA, Imberger GL. A survey of the choice of general anaesthetic agents in Australia and New Zealand. *Anaesth Intensive Care*. 2019 May 1;47(3):235–41.
 38. Khan KS, Hayes I, Buggy DJ. Pharmacology of anaesthetic agents II: inhalation anaesthetic agents. *Contin Educ Anaesth Crit Care Pain*. 2014 Jun 1;14(3):106–11.
 39. Jedlicka J, Groene P, Linhart J, Raith E, Mu Stapha DV, Conzen P. [Inhalational anesthetics]. *Anaesthesist*. 2021 Apr;70(4):343–55.
 40. Lugli AK, Yost CS, Kindler CH. Anaesthetic mechanisms: update on the challenge of unravelling the mystery of anaesthesia. *Eur J Anaesthesiol*. 2009 Oct;26(10):807–20.
 41. Clar DT, Patel S, Richards JR. Anesthetic Gases. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 [cited 2025 Mar 27]. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK537013/>
 42. Darwish D, Kumar P, Urs K, Dave S. Inhaled Anesthetics: Beyond the Operating Room. *J Clin Med*. 2024 Jan;13(24):7513.
 43. Kharasch ED, Thummel KE. Identification of Cytochrome P450 2E1 as the Predominant Enzyme Catalyzing Human Liver Microsomal Defluorination of Sevoflurane, Isoflurane, and Methoxyflurane. *Anesthesiology*. 1993 Oct 1;79(4):795.
 44. Bogari AF, Aldakhil IA, Alsuwaidan MF, Alhassani NM, Alroudan DA, Aljuaid OE, et al. Inhalation anaesthetics: types, mechanism of action and adverse effects. *Int J Community Med Public Health*. 2022 Nov 28;9(12):4684–8.
 45. Knuf K, Maani CV. Nitrous Oxide. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 [cited 2025 Mar 27]. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK532922/>
 46. Horn CC, Wallisch WJ, Homanics GE, Williams JP. Pathophysiological and neurochemical mechanisms of postoperative nausea and vomiting. *Eur J Pharmacol*. 2014 Jan 5;722:55–66.
 47. Wu YM, Su YH, Huang SY, Lo PH, Chen JT, Chang HC, et al. Recovery Profiles of Sevoflurane and Desflurane with or without M-Entropy Guidance in Obese Patients: A Randomized Controlled Trial. *J Clin Med*. 2021 Dec 29;11(1):162.
 48. Rübsam ML, Kruse P, Dietzler Y, Kropf M, Bette B, Zarbock A, et al. A call for immediate climate action in anesthesiology: routine use of minimal or metabolic fresh gas flow reduces our ecological footprint. *Can J Anaesth J Can Anesth*. 2023 Mar;70(3):301–12.

49. What Are Greenhouse Gases and Why Do They Matter | NOAA Climate.gov [Internet]. [cited 2025 May 4]. Available from: <https://www.climate.gov/ghg/what-are-greenhouse-gases-and-why-do-they-matter>
50. US EPA O. Understanding Global Warming Potentials [Internet]. 2016 [cited 2025 Feb 14]. Available from: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
51. Andersen MPS, Nielsen OJ, Sherman JD. Assessing the potential climate impact of anaesthetic gases. *Lancet Planet Health*. 2023 Jul 1;7(7):e622–9.
52. Özelsel TJP, Sondekoppam RV, Buro K. The future is now—it's time to rethink the application of the Global Warming Potential to anesthesia. *Can J Anesth Can Anesth*. 2019 Nov 1;66(11):1291–5.
53. Cooper RN, Houghton JT, McCarthy JJ, Metz B. Climate Change 2001: The Scientific Basis. *Foreign Aff*. 2002;81(1):208.
54. Brown AC, Canosa-Mas CE, Parr AD, Pierce JMT, Wayne RP. Tropospheric lifetimes of halogenated anaesthetics. *Nature*. 1989 Oct;341(6243):635–7.
55. Langbein T, Sonntag H, Trapp D, Hoffmann A, Malms W, Röth EP, et al. Volatile anaesthetics and the atmosphere: atmospheric lifetimes and atmospheric effects of halothane, enflurane, isoflurane, desflurane and sevoflurane. *Br J Anaesth*. 1999 Jan;82(1):66–73.
56. Sulbaek Andersen MP, Nielsen OJ, Karpichev B, Wallington TJ, Sander SP. Atmospheric Chemistry of Isoflurane, Desflurane, and Sevoflurane: Kinetics and Mechanisms of Reactions with Chlorine Atoms and OH Radicals and Global Warming Potentials. *J Phys Chem A*. 2012 Jun 21;116(24):5806–20.
57. Ryan SM, Nielsen CJ. Global Warming Potential of Inhaled Anesthetics: Application to Clinical Use. *Anesth Analg*. 2010 Jul;111(1):92.
58. Armour K, Forster P, Storelvmo T, Collins W, Dufresne JL, Frame D, et al. The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. 2021 Dec 1;2021:U13B-07.
59. Laboratory (CSL) NCS. NOAA CSL: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010 [Internet]. [cited 2025 Mar 18]. Available from: <https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2010/twentyquestions/>
60. Campbell M, Pierce JMT. Atmospheric science, anaesthesia, and the environment. *BJA Educ*. 2015 Aug 1;15(4):173–9.
61. Rowland FS. Stratospheric ozone depletion. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 2006 May 29;361(1469):769–90.
62. Ravishankara AR, Daniel JS, Portmann RW. Nitrous oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*. 2009 Oct 2;326(5949):123–5.
63. Hu X, Pierce JT, Taylor T, Morrissey K. The carbon footprint of general anaesthetics: A case study in the UK. *Resour Conserv Recycl*. 2021 Apr 1;167:105411.
64. Deng HB, Li FX, Cai YH, Xu SY. Waste anesthetic gas exposure and strategies for solution. *J Anesth*. 2018 Apr;32(2):269–82.

65. Lucio LMC, Braz MG, do Nascimento Junior P, Braz JRC, Braz LG. [Occupational hazards, DNA damage, and oxidative stress on exposure to waste anesthetic gases]. *Braz J Anesthesiol Elsevier*. 2018;68(1):33–41.
66. Aun AG, Damasceno DC, Sinzato YK, Nogueira FR, Souza KM, Lawi YSA, et al. High anesthetic exposure leads to oxidative damage and gene expression changes in physicians during medical residency: a cohort study. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2023 Jun;30(29):73202–12.
67. Musak L, Smerhovsky Z, Halasova E, Osina O, Letkova L, Vodickova L, et al. Chromosomal damage among medical staff occupationally exposed to volatile anesthetics, antineoplastic drugs, and formaldehyde. *Scand J Work Environ Health*. 2013 Nov;39(6):618–30.
68. Figueiredo DBS, Aun AG, Souza KM, Nishimoto IH, Silva MAP, de Carvalho LR, et al. High anesthetic (isoflurane) indoor pollution is associated with genetic instability, cytotoxicity, and proliferative alterations in professionals working in a veterinary hospital. *Environ Sci Pollut Res*. 2022 Oct 1;29(47):71774–84.
69. Oliveira LA, P El Dib R, Figueiredo DBS, Braz LG, Braz MG. Spontaneous abortion in women occupationally exposed to inhalational anesthetics: a critical systematic review. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2021 Mar;28(9):10436–49.
70. García-Álvarez JM, Escribano-Sánchez G, Osuna E, Molina-Rodríguez A, Díaz-Agea JL, García-Sánchez A. Occupational Exposure to Inhalational Anesthetics and Teratogenic Effects: A Systematic Review. *Healthc Basel Switz*. 2023 Mar 17;11(6):883.
71. Masselink T, Hardinger J, Bowman-Dalley C, O’Guin C, Hendrix K, Crowell N, et al. Certified Registered Nurse Anesthetists’ occupational exposure to inhalational anesthetic agents: a survey of anesthetic gas safety. *BMC Anesthesiol*. 2022 Dec 3;22(1):375.
72. Emara AM, Alrasheedi KA, Aldubayan MA, Alhowail AH, Elgarabawy RM. Effect of inhaled waste anaesthetic gas on blood and liver parameters among hospital staff. *Hum Exp Toxicol*. 2020 Dec;39(12):1585–95.
73. Luo A, Zhang X, Li S, Zhao Y. Sevoflurane addiction due to workplace exposure: A case report and literature review. *Medicine (Baltimore)*. 2018 Sep;97(38):e12454.
74. Dehghani F, Kamalinia M, Omid F, Fallahzadeh RA. Probabilistic health risk assessment of occupational exposure to isoflurane and sevoflurane in the operating room. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2021 Jan 1;207:111270.
75. ANZCA [Internet]. [cited 2025 Feb 26]. Your anaesthetic and the environment. Available from: <https://www.anzca.edu.au/about-us/our-culture/environmental-sustainability/your-anaesthetic-and-the-environment>
76. Devlin-Hegedus JA, McGain F, Harris RD, Sherman JD. Action guidance for addressing pollution from inhalational anaesthetics. *Anaesthesia*. 2022 Sep;77(9):1023–9.
77. Sherman JD, Chesebro BB. Inhaled anaesthesia and analgesia contribute to climate change. *BMJ*. 2022 Jun 8;377:o1301.
78. Vollmer MK, Rhee TS, Rigby M, Hofstetter D, Hill M, Schoenenberger F, et al. Modern inhalation anesthetics: Potent greenhouse gases in the global atmosphere. *Geophys Res Lett*. 2015;42(5):1606–11.

79. Kennedy RR, Hendrickx JF, Feldman JM. There are no dragons: Low-flow anaesthesia with sevoflurane is safe. *Anaesth Intensive Care*. 2019 May;47(3):223–5.
80. Schwiethal A, Treskatsch S, Michael J, Höft M, Spies CD, Koch S. The Power of Education to Reduce the Carbon Footprint of Volatile Anesthetics in Clinical Practice. *Anesth Analg*. 2022 Mar 18;10.1213/ANE.0000000000007375.
81. Bracco D, Bozzer C. The effects of desflurane withdrawal from the hospital: a call for a national ban of desflurane. *Can J Anaesth J Can Anesth*. 2024 Dec;71(12):1778–9.
82. Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014 [Internet]. 2022. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022PC0150>
83. Feldman JM. Managing fresh gas flow to reduce environmental contamination. *Anesth Analg*. 2012 May;114(5):1093–101.
84. Edgington TL, Muco E, Maani CV. Sevoflurane. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 [cited 2025 Mar 27]. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK534781/>
85. Sheffels P, Schroeder JL, Altuntas TG, Liggitt HD, Kharasch ED. Role of cytochrome P4503A in cysteine S-conjugates sulfoxidation and the nephrotoxicity of the sevoflurane degradation product fluoromethyl-2,2-difluoro-1-(trifluoromethyl)vinyl ether (compound A) in rats. *Chem Res Toxicol*. 2004 Sep;17(9):1177–89.
86. Ong Sio LCL, Dela Cruz RGC, Bautista AF. Sevoflurane and renal function: a meta-analysis of randomized trials. *Med Gas Res*. 2017;7(3):186–93.
87. Conley C, Brook K, Louca J, Haber A, Nozari A, Ortega R. Inhalational Induction. *N Engl J Med*. 2022 Sep 8;387(10):e19.
88. Ramaswamy P, Shah A, Kothari R, Schloemerkemper N, Methangkool E, Aleck A, et al. An Accessible Clinical Decision Support System to Curtail Anesthetic Greenhouse Gases in a Large Health Network: Implementation Study. *JMIR Perioper Med*. 2022 Dec 8;5(1):e40831.
89. Nair BG, Peterson GN, Neradilek MB, Newman SF, Huang EY, Schwid HA. Reducing Wastage of Inhalation Anesthetics Using Real-time Decision Support to Notify of Excessive Fresh Gas Flow. *Anesthesiology*. 2013 Apr;118(4):874.
90. Al-Rifai Z, Mulvey D. Principles of total intravenous anaesthesia: basic pharmacokinetics and model descriptions. *BJA Educ*. 2016 Mar 1;16(3):92–7.
91. Johnson KB, Egan TD. In Total Intravenous Anesthesia We Trust: Building Confidence in Total Intravenous Anesthesia Techniques. *Anesth Analg*. 2023 Sep 1;137(3):559–64.
92. Bernat M, Boyer A, Roche M, Richard C, Bouvet L, Remacle A, et al. Reducing the carbon footprint of general anaesthesia: a comparison of total intravenous anaesthesia vs. a mixed anaesthetic strategy in 47,157 adult patients. *Anaesthesia*. 2024 Mar;79(3):309–17.
93. Ahmed MM, Tian C, Lu J, Lee Y. Total Intravenous Anesthesia Versus Inhalation Anesthesia on Postoperative Analgesia and Nausea and Vomiting After Bariatric Surgery: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Asian J Anesthesiol*. 2021 Dec 1;59(4):135–51.

94. Zheng H, Xiao X, Han Y, Wang P, Zang L, Wang L, et al. Research progress of propofol in alleviating cerebral ischemia/reperfusion injury. *Pharmacol Rep PR*. 2024 Oct;76(5):962–80.
95. Wong SSC, Chan WS, Irwin MG, Cheung CW. Total Intravenous Anesthesia (TIVA) With Propofol for Acute Postoperative Pain: A Scoping Review of Randomized Controlled Trials. *Asian J Anesthesiol*. 2020 Sep 1;58(3):79–93.
96. Herzog-Niescery J, Bartz H, Vogelsang H, Bunse J, Maier-Hasselmann A, Bellgardt M, et al. Kinetics of isoflurane and sevoflurane in a unidirectional displacement flow and the relevance to anesthetic gas exposure by operating room personnel. *J Occup Environ Hyg*. 2019 Apr;16(4):294–301.
97. Lahvic N, Liu M. Waste Gas Scavenging System. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 [cited 2025 Apr 13]. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK544254/>
98. Gandhi J, Barker K, Cross S, Goddard A, Vaghela M, Cooper A. Volatile capture technology in sustainable anaesthetic practice: a narrative review. *Anaesthesia*. 2024 Mar;79(3):261–9.
99. Kampman JM, Sperna Weiland NH. Anaesthesia and environment: impact of a green anaesthesia on economics. *Curr Opin Anaesthesiol*. 2023 Apr 1;36(2):188–95.
100. Müller-Wirtz LM, Volk T, Meiser A. Towards sustainability of volatile anaesthetics: capture and beyond. *Br J Anaesth*. 2024 Dec;133(6):1363–6.
101. Hinterberg J, Beffart T, Gabriel A, Holzschneider M, Tartler TM, Schaefer MS, et al. Efficiency of inhaled anaesthetic recapture in clinical practice. *Br J Anaesth*. 2022 Oct;129(4):e79–81.
102. Lu CC, Tsai CS, Hu OYP, Chen RM, Chen TL, Ho ST, et al. Pharmacokinetics of desflurane elimination from respiratory gas and blood during the 20 minutes after cardiac surgery. *J Formos Med Assoc*. 2013 Apr 1;112(4):185–92.
103. Mulier H, Struys MMRF, Vereecke H, Rex S, Teunkens A, Kalmar AF. Efficiency of CONTRAfluran™ in reducing sevoflurane pollution from maintenance anaesthesia in minimal flow end-tidal control mode for laparoscopic surgery: Efficiency of CONTRAfluran™. *Anaesthesia*. 2024 Aug;79(8):849–55.
104. Kalmar AF, Verdonck P, Saxena S, Mulier J. Proper use of CONTRAfluran™ for optimal desorption and reuse of volatile anaesthetics. Comment on *Br J Anaesth* 2022; 129: e79-81. *Br J Anaesth*. 2023 Sep;131(3):e71–2.
105. Slutzman JE, Ciardi FC, Smith SJ, Everett LL. Effectiveness of a waste volatile anaesthetic gas collection and recycling system. *Br J Anaesth*. 2024 Dec 1;133(6):1525–7.
106. Kermad A, Appenzeller M, Morinello E, Schneider SO, Kleinschmidt S, O’Gara B, et al. Reflection Versus Rebreathing for Administration of Sevoflurane During Minor Gynecological Surgery. *Anesth Analg*. 2021 Apr 1;132(4):1042–50.
107. Bomberg H, Volk T, Groesdonk HV, Meiser A. Efficient application of volatile anaesthetics: total rebreathing or specific reflection? *J Clin Monit Comput*. 2018 Aug;32(4):615–22.
108. Jin Z, Piazza O, Ma D, Scarpatti G, De Robertis E. Xenon anesthesia and beyond: pros and cons. *Minerva Anesthesiol*. 2019 Jan;85(1):83–9.

109. Bajaj T, Cascella M, Borger J. Xenon. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 [cited 2025 Apr 15]. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK540997/>
110. Coburn M, Baumert JH, Zühlsdorff A, Hein M, Fries M, Rossaint R. A comparison of waste gas concentrations during xenon or nitrous oxide anaesthesia. *Eur J Anaesthesiol*. 2008 Sep;25(9):748–51.
111. Law LSC, Lo EAG, Gan TJ. Xenon Anesthesia: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Anesth Analg*. 2016 Mar;122(3):678–97.
112. McGuigan S, Abrahams BF, Scott DA. A narrative review of gas separation and conservation technologies during xenon anesthesia. *Med Gas Res*. 2025 Mar 1;15(1):93–100.
113. Park EJ, Bae J, Kim J, Yoon JU, Do W, Yoon JP, et al. Reducing the carbon footprint of operating rooms through education on the effects of inhalation anesthetics on global warming: A retrospective study. *Medicine (Baltimore)*. 2024 Mar 1;103(9):e37256.
114. Wyssusek K, Chan KL, Eames G, Whately Y. Greenhouse gas reduction in anaesthesia practice: a departmental environmental strategy. *BMJ Open Qual*. 2022 Aug;11(3):e001867.
115. Zuegge KL, Bunsen SK, Volz LM, Stromich AK, Ward RC, King AR, et al. Provider Education and Vaporizer Labeling Lead to Reduced Anesthetic Agent Purchasing With Cost Savings and Reduced Greenhouse Gas Emissions. *Anesth Analg*. 2019 Jun;128(6):e97–9.
116. Burrell RH. Primum non nocere: greening anaesthesia. *Anaesth Intensive Care*. 2018 Nov;46(6):630–1.
117. Glenski TA, Levine L. The implementation of low-flow anesthesia at a tertiary pediatric center: A quality improvement initiative. *Paediatr Anaesth*. 2020 Oct;30(10):1139–45.
118. Hansen EE, Chiem JL, Richter-Foss K, Zha Y, Cockrell HC, Greenberg SLM, et al. Project SPRUCE: Saving Our Planet by Reducing Carbon Emissions, a Pediatric Anesthesia Sustainability Quality Improvement Initiative. *Anesth Analg*. 2023 Jul 1;137(1):98–107.
119. Chambrin C, de Souza S, Gariel C, Chassard D, Bouvet L. Association Between Anesthesia Provider Education and Carbon Footprint Related to the Use of Inhaled Halogenated Anesthetics. *Anesth Analg*. 2023 Jan 1;136(1):101–10.
120. Mychaskiw Ii G. Anesthesia and global warming: the real hazards of theoretic science. *Med Gas Res*. 2012 Mar 25;2(1):7.
121. Mortimer F, Isherwood J, Wilkinson A, Vaux E. Sustainability in quality improvement: redefining value. *Future Healthc J*. 2018 Jun;5(2):88–93.
122. Cappellini I, Schirru E. Bridging Anesthesia and Sustainability: A Special Article for a Path towards Eco-Conscious Practice. *Anesth Res*. 2024 Dec;1(3):168–79.

14. PRIEDAI

14.1. Lentelė, apibūdinanti kokybės gerinimo intervencijas gydymo įstaigose

4 lentelė. Apibūdinamos intervencijos gydymo įstaigose ir su jų pagalba pasiekti rezultatai. $CO_2e - CO_2$ emisijos; $CDE_{100} - CO_2$ ekvivalentai; CDSS – clinical decision support systems. PDSA – (plan-do-study-act); TIVA – totalioji intraveninė anestezija; Parengta pagal Park et al. 2024 (113), Schwiethal et al., 2025 (80), Wyssusek et al., 2022 (114), Zuegge et al., 2019 (115), Chambrin et al., 2023 (119), Bracco and Bozzer, 2024 (81), Glenski and Levine, 2020 (117), Burrell, 2018 (116), Hansen et al (118).

Autoriai, metai	Šalis / Institucija	Intervencijos apibūdinimas	Tikslas	Rezultatas	Pastabos
Burrell, 2018	Naujoji Zelandija / Middlemore ir Manukau	2012–2017 m. vykdyta kompleksinė intervencija. Edukacija apie inhaliacinių anestetikų CO_2e , dujų srauto parametrus, anestezijos aparatų naudojimą. Alternatyvių anestezijos būdų skatinimas. Matuojamos mėnesinės CO_2e , siunčiami el. laiškai personalui apie tvarumo intervencijų progresą. Darbuotojai skatinami reikšti savo nuomonę internetiniame forume.	Sumažinti desflurano naudojimą ir CO_2e .	Pasiekta $CO_2e < 100$ g/min taikant bendrąją neįtampą. Atsisakyta desflurano klinikinėje praktikoje. Metinės CO_2e sumažintos 600t.	Iniciatyva rėmėsi kolektyvine motyvacija ir savanorišku dalyvavimu, be papildomų technologinių sprendimų.
Zuegge et al., 2019	JAV / University of Wisconsin Health	Ženklinanti desflurano garintuvai, edukacinės QR nuorodos, asmeniniai pokalbiai, „green team“ įtraukimas.	Sumažinti desflurano naudojimą ir CO_2e .	Desflurano sunaudojimas sumažėjo 55 %. CO_2e /atv. sumažėja 64 %. \$25k/mėn. mažesnės išlaidos.	Specialistai labiau linkę keisti savo elgesį atsižvelgę į ekologinius, o ne į finansinius aspektus.
Glenski & Levine, 2020	JAV / Children's Mercy Hospital	2017–2018 m. vykdyta kompleksinė intervencija. Įgyvendintas mažo srauto (<1 L/min) režimas per PDSA ciklus, naudotas „Low Flow Wizard“, vykdyti komandos susitikimai, kurių metu aptartas progresas.	Sevoflurano naudojimo sumažinimas 20 % vienai procedūrai per metus.	Sevoflurano sunaudojimas sumažėjo 20 %. Metinės CO_2e sumažintos 28,5 t.	Pritaikyta be dažnesnio TIVA naudojimo.
Chambrin et al., 2022	Prancūzija / Hospices Civils de Lyon	2019–2021 m. vykdyta kompleksinė intervencija. Suburtos tvarios anestezijos grupės, platinama informacija el. paštu ir susitikimų metu, atliktas klausimynas dėl žinių apie inhaliacinius anestetikus.	Mažinti desflurano sunaudojimą ir CO_2e .	CDE_{100} sumažėjo nuo 66,2 kg iki 6,5 kg per vieną bendrąją neįtampą. Metinės CO_2e sumažintos 3800 t.	Sevoflurano naudojimas išaugo, propofolio nesikeitė; sutaupyta ~200 000 €.
Wyssusek et al., 2022	Australija / Royal Brisbane and Women's Hospital	2020–2021 m. vykdyta kompleksinė intervencija. Skatintas dujų srauto mažinimas, skatinta TIVA ir regioninė anestezija, pašalinti desflurano garintuvai, informaciniai plakatai, mokymai, žodinis palaikymas.	Mažinti CO_2e ir išlaidas, eliminuoti desfluraną.	Desflurano atsargos sumažintos 95,6 %. CO_2e sumažintos 87,9 %. Išlaidos -58,3 %.	Desfluranas sudarė 83 % viso emisijų kiekio.
Hansen et al., 2023	JAV / Seattle Children's Hospital ir ASC	2017–2022 m. vykdyta kompleksinė intervencija. Desflurano ir N_2O pašalinimas, skatintas dujų srauto mažinimas, naudotas CDSS su žinutėmis apie CO_2 , personalizuoti grįžtamasis ryšys.	Sumažinti CO_2 50 %, pasiekti <0.1 kg CO_2e /min.	CO_2e sumažėjo 87 %. Išlaidos sumažėjo \$140k/met. .	Vienas išsamiausių tyrimų apie kokybės gerinimą.
Park et al., 2024	Pietų Korėja / Pusan National University Hospitals	2 mėn. Intervencija 2022 m. Vienkartinis edukacinis pokalbis. 30 min. trukmės pristatymas apie inhaliacinių anestetikų poveikį klimatui. Vėliau analizuotas inhaliacinių anestetikų sunaudojimas.	Mažinti desflurano naudojimą, CO_2e ir išlaidas.	Desflurano naudojimas sumažėjo 50 %. Vidutinės CO_2e operacijos metu sumažėjo nuo 186 kg iki 127 kg. Kaina sumažėjo \$2 per operaciją.	Pokytis reikšmingas, bet trumpalaikis; Svarbi tęstinė edukacija.
Bracco & Bozzer, 2024	Kanada / Montreal General Hospital, McGill University	Top-down sprendimas, pasitarus su įstaigos anesteziologais. Desflurano pašalinimas iš ligoninės vaistų sąrašo ir fizinis garintuvų pašalinimas.	Sumažinti CO_2 pėdsaką.	CO_2e sumažėjo 66 %.	Desfluranas naudotas tik 6 % viso bendrosios neįtampos laiko, bet sudarė 57 % emisijų.
Schwiethal et al., 2025	Vokietija / Charité – Universitätsmedizin Berlin	2015–2023 vykdyta kompleksinė intervencija. Paskaitos, griežti apribojimai desfluranui, darbuotojų mokymai, mokslinių darbų rengimas.	CO_2 emisijų ir išlaidų mažinimas.	CO_2e sumažėjo ~90 %. Išlaidos sumažėjo nuo €541k iki €282k.	Efektyviausias yra top-down intervencijos.