



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

GEODEZIJOS IR KADASTRO KATEDRA

Andrėj Kozliuk

**VANDENS CHLOROFILO ĮVERTINIMAS TAIKANT NUOTOLINIUS
TYRIMŲ METODUS**

**ESTIMATION OF WATER CHLOROPHYLL USING REMOTE SENSING
METHODS**

Baigiamasis magistro darbas

Geografinių informacinių sistemų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX036

Matavimų inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2025

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

GEODEZIJOS IR KADASTRO KATEDRA

Andrėj Kozliuk

**VANDENS CHLOROFILO ĮVERTINIMAS TAIKANT NUOTOLINIUS
TYRIMŲ METODUS**

**ESTIMATION OF WATER CHLOROPHYLL USING REMOTE SENSING
METHODS**

Baigiamasis magistro darbas

Geografinių sistemų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX036

Matavimų inžinerijos studijų kryptis

Vadovė

Prof. dr. Jūratė Sužiedelytė Visockienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Lietuvių kalbos konsultantė

Dr. Vitalija Karaciejūtė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vilnius, 2025

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
GEODEZIJOS IR KADASTRO KATEDRA

Studijų kryptis: Matavimų inžinerija

Studijų programa: Geografinės informacinės sistemos, valstybinis kodas 6211EX036

Specializacija: Geografinės informacinės sistemos

TVIRTINU

Katedros vedėjas

Jūratė Sužiedelytė Visockienė

2025-05-17

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Nr. GISfm-23-10657

Vilnius

Studentas (-ė): Andrėj Kozliuk

Baigiamojo darbo tema: Vandens chlorofilo įvertinimas taikant nuotolinius tyrimų metodus

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Duomenys: Darbe bus naudojami palydoviniai Landsat, Sentinel ir lauko (in situ) chlorofilo (Chl-a) koncentracijos vandens telkiniuose matavimų duomenys.

Aiškinamasis aprašas:

Tyrimo tikslas – įvertinti Chl-a koncentracijos nustatymo galimybes vandens telkiniuose naudojant nuotolinius stebėjimo metodus, lyginant juos su tiesioginiais in situ matavimais.

Tyrimo uždaviniai:

1. Surinkti ir apdoroti iš monitoringo tiesioginius Chl-a koncentracijos duomenis bei parinkti palydovinius duomenis tyrimui;
2. Atlikti surinktų duomenų analizę naudojantis GIS priemonėmis;
3. Palyginti gautus iš nuotolinių duomenų Chl-a koncentracijos rezultatus su tiesioginių matavimų rezultatais;
4. Parengti rekomendacijas dėl nuotolinių metodų integravimo vandens kokybės stebėjimo praktikoje.

Darbo naujumas – pasiūlyta metodika papildanti tiesioginius chlorofilo matavimus vandens telkiniuose taikant palydovinius duomenis.

Vadovas profesorius Jūratė Sužiedelytė Visockienė

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Aplinkos inžinerijos fakultetas
Geodezijos ir kadastro katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-....-....

Antrosios pakopos studijų **Geografinių informacinių sistemų** programos magistro baigiamasis darbas (geografinės informacinės sistemos)

Pavadinimas **Vandens chlorofilo įvertinimas taikant nuotolinius tyrimų metodus**

Autorius **Andrėj Kozliuk**

Vadovas **Jūratė Sužiedelytė Visockienė**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe analizuojamos galimybės įvertinti vandens telkinių chlorofilo-a (Chl-a) koncentraciją taikant nuotolinius tyrimų metodus, integruojant palydovinius duomenis ir GIS priemones. Tyrimo tikslas – įvertinti, kiek tiksliai palydoviniai Chl-a koncentracijos įverčiai atitinka in situ matavimus, bei ar lokalizuoti Gitelsono modelio koeficientai pagerina rezultatų tikslumą Lietuvos sąlygomis. Atlikta Sentinel-2 ir Landsat 8–9 palydovinių vaizdų analizė, parinkti mažo debesuotumo laikotarpiai ir palyginti skirtingais metodais gauti Chl-a įverčiai su tiesioginiais matavimais. Duomenys apdoroti naudojant GIS priemones, leidusias tiksliai nustatyti vandens telkinių ribas, pritaikyti regioninius koeficientus ir vizualizuoti rezultatus. Nustatyta, kad lokalizuoti koeficientai ($a = 2,76$; $b = 12,97$) reikšmingai sumažina nuokrypius, ypač Sentinel-2 duomenyse, tačiau ne visose vietovėse pasiektas pakankamas tikslumas, kad būtų galima taikyti praktikoje be papildomo modelio tikslinimo. Nuotoliniai metodai gali būti naudingi kaip papildoma priemonė bendram vandens kokybės vaizdui formuoti, ypač kai būtina greitai stebėti plačias teritorijas. Pateiktos išvados ir rekomendacijos dėl nuotolinių tyrimų integravimo į vandens telkinių stebėsenos praktiką.

Darbą sudaro penkios dalys: įvadas, teorinė dalis, tyrimo metodika, tyrimo rezultatai ir išvados.

Darbo apimtis – 46 p. teksto be priedų, 20 iliustracijų, 9 lentelės, 18 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: chlorofilas-a, nuotoliniai tyrimai, palydoviniai duomenys, GIS, Sentinel, Landsat, vandens kokybė, lokalizuoti koeficientai, spektrinės juostos, Gitelson.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Environmental Engineering
Department of Geodesy and Cadastre

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-....-....

Master Degree Studies **Geographic Information Systems** study programme Master Graduation Thesis (Geographic Information Systems)

Title **Estimation of Water Chlorophyll Using Remote Sensing Methods**

Author **Andrėj Kozliuk**

Academic supervisor **Jūratė Sužiedelytė Visockienė**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

This Master's thesis analyses the possibilities of assessing chlorophyll-a (Chl-a) concentration in inland water bodies using remote sensing methods, integrating satellite data and GIS tools. The aim of the study is to evaluate how accurately satellite-derived Chl-a estimates correspond to in situ measurements, and whether localized Gitelson model coefficients improve the accuracy of results under Lithuanian conditions. An analysis of Sentinel-2 and Landsat 8–9 satellite images was carried out, selecting low-cloud-cover periods and comparing Chl-a values obtained using different methods with direct measurements. The data were processed using GIS tools, which allowed for precise delineation of waterbody boundaries, the application of regional coefficients, and visualization of the results. It was found that localized coefficients ($a = 2.76$; $b = 12.97$) significantly reduce discrepancies, especially in Sentinel-2 data, although in some areas the accuracy was still insufficient for practical application without further model refinement. Remote sensing methods can serve as a supplementary tool for forming a general picture of water quality, particularly when rapid monitoring over large areas is needed. The paper presents conclusions and recommendations for integrating remote sensing methods into water quality monitoring practice.

The thesis consists of five parts: introduction, theoretical background, research methodology, research results, and conclusions.

The total volume of the thesis – 46 pages of text excluding appendices, 20 illustrations, 9 tables, and 18 references. Appendices are attached separately.

Keywords: chlorophyll-a, remote sensing, satellite data, GIS, Sentinel, Landsat, water quality, localized coefficients, spectral bands, Gitelson

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	7
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	8
PRIEDŲ SĄRAŠAS.....	9
ĮVADAS.....	10
1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA.....	11
1.1. Fitoplanktono funkcinės ir morfologinės savybės.....	12
1.2. Vandens telkinių būklės stebėjimas.....	13
1.2.1. Tiesioginis matavimas (<i>in situ</i>)	14
1.2.2. Nuotoliniai tyrimai	17
2. METODOLOGIJA: VANDENS CHLOROFILO ĮVERTINIMAS TAIKANT TIESIOGINIUS MATAVIMUS IR NUOTOLINIUS TYRIMŲ METODUS	22
2.1. Tiesioginiai matavimai	22
2.2. Nuotolinis tyrimų metodas	27
3. VANDENS CHLOROFILO ĮVERTINIMO TAIKANT NUOTOLINIUS TYRIMŲ METODUS DUOMENŲ TIKSLUMAS IR ANALIZĖ	34
3.1. Rezultatų palyginimas	34
IŠVADOS.....	44
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	45
PRIEDAI	47

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Vandens kokybei vertinti dažniausiai naudojami palydovų jutikliai (šaltinis: Kilpys ir kt., 2021)	19
1.2 lentelė. <i>Landsat</i> ir <i>Sentinel</i> palydovų charakteristikos.....	20
2.1 lentelė. 2020–2023 metų <i>in situ</i> matavimų monitoringo rezultatų ištrauka	23
2.2 lentelė. 2020–2023 metų tyrimų skaičius pagal mėnesius, vnt.	24
2.3 lentelė. 2020–2023 metų vidutinė išmatuota <i>Chl-a</i> koncentracija pagal mėnesius visuose vandens telkiniuose, mg/m ³	25
2.4 lentelė. <i>Chl-a</i> koncentracijos intervalai pagal eutrofikacijos lygį.....	30
2.5 lentelė. <i>In situ</i> ir palydovinių duomenų <i>Chl-a</i> koncentracijos rezultatai	32
3.1 lentelė. Gautų palydovinių (Gitelsono su $a=21,5$ ir $b=1,7$ koeficientais) duomenų palyginimas su <i>in situ</i>	34
3.2 lentelė. <i>In situ</i> ir palydovinių duomenų <i>Chl-a</i> koncentracijos rezultatai (su perskaičiuotais koeficientais)	38

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Panardinamasis mėginių jutiklis (šaltinis: Measurement and Control, 2025)	15
1.2 pav. YSI 6025 jutiklis (šaltinis: YSI Incorporated, 2025)	16
1.3 pav. Chlorofilo jutiklio diagrama (šaltinis: The Basics of Chlorophyll Measurement. A xylem brand, 2025)	16
1.4 pav. <i>Chl-a</i> koncentracijos įvertinimo Pietų Lietuvos ežeruose pagal <i>Sentinel 2 MSI B4</i> ir <i>B5</i> kanalų duomenis pavyzdys (šaltinis: Kilpys ir kt., 2021)	19
2.1 pav. Technologinė darbų schema	22
2.2 pav. Lauko matavimų atvaizdavimas <i>QGIS</i> programos projekte	24
2.3 pav. 2020–2023 metų <i>in situ</i> tyrimų skaičius pagal mėnesius	25
2.4 pav. 2020–2023 metų vidutinė išmatuota <i>Chl-a</i> koncentracija pagal mėnesius visuose vandens telkiniuose, mg/m ³	26
2.5 pav. <i>QGIS</i> papildinys	27
2.6 pav. <i>Chl-a</i> koncentracijos intervalai parengtame <i>QGIS</i> projekte	30
2.7 pav. Gitelsono algoritmo taikymo rezultato pavyzdys: <i>Chl-a</i> koncentracijos erdvinis pasiskirstymas 2023 m. rugsėjo 7 d. (<i>Landsat 8–9 OLI_TIRS C2 L2</i> duomenys)	31
2.8 pav. Nuotolinio stebėjimo pagrindu apskaičiuota <i>Chl-a</i> koncentracija Verpio ežere	32
3.1 pav. Vandens telkinių <i>Chl-a</i> koncentracijų skirtumai: <i>in situ</i> ir <i>Landsat</i> (Gitelsono $a=21,5$; $b=1,7$)	35
3.2 pav. Vandens telkinių <i>Chl-a</i> koncentracijų skirtumai: <i>in situ</i> ir <i>Sentinel</i> (Gitelsono $a=21,5$; $b=1,7$)	36
3.3 pav. <i>Chl-a</i> koncentracijų palyginimas tarp <i>in situ</i> ir palydovinių (<i>Landsat</i> , <i>Sentinel</i>) duomenų (Gitelsono $a=21,5$; $b=1,7$)	37
3.4 pav. Vandens telkinių <i>Chl-a</i> koncentracijų skirtumai: <i>in situ</i> ir <i>Landsat</i> (Gitelsono $a=2,76$; $b=12,97$) ..	40
3.5 pav. Vandens telkinių <i>Chl-a</i> koncentracijų skirtumai: <i>in situ</i> ir <i>Sentinel</i> (Gitelsono $a=2,76$; $b=12,97$) ..	41
3.6 pav. Debesuotumo poveikio pavyzdys nuotoliniam <i>Chl-a</i> koncentracijos įvertinimui	42
3.7 pav. Pakrančių zonos galimas poveikis nuotoliniam <i>Chl-a</i> koncentracijos įvertinimui	42
3.8 pav. <i>In situ</i> ir palydovinių (<i>Landsat</i> , <i>Sentinel</i>) <i>Chl-a</i> koncentracijos įverčių palyginimas naudojant pradinius ir lokalizuotus Gitelsono koeficientus	43

PRIEDŲ SĄRAŠAS

1 priedas. <i>Chl-a</i> koncentracijos (pagal pradinis koeficientus) erdvinis pasiskirstymas 2023 m. rugpjūčio 12 d. (<i>Sentinel-2 MSI L2A</i> duomenys)	47
2 priedas. <i>Chl-a</i> koncentracijos (pagal pradinis koeficientus) erdvinis pasiskirstymas 2023 m. rugpjūčio 5 d. (<i>Landsat 8-9 OLI_TIRS C2 L2</i> duomenys)	48
3 priedas. <i>Chl-a</i> koncentracijos (pagal lokalizuotus koeficientus) erdvinis pasiskirstymas 2023 m. rugpjūčio 12 d. (<i>Sentinel-2 MSI L2A</i> duomenys)	49
4 priedas. <i>Chl-a</i> koncentracijos (pagal lokalizuotus koeficientus) erdvinis pasiskirstymas 2023 m. rugpjūčio 5 d. (<i>Landsat 8-9 OLI_TIRS C2 L2</i> duomenys)	50
5 priedas. <i>Chl-a</i> koncentracijos (pagal lokalizuotus koeficientus) erdvinis pasiskirstymas 2022 m. rugpjūčio 24 d. (<i>Landsat 8-9 OLI_TIRS C2 L2</i> duomenys)	51
6 priedas. <i>Chl-a</i> koncentracijos (pagal pradinis koeficientus) erdvinis pasiskirstymas 2022 m. rugpjūčio 24 d. (<i>Landsat 8-9 OLI_TIRS C2 L2</i> duomenys)	52

IVADAS

Paviršinių vandens telkinių stebėsena yra viena iš kertinių šiuolaikinės aplinkos apsaugos ir darniojo išteklių valdymo sričių. Nors gėlavandeniai telkiniai dengia tik nedidelę Žemės paviršiaus dalį, jie atlieka kritinį vaidmenį užtikrindami biologinę įvairovę, vandens tiekimą bei kitas esmines ekosistemines funkcijas. Pastaraisiais dešimtmečiais intensyvi urbanizacija, žemės ūkio plėtra ir klimato kaita daro vis didesnę poveikį šių telkinių būklei, skatinant hidrologinius pokyčius, eutrofikaciją ir ekosisteminių funkcijų nykimą.

Vandens kokybės vertinimui itin svarbus fitoplanktono biomasės indikatorius – chlorofilo-*a* (*Chl-a*) koncentracija. Šis parametras atspindi tiek bendrą vandens trofiškumo lygį, tiek leidžia anksti nustatyti ekologinių procesų, tokių kaip eutrofikacija, pradžią. Tradiciniai *Chl-a* nustatymo metodai, grindžiami tiesioginiais (*in situ*) matavimais, pasižymi dideliu tikslumu, tačiau reikalauja daug laiko, žmogiškųjų resursų ir finansinių sąnaudų. Atsižvelgiant į šiuos iššūkius, vis didesnę dėmesį pritraukia nuotolinio stebėjimo technologijos, leidžiančios ekonomiškai efektyviai analizuoti didelius vandens plotus.

Nuotolinio stebėjimo duomenys, surinkti naudojant palydovinius multispektrinius jutiklius, suteikia galimybę ne tik nustatyti *Chl-a* koncentracijos pasiskirstymą, bet ir stebėti šių parametru dinamiką laiko perspektyvoje. Vis dėlto, šių metodų taikymas reikalauja spręsti tam tikrus iššūkius, susijusius su duomenų kokybe, atmosferos korekcijos būtinybe ir skirtingų jutiklių savybėmis.

Tyrimo objektas – paviršinių vandens telkinių *Chl-a* koncentracija.

Tyrimo tikslas – įvertinti *Chl-a* koncentracijos nustatymo galimybes vandens telkiniuose naudojant nuotolinius stebėjimo metodus, lyginant juos su tiesioginiais *in situ* matavimais.

Tyrimo uždaviniai:

1. Surinkti ir apdoroti iš monitoringo tiesioginius *Chl-a* koncentracijos duomenis bei parinkti palydovinius duomenis tyrimui.
2. Atlikti surinktų duomenų analizę naudojantis GIS priemonėmis.
3. Palyginti gautus iš nuotolinių duomenų *Chl-a* koncentracijos rezultatus su tiesioginių matavimų rezultatais.
4. Parengti rekomendacijas dėl nuotolinių metodų integravimo vandens kokybės stebėjimo praktikoje.

Darbo naujumas – pasiūlyta metodika, papildanti tiesioginius chlorofilo matavimus vandens telkiniuose taikant palydovinius duomenis.

1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA

Žemyninių vandens ekosistemų reikšmė sausumos aplinkai ir žmogaus veiklai yra fundamentali, nes jos užtikrina gyvybinių procesų palaikymą. Gėlavandeniai ežerai ir upės kartu sudaro 0,009 % viso Žemės vandens kiekio ir dengia apie 2,5 milijono km² ploto. Ežerai, kaip jautrūs aplinkos pokyčiams vandens telkiniai, buvo pripažinti svarbiais klimato kaitos reguliatoriais (Rodriguez-Lopez, 2020). Nepaisant to, kad jų plotas sudaro mažiau nei 1 % Žemės paviršiaus, ežerai atlieka esmines ekosistemines funkcijas, tokias kaip geriamojo vandens tiekimas, buveinių teikimas biologinei įvairovei bei rekreacinių galimybių užtikrinimas, kurie prisideda prie tvaraus vystymosi tikslų įgyvendinimo (Free ir kt., 2022). Istoriskai žmonių gyvenvietės būdavo kuriamos šalia gėlo vandens telkinių, tačiau spartus urbanizacijos ir gyventojų skaičiaus augimas nulėmė hidrologinių procesų sutrikimus, eutrofikaciją ir ekosisteminių paslaugų nykimą. Rūšių nykimo tempai gėluose vandenyse gali būti iki penkių kartų spartesni nei sausumoje, o pagrindiniais šio proceso veiksniais įvardijamos invazinės rūšys, intensyvus žemės ūkis ir klimato kaita (Free ir kt., 2022).

Vanduo yra būtinas visų gyvybės formų egzistavimui, nes tirpios medžiagos iš vandens pasisavinamos ir panaudojamos organizmų fiziologiniams procesams. Žmogaus organizmas be vandens gali išgyventi tik keletą dienų, todėl užtikrinti kokybiško geriamojo vandens prieinamumą yra vienas svarbiausių globalių iššūkių. Netiesiogiai vandens ekosistemų būklė taip pat lemia daugelį žmogaus gerovei svarbių aspektų – jos tiekia maistą, aprūpina vandenį žemės ūkiui ir pramonei, prisideda prie kraštovaizdžio estetinio vertinimo bei plečia rekreacines galimybes (Kilpys ir kt., 2021). Pastaraisiais dešimtmečiais vandens kokybė visame pasaulyje blogėja, ypač sparčiai augant gyventojų skaičiui ir vystantis ekonomikai besivystančiose šalyse. Vandens kokybės prastėjimas kelia grėsmę tiek žmonių sveikatai, tiek vandens ekosistemų stabilumui, todėl svarbu vykdyti nuolatinę vandens telkinių stebėseną (Dzurume ir kt., 2022). Šiuolaikinė stebėseną vis dažniau remiasi pažangiomis technologijomis, tarp jų – *in situ* matavimais ir nuotolinio stebėjimo algoritmų taikymu (Grosz ir kt., 2024).

Viena iš pagrindinių vandens kokybės pokyčių priežasčių yra klimato šilimas. Modeliuojama, kad XXI amžiuje Europoje, ypač pietiniuose regionuose, ekstremalių karščių atvejų dažnis reikšmingai išaugs, tikimybė tam viršija 90 % (Free ir kt., 2022). Temperatūros kilimas glaudžiai siejamas su fitoplanktono bendrųjų dinamika, nes aukštesnė temperatūra skatina jų produktyvumą. Siekiant geriau suprasti fitoplanktono reakcijas į klimato ir aplinkos pokyčius, būtina analizuoti jų biomasės erdvinį ir laikinį pasiskirstymą bei fenologinius parametrus (Ryu ir kt., 2022). Fitoplanktonas sudaro pagrindinę vandens maisto tinklo bazę, todėl jų ekologinė reikšmė yra išskirtinė. Didėjantis poreikis gauti tikslius *Chl-a* duomenis įvairiais erdviniais ir laikiniais masteliais paskatino spartesnį nuotolinio stebėjimo metodų plėtojimą (Soomets ir kt., 2022). *Chl-a*, kaip

pagrindinis fitoplanktono pigmentas, dažnai naudojamas kaip biomasės rodiklis, todėl jo koncentracija yra vienas iš dažniausiai vertinamų vandens kokybės parametrų (Soomets ir kt., 2022). *Chl-a* koncentracijos analizė yra plačiai taikoma tiriant fitoplanktono dinamiką bei vertinant pirminę produkciją įvairiose vandens ekosistemose (Ryu ir kt., 2022).

1.1. Fitoplanktono funkcinės ir morfologinės savybės

Fitoplanktonas (iš senovės graikų kalbos: φυτόν – „augalas“, πλαγκτός – „klajūnas“) apima autotrofinius organizmus, priklausančius planktono bendrijoms. Šie mikroorganizmai sudaro pirmąją vandens ekosistemų mitybinės grandinės pakopą, kuria minta zooplanktonas, žuvų jaunikliai bei pačios žuvis. Fitoplanktonas pasižymi dideliu jautrumu aplinkos pokyčiams, ypač vandens cheminės sudėties ir maistinių medžiagų prieinamumo svyravimams.

Tai itin įvairialypė organizmų grupė, kurią sudaro vienaląsčiai dumbliai ir melsvabakterės. Ši mikroorganizmų įvairovė pasireiškia skirtingomis morfologinėmis ir funkcinėmis savybėmis, nulemiančiomis ekologines strategijas, prisitaikymą prie įvairių aplinkos sąlygų bei reikšmę vandens telkinių ekosistemų funkcionavimui. Būtent dėl šių savybių fitoplanktonas dažnai pasirenkamas kaip modelinis organizmas tyrimuose, susijusiuose su ekologinių nišų diferenciacija, bendrijų struktūros formavimusi bei biogeocheminių ciklų dinamika (Litchman ir Klausmeier, 2008). Fitoplanktono rūšys dažnai skirstomos į funkcinės grupes, tokias kaip diatomėjos, žaliadumbliai ar melsvabakterės, atsižvelgiant į jų morfologinius ir fiziologinius požymius. Ši klasifikacija leidžia apibendrinti bendrijų struktūrą dideliu masteliu ir yra itin naudinga ekologiniuose modeliuose.

Pagrindiniai funkciniai fitoplanktono požymiai apima gebėjimą įsisavinti išteklius, gynybos mechanizmus, kūno dydžio ypatybes, temperatūrinį jautrumą bei augimo ir dauginimosi strategijas (Litchman ir Klausmeier, 2008).

Vienas svarbiausių veiksnių, lemiančių fitoplanktono konkurencingumą, yra gebėjimas efektyviai pasisavinti pagrindinius išteklius: šviesą, azotą, fosforą ir geležį. Šis gebėjimas vertinamas pagal vadinamąją reikšmę (R), kuri nurodo minimalią išteklių koncentraciją, reikalingą rūšiai išlikti. Rūšys, pasižyminti mažesne R , paprastai turi pranašumą konkurencinėje kovoje. Ši pranašumą dažnai lemia fotopigmentų kiekis, ląstelės membranų savybės, ląstelės dydis bei paviršiaus ir tūrio santykis (S/V). Didesnis S/V santykis, būdingas mažesniems organizmams, leidžia efektyviau įsisavinti tirpias maistines medžiagas (Litchman ir Klausmeier, 2008).

Fitoplanktono rūšys išvystė įvairius apsauginius mechanizmus, kurie padeda išvengti plėšrūnų poveikio. Tai apima morfologines adaptacijas, tokias kaip šarvai ar erškėčiai, toksinių medžiagų sintezę, kolonijų formavimąsi bei aktyvų judėjimą. Tačiau šios apsauginės strategijos susijusios su

išlaidomis – pavyzdžiui, didesnės ar labiau apsaugotos ląstelės linkusios greičiau grimzti, o toksinų gamyba reikalauja papildomos energijos ir išteklių (Litchman ir Klausmeier, 2008).

Fitoplanktono ląstelės dydis yra vienas svarbiausių ekologinių parametru, darančių įtaką išteklių įsisavinimui, augimo greičiui, plėšrūnų spaudimui, grimzdimo greičiui ir difuziniams apribojimams. Mažesni organizmai paprastai pasižymi spartesniu augimu ir efektyvesniu medžiagų pasisavinimu dėl didesnio paviršiaus ir tūrio santykio, tuo tarpu didesni organizmai dažniau yra atsparesni ganytojams, tačiau susiduria su didesniu energijos poreikiu ir ribotu maisto medžiagų įsisavinimu (Litchman ir Klausmeier, 2008).

Kiekviena fitoplanktono rūšis turi tam tikrą optimalią temperatūrą, kurioje jos augimo greitis yra didžiausias. Temperatūra veikia įvairius fiziologinius procesus, tokius kaip fermentų aktyvumas, fotosintezės efektyvumas bei membranų vientisumas. Todėl temperatūrinis jautrumas laikomas svarbia ekologine savybe, galinčia lemti rūšių dominavimą ir bendrijų struktūrinius pokyčius klimato kaitos sąlygomis (Litchman ir Klausmeier, 2008).

Fitoplanktono augimo greitis ir dauginimosi strategijos glaudžiai susijusios su aplinkos dinamiškumu. Greitai augančios rūšys dažniausiai vyrauja dinamiškose sistemose, kuriose sąlygos greitai keičiasi ir reikalingas spartus prisitaikymas. Tuo tarpu lėtai augančios rūšys dažniau būna pranašesnės stabiliose ekosistemose, ypač jeigu pasižymi išskirtinėmis gynybinėmis savybėmis ar gebėjimu efektyviai naudoti ribotus išteklius (Litchman ir Klausmeier, 2008).

Fitoplanktonas yra pagrindinis organinės medžiagos gamintojas vandens telkiniuose. Jo biomasės augimo intensyvumas tiesiogiai lemia vandens telkinių biologinį produktyvumą. Vienos ar kitos dumblių grupės dominavimas planktono bendrijose atspindi konkrečias telkinio aplinkos sąlygas ir leidžia vertinti vandens kokybę.

1.2. Vandens telkinių būklės stebėjimas

Paviršinių vandens telkinių būklės analizė yra esminė vandens išteklių apsaugos ir darnaus valdymo dalis. Pagrindinis stebėsenos tikslas – laiku aptikti ekologinius pokyčius, identifikuoti taršos šaltinius ir užtikrinti ilgalaikį vandens telkinių ekosistemų stabilumą. Šiam tikslui pasiekti taikoma įvairių metodų visuma, apimanti biologinius indikatorius, fizinius ir cheminius parametrus bei modernius matavimo sprendimus.

Biologinių kokybės elementų stebėseną leidžia įvertinti gyvųjų organizmų reakcijas į aplinkos pokyčius, ypač tuos, kuriuos lemia antropogeninė veikla. Stebėjimo objektai – jautrios floros ir faunos grupės, tokios kaip fitoplanktonas, makrozoobentosas (dugno bestuburiai), makrofitai ir žuvis (ichtiofauna), veikiančios kaip ekosistemų sveikatos indikatoriai. Rūšinės sudėties įvairovė bei populiacijų gausa yra glaudžiai susijusios su specifinėmis aplinkos sąlygomis. Pavyzdžiui, rūšys,

toleruojančios mažą ištirpusio deguonies kiekį, gali dominuoti, tuo tarpu deguonies reikalaujančios rūšys gali sumažėti arba visiškai išnykti. Svarbu pabrėžti, kad dažniau apie ekologinius pokyčius signalizuoja ne pavienių rūšių, o visos taksonominės grupės nykimas.

Vandens telkiniuose vykstant įvairiems cheminiams, biologiniams ir fiziniams procesams, keičiasi ištirpusių medžiagų kiekis bei jų cheminė sudėtis. Šie procesai prasideda dar vandeniui tekant per sausumos ekosistemas ir tęsiasi pačiuose vandens telkiniuose. Todėl vandens kokybė atspindi ne tik pačio telkinio, bet ir viso baseino, iš kurio vanduo priteka, ekosistemine būklę bei patiriamą antropogeninį poveikį.

Vandens telkinių būklės vertinimas remiasi cheminių, biologinių ir fizinių parametrų analize. Šie rodikliai gali būti matuojami tiesiogiai pačiame vandens telkinyje, pavyzdžiui, nustatant vandens skaidrumą, arba laboratorinėmis sąlygomis, kaip tai daroma analizuojant chlorofilo koncentraciją (Kilpys ir kt., 2021).

Chl-a yra vienas iš pagrindinių vandens būklės indikatorių, nes jis tiesiogiai atspindi fitoplanktono biomasę ir netiesiogiai – maistinių medžiagų, ypač azoto ir fosforo, koncentracijas. Vertikalus ir horizontalus *Chl-a* pasiskirstymas leidžia įvertinti vandens telkinių trofiškumo lygį bei eutrofikacijos riziką. Dėl pastovaus kiekio ląstelėse ir patikimų matavimo metodų, *Chl-a* yra plačiai taikomas ekologiniuose vertinimuose.

Siekiant užtikrinti tikslų vandens būklės įvertinimą, taikomi įvairūs stebėsenos metodai, skirstomi į tiesioginius (*in situ*) ir nuotolinius. Tiesioginiai metodai apima vietoje atliekamus matavimus ir laboratorines analizes, tuo tarpu nuotoliniai tyrimai grindžiami palydoviniais ar kitais nuotoliniais jutikliais, registruojančiais paviršiaus optines savybes.

1.2.1. Tiesioginis matavimas (*in situ*)

Tiesioginiai metodai, įskaitant tradicinius *Chl-a* nustatymo būdus, grindžiami *in situ* matavimais arba laboratorine vandens mėginių analize. Paprastai tyrimai atliekami įvairiose vandens telkinio vietose, siekiant atspindėti skirtingas akvatorijos dalis, todėl stebėjimai dažnai vykdomi iš valčių ar laivų. Atsižvelgiant į tai, kad vandens kokybės rodikliai kinta su gyliu, matavimai arba mėginių paėmimas atliekami skirtinguose vandens sluoksniuose, kad būtų gauta viso telkinio tūrio reprezentatyvi informacija. Dėl šių priežasčių *in situ* matavimai yra brangūs ir reikalaujantys didelių žmogiškųjų bei logistinių resursų. Nors šie metodai pasižymi aukštu tikslumu, jie dažnai būna laiko ir darbo imlūs, o jų taikymas ribojamas tiek erdvės, tiek laiko mastu. Be to, surinktų duomenų patikimumui gali pakenkti nepakankama kokybės kontrolė ir užtikrinimo procedūros, tokios kaip ilgas mėginių laikymo laikas, nestandartinių metodikų taikymas arba netikslus duomenų, ypač geografinių koordinatų, registravimas (Dzurume ir kt., 2022).

Vienas iš plačiausiai naudojamų *in situ* metodų yra fluorometrija, paremta chlorofilo gebėjimu fluorescuoti – sugeriant mėlynąją šviesą ir išspinduliuojant raudoną spektrą. Fluorometrai skleidžia ~470 nm bangos ilgio šviesą, kuri sužadina chlorofilą fitoplanktono ląstelėse, o detektoriai registruoja fluorescencijos signalą 650–700 nm intervale. Gautas signalas koreliuojamas su chlorofilo koncentracija, leidžiant operatyviai vertinti *Chl-a* pasiskirstymą tiek vertikaliai, tiek horizontaliai vandenyje.

Fitoplanktono kiekio pokyčiai gali būti stebimi laike, o sukauptos duomenų bazės bei kokybės užtikrinimo protokolai leidžia išsamiai apibūdinti vandens telkinių būklę. Tokie duomenys padeda atskleisti netiesioginius teršalus, dažniausiai fosforo ir azoto junginius, kurie skatina eutrofikacijos procesus. Lyginant su dažnu mėginių ėmimu ir sudėtingomis laboratorinėmis analizėmis, fluorimetriniai metodai yra ekonomiškesni ir operatyvesni, leidžiantys greitai įvertinti fitoplanktono koncentraciją.

Modernūs panardinami jutikliai (žr. 1.1 pav.), pavyzdžiui, YSI 6025 modelis (žr. 1.2 pav.), suteikia galimybę realiuoju laiku gauti aukštos skiriamosios gebos duomenis apie *Chl-a* koncentraciją, taip sumažinant laiko sąnaudas ir padidinant matavimų tikslumą tiek erdvinio, tiek laiko aspektu (Grosz ir kt., 2024). Visgi, net ir pažangūs jutikliai turi tam tikrų ribojimų – jų duomenis gali iškreipti vertikalūs chlorofilo gradientai, reikalaujantys specifinių analizės metodikų.



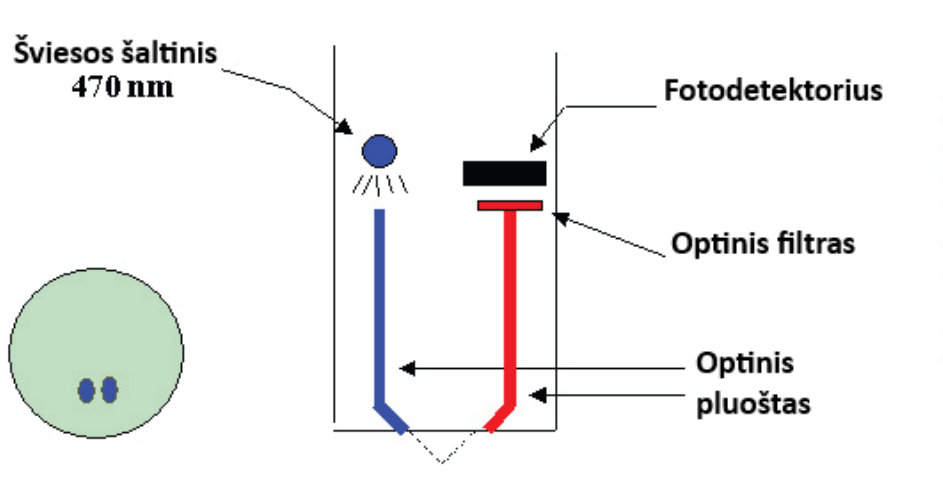
1.1 pav. Panardinamasis mėginių jutiklis (šaltinis: Measurement and Control, 2025)

Kadangi dažnas mėginių ėmimas (pvz., kas valandą) būtų nepraktiškas ir resursų reikalaujantis, buvo sukurti optiniai fluorometriniai jutikliai, leidžiantys tiesiogiai matuoti *Chl-a* koncentraciją natūraliomis sąlygomis, nepažeidžiant ląstelių struktūros. Tokie jutikliai ypač naudingi ilgalaikėse stebėjimo programose, nes leidžia automatizuotai rinkti duomenis be nuolatinės žmogaus priežiūros (1.2 pav.).



1.2 pav. YSI 6025 jutiklis (šaltinis: YSI Incorporated, 2025)

Šių jutiklių veikimas (žr. 1.3 pav.) pagrįstas fluorescencijos principu: chlorofilas, apšviestas mėlynąja šviesa (~470 nm), išspinduliuoja ilgesnio bangos ilgio šviesą, kuri registruojama didelio jautrumo detektoriais. Siekiant užtikrinti matavimo tikslumą drumzliname vandenyje, taikomi specialūs optiniai filtrai, pašalinantys trikdžius, atsirandančius dėl suspenduotų dalelių atspindžio.



1.3 pav. Chlorofilo jutiklio diagrama (šaltinis: The Basics of Chlorophyll Measurement. A xylem brand, 2025)

Lauko sąlygomis *in situ* fluorometrai gali būti paveikti biologinių ir cheminių apnašų kaupimosi arba burbulų iš ištirpusių dujų. Trumpalaikių matavimų metu šie trikdžiai dažnai pašalinami mechaniniu jutiklio sujudinimu, o ilgalaikėms stebėsenoms naudojami automatiniai valymo mechanizmai. Valymo ciklą dažnumas nustatomas programinėje įrangoje; paprastai pakanka vieno rankinio jutiklio judesio, tačiau stipriau užterštoms sąlygoms gali būti taikomas intensyvesnis režimas.

Apibendrinant, fluorometrinis *in situ Chl-a* matavimo metodas, nepaisant tam tikrų apribojimų yra:

- Mažesnio tikslumo lyginant su ekstrakcijos analize ar jautrumo aplinkos trikdžiams.
- Išlieka vertinga technologija vandens kokybės stebėsenai.

Šiuolaikiniai optiniai jutikliai suteikia galimybę vykdyti nuolatinį, automatizuotą monitoringą, generuojant realaus laiko duomenis apie chlorofilo pasiskirstymą ir jo dinaminius pokyčius. Nors jie nepakeičia laboratorinių metodų, tačiau tapo svarbia šiuolaikinės vandens kokybės vertinimo praktikos dalimi.

1.2.2. Nuotoliniai tyrimai

Netiesioginiai metodai, tokie kaip nuotolinis stebėjimas, leidžia įvertinti *Chl-a* koncentracijas analizuojant optines vandens paviršiaus savybes. Nuotoliniu būdu gauti duomenys teikia vertingą informaciją, leidžiančią geriau suprasti paviršinių vandenų būklę. Pastaraisiais metais nuotolinio stebėjimo technologijos plačiai taikomos vertinant regioninių vandens telkinių kokybinius parametrus, tokius kaip *Chl-a*, spalvotas ištirpusias organines medžiagas, suspenduotas kietąsias medžiagas ir įvairius teršalus (Chu ir He, 2023). Be to, palydoviniai duomenys vis dažniau pasitelkiami kaip papildoma priemonė prie *in situ* stebėjimo tinklų. Naujausi tyrimai rodo, kad nuotolinis stebėjimas yra efektyvi priemonė vandens kokybės parametrams, įskaitant *Chl-a*, stebėti (Rodriguez-Lopez, 2020).

Chl-a, kaip optiškai aktyvus komponentas, daro įtaką vandens atspindžio charakteristikoms, todėl jo koncentraciją galima nustatyti naudojant nuotolinio stebėjimo metodus. Šie metodai siūlo ekonomišką, pasikartojantį ir kiekybiškai pagrįstą sprendimą vandens kokybės stebėjimui. Palydoviniai duomenų rinkiniai, tokie kaip *Landsat*, *MODIS* ir *Sentinel-2*, teikia tiek aukštos erdvinės, tiek laiko rezoliucijos informaciją. Nuotolinio stebėjimo taikymas vandens kokybės parametrams vertinti siekia XX a. pradžią, kai buvo pradėtas naudoti *Landsat* teminis žemėlapių sudarytojas (*TM*) (Dzurume ir kt., 2022).

Pirmasis vandenyno spalvai jautrus palydovas, *Coastal Zone Color Scanner (CZCS)* (1978–1986), sudarė sąlygas tirti paviršinio fitoplanktono biomasės dinamiką jūrų ekosistemose ir vertinti

pasaulinę pirminę gamybą. Per pastaruosius tris dešimtmečius pasiekta didelė pažanga kuriant, kalibruojant ir validuojant optinius jutiklius, kas leido plėtoti ilgalaikę vandens aplinkos stebėseną ir pagerinti jos valdymą (Jiang ir kt., 2020). Šiuo metu palydovinis nuotolinis stebėjimas atlieka vis reikšmingesnę vaidmenį teikiant informaciją apie *Chl-a* koncentracijas vandenyse, ypač tose vietose, kur būdingi dumblių žydėjimai.

Palydovai yra aprūpinti padėties kontrolės sistemomis, leidžiančiomis orientuoti prietaisus pagal Žemės paviršių, bei orbitos palaikymo sistemomis, kurios užtikrina stabilų judėjimą. Energijos tiekimo sistemas sudaro saulės baterijos, įkraunamos esant saulės šviesai, ir akumuliatoriai, naudojami palydovui esant Žemės šešėlyje. Be to, palydovai dažnai turi įrengtas temperatūros palaikymo sistemas (Kilpys ir kt., 2021).

Pagal funkcijas dirbtiniai Žemės palydovai klasifikuojami į:

- Mokslinių tyrimų palydovus, skirtus Visatos procesų stebėjimui.
- Žemės išteklių kartografavimo ir stebėjimo palydovus.
- Ryšių palydovus, naudojamus globaliems telekomunikacijos tinklams palaikyti.
- Navigacinius palydovus, skirtus itin tiksliai vietos nustatymui.

Žemės stebėjimo iš palydovų tikslas – nustatyti esminius vandens telkinių parametrus, leidžiančius įvertinti tiek natūralių procesų eigą, tiek antropogeninį poveikį. Šie rodikliai skirstomi į dvi pagrindines grupes: fizinius rodiklius (temperatūra, vandens lygis, bangos, vėjo greitis ir srovės) ir vandens kokybės rodiklius (skaidrumas, spalva, organinių ir mineralinių medžiagų koncentracijos, *Chl-a* lygis).

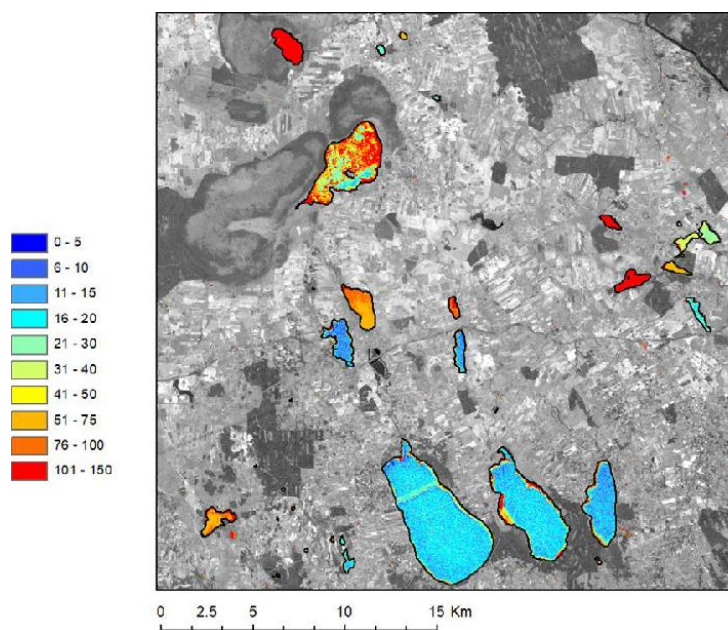
Vertinant vandens kokybės rodiklius dažniausiai pasitelkiami optiniai jutikliai, kurių erdvinė raiška gali svyruoti nuo kelių dešimčių centimetrų iki kelių kilometrų. Didelės ir vidutinės raiškos duomenys leidžia efektyviai vertinti net santykinai nedidelių telkinių ar pakrančių zonų būklę.

Nors palydoviniai metodai paprastai pasižymi mažesniu tikslumu nei *in situ* stebėjimai, jie turi esminį pranašumą – galimybę apdoroti didžiulius vandens plotus ir dažnai kartoti stebėjimus. Taigi galima gauti išsamią informaciją apie mažų, vidutinių ir didelių telkinių būklę, o dažnas stebėjimų kartojimas leidžia stebėti trumpalaikius pokyčius. Stebėjimų dažnumą lemia telkinio geografinė padėtis, palydovo orbitos parametrai ir matavimo juostos plotis.

Palydovų jutikliai užfiksuoja atspindžio signalą nuo vandens paviršiaus platesniame elektromagnetinių bangų spektro intervale nei žmogaus regimoji sistema. Tai leidžia nustatyti tokius kokybinius parametrus, kurie įprastomis vizualinėmis stebėjimo priemonėmis nebūtų įvertinami. Nors pradinė palydovinių sistemų įrengimo ir eksploatavimo kaina yra didelė, generuojamas duomenų kiekis kompensuoja šias išlaidas.

Palydovų optiniai jutikliai, registruodami vandens paviršiaus atspindį skirtingose bangų ilgių juostose, leidžia įvertinti vandens spalvą ir ją lemiančius komponentus. Tačiau kadangi fiksuojamas bendras atspindžio signalas, ne visada galima tiesiogiai atskirti pavienių komponentų įnašą.

Sentinel-2 MSI duomenimis pagrįstas *Chl-a* pasiskirstymo žemėlapis Pietų Lietuvos ežeruose (žr. 1.4 pav.), sudarytas naudojant *B4* (raudonos šviesos) ir *B5* (red-edge) kanalų duomenis, yra pavyzdys, kaip galima analizuoti vandens kokybę.



1.4 pav. *Chl-a* koncentracijos įvertinimo Pietų Lietuvos ežeruose pagal *Sentinel 2 MSI B4* ir *B5* kanalų duomenis pavyzdys (šaltinis: Kilpys ir kt., 2021)

Skirtingų jutiklių kanalų skaičius ir apimamos spektro dalys skiriasi (žr. 1.1 lentelę), tačiau jie išdėstyti taip, kad užtikrintų Žemės paviršiaus atspindžio fiksavimą svarbiausiose spektro srityse. Kanaluose užfiksuotas bendras atspindžio signalas apima vandenyje esančių tirpiųjų ir suspenduotų medžiagų, planktono ir paties vandens savybes (Kilpys ir kt., 2021).

1.1 lentelė. Vandens kokybei vertinti dažniausiai naudojami palydovų jutikliai (šaltinis: Kilpys ir kt., 2021)

PALYDOVAS, JUTIKLIS	PRADŽIA	KANALŲ SKAIČIUS IR DIAPAZONAS, nm	ERDVINĖ RAIŠKA, m
<i>Sentinel 2 MSI</i>	2015	13 (442–2202)	10–60
<i>Sentinel 3 OLCI</i>	2016	21 (400–1020)	300–1000
<i>Landsat 8 OLI</i>	2013	9 (433–1390)	15–100
<i>DigitalGlobe WorldView 2</i>	2009	8 (400–1040)	1,85
<i>NOAA WorldView 3</i>	2014	16 (400–2365)	1,24
<i>EO-1 ALI</i>	2000	10 (433–2350)	10-30
<i>EO-1 Hyperion</i>	2000	242 (350–2570)	30

<i>Terra / Aqua MODIS</i>	1999	36 (405–2155)	250–1000
<i>Envisat 1 MERIS</i>	2002	15 (390–1040)	300–1200
<i>OrbView 2 SeaWiFS</i>	1997	8 (402–885)	1130

Siekiant geriau suprasti palydovinių duomenų šaltinius, būtina susipažinti su pagrindinėmis *Landsat* ir *Sentinel* misijų palydovų charakteristikomis bei jų taikymo galimybėmis. Apibendrinta informacija apie šiuos palydovus pateikiama lentelėje (žr. 1.2 lentelę).

1.2 lentelė. *Landsat* ir *Sentinel* palydovų charakteristikos

Palydovas	Paleidimo metai	Esami jutikliai, radarai	Skiriamoji geba	Paskirtis	Savybės	Pastaba
<i>Landsat 1</i>	1972	<i>RBV, MSS</i>	80 m (<i>RBV</i>), 60 m (<i>MSS</i>); 185x185 km	Žemės paviršiaus stebėjimai (eksperimentinis projektas)	Pirmasis Žemės stebėjimo palydovas su multispektriniais jutikliais	
<i>Landsat 2</i>	1975	<i>RBV, MSS</i>	80 m (<i>RBV</i>), 60 m (<i>MSS</i>); 185x185 km	Žemės stebėjimas, aplinkos pokyčių sekimas	Pagerintas duomenų perdavimas, <i>RBV</i> vėliau išjungtas	
<i>Landsat 3</i>	1978	<i>RBV, MSS</i>	30 m (<i>RBV</i>), 60 m (<i>MSS</i>); 185x185 km	Žemės paviršiaus stebėjimai	<i>RBV</i> naudotas eksperimentams, <i>MSS</i> pagrindinis jutiklis	40 m skiriamoji geba - nespalvoti vaizdai
<i>Landsat 4</i>	1982	<i>MSS, TM</i>	30 m (<i>TM</i>), 60 m (<i>MSS</i>); 185x185 km	Žemės dangos, žemės ūkio ir miškų pokyčių stebėjimai	Pirmasis palydovas su <i>Thematic Mapper</i> jutikliu	
<i>Landsat 5</i>	1984	<i>MSS, TM</i>	30 m (<i>TM</i>), 60 m (<i>MSS</i>); 185x185 km	Žemės stebėjimas	Ilgiausiai veikiantis Žemės stebėjimo palydovas (iki 2013 m.)	
<i>Landsat 6</i>	1993	<i>ETM</i>	30 m; 185x185 km	Žemės dangos stebėjimas	Planuotas tęsti <i>Landsat</i> misiją	Palydovas buvo prarastas
<i>Landsat 7</i>	1999	<i>ETM+</i>	15 m (pankromatinis), 30 m (multispektrinis), 60 m (<i>TIR</i>); 185x185 km	Žemės dangos ir klimato pokyčių stebėjimai	Su <i>Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)</i> , tačiau vėliau įvyko <i>SLC</i> gedimas	
<i>Landsat 8</i>	2013	<i>OLI, TIRS</i>	15 m (pankr.), 30 m (<i>OLI</i>), 100 m (<i>TIRS</i>); 185x185 km	Žemės stebėjimas, vandens, dirvožemio ir augalijos analizė	Naujos kartos jutikliai – <i>OLI (Operational Land Imager)</i> ir <i>TIRS</i>	
<i>Sentinel 1A</i>	2014	<i>C-SAR</i>	5–40 m	Žemės paviršiaus stebėjimas bet kokiomis oro sąlygomis	C tipo sintetinės apertūros radaras (<i>SAR</i>); dieną ir naktį	
<i>Sentinel 2A</i>	2015	<i>MSI</i>	10, 20, 60 m; 290 km juosta	Augalijos, vandens, dirvožemio ir pakrančių stebėjimai	Multispektrinis vaizdavimas 13 juostų, aukšta skiriamoji geba	Stebi paviršių kas 5 dienas kartu su 2B

<i>Sentinel 1B</i>	2016	<i>C-SAR</i>	5–40 m	Toks pat kaip 1A	Duomenų gavimas kas 6 dienas kartu su 1A	2022 m. patyrė gedimą ir nebenaudojamas
<i>Sentinel 3</i>	2016	<i>OLCI, SLSTR, SRAL</i>	300 m (<i>OLCI</i>), 1 km (<i>SLSTR</i>)	Vandenynų ir sausumos temperatūros, spalvos, aukščio matavimai	Naudojami spalvos, paviršiaus topografijos, augalijos matavimai	
<i>Sentinel 2B</i>	2017	<i>MSI</i>	10, 20, 60 m; 290 km juosta	Toks pat kaip 2A	Pagerina laikų aprėptį	
<i>Sentinel 5P</i>	2017	<i>TROPOMI</i>	7x3.5 km (vidutiniškai)	Oro taršos ir atmosferos stebėjimai	<i>TROPOMI</i> jutiklis stebi ozoną, CO, NO ₂ , metaną, aerozolius	Dalis <i>Copernicus</i> programos
<i>Sentinel 6</i>	2020	<i>Poseidon-4</i>	~10 cm (aukščio matavimas)	Jūrų paviršiaus lygio stebėjimai	Tęsia Jason misijų darbą; labai tikslūs altimetriniai matavimai	Numatyta misijos trukmė – 5.5 metai
<i>Landsat 9</i>	2021	<i>OLI-2, TIRS-2</i>	15 m (pankr.), 30 m (<i>OLI-2</i>), 100 m (<i>TIRS-2</i>); 185x185 km	Tęstinė žemės stebėsena	Tęsia <i>Landsat 8</i> duomenų seką, pagerintas radiometrinis tikslumas	
<i>Sentinel 4</i>	2024	<i>MTG-S</i>	~8 km	Atmosferos cheminės sudėties analizė	Veiks geostacionarioje orbitoje; stebės NO ₂ , O ₃ , SO ₂ ir kt.	Planuojama trukmė – 8 metai
<i>Sentinel 2C</i>	2024	<i>MSI</i>	10, 20, 60 m	Tęsia <i>Sentinel-2A/B</i> misijas	Aukštos raiškos multispektriniai duomenys	
<i>Sentinel 2D</i>	2025	<i>MSI</i>	10, 20, 60 m	Tęsia <i>Sentinel-2A/B</i> misijas	Bus paleistas siekiant užtikrinti tęstinumą	

Radiometriniai indeksai leidžia nustatyti konkrečių komponentų įtaką bendram atspindžiui, remiantis teorinėmis ir empirinėmis žiniomis apie medžiagų optines savybes. Tinkamai pasirinkus kanalų kombinacijas galima sukurti indeksus, tiesiogiai susijusius su vandens kokybės rodikliais.

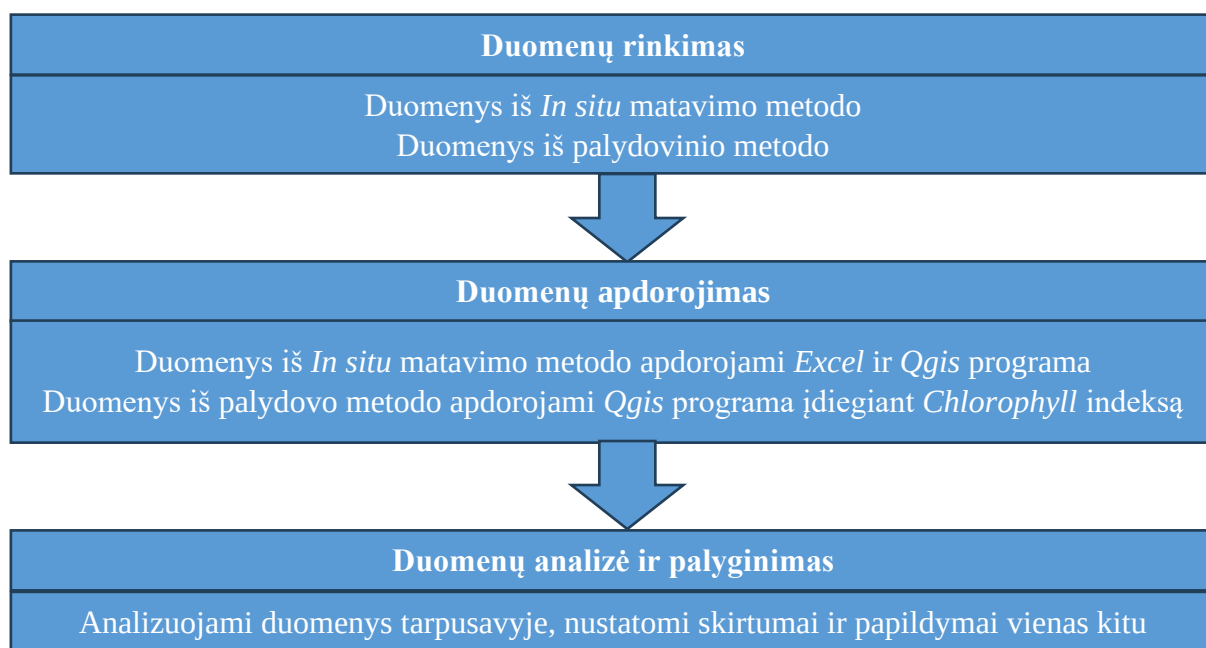
Radiometriniai indeksai gali būti taikomi įvairių jutiklių duomenims, jei jų kanalai atitinka panašias spektrines zonas. Vis dėlto būtina atsižvelgti į tai, kad rodiklių nustatymo tikslumas skiriasi skaidriame ir drumstame vandenyje (Kilpys ir kt., 2021).

Apibendrinant, palydoviniai duomenys gali veiksmingai papildyti *in situ* stebėjimus, optimizuojant monitoringo tinklus ir gerinant supratimą apie vandens telkiniuose vykstančius procesus. Vis dėlto jie nėra skirti visiškai pakeisti vietinius stebėjimus, o veikiau juos išplėsti ir papildyti (Kilpys ir kt., 2021).

2. METODOLOGIJA: VANDENS CHLOROFILO ĮVERTINIMAS TAIKANT TIESIOGINIUS MATAVIMUS IR NUOTOLINIUS TYRIMŲ METODUS

Praktinėje dalyje įvertinsiu vandens *Chl-a* koncentraciją taikant du skirtingus metodus: tiesioginius (*in situ*) matavimus ir nuotolinius (palydovinius) stebėjimus. Tyrimas orientuotas į šių metodų lyginamąją analizę, siekiant nustatyti jų tikslumą, privalumus ir trūkumus. Tyrimo metu naudojami duomenys bus apdorojami ir analizuojami naudojant *QGIS* programą bei kitas duomenų apdorojimo priemones. Tyrimas apima kelis etapus: duomenų rinkimą, apdorojimą, analizę ir rezultatų interpretavimą. Kiekvienas etapas yra esminis siekiant užtikrinti tikslumą ir duomenų patikimumą.

Tyrimas atliktas pagal technologinę darbų schemą pateiktą 2.1 paveiksle (žr. 2.1 pav.)



2.1 pav. Technologinė darbų schema

2.1. Tiesioginiai matavimai

Tiesioginiai (*in situ*) matavimai atliekami vandens telkiniuose, kur mėginiai imami laikantis standartizuotų protokolų, tokių kaip paviršinių vandens telkinių ekologinės būklės vertinimo metodika, 2007 m. balandžio 12 d. patvirtinta aplinkos ministro įsakymu Nr. D1-210 „Dėl Paviršinių vandens telkinių būklės nustatymo metodikos patvirtinimo“, vandens mėginių ėmimo metodika (LST EN ISO 5667-4:2016) ir kt.

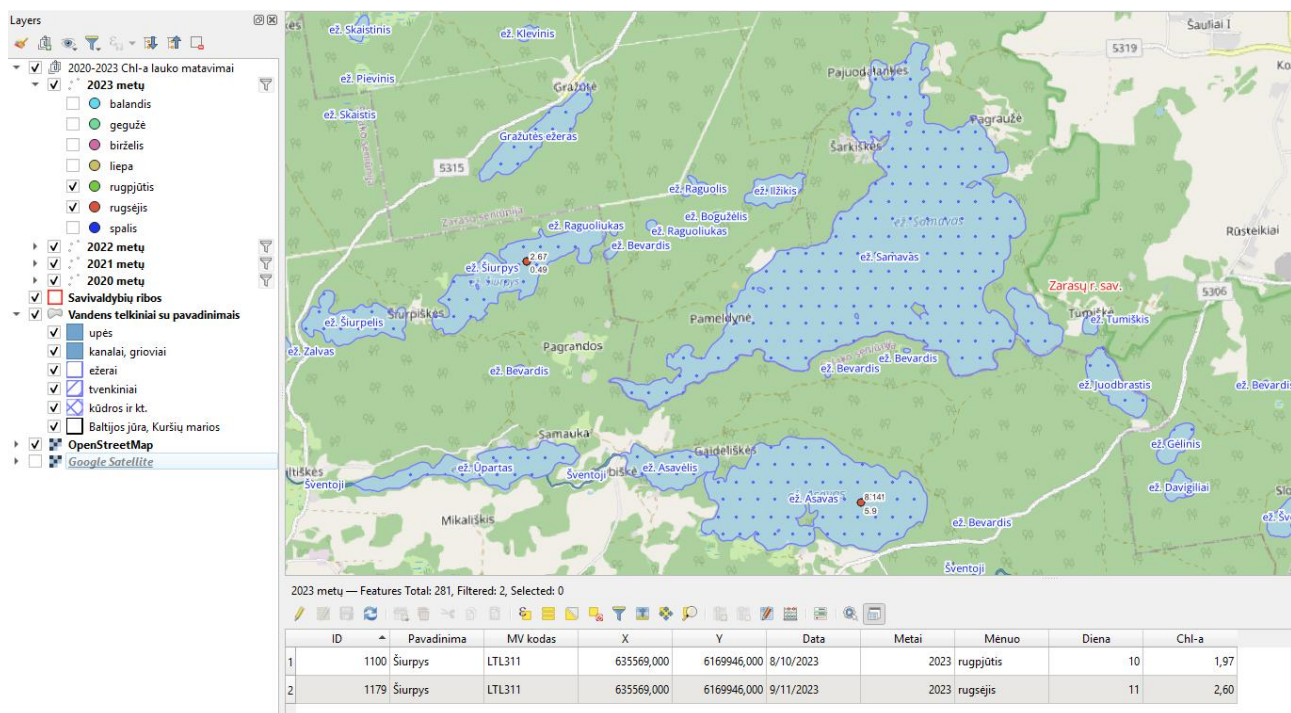
Šis procesas apima vandens mėginių paėmimą iš skirtingų telkinio vietų, siekiant įvertinti erdvinį *Chl-a* pasiskirstymą. Surinkti mėginiai analizuojami laboratorijoje, naudojant spektrofotometrinius metodus, kurie užtikrina tikslius ir patikimus rezultatus. Surinkti duomenys apdorojami *MS Excel* ir *QGIS* programomis, atliekant jų validavimą, statistinę analizę ir erdvinį vaizdavimą. Analizės procese vykdoma koreliacinė analizė ir paklaidų įvertinimas, siekiant nustatyti ryšį tarp *in situ* ir nuotolinių matavimų rezultatų. Norint užtikrinti tikslumą, vykdoma *in situ* duomenų kokybės kontrolė, o visi procesai dokumentuojami siekiant pakartojamumo.

Visos Lietuvos *Chl-a* monitoringo 2020–2023 metų duomenys naudoti kaip pradiniai duomenys analizei ir palyginimui. Šiuos vektorinius duomenis sudaro vandens telkinio pavadinimas, X Y koordinatės metrais, tyrimo data, *Chl-a* koncentracija (mg/m³) ir kt. (žr. 2.1 lentelę).

2.1 lentelė. 2020–2023 metų *in situ* matavimų monitoringo rezultatų ištrauka

Eilės Nr.	Vandens telkinio pavadinimas	MV kodas	X	Y	Tyrimo data	Tyrimo metai	Tyrimo mėnuo	Tyrimo diena	<i>Chl-a</i> koncentracija (mikrogramas kubiniame metre)
1	Kauno marios	LTL71	505731,598	6084954,723	4/15/2020	2020	balandis	15	15,4
2	Kivylių tvenkinys	LTL270	419282,077	6246663,257	4/20/2020	2020	balandis	20	28,86
3	Draudenių ežeras	LTL205	371778,677	6132497,466	4/21/2020	2020	balandis	21	18,94
4	Ilgis	LTL204	364291,322	6210196,732	4/21/2020	2020	balandis	21	5,18
5	Karvys	LTL363	573096,053	6083349,308	4/21/2020	2020	balandis	21	5,7
6	Pikeliškių ežeras (ež. Žalesas)	LTL364	581424,864	6082605,181	4/21/2020	2020	balandis	21	10,4
7	Platelių ežeras	LTL34	366955,369	6214390,874	4/21/2020	2020	balandis	21	3,55
8	Sablauskių tvenkinys	LTL271	430028,342	6236793,332	4/21/2020	2020	balandis	21	15,69
9	Čičirys	LTL222	628556,791	6187704,650	4/22/2020	2020	balandis	22	1,4
10	Šventas	LTL39	644760,323	6166706,577	4/22/2020	2020	balandis	22	1,3
11	Talkša	LTL267	458364,212	6200045,274	4/22/2020	2020	balandis	22	14,36
12	Vaitiekūnų tvenkinys	LTL408	477949,751	6150901,775	4/22/2020	2020	balandis	22	4,64
13	Alnis	LTL65	606156,920	6127535,452	4/23/2020	2020	balandis	23	2,1
14	Grabuostas	LTL360	584709,338	6114414,985	4/23/2020	2020	balandis	23	8,1
15	Kadrėnų tvenkinys	LTL162	552576,299	6130624,449	4/23/2020	2020	balandis	23	2,4
16	Stirniai	LTL343	605749,217	6124518,534	4/23/2020	2020	balandis	23	3,4
17	Alsėdžių ežeras	LTL258	379242,323	6207315,183	4/27/2020	2020	balandis	27	37,3
18	Asavas	LTL310	638935,403	6167521,628	4/27/2020	2020	balandis	27	5,2
19	Mastis	LTL435	390736,822	6205996,359	4/27/2020	2020	balandis	27	40,85
20	Šiurpys	LTL311	635569,168	6169946,250	4/27/2020	2020	balandis	27	1

Duomenys įkelti į paruoštą projektą QGIS programoje (2.2 pav.) pagal koordinates ir paruošti analizės procesui.



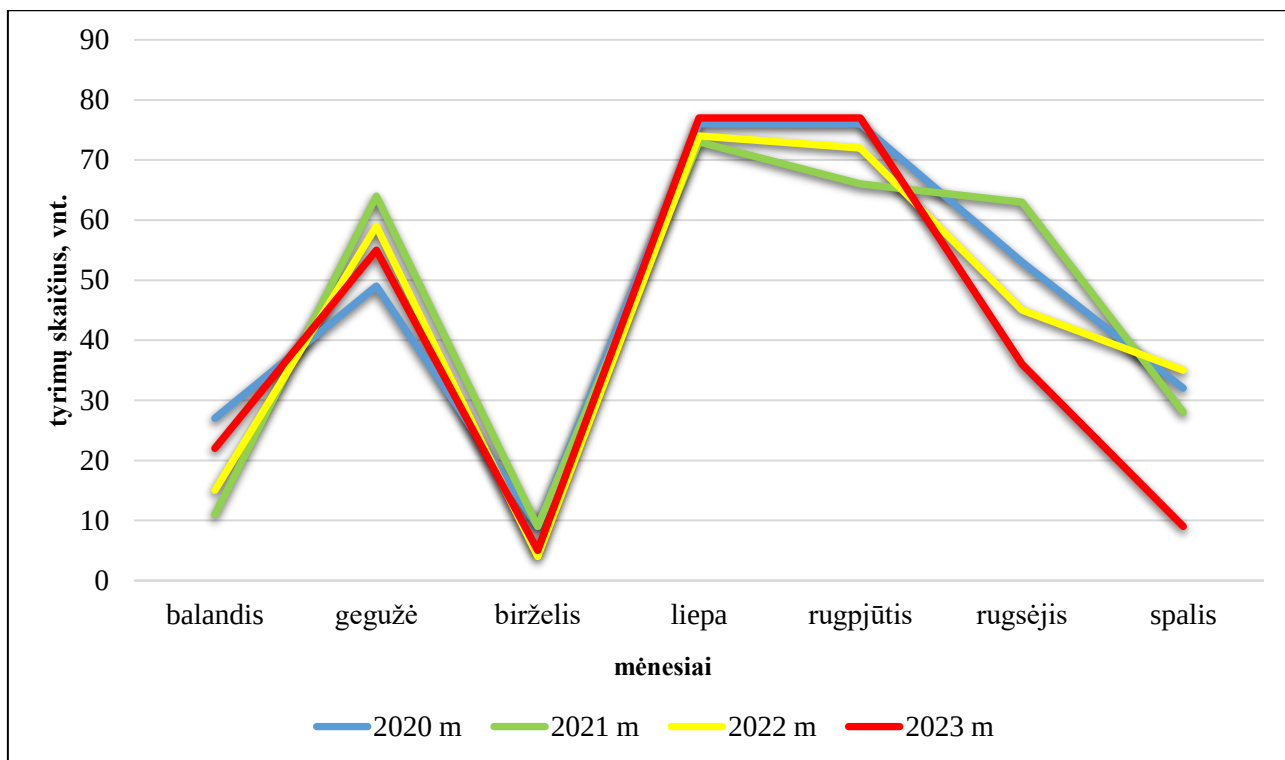
2.2 pav. Lauko matavimų atvaizdavimas QGIS programos projekte

Siekiant nustatyti *in situ* Chl-a koncentracijos matavimų pasiskirstymą laike, buvo atlikta duomenų analizė pagal lentelę „2020–2023 metų *in situ* matavimų monitoringo rezultatai“. Analizės metu duomenys buvo suskirstyti pagal kalendorinius metus ir mėnesius, apskaičiuojant kiekvieną mėnesį atliktų matavimų skaičių (vienetais).

Šis skirstymas leido nustatyti, kuriais mėnesiais buvo atlikta daugiausia stebėjimų, ir atskleisti sezoniskumo tendencijas. Rezultatai pateikiami papildomoje lentelėje (žr. 2.2 lentelę), kurioje nurodomas kiekvieno mėnesio matavimų dažnis kiekvienais metais, bei grafinėje diagramos formoje (žr. 2.3 pav.).

2.2 lentelė. 2020–2023 metų tyrimų skaičius pagal mėnesius, vnt.

Tyrimo metai	Tyrimo mėnuo						
	balandis	gegužė	birželis	liepa	rugpjūtis	rugsėjis	spalis
2020	27	49	9	76	76	53	32
2021	11	64	9	73	66	63	28
2022	15	59	4	74	72	45	35
2023	22	55	5	77	77	36	9
suma:	75	227	27	300	291	197	104

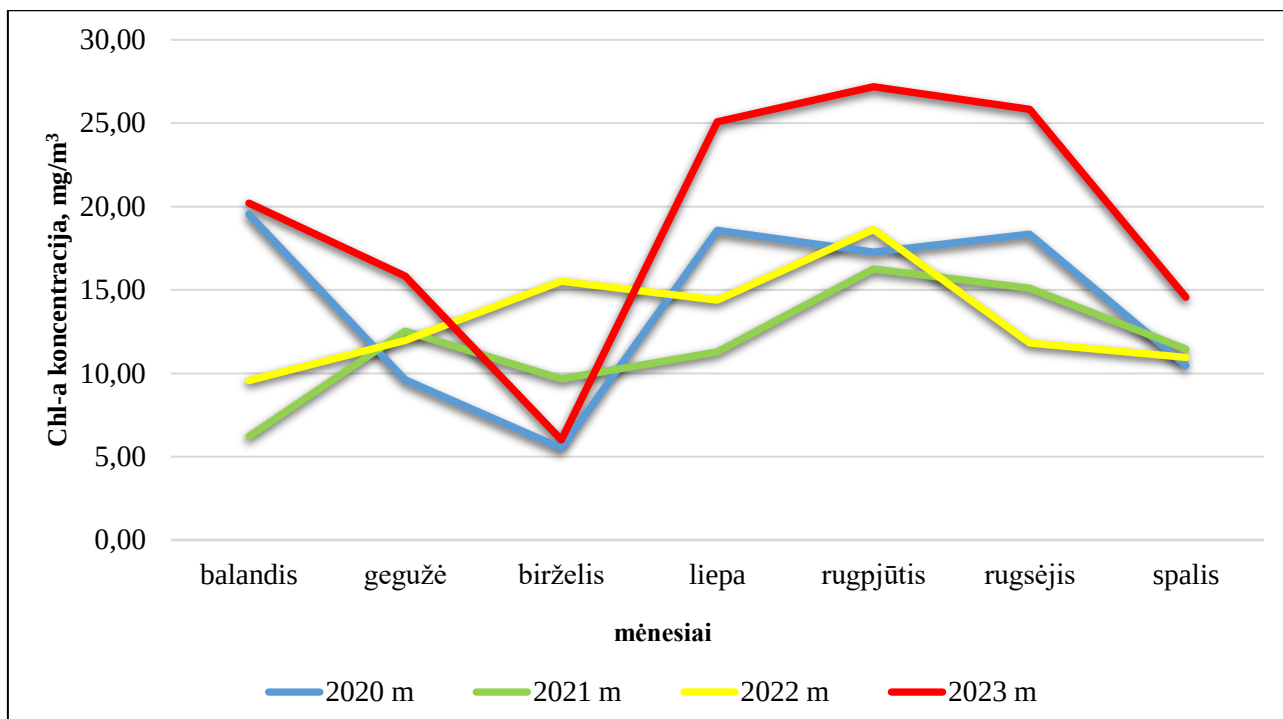


2.3 pav. 2020–2023 metų *in situ* tyrimų skaičius pagal mėnesius

Be to, buvo atlikta vidutinės *Chl-a* koncentracijos analizė pagal mėnesius visoje 2020–2023 m. stebėsenos laikotarpio duomenų apimtyje (pagal visus stebėtus vandens telkinius Lietuvoje). Tokiu būdu įvertinta, kada sezoniškai chlorofilo koncentracijos būna didžiausios, o tai leido papildomai optimizuoti nuotolinio stebėjimo analizės laikotarpį, susiaurinant apimtį į labiausiai reprezentatyvius mėnesius. Vidutinės *Chl-a* koncentracijos reikšmės pagal mėnesius taip pat pateikiamos ataskaitinėje lentelėje (žr. 2.3 lentelę) ir grafinėje išraiškoje (žr. 2.4 pav.), leidžiančioje aiškiai identifikuoti sezoninę dinamiką.

2.3 lentelė. 2020–2023 metų vidutinė išmatuota *Chl-a* koncentracija pagal mėnesius visuose vandens telkiniuose, mg/m³

Tyrimo metai	Tyrimo mėnuo						
	balandis	gegužė	birželis	liepa	rugpjūtis	rugsėjis	spalis
2020	19,53	9,60	5,51	18,57	17,27	18,34	10,47
2021	6,21	12,52	9,67	11,28	16,26	15,10	11,46
2022	9,56	11,97	15,52	14,40	18,63	11,82	10,95
2023	20,21	15,83	6,00	25,09	27,19	25,83	14,55
vidurkis:	13,88	12,48	9,17	17,33	19,84	17,77	11,86



2.4 pav. 2020–2023 metų vidutinė išmatuota *Chl-a* koncentracija pagal mėnesius visuose vandens telkiniuose, mg/m³

Atlikus 2020–2023 metų *in situ* duomenų analizę, nustatyta, kad daugiausiai matavimų skaičiumi buvo atlikta vasaros mėnesiais, ypač liepos (vidutiniškai 300 matavimų) ir rugpjūčio (vidutiniškai 291) mėnesiais. Šiek tiek mažesnis, bet vis dar reikšmingas matavimų skaičius fiksuotas gegužę (227) ir rugsėjį (197). Kiti metų mėnesiai išsiskyrė ženkliai mažesniu matavimų kiekiu, todėl jų įtraukimas į tolesnę analizę būtų mažiau reprezentatyvus.

Vertinant vidutines *Chl-a* koncentracijas pagal mėnesius, akivaizdžiai išsiskiria rugpjūčio mėnuo, kurio vidutinė *Chl-a* reikšmė siekia 19,84 mg/m³. Antroje vietoje pagal koncentraciją yra rugsėjis (17,77 mg/m³) ir liepa (17,33 mg/m³). Kitais mėnesiais vidutinė *Chl-a* koncentracija nesiekia 14 mg/m³, o tai leidžia daryti prielaidą, kad didžiausia fitoplanktono biomasė susidaro būtent vasaros pabaigoje.

Atsižvelgiant į tiek matavimų kiekį, tiek *Chl-a* koncentracijos lygį, tolesnei nuotolinio stebėjimo analizei buvo pasirinktas rugpjūčio mėnuo, kaip labiausiai reprezentatyvus ir turintis didžiausią ekologinę apkrovą. Be to, papildomai į analizę įtrauktas ir rugsėjo mėnuo, siekiant išlaikyti tyrimo sezoninį tęstinumą bei įvertinti, ar aukštos *Chl-a* reikšmės išlieka ir vegetacijos laikotarpio pabaigoje.

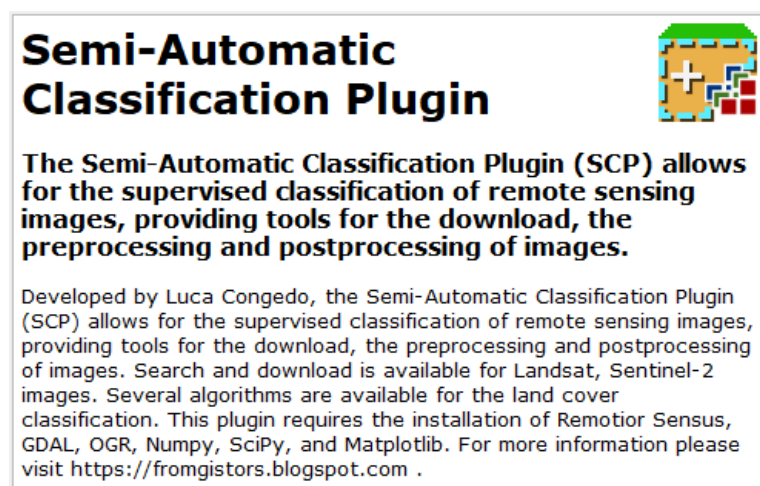
2.2. Nuotolinis tyrimų metodas

Nuotoliniai (palydoviniai) stebėjimai atliekami naudojant *Landsat 8–9 OLI_TIRS C2 L2* duomenis, surinktus per *U.S. Geological Survey* platformą, bei *Sentinel-2 MSI L2A* misijos archyvinis duomenis, gautus per *Copernicus Open Access Hub*. Šie duomenys apima spektrinius, erdvinis ir laiko parametrus, leidžiančius stebėti ir analizuoti vandens kokybės pokyčius.

Vadovaujantis 2.1 poskyryje aprašyta *in situ* duomenų analize, tolimesnei nuotolinei analizei buvo atrinkti 2020–2023 metų rugpjūčio ir rugsėjo mėnesių vaizdai – šie mėnesiai pasižymėjo didžiausiu *in situ* matavimų skaičiumi ir didžiausiomis vidutinėmis *Chl-a* koncentracijomis, todėl laikomi reprezentatyviausiais sezoninės analizės požiūriu.

Atsižvelgiant į vaizdo kokybę, iš duomenų archyvų buvo pasirinkti tik tie palydoviniai vaizdai, kurių debesuotumo indeksas yra mažiausias, siekiant užtikrinti kuo tikslesnį *Chl-a* indeksų ir algoritmų taikymą. Vaizdai buvo atrinkti iš ežeringiausio Lietuvos regiono – Zarasų ir Ignalinos rajonų bei jų apylinkių, atsižvelgiant į tai, kokias teritorijas apėmė konkretaus palydovo darytos nuotraukos. Tokiu būdu siekta analizuoti teritoriją, kurioje gausu skirtingų dydžių ir tipų ežerų.

Duomenų apdorojimas vykdomas naudojant atviro kodo *QGIS* programa, taikant specifinį priedą (žr. 2.5 pav.) bei literatūroje pagrįstą chlorofilo indeksą ir algoritmą. Šis procesas apima duomenų filtravimą, spektrinių juostų analizę bei erdvinę ir laikinę interpretaciją, kurios pagrindu vertinama vandens telkinių ekologinė būklė. Gauti nuotoliniai duomenys lyginami su atitinkamo laikotarpio *in situ* matavimais pagal konkrečias datas ir vietas, siekiant nustatyti šių duomenų papildomumą, pritaikomumą ir tikslumo lygį.



2.5 pav. *QGIS* papildinys

Chl-a koncentracijos įvertinimui iš nuotolinių (palydovinių) stebėjimų šiame tyrime pasirinktas Gitelsono algoritmas, priskiriamas empirinių spektrinių modelių grupei. Šis metodas sukurtas remiantis paviršinio atspindžio duomenų analize iš eutrofinių ir vidutiniškai drumzlinių vandens telkinių, todėl laikomas tinkamu taikyti Lietuvos vidaus vandenų sąlygomis. Formulėje (žr. 2.1 formulę) naudojamos žaliosios (*B3*) ir mėlynosios (*B2*) spektrinės juostos, kurios pasižymi dideliu jautrumu fitoplanktoną (*Chl-a* turinčius organizmus) atspindinčiai spinduliutei, ypač vandens paviršiaus sluoksnyje.

Šiame tyrimo etape taikomi literatūriniai (standartiniai) Gitelsono formulės koeficientai – $a=21,5$ ir $b=1,7$, kaip dažniausiai sutinkami ankstesniuose tyrimuose. Jie pasirinkti kaip pradinė analizės bazė, leidžianti įvertinti bendras tendencijas ir palyginti nuotoliniu būdu gautus rezultatus su tiesioginiais *in situ* matavimais.

$$Chla = a \cdot \left(\frac{Bgreen}{Bblue} \right)^b, \quad (2.1)$$

kur:

a ir b – empiriniai koeficientai,

Bgreen ir *Bblue* – žaliosios ir mėlynosios spektrinės juostos (atitinkamai *B3* ir *B2*).

Šis algoritmas pasižymi tuo, kad jam nereikalinga išankstinė lokalioji kalibracija, todėl jis tinkamas pradiniam palyginimui tarp skirtingų *Chl-a* įvertinimo šaltinių. Vis dėlto, siekiant didesnio tikslumo, tolimesniame analizės etape planuojama palyginti gautus rezultatus su realiais *in situ* duomenimis ir, esant sistemingsiems nukrypimams, pritaikyti koeficientų lokalų kalibravimą. Tokiu būdu formulė bus adaptuota būtent Lietuvos ežerų sąlygoms, priimant *in situ* matavimus kaip patikimą atskaitos šaltinį.

Ankstesni tyrimai rodo, kad šis metodas pasiekia aukštą statistinį tikslumą ($R^2 \sim 0.9$), todėl Gitelsono formulė laikoma patikimu įrankiu nuotoliniam *Chl-a* koncentracijos vertinimui, kai naudojami palydoviniai duomenys su paviršinio atspindžio informacija ir atitinkamomis spektrinėmis juostomis.

Sentinel-2 duomenų apdorojimo metodas:

Gitelsono algoritmo taikymui iš *Sentinel-2* palydovo duomenų buvo naudojamos *B2* (mėlynoji) ir *B3* (žalioji) spektrinės juostos. Abi juostos yra 10 metrų erdvinės raiškos ir yra įtrauktos į *Sentinel-2 MSI L2A* produkto duomenų rinkinį. Šios spektrinės juostos yra jautrios *Chl-a* turinčio fitoplanktono atspindžio pokyčiams paviršiniame vandens sluoksnyje, todėl tinkamos taikyti empiriniams modeliams.

Kadangi *Sentinel-2* duomenys pateikiami *.JP2 (JPEG2000)* formatu, prieš tolimesnį skaičiavimą jie buvo konvertuoti į *.TIF* formatą pasinaudojant *QGIS* įrankiu *Warp (Reproject)*. Šio

proceso metu taip pat buvo suvienodinta koordinacių sistema (CRS), pritaikant visus sluoksnius prie tyrime naudojamos Lietuvos koordinacių sistemos *LKS94 (EPSG:3346)*.

Paruošti spektriniai sluoksniai (*B2* ir *B3*) buvo įkelti į *QGIS* aplinką ir panaudoti rastrų skaičiuoklėje, taikant Gitelsono 2.1 formulę su pradiniais koeficientais. Šiuo būdu *Sentinel* duomenų pagrindu buvo apskaičiuotos apytikslės *Chl-a* koncentracijos (mg/m^3) pasirinktuose Lietuvos vandens telkiniuose.

Skaičiavimai atlikti naudojant *Sentinel-2 MSI L2A* vaizdus, gautus 2020–2023 metų rugpjūčio ir rugsėjo mėnesiais, atrenkant tik tuos, kurių debesuotumo lygis mažiausias. Tyrimui naudoti duomenys apima šias konkrečias datas: 2020-08-17, 2020-09-26, 2021-08-01, 2021-09-08, 2022-08-04, 2022-09-26, 2023-08-12 ir 2023-09-16.

***Landsat 8–9* duomenų apdorojimo metodas:**

Gitelsono algoritmo taikymui iš *Landsat 8–9 OLI_TIRS C2 L2* palydovinių duomenų buvo naudojamos *B2* (mėlynoji) ir *B3* (žalioji) spektrinės juostos, kurios pateikiamos *.TIF* formato failais ir turi 30 metrų erdvinę raišką. Šios juostos yra jautrios *Chl-a* turinčio fitoplanktono atspindžio intensyvumo pokyčiams, todėl tinkamos naudoti Gitelsono empirinėje 2.1 formulėje.

Prieš atliekant skaičiavimus, visi *Landsat* palydovo duomenys (spektrinių juostų sluoksniai) buvo suvienodinti pagal koordinacių sistemas, pasinaudojant *QGIS* įrankiu *Warp (Reproject)*, kuris užtikrina, kad visi duomenys būtų suderinti su tyrimui taikyta *LKS94 (EPSG:3346)* koordinacių sistema.

Paruošti spektriniai sluoksniai (*B2* ir *B3*) buvo įkelti į *QGIS* aplinką ir panaudoti rastrų skaičiuoklėje, taikant Gitelsono 2.1 formulę su pradiniais koeficientais. Šiuo būdu *Landsat* duomenų pagrindu buvo apskaičiuotos apytikslės *Chl-a* koncentracijos (mg/m^3) pasirinktuose Lietuvos vandens telkiniuose.

Skaičiavimai atlikti naudojant *Landsat 8–9* palydovų vaizdus iš 2020–2023 metų rugpjūčio ir rugsėjo mėnesių, atrenkant tik tuos atvaizdus, kurių debesuotumo lygis buvo minimalus. Analizuotos datos apima šiuos laikotarpius: 2020-08-28, 2021-08-08, 2021-09-09, 2022-08-11, 2022-08-27, 2023-08-05 ir 2023-09-07.

***Chl-a* koncentracijos klasifikavimas pagal ekologinius vandens būklės vertinimo principus:**

Ekologiniai vandens būklės vertinimo principai grindžiami siekiu nustatyti, kiek vandens telkinio būseną nukrypsta nuo natūralios, žmogaus veiklos nepaveiktos būklės. Vertinant paviršinių vandens telkinių ekologinę būklę, svarbūs tiek biologiniai, tiek cheminiai ir fizikiniai parametrai, tačiau vienas pagrindinių biologinių rodiklių vidiniuose vandens telkiniuose yra *Chl-a* koncentracija, tiesiogiai atspindinti fitoplanktono biomasę ir vandens telkinio trofiškumo lygį.

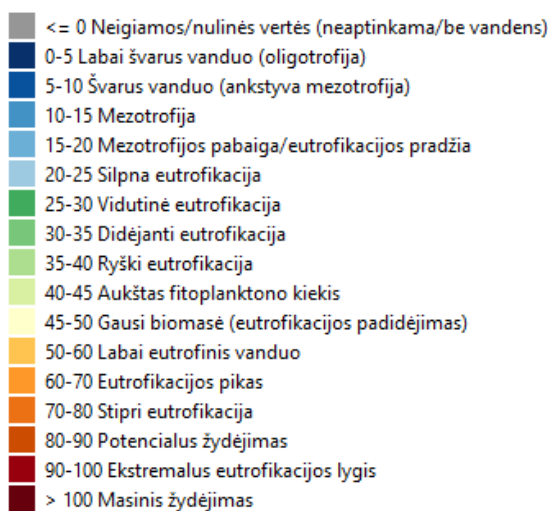
Remiantis *HELCOM* (Baltijos jūros aplinkos apsaugos komisijos) rekomendacijomis, kurios taikomos visame Baltijos jūros baseino regione, įskaitant Lietuvą, *Chl-a* koncentracija naudojama eutrofikacijos įvertinimui, klasifikuojant vandens telkinius pagal eutrofikacijos lygį (žr. 2.4 lentelę).

2.4 lentelė. *Chl-a* koncentracijos intervalai pagal eutrofikacijos lygį

Trofijos lygis	<i>Chl-a</i> koncentracija (mg/m ³)
Oligotrofija	0–5
Mezotrofija	5–15
Silpna eutrofikacija	15–25
Vidutinė eutrofikacija	25–40
Stipri eutrofikacija	>40

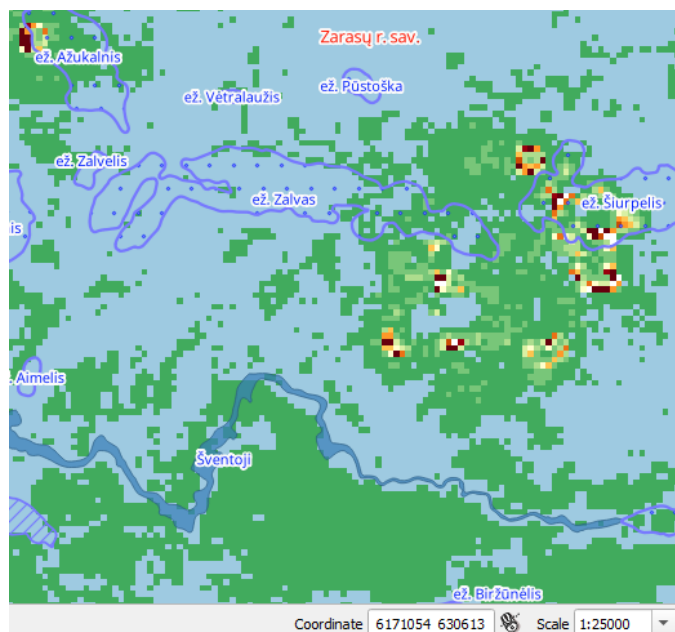
Šiose sistemose akcentuojama, kad koncentracijų intervalai turi būti pakankamai smulkūs, kad būtų galima tiksliai fiksuoti net ir nedidelius trofiškumo pokyčius, ypač svarbius sezoninių ar ilgalaikių pokyčių analizėje.

Vadovaujantis šiais principais, šiame tyrime *Chl-a* koncentracijos intervalai vizualizacijai buvo dar labiau detalizuoti – taikant 5 mg/m³ intervalą (žr. 2.6 pav.).



2.6 pav. *Chl-a* koncentracijos intervalai parengtame QGIS projekte

Pateikiamas vaizdinis pavyzdys (žr. 2.7 pav.), kuriame pavaizduotas *Chl-a* koncentracijų pasiskirstymas ežerų regione, suskirstytas pagal išplėstą trofijos lygių gradaciją kas 5 mg/m³. Vizualizacija atlikta QGIS aplinkoje taikant Gitelsono 2.1 formulę. Tokio tipo rezultatai pateikiami ir QGIS maketavimo formoje (žr. 1 ir 2 priedus).

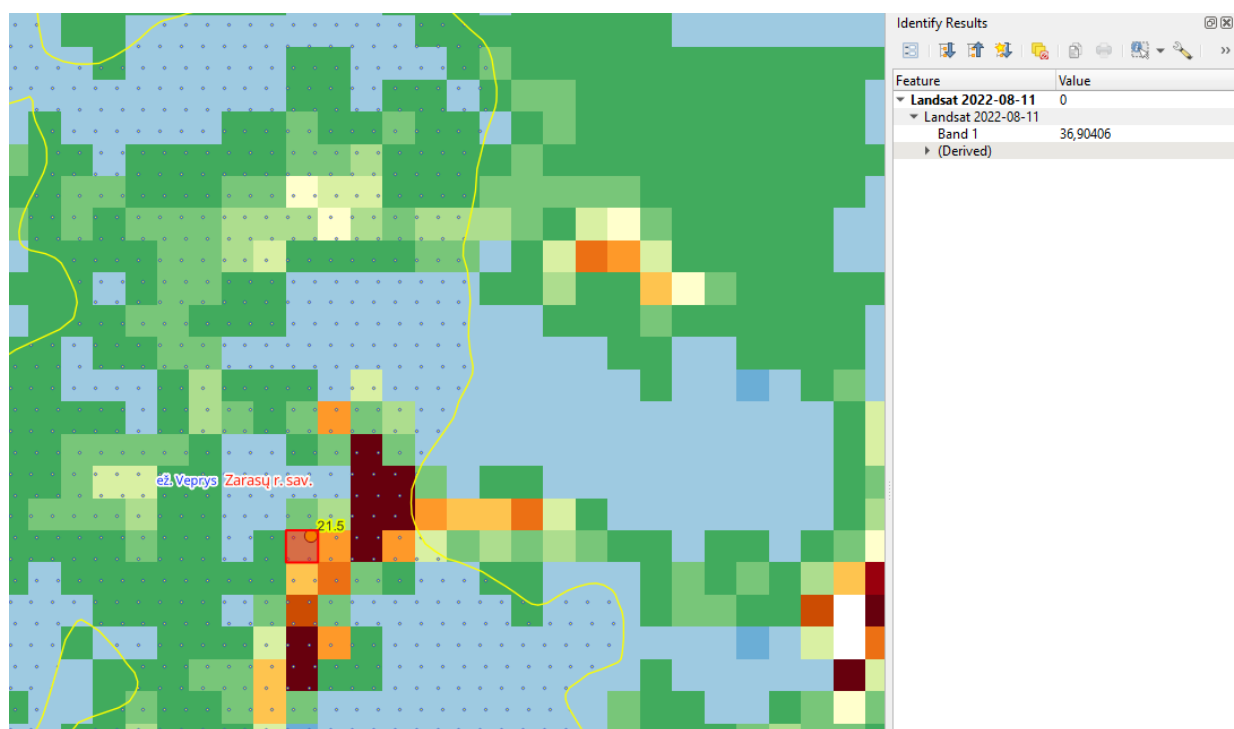


2.7 pav. Gitelsono algoritmo taikymo rezultato pavyzdys: *Chl-a* koncentracijos erdvinis pasiskirstymas 2023 m. rugsėjo 7 d. (*Landsat 8–9 OLI_TIRS C2 L2* duomenys)

Chl-a koncentracijos palydoviniai duomenys buvo surinkti iš visų šiame tyrime naudotų nuotolinių stebėjimų vaizdų, apimančių 2020–2023 metų rugpjūčio ir rugsėjo mėnesius. Analizei atrinkti *Landsat 8–9 OLI_TIRS C2 L2* palydovo vaizdai įrašyti 2020-08-28, 2021-08-08, 2021-09-09, 2022-08-11, 2022-08-27, 2023-08-05 ir 2023-09-07 dienomis, bei *Sentinel-2 MSI L2A* palydovo duomenys, gauti 2020-08-17, 2020-09-26, 2021-08-01, 2021-09-08, 2022-08-04, 2022-09-26, 2023-08-12 ir 2023-09-16 dienomis.

Iš šių palydovinių atvaizdų, naudojant Gitelsono algoritmą, buvo apskaičiuotos *Chl-a* koncentracijos (mg/m^3) konkrečiose teritorijose, kurios atitinka kiekvieno vaizdo erdvinį aprėpties plotą. Gautos reikšmės buvo integruotos į bendrą duomenų rinkinį ir priskirtos prie atitinkamų vietovių. Analizuojant duomenis buvo laikomasi principo, kad palydovinis matavimas neturi būti daugiau nei penkiomis dienomis nutolęs nuo toje pačioje vietovėje atlikto *in situ* matavimo – taip užtikrinamas duomenų palyginamumas ir didesnis patikimumas vertinant nuotolinio stebėjimo rezultatų atitikimą realioms sąlygoms.

Gautos *Chl-a* reikšmės iš palydovinių vaizdų pateiktos bendroje duomenų lentelėje (žr. 2.5 lentelę), kuri parengta tolimesniam apdorojimui, statistinei analizei ir palyginimui su *in situ* matavimais. Teritorinis analizės pagrindas – konkretus regionas, kuriame buvo atliktas *in situ* mėginių ėmimas (pvz., Zarasų ir Ignalinos rajonų vandens telkiniai), o erdvinis atvaizdas (žr. 2.8 pav.) iliustruoja vieną iš *Landsat 2022-08-11* duomenimis paremtų rezultatų su nustatyta *Chl-a* koncentracija pagal pradinį Gitelsono algoritmą.



2.8 pav. Nuotolinio stebėjimo pagrindu apskaičiuota *Chl-a* koncentracija Verpio ežere

2.5 lentelė. *In situ* ir palydovinių duomenų *Chl-a* koncentracijos rezultatai

ID	Vandens telkinio pavadinimas	MV kodas	X	Y	<i>in situ</i> Tyrimo data	Nustatyta <i>in situ</i> <i>Chl-a</i> koncentracija (mg/m ³)	Palydovo duomenų data		Palydovo rezultatai su $a=21.5$ $b=1.7$ Gitelsono koeficientais	
							Landsat	Sentinel	Landsat	Sentinel
168	Čičirys	LTL222	628556,79	6187704,7	2020-08-12	2,3		2020-08-17		23,1
171	Šventas	LTL39	644760,32	6166706,6	2020-08-12	2,2		2020-08-17		21,6
172	Dūkštas	LTL313	645550,17	6162907,8	2020-08-13	2,8		2020-08-17		22,2
174	Luodis	LTL312	639476,83	6163284,4	2020-08-13	3,4		2020-08-17		23,2
178	Kemešys	LTL214	616527,01	6139653,9	2020-08-17	16,9		2020-08-17		23,0
179	Lūšiai	LTL327	630658,11	6135175,5	2020-08-17	1,9		2020-08-17		22,1
192	Bebrusai	LTL345	593491,44	6118115,2	2020-08-19	5,2		2020-08-17		25,5
193	Galuonai	LTL224	596830,32	6114776,3	2020-08-19	3,6		2020-08-17		22,5
199	Vasaknas	LTL297	612109,24	6173874,4	2020-08-19	15,7		2020-08-17		23,5
200	Žiegas	LTL296	611700,79	6179486,6	2020-08-19	7,9		2020-08-17		25,5
202	Almajas	LTL322	625462,27	6141249,5	2020-08-20	4,2		2020-08-17		22,5
210	Tauragnas	LTL442	619651,45	6147505,7	2020-08-20	2,6		2020-08-17		23,6
212	Grabuostas	LTL360	584709,34	6114415	2020-08-24	28,9	2020-08-28		30,5	
213	Kadrėnų tvenkinys	LTL162	552576,3	6130624,4	2020-08-24	23,4	2020-08-28		25,9	
214	Mušėjus	LTL288	582296,43	6149216,7	2020-08-24	18,4	2020-08-28		22,0	
215	Nevėža	LTL285	575316,14	6146804,1	2020-08-24	8,1	2020-08-28		28,8	
219	Dūburaitis	LTL528	624173,5	6187179,3	2020-08-25	6,5	2020-08-28		22,2	
220	Išnarai	LTL344	602959,22	6114181,7	2020-08-25	5,2	2020-08-28		24,9	
221	Kirmeilis	LTL349	592256,52	6119944,7	2020-08-25	5,0	2020-08-28		46,9	
223	Laukesas	LTL527	644152,06	6181714	2020-08-25	16,5	2020-08-28		24,5	
226	Gėlių ežeras	LTL283	574264,68	6129389,7	2020-08-26	48,3	2020-08-28		22,7	
227	Karališkių ežeras	LTL282	569674,93	6131847,7	2020-08-26	16,1	2020-08-28		22,5	
229	Uolys	LTL533	624213,56	6166649	2020-08-26	3,8	2020-08-28		28,1	
230	Zalvas	LTL523	632093,46	6169360,6	2020-08-26	3,6	2020-08-28		27,8	
233	Imbradas	LTL441	633197,16	6183472,9	2020-08-27	15,1	2020-08-28		26,2	
234	Suvieko ežeras	LTL304	632087,03	6192624,4	2020-08-27	8,1	2020-08-28		21,4	
235	Šventas	LTL446	629748,91	6121795,7	2020-08-27	35,3	2020-08-28		28,6	

271	Bebrusai	LTL345	593491,44	6118115,2	2020-09-24	7,6		2020-09-26		23,4
273	Galunai	LTL224	596830,32	6114776,3	2020-09-24	8,5		2020-09-26		23,3
279	Dūkštas	LTL313	645550,17	6162907,8	2020-09-29	3,4		2020-09-26		23,1
281	Luodis	LTL312	639476,83	6163284,4	2020-09-29	5,5		2020-09-26		22,2
287	Kemešys	LTL214	616527,01	6139653,9	2020-09-30	24,8		2020-09-26		22,8
288	Lūšiai	LTL327	630658,11	6135175,5	2020-09-30	2,1		2020-09-26		22,4
556	Alnis	LTL65	606156,92	6127535,5	2021-09-13	3,6	2021-09-09		22,8	
558	Šiurpys	LTL311	635569,17	6169946,3	2021-09-14	2,0	2021-09-09		22,8	
789	Šiurpys	LTL311	635569	6169946	2022-08-08	4,9	2022-08-11	2022-08-04	22,1	21,9
793	Auslas		632814,11	6178446,8	2022-08-16	21,5	2022-08-11		22,1	
794	Avilys		629267,7	6183633,1	2022-08-16	4,3	2022-08-11		22,3	
831	Gačionių ežeras		605143,52	6186942,6	2022-08-24	3,3	2022-08-27		23,6	
834	Vajuonis		634866,02	6129869,9	2022-08-24	7,5	2022-08-27		24,4	
836	Žeimenys		630925,82	6130043,2	2022-08-24	1,4	2022-08-27		22,9	
844	Ilgis		647268,58	6175831,3	2022-08-29	6,6	2022-08-27		22,7	
845	Ilgys		631279,2	6187575,4	2022-08-29	4,9	2022-08-27		22,7	
846	Lamėstas		616272,28	6136908,8	2022-08-29	5,2	2022-08-27		22,6	
848	Ūsiai		625535,46	6131150,6	2022-08-29	2,8	2022-08-27		23,0	
850	Dysnykštis		650124,18	6149592,2	2022-08-30	10,6	2022-08-27		24,7	
851	Padysnio HE tvenkinys		650367,2	6144996,1	2022-08-30	14,9	2022-08-27		24,8	
852	Parsvėtas		646746,89	6158256,4	2022-08-30	5,3	2022-08-27		24,8	
855	Alksnas		655239,54	6154224,6	2022-08-31	2,6	2022-08-27		23,3	
858	Rūžas		657313,5	6152597,7	2022-08-31	6,9	2022-08-27		23,0	
861	Pakalas		620778,71	6134516,9	2022-09-01	3,7	2022-08-27		22,8	
862	Žiezdrelis		617819,5	6134562,6	2022-09-01	5,2	2022-08-27		22,8	
886	Liberišio tvenkinys		507070,43	6173895,1	2022-09-22	8,7		2022-09-26		23,2
1100	Šiurpys	LTL311	635569	6169946	2023-08-10	2,0	2023-08-05	2023-08-12	31,6	21,2
1101	Šventas	LTL39	644760	6166707	2023-08-10	2,1	2023-08-05	2023-08-12	24,9	20,8
1179	Šiurpys	LTL311	635569	6169946	2023-09-11	2,6	2023-09-07	2023-09-16	22,7	22,2
1180	Šventas	LTL39	644760	6166707	2023-09-11	1,8	2023-09-07	2023-09-16	22,4	20,6
1181	Alnis	LTL65	606157	6127535	2023-09-13	1,7		2023-09-16		21,5

3. VANDENS CHLOROFILO ĮVERTINIMO TAIKANT NUOTOLINIUS TYRIMŲ METODUS DUOMENŲ TIKSLUMAS IR ANALIZĖ

Nuotolinio stebėjimo metodai leidžia įvertinti *Chl-a* koncentraciją plačiu mastu, tačiau jų tikslumui įtakos turi atmosferos trikdžiai ir vandens optinių savybių kaita. Kadangi vandens paviršius atspindi tik nedidelę dalį saulės spinduliuotės, atmosferos iškraipymai – ypač dėl aerozolių, vandens garų ir debesų – reikšmingai veikia jutiklių fiksuojamą signalą. Dėl to *Chl-a* vertinimui būtina naudoti patikimą atmosferos korekciją ir tinkamai parinktus spektrinių juostų santykius.

Pakrančių vandenyse ir ežeruose situaciją komplikuoja didelis suspenduotų dalelių ir tirpių organinių medžiagų kiekis, kurie keičia šviesos sklaidos ir sugėrimo savybes. Šie veiksniai dažnai iškraipo atspindžio reikšmes žaliųjų (*B3*) ir mėlynųjų (*B2*) bangų ilgių diapazone, kuriame dažniausiai taikomas Gitelsono algoritmas. Dėl šios priežasties *Chl-a* koncentracijų vertinimas nuotoliniu būdu turi būti kalibruojamas lokaliai, atsižvelgiant į konkretaus regiono optines savybes.

Šiame skyriuje nagrinėjamas palydovinių (*Landsat* ir *Sentinel*) duomenų atitikimas *in situ Chl-a* matavimams. Analizė apima ir standartinių, ir lokalizuotų koeficientų taikymą, siekiant įvertinti, kaip skirtingi metodiniai pasirinkimai veikia rezultatų tikslumą. Tuo pačiu aptariami atskiri atvejai, kai nuokrypiai tarp palydovinių ir tiesioginių matavimų ženkliai padidėja, ieškant galimų jų priežasčių.

3.1. Rezultatų palyginimas

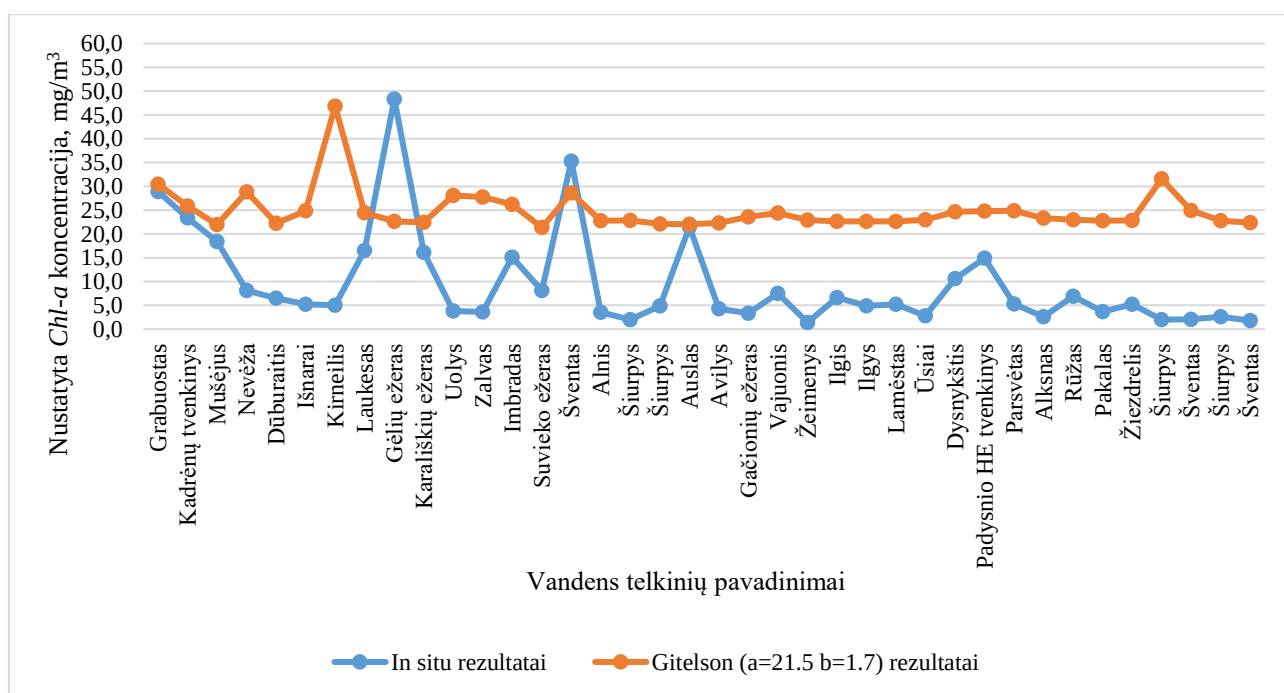
Siekiant įvertinti nuotolinių metodų tikslumą nustatant *Chl-a* koncentraciją vandens telkiniuose, buvo atliktas *Landsat* ir *Sentinel* palydovais gautų duomenų palyginimas su laboratoriniais *in situ* matavimais.

Abiem atvejais buvo taikoma Gitelsono formulė su standartiniais koeficientais ($a = 21,5$; $b = 1,7$). Duomenų analizė parodė, kad abu palydovai sistemingai pervertina tikrąsias *Chl-a* reikšmes, ypač esant mažoms koncentracijoms (žr. 3.1 lentelę).

3.1 lentelė. Gautų palydovinių (Gitelsono su $a=21,5$ ir $b=1,7$ koeficientais) duomenų palyginimas su *in situ*

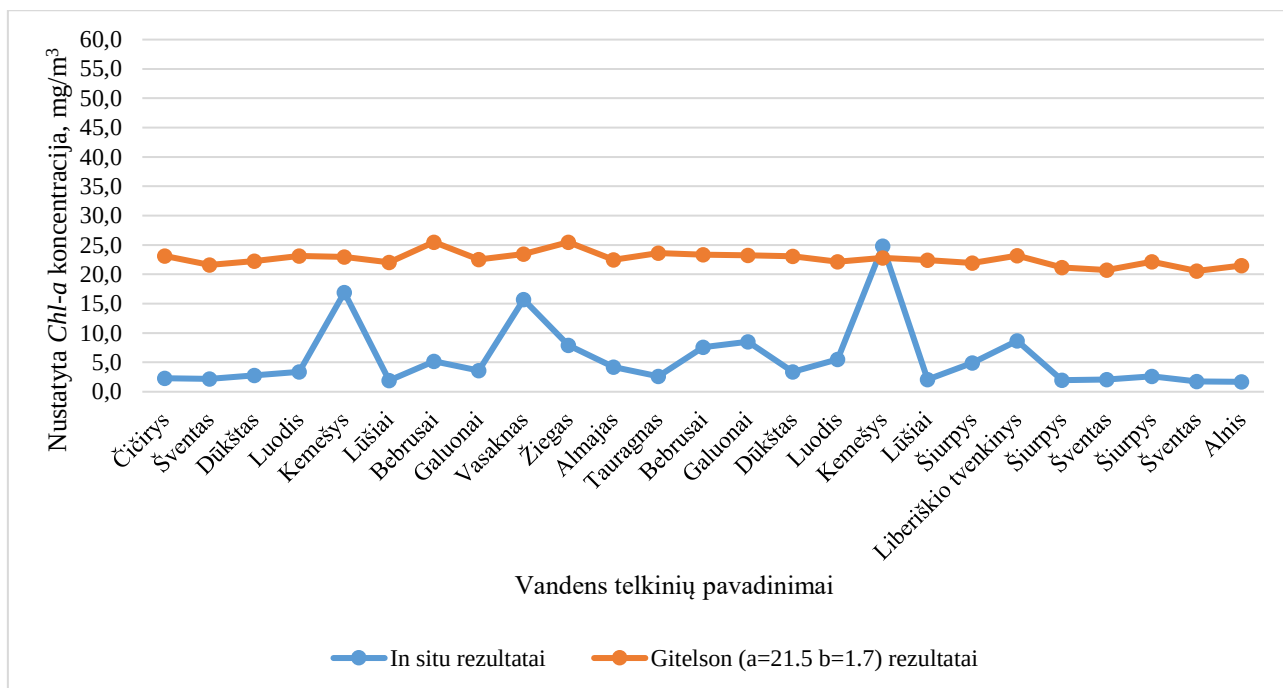
Lyginimo objektai	Vid. absoliutus skirtumas, mg/m^3	Vid. nuokrypis kartais	Minimalus skirtumas, mg/m^3	Maksimalus skirtumas, mg/m^3	Minimalus nuokrypis kartais	Maksimalus nuokrypis kartais
<i>Landsat</i> su <i>in situ</i>	16,9	5,4	0,6	41,9	0,5	16,3
<i>Sentinel</i> su <i>in situ</i>	17,1	6,7	2,0	21,0	0,9	12,7

Landsat palydovo rezultatai atskleidė vidutinį absoliutų skirtumą nuo *in situ* matavimų, siekiantį 16,9 mg/m³, o vidutinis nuokrypis sudarė 5,4 karto. Didžiausias fiksuotas skirtumas buvo 41,9 mg/m³, o mažiausias – 0,6 mg/m³. Nuokryptai kartais svyravo nuo 0,5 iki net 16,3 karto, aiškiai rodant, kad esant mažoms *in situ* reikšmėms, net nedidelis palydovinių duomenų pervertinimas sukelia labai didelį santykinį netikslumą. Sistemingas pervertinimas ypač gerai atsiskleidžia pateiktoje linijinėje diagramoje (žr. 3.1 pav.), kurioje pavaizduoti *Landsat* ir *in situ* *Chl-a* duomenys skirtinguose vandens telkiniuose. Grafike akivaizdžiai išryškėja tendencija, kad palydoviniai rezultatai nuosekliai viršija tiesioginius matavimus, nepriklausomai nuo faktinio *Chl-a* lygio.



3.1 pav. Vandens telkinių *Chl-a* koncentracijų skirtumai: *in situ* ir *Landsat* (Gitelsono $a=21,5$; $b=1,7$)

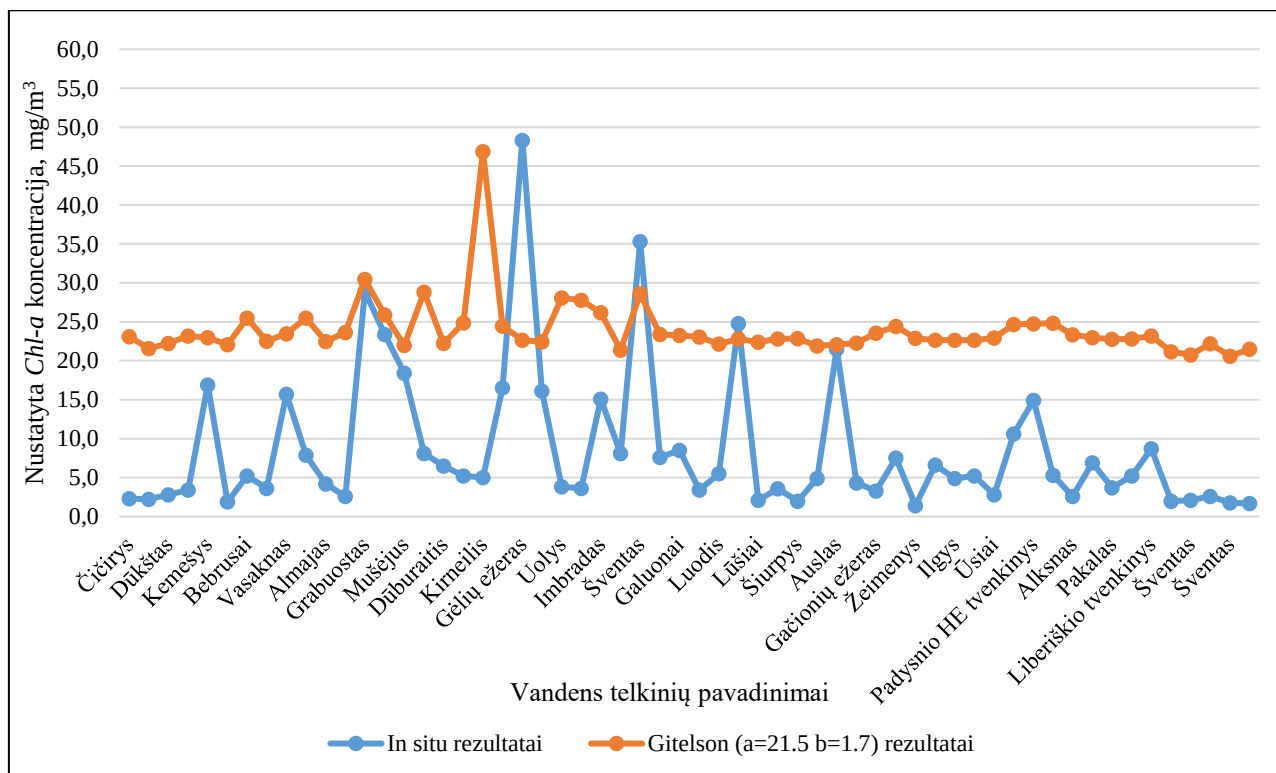
Sentinel duomenų analizė parodė labai panašią tendenciją. Nors vidutinis absoliutus skirtumas buvo kiek didesnis ir siekė 17,1 mg/m³, nuokrypis kartais dar labiau išaugo – iki 6,7 karto. Didžiausias fiksuotas skirtumas sudarė 21,0 mg/m³, o mažiausias – 2,0 mg/m³. Nuokrypis kartais svyravo nuo 0,9 iki 12,7 karto. Tai reiškia, kad *Sentinel* duomenys taip pat stipriai pervertina realias *Chl-a* koncentracijas, nors kai kuriose situacijose santykiniai nuokryptai buvo šiek tiek mažesni nei *Landsat* atveju. Ši sisteminga paklaida aiškiai matoma pateiktoje linijinėje diagramoje (žr. 3.2 pav.), kurioje *in situ* ir *Sentinel* duomenys vaizduojami skirtinguose vandens telkiniuose. Grafike matyti, kad palydoviniai rezultatai dažniausiai išlieka aukštesni nei tikrosios vertės. Be to, *Sentinel* rezultatai tik ribotai atspindi tikrąjį *Chl-a* koncentracijų kintamumą tarp skirtingų vandens telkinių – grafike matyti, kad palydoviniai duomenys beveik nekinta, kai tuo tarpu *in situ* matavimai rodo žymius skirtumus.



3.2 pav. Vandens telkinių *Chl-a* koncentracijų skirtumai: *in situ* ir *Sentinel* (Gitelsono $a=21,5$; $b=1,7$)

Šie rezultatai patvirtina, kad abu palydovai, taikant standartinę Gitelsono formulę su pradiniais koeficientais ($a = 21,5$ ir $b = 1,7$), dažnai pervertina realias *Chl-a* reikšmes, ypač žemesnės koncentracijos ribose. Tokie sistemingi nuokrypiai gali būti susiję su spektrinių juostų ribotu jautrumu mažoms *Chl-a* koncentracijoms bei regionui nebūdingų koeficientų taikymu. Analizės metu nustatyta, kad palydoviniai duomenys ne tik nuosekliai viršijo tiesioginius *in situ* matavimus, bet ir tik ribotai atspindėjo realų koncentracijų kintamumą tarp skirtingų vandens telkinių. Abiejų palydovų duomenys pagal visus analizuotus telkinius ir jų palyginimas su *in situ* rezultatais pateikiami linijinėje diagramoje (žr. 3.3 pav.), kurioje aiškiai matomi sistemingi pervertinimai ir skirtingų šaltinių duomenų skirtumai.

Tai leidžia daryti išvadą, kad standartinė Gitelsono formulė nėra pakankamai tiksliai pritaikyta Lietuvos vidaus vandenų optinėms sąlygoms. Siekiant sumažinti nuokrypius ir padidinti rezultatų patikimumą, nuspręsta atlikti lokalų kalibravimą tarp *in situ* matavimų ir pradinių palydovinių rezultatų, pritaikant formulės koeficientus konkrečiai tiriamajai teritorijai.



3.3 pav. *Chl-a* koncentracijų palyginimas tarp *in situ* ir palydovinių (*Landsat*, *Sentinel*) duomenų (Gitelsono $a=21,5$; $b=1,7$)

Taikyta regresinė analizė:

Koeficientas a Gitelsono formulėje yra atsakingas už bendrą modelio vertės mastelį – didesnė jo reikšmė proporcingai padidina visas apskaičiuotas *Chl-a* koncentracijas, o mažesnė – sumažina. Tuo tarpu koeficientas b lemia formulės jautrumą spektrinių juostų santykio ($B3/B2$) pokyčiams: kuo b didesnis, tuo staigesnė modelio reakcija į nedidelius spektrinio signalo pokyčius, todėl labai išauga jautrumas mažiems atspindžio svyravimams.

Siekiant geriau pritaikyti Gitelsono formulę Lietuvos vidaus vandens telkiniams, buvo atliktas lokalus empirinės formulės pritaikymas remiantis regresinės analizės principais. Pradinėje stadijoje buvo naudojamos *Chl-a* koncentracijos, gautos pagal standartinius koeficientus ($a = 21,5$; $b = 1,7$), ir taikant atvirkštinę Gitelsono formulę (3.1), iš jų apskaičiuoti atitinkami $B3/B2$ spektrinių juostų santykiai.

$$B3/B2 = \left(\frac{Chla}{a} \right)^{\frac{1}{b}}, \quad (3.1)$$

kur:

$B3/B2$ – santykis tarp žalios ir mėlynos spektro juostų,

a – žinomas pradinis taikytas koeficientas = 21,5,

b – žinomas pradinis taikytas koeficientas = 1,7.

Šie apskaičiuoti spektriniai santykiai buvo susieti su realiais *in situ* laboratoriniais *Chl-a* matavimais (mg/m³), o tuomet taikytas tiesinės regresijos modelis pagal formulę: (3.2):

$$y = a \cdot x^b, \quad (3.2)$$

kur:

x – Gitelsono skaičiuotas spektrinių juostų santykis ($B3/B2$),

y – laboratorinis *Chl-a* matavimas mg/m³,

a ir b – kalibruojami koeficientai.

Norint užtikrinti rezultatų stabilumą, buvo eliminuotos išsišokančios reikšmės ir sudarytas lokalus duomenų pogrupis, kuriame *Chl-a* koncentracija svyravo tarp ~0 ir 25 mg/m³. Šiam duomenų rinkiniui taikytas ribinis nelyginis tiesinės regresijos metodas (angl. *curve fitting*), kuriuo ieškota koeficientų a ir b , geriausiai atspindinčių *Chl-a* koncentracijos priklausomybę nuo spektrinių juostų santykio. Optimizavimas atliktas pagal mažiausios kvadratų sumos principą

Taip buvo nustatyti nauji, lokaliai kalibruoti koeficientai: **$a=2,76$** ir **$b=12,97$** .

Šie koeficientai buvo pasirinkti kaip optimalūs konkrečiam tyrimo kontekstui, nes jie geriausiai atitiko *in situ* duomenų struktūrą mažų ir vidutinių koncentracijų intervale (žr. 3 ir 4 priedus). Nors regresinė funkcija gali turėti daugiau nei vieną lokalų optimizavimo sprendinį, būtent šis modelis užtikrino reikiamą jautrumą ir prognozavimo tikslumą Lietuvos vidaus vandens telkiniuose.

Skaičiavimai su lokalizuotais koeficientais:

Siekiant padidinti *Chl-a* koncentracijų įverčių tikslumą, palydoviniai *Landsat* ir *Sentinel* duomenys buvo perskaičiuoti taikant lokalizuotus Gitelsono koeficientus ($a=2,76$; $b=12,97$). Palyginus rezultatus su laboratoriniais *in situ* matavimais, fiksuotas ženklus tikslumo pagerėjimas (žr. 3.2 lentelę), lyginant su skaičiavimais pagal pradinius taikytus koeficientus.

Skaičiavimai atlikti tiems patiems *Landsat* ir *Sentinel* palydovų duomenims bei vandens telkinių stebėjimo taškams, kaip ir ankstesnėje analizėje.

3.2 lentelė. *In situ* ir palydovinių duomenų *Chl-a* koncentracijos rezultatai (su perskaičiuotais koeficientais)

ID	Vandens telkinio pavadinimas	MV kodas	X	Y	<i>in situ</i> Tyrimo data	Nustatyta <i>in situ Chl-a</i> koncentracija (mg/m ³)	Palydovo duomenų data		Palydovo rezultatai su $a=2.76$ $b=12.97$ Gitelsono koeficientais	
							<i>Landsat</i>	<i>Sentinel</i>	<i>Landsat</i>	<i>Sentinel</i>
168	Čičirys	LTL222	628556,79	6187704,7	2020-08-12	2,3		2020-08-17		4,8
171	Šventas	LTL39	644760,32	6166706,6	2020-08-12	2,2		2020-08-17		2,9
172	Dūkštas	LTL313	645550,17	6162907,8	2020-08-13	2,8		2020-08-17		3,6
174	Luodis	LTL312	639476,83	6163284,4	2020-08-13	3,4		2020-08-17		4,9
178	Kemešys	LTL214	616527,01	6139653,9	2020-08-17	16,9		2020-08-17		4,6

179	Lūšiai	LTL327	630658,11	6135175,5	2020-08-17	1,9		2020-08-17		3,4
192	Bebrusai	LTL345	593491,44	6118115,2	2020-08-19	5,2		2020-08-17		10,1
193	Galuonai	LTL224	596830,32	6114776,3	2020-08-19	3,6		2020-08-17		3,9
199	Vasaknas	LTL297	612109,24	6173874,4	2020-08-19	15,7		2020-08-17		5,4
200	Žiegas	LTL296	611700,79	6179486,6	2020-08-19	7,9		2020-08-17		10,1
202	Almajas	LTL322	625462,27	6141249,5	2020-08-20	4,2		2020-08-17		3,9
210	Tauragnas	LTL442	619651,45	6147505,7	2020-08-20	2,6		2020-08-17		5,7
212	Grabuostas	LTL360	584709,34	6114415	2020-08-24	28,9	2020-08-28		39,4	
213	Kadrėnų tvenkinys	LTL162	552576,3	6130624,4	2020-08-24	23,4	2020-08-28		11,4	
214	Mušėjus	LTL288	582296,43	6149216,7	2020-08-24	18,4	2020-08-28		3,2	
215	Nevėža	LTL285	575316,14	6146804,1	2020-08-24	8,1	2020-08-28		25,9	
219	Dūburaitis	LTL528	624173,5	6187179,3	2020-08-25	6,5	2020-08-28		3,6	
220	Išnarai	LTL344	602959,22	6114181,7	2020-08-25	5,2	2020-08-28		8,4	
221	Kimeilis	LTL349	592256,52	6119944,7	2020-08-25	5,0	2020-08-28		1053,4	
223	Laukesas	LTL527	644152,06	6181714	2020-08-25	16,5	2020-08-28		7,4	
226	Gėlių ežeras	LTL283	574264,68	6129389,7	2020-08-26	48,3	2020-08-28		4,1	
227	Karališkių ežeras	LTL282	569674,93	6131847,7	2020-08-26	16,1	2020-08-28		3,8	
229	Uolys	LTL533	624213,56	6166649	2020-08-26	3,8	2020-08-28		21,2	
230	Zalvas	LTL523	632093,46	6169360,6	2020-08-26	3,6	2020-08-28		19,4	
233	Imbradas	LTL441	633197,16	6183472,9	2020-08-27	15,1	2020-08-28		12,5	
234	Suvieko ežeras	LTL304	632087,03	6192624,4	2020-08-27	8,1	2020-08-28		2,6	
235	Šventas	LTL446	629748,91	6121795,7	2020-08-27	35,3	2020-08-28		24,4	
271	Bebrusai	LTL345	593491,44	6118115,2	2020-09-24	7,6		2020-09-26		5,2
273	Galuonai	LTL224	596830,32	6114776,3	2020-09-24	8,5		2020-09-26		5,0
279	Dūkštas	LTL313	645550,17	6162907,8	2020-09-29	3,4		2020-09-26		4,8
281	Luodis	LTL312	639476,83	6163284,4	2020-09-29	5,5		2020-09-26		3,5
287	Kemešys	LTL214	616527,01	6139653,9	2020-09-30	24,8		2020-09-26		4,4
288	Lūšiai	LTL327	630658,11	6135175,5	2020-09-30	2,1		2020-09-26		3,8
556	Alnis	LTL65	606156,92	6127535,5	2021-09-13	3,6	2021-09-09		4,3	
558	Šiurpys	LTL311	635569,17	6169946,3	2021-09-14	2,0	2021-09-09		4,4	
789	Šiurpys	LTL311	635569	6169946	2022-08-08	4,9	2022-08-11	2022-08-04	3,4	3,2
793	Auslas		632814,11	6178446,8	2022-08-16	21,5	2022-08-11		3,4	
794	Avilys		629267,7	6183633,1	2022-08-16	4,3	2022-08-11		3,6	
831	Gačionių ežeras		605143,52	6186942,6	2022-08-24	3,3	2022-08-27		5,5	
834	Vajuonis		634866,02	6129869,9	2022-08-24	7,5	2022-08-27		7,3	
836	Žeimenys		630925,82	6130043,2	2022-08-24	1,4	2022-08-27		4,4	
844	Ilgis		647268,58	6175831,3	2022-08-29	6,6	2022-08-27		4,1	
845	Ilgys		631279,2	6187575,4	2022-08-29	4,9	2022-08-27		4,1	
846	Lamėstas		616272,28	6136908,8	2022-08-29	5,2	2022-08-27		4,1	
848	Ūsiai		625535,46	6131150,6	2022-08-29	2,8	2022-08-27		4,5	
850	Dysnykštis		650124,18	6149592,2	2022-08-30	10,6	2022-08-27		7,9	
851	Padysnio HE tvenkinys		650367,2	6144996,1	2022-08-30	14,9	2022-08-27		8,1	
852	Parsvėtas		646746,89	6158256,4	2022-08-30	5,3	2022-08-27		8,3	
855	Alksnas		655239,54	6154224,6	2022-08-31	2,6	2022-08-27		5,2	
858	Rūžas		657313,5	6152597,7	2022-08-31	6,9	2022-08-27		4,6	
861	Pakalas		620778,71	6134516,9	2022-09-01	3,7	2022-08-27		4,3	
862	Žiezdrelis		617819,5	6134562,6	2022-09-01	5,2	2022-08-27		4,4	
886	Liberišio tvenkinys		507070,43	6173895,1	2022-09-22	8,7		2022-09-26		5,0
1100	Šiurpys	LTL311	635569	6169946	2023-08-10	2,0	2023-08-05	2023-08-12	52,0	2,5
1101	Šventas	LTL39	644760	6166707	2023-08-10	2,1	2023-08-05	2023-08-12	8,3	2,1
1179	Šiurpys	LTL311	635569	6169946	2023-09-11	2,6	2023-09-07	2023-09-16	3,7	3,5
1180	Šventas	LTL39	644760	6166707	2023-09-11	1,8	2023-09-07	2023-09-16	3,7	2,0
1181	Alnis	LTL65	606157	6127535	2023-09-13	1,7		2023-09-16		2,8

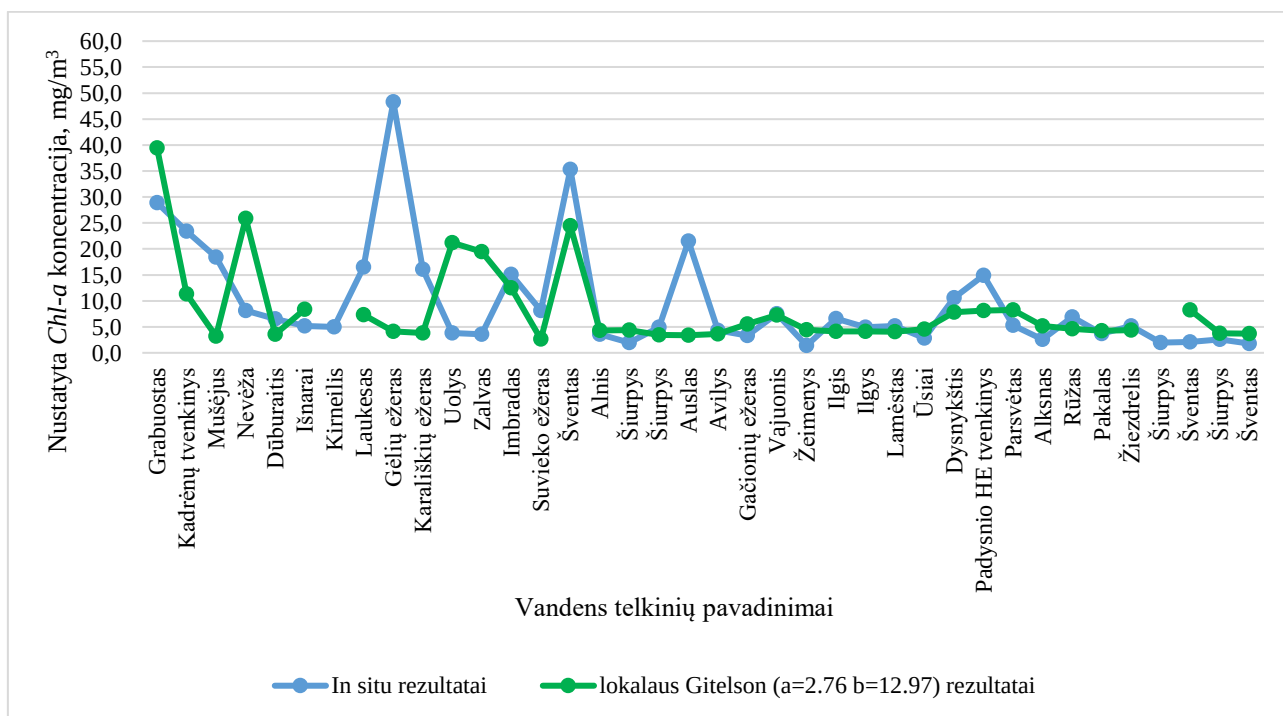
Siekiant užtikrinti analizės patikimumą, į lentelę (žr. 3.3 lentelę) buvo įtraukti tik palyginami atvejai, o duomenys su galimais iškraipymais (dėl debesuotumo, pakrančių ar atmosferinių trikdžių)

buvo pašalinti. Atliktas filtravimas leido objektyviau įvertinti lokalizuotų koeficientų taikymo tikslumą bei sumažinti išskirtinių reikšmių įtaką vidurkiams ir nuokrypiams.

3.3 lentelė. Gautų palydovinių (Gitelsono su $a=2,76$ ir $b=12,97$ koeficientais) duomenų palyginimas su *in situ*

Lyginimo objektai	Vid. absoliutus skirtumas, mg/m^3	Vid. nuokrypis kartais	Minimalus skirtumas, mg/m^3	Maksimalus skirtumas, mg/m^3	Minimalus nuokrypis kartais	Maksimalus nuokrypis kartais
<i>Landsat</i> su <i>in situ</i>	6,7	1,4	0,2	44,2	0,1	5,6
<i>Sentinel</i> su <i>in situ</i>	3,2	1,2	0,0	20,4	0,2	2,2

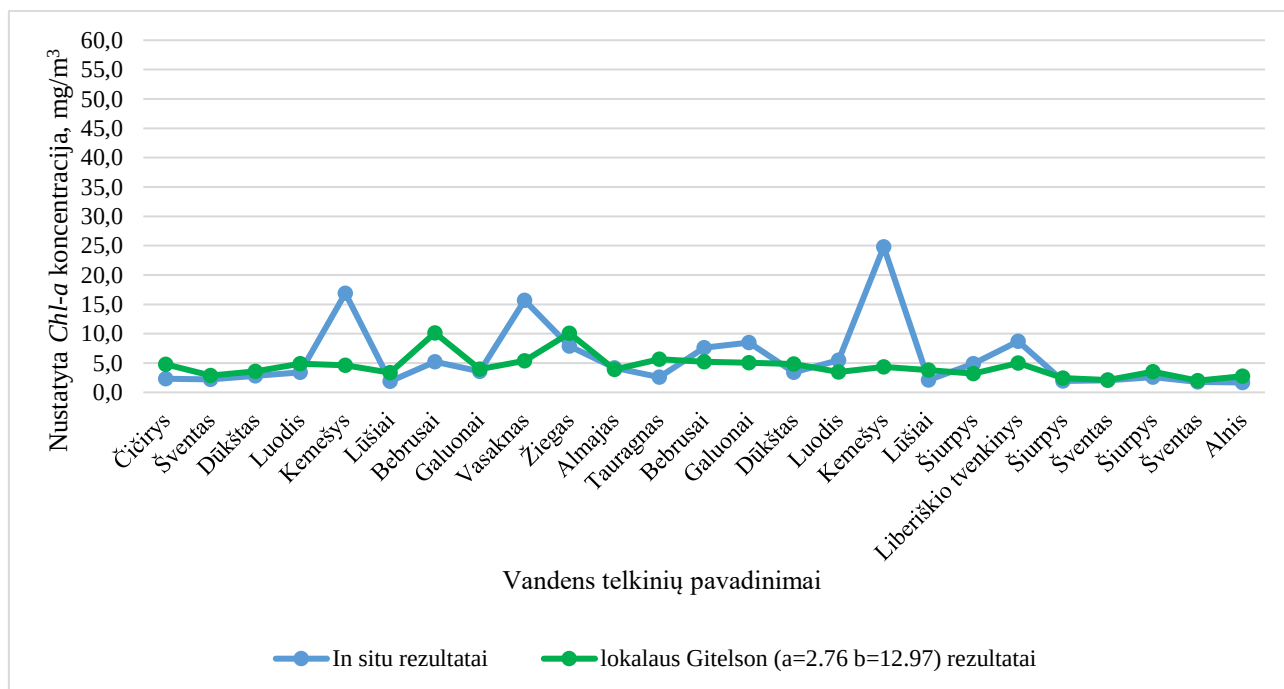
Landsat duomenys, taikant lokalizuotus koeficientus, parodė vidutinį absoliutų skirtumą – $6,7 \text{ mg/m}^3$ (vietoje $16,9 \text{ mg/m}^3$), o vidutinis nuokrypis sumažėjo iki 1,4 karto (vietoje 5,4 karto). Nuokryptai kartais svyravo nuo 0,1 iki 5,6 karto. Tačiau kai kurių ežerų (pvz., Kirneilio ir Šiurpio) reikšmės buvo atmetos kaip anomalijos dėl itin didelio nuokrypio (atitinkamai 210,7 ir 25,4 karto), kadangi jos reikšmingai iškraipytų vidurkius. Linijinėje diagramoje (žr. 3.4 pav.) šie atvejai išsiskiria kaip ekstremalūs taškai.



3.4 pav. Vandens telkinių *Chl-a* koncentracijų skirtumai: *in situ* ir *Landsat* (Gitelsono $a=2,76$; $b=12,97$)

Sentinel duomenų analizė parodė dar tikslesnius rezultatus: vidutinis absoliutus skirtumas – $3,2 \text{ mg/m}^3$, o vidutinis nuokrypis – 1,2 karto (vietoje 6,7 karto). Nuokryptai kartais buvo reikšmingai mažesni, svyravo nuo 0,2 iki 2,2 karto, be jokių išsiskiriančių anomalijų. Linijinėje diagramoje (žr.

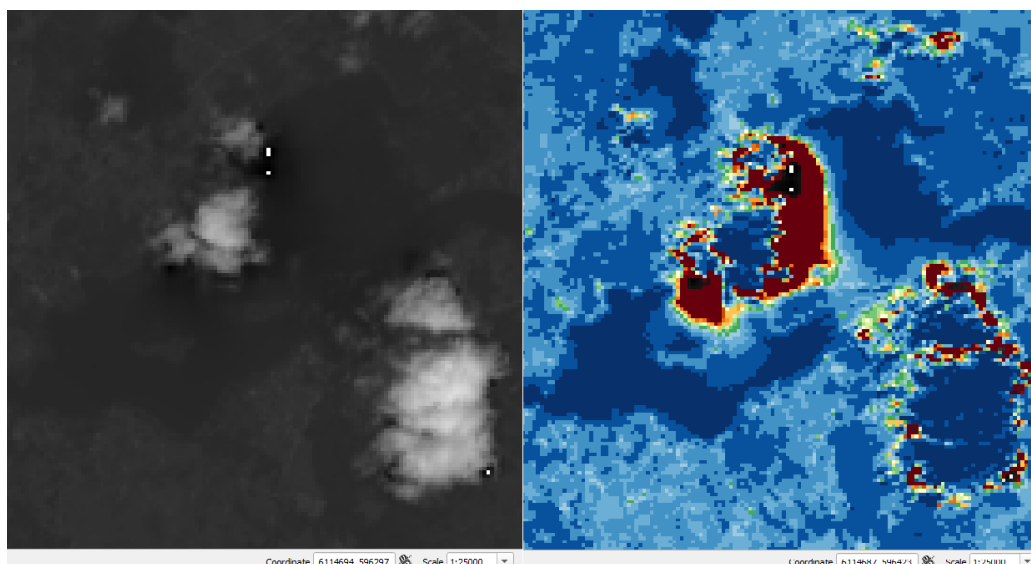
3.5 pav.) *Sentinel* duomenys seka *in situ* reikšmes itin tolygiai, ypač vidutinių ir mažų koncentracijų ribose.



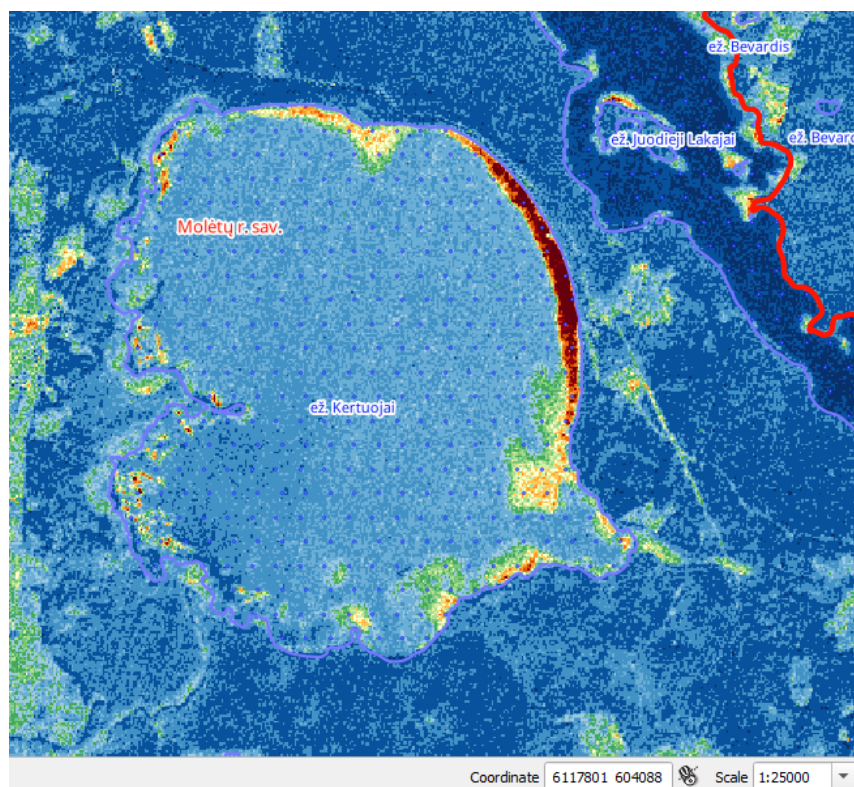
3.5 pav. Vandens telkinių *Chl-a* koncentracijų skirtumai: *in situ* ir *Sentinel* (Gitelsono $a=2,76$; $b=12,97$)

Lyginant su ankstesniais rezultatais, kai buvo taikomi pradiniai Gitelsono koeficientai ($a = 21,5$; $b = 1,7$), abu palydovai rodė reikšmingus sisteminius nuokrypius – tiek absoliučiais skaičiais, tiek santykinu nuokrypiu kartais. Taikant lokalizuotą kalibravimą, skirtumai sumažėjo kelis kartus, o duomenų artimumas *in situ* matavimams ženkliai pagerėjo. Nors *Landsat* rezultatuose vis dar pasitaikė pavienių anomalijų, *Sentinel* palydovas pasirodė esąs patikimesnis, ypač tiriant telkinius su mažomis ar vidutinėmis *Chl-a* koncentracijomis.

Tai rodo, kad lokalizuoti koeficientai geriau atspindi regionines vandens telkinių optines savybes ir sumažina sisteminį duomenų iškraipymą, ypač mažų koncentracijų ribose. Visgi, analizuojant duomenis, pastebėti pavieniai išsišokantys atvejai abiejuose palydoviniuose duomenyse – ypač Kirneilio ežere (*Landsat*, 210,7 karto) ir Šiurpio ežere (*Sentinel*, 25,4 karto), kurie buvo atmesti kaip anomalijos. Tokie neatitikimai gali būti susiję su debesuotumo poveikiu (žr. 3.6 pav.), pakrančių zonų padidinta atspindžio verte (žr. 3.7 pav.) arba kitais atmosferiniais trikdžiais, kurie gali reikšmingai iškreipti *B3/B2* juostų santykį bei paveikti palydovinių įverčių tikslumą. Šie veiksniai turėtų būti atsižvelgti tolesnėse analizėse, siekiant dar labiau sumažinti paklaidas.



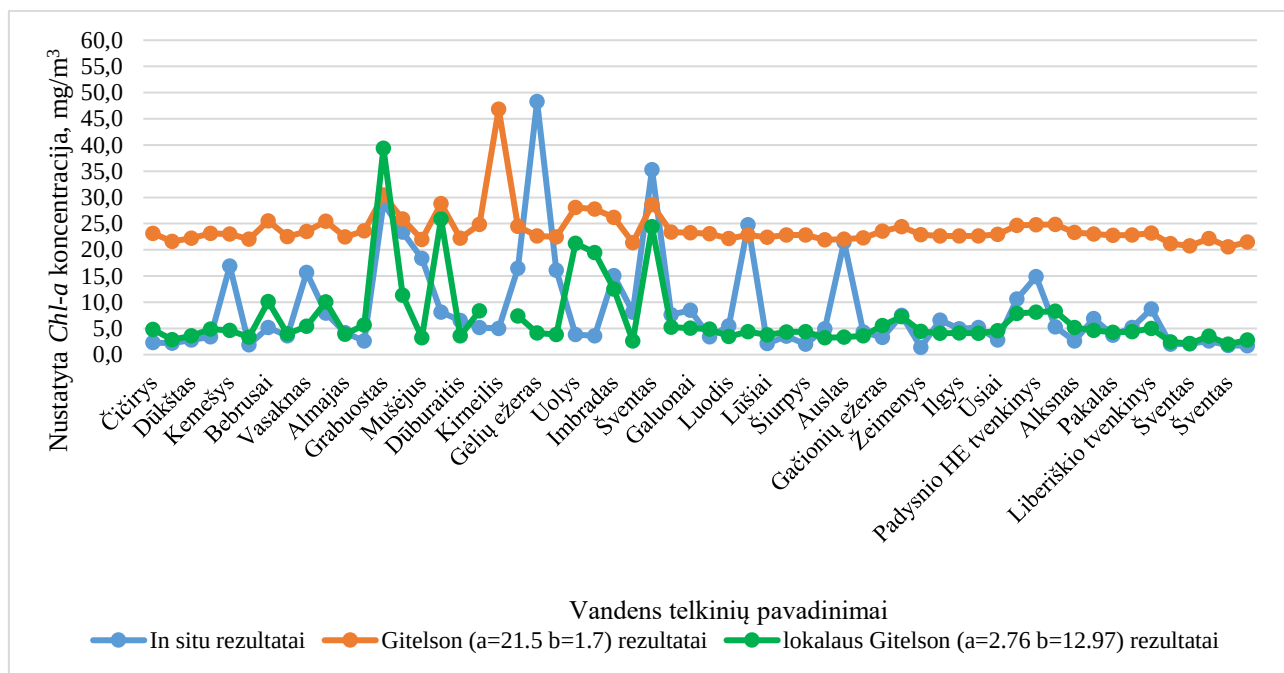
3.6 pav. Debesuotumo poveikio pavyzdys nuotoliniam *Chl-a* koncentracijos įvertinimui



3.7 pav. Pakrančių zonos galimas poveikis nuotoliniam *Chl-a* koncentracijos įvertinimui

Bendras visų analizuotų vandens telkinių duomenų palyginimas tarp *in situ* rezultatų, pradinių Gitelsono įverčių ir lokalizuotų koeficientų rezultatų pateikiamas linijinėje diagramoje (žr. 3.8 pav.). Joje aiškiai matyti, kad pradiniai koeficientai (oranžinė linija) sistemingai pervertina *Chl-a* koncentracijas ir beveik nekinta tarp skirtingų telkinių, slopindami realų kintamumą. Tuo tarpu lokalizuotų koeficientų įverčiai (žalia linija) labiau atitinka *in situ* matavimus (mėlyna linija) – tiek pagal absoliučias reikšmes, tiek pagal jų variaciją skirtinguose vandens telkiniuose. Tai įrodo, kad

regioninė kalibracija yra būtina, siekiant patikimų nuotolinių stebėjimų rezultatų Lietuvos vidaus vandenyse.



3.8 pav. *In situ* ir palydovinių (*Landsat*, *Sentinel*) *Chl-a* koncentracijos įverčių palyginimas naudojant pradinius ir lokalizuotus Gitelsono koeficientus

Atsižvelgiant į identifikuotas problemas, tokias kaip debesuotumo poveikis, pakrančių zonų padidinta atspindžio vertė bei tai, kad *Sentinel* palydovo duomenys pasirodė esantys patikimesni nei *Landsat*, buvo atlikta papildoma analizė. Iš *Copernicus Open Access Hub* platformos buvo atsisiųsti *Sentinel-2 MSI L2A* duomenys, apimantys 2022 m. rugpjūčio 24 d. laikotarpį Trakų rajono savivaldybėje. Ši data pasirinkta dėl nulinio debesuotumo lygio, be to, ji beveik tiksliai sutampa su Galvės ir Didžiulio ežerų *in situ* matavimų laikotarpiu (vienos dienos skirtumas).

Atlikus skaičiavimus tiek pagal pradinius (žr. 6 priedą), tiek pagal lokalizuotus (žr. 5 priedą) Gitelsono koeficientus, gauti rezultatai patvirtina lokalizavimo svarbą. Pagal *in situ* duomenis, Galvės ež. *Chl-a* koncentracija sudarė 2,3 mg/m³, o Didžiulio ež. – net 179,9 mg/m³. Tačiau taikant pradinius koeficientus, palydoviniai įverčiai gerokai pervertino mažas koncentracijas ir nuvertino dideles: Galvės ež. gauta net 22,6 mg/m³, o Didžiulio ež. – tik 34,4 mg/m³. Tuo tarpu taikant lokalizuotus koeficientus, Galvės ež. įvertis sumažėjo iki 4,0 mg/m³, o Didžiulio ež. reikšmė pakilo iki 100,6 mg/m³ – artimesnių tikrosioms *in situ* reikšmėms.

Matomas akivaizdus lokalizuotų koeficientų pranašumas, ypač mažų ir didelių *Chl-a* koncentracijų ribose. Visgi šie rezultatai taip pat rodo, kad koeficientai dar gali būti tobulintini, įtraukiant platesnį vandens telkinių ir sezoninių sąlygų spektrą, siekiant didesnio tikslumo ir modelio universalumo.

IŠVADOS

1. Tyrimo metu sėkmingai surinkti ir apdoroti monitoringo metu gauti tiesioginiai *Chl-a* koncentracijos duomenys bei atrinkti atitinkami *Sentinel-2 (MSI L2A)* ir *Landsat 8–9 (OLI_TIRS C2 L2)* palydoviniai vaizdai. Siekiant užtikrinti rezultatų tikslumą, palydoviniai duomenys buvo kruopščiai parinkti pagal debesuotumo lygį ir atitiktį *in situ* matavimo laikui.

2. Duomenų analizė atlikta pasitelkiant geografinių informacinių sistemų (*GIS*) priemones, kurios sudarė galimybę vizualizuoti, geografiškai analizuoti bei palyginti skirtingų šaltinių *Chl-a* koncentracijos duomenis. *GIS* įrankiai padėjo tiksliai identifikuoti vandens telkinių ribas ir pritaikyti joms atitinkamus lokalizuotus koeficientus, o tai padidino skaičiavimų tikslumą. Skaičiavimams naudotos *B2* (mėlynoji) ir *B3* (žalioji) spektrinės juostos, kurių santykis ($B3/B2$) ypač jautrus *Chl-a* pokyčiams vandenyje, ypač esant mažoms koncentracijoms.

3. Atlikus nuotolinių tyrimų duomenų ir tiesioginių matavimų palyginimą, paaiškėjo, kad lokalizuoti Gitelsono koeficientai ($a = 2,76$; $b = 12,97$) reikšmingai pagerina palydovinių *Chl-a* įverčių tikslumą, palyginti su pradiniais (literatūriniais) koeficientais. Vidutiniai absoliutūs ir nuokryptai kartais sumažėjo kelis kartus, ypač *Sentinel-2* palydovo duomenyse, kurie pasižymėjo didesniu jautrumu ir geresniu atitikimu *in situ* rezultatams. Vis dėlto, kai kuriuose telkiniuose fiksuota išsiskiriančių reikšmių, rodančių, kad lokalizuotas modelis nors ir tikslesnis, tačiau kol kas dar nėra pakankamai preciziškas taikyti plačiai praktikoje be papildomo tikslinimo.

4. Nuotoliniai tyrimų metodai nėra skirti pakeisti tiesioginių (*in situ*) matavimų – jie gali veikti tik kaip papildoma priemonė, padedanti išplėsti stebėsenos aprėptį tiek erdvėje, tiek laike. Palydoviniai duomenys leidžia greitai įvertinti bendrą vandens telkinių būklę, ypač kai stebimi dideli plotai ar keli vandens telkiniai vienu metu. Be to, jų taikymo privalumas – galimybė gauti duomenis dažnu intervalu (pvz., *Sentinel-2* kas 5 dienas), todėl tampa įmanoma efektyviai stebėti trumpalaikius pokyčius.

5. Atsižvelgiant į atliktą tyrimą, galima rekomenduoti nuotolinių tyrimų metodų integravimą į bendrą vandens kokybės stebėsenos sistemą, ypač kai siekiama greitai įvertinti didesnės teritorijos būklę ir nustatyti galimas problemines zonas. *GIS* įrankiai bei lokalizuotų koeficientų taikymas leidžia padidinti tokios analizės tikslumą. Vis dėlto, sprendimai, grįsti vien palydoviniais duomenimis, turi būti vertinami atsargiai ir kiek įmanoma tikrinami laboratoriniais (*in situ*) matavimais.

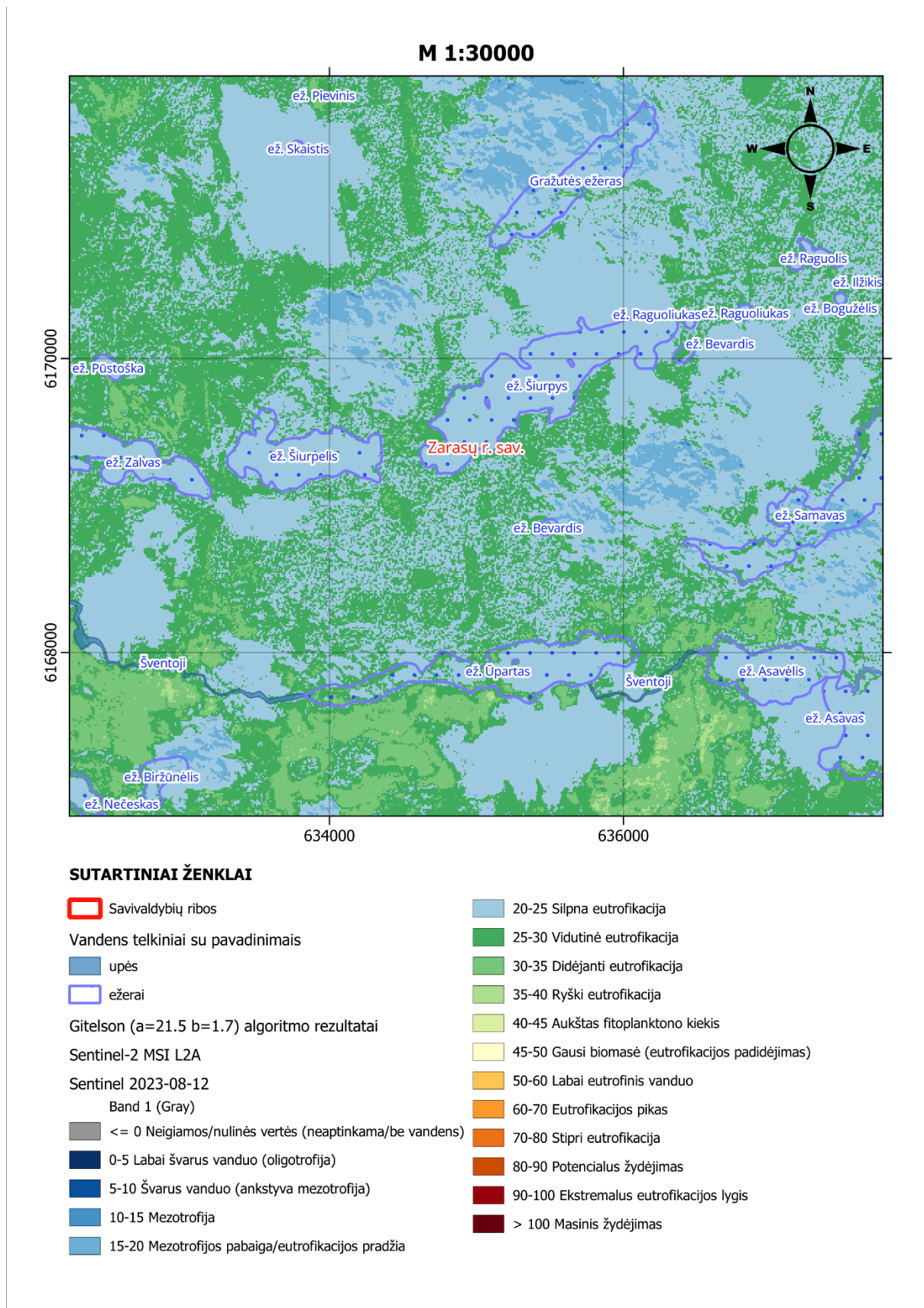
LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Free, G., Bresciani, M., Pinardi, M., Simis, S., Liu, X., Albergel, C., Giardino, C. 2022. Investigating lake chlorophyll-a responses to the 2019 European double heatwave using satellite remote sensing. *Ecological Indicators* Volume 142, September 2022, 109217.
- Ryu, J., Son, S.H., Jo, C.O., Kim, H., Kim, Y., Lee, S.H., Joo, H.T. 2022. Revised chlorophyll-a algorithms for satellite ocean color sensors in the East/Japan Sea. *Regional Studies in Marine Science* 60 2023, 102876.
- Soomets, T., Toming, K., Paavel, B., Kutser, T. 2022. Evaluation of remote sensing and modeled chlorophyll-a products of the Baltic Sea. *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 16, Issue 4, 046516.
- Chu, H-J., He, Y-C. 2023. Remote sensing water quality inversion using sparse representation: Chlorophyll-a retrieval from Sentinel-2 MSI data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 31, 101006.
- Jiang, G., Loiselle, S., Yang, D., Ma, R., Su, W., Gao, C. 2020. Remote estimation of chlorophyll a concentrations over a wide range of optical conditions based on water classification from VIIRS observations. *Remote Sensing of Environment* 241, 111735.
- Dzurume, T., Dube, T., Shoko, C. 2022. Remotely sensed data for estimating chlorophyll-a concentration in wetlands located in the Limpopo Transboundary River Basin, South Africa. 2022. *Physics and Chemistry of the Earth* 127, 103193.
- Xia, Y., Chen, J., Xu, Y., Guo, S., Nie, X., Guo, Y., Li, X., Hao, F., Fu, Y, H. 2023. Monitoring of chlorophyll-a and suspended sediment concentrations in optically complex inland rivers using multisource remote sensing measurements. *Ecological Indicators* 155, 111041.
- Rodriguez-Lopez, L., Duran-Llacer, I., Gonzalez-Rodriguez, L., Abarca-del-Rio, R., Cardenas, R., Parra, O., Martinez-Retureta, R., Urrutia, R. 2020. Spectral analysis using LANDSAT images to monitor the chlorophyll-a concentration in Lake Laja in Chile. *Ecological Informatics* 60, 101183.
- Rwanga S.S., Ndambuki J.M. 2017. Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification Using Remote Sensing and GIS. *International Journal of Geosciences*, 8, 611-622.
- Foody G.M. 2020. Explaining the unsuitability of the kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification. *Remote Sensing of Environment* 239, 111630.
- Banerjee M., Capozzoli M., McSweeney L., Sinha D. 1999. Beyond kappa: A review of interrater agreement measures. *The Canadian Journal of Statistics*, Vol. 27, No. 1, Pages 3-23.
- Allouche O., Tsoar A., Kadmon R. 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology* 43, 1223-1232.

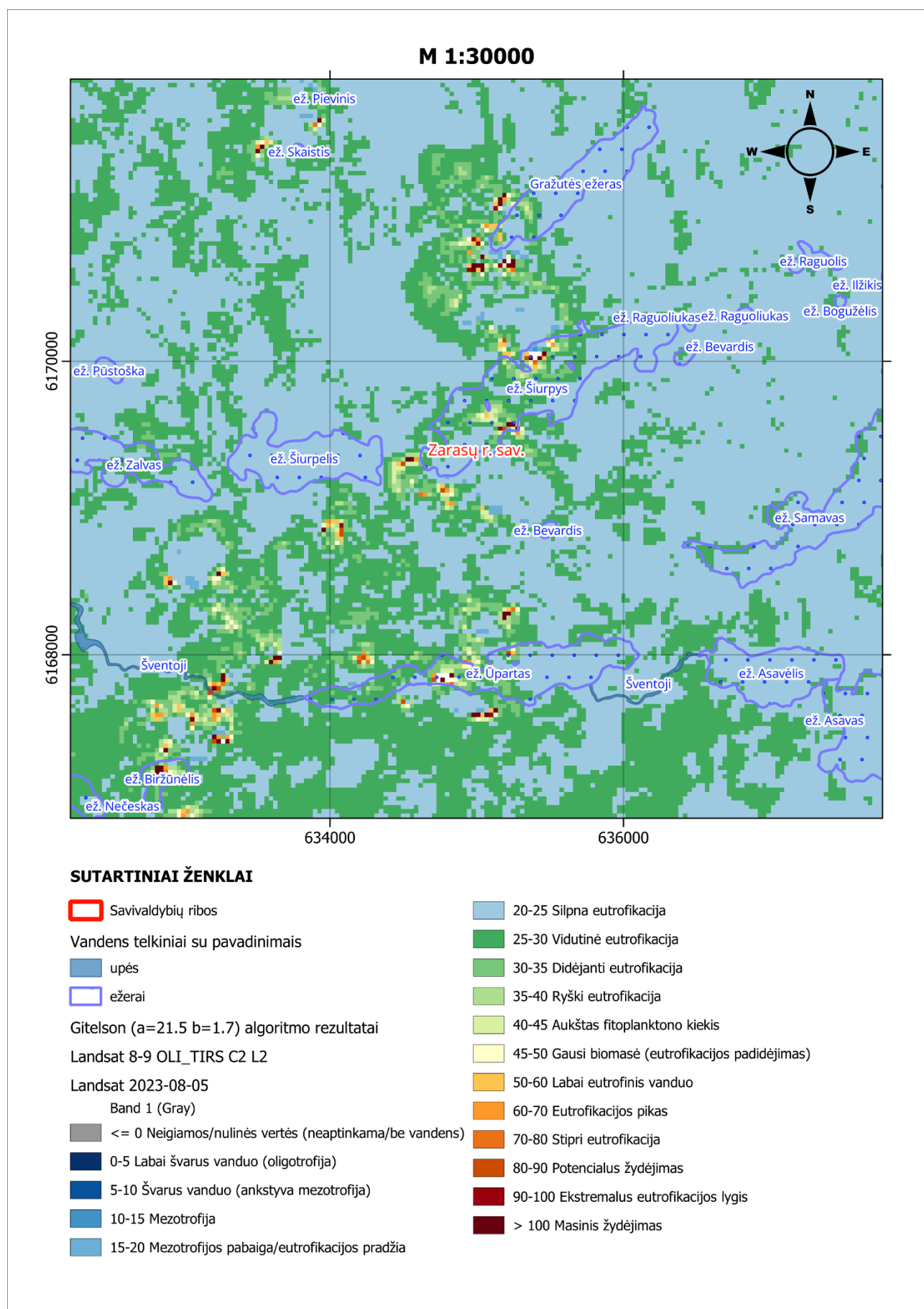
- Grosz, J., Toth, V. Z., Waltner, I., Vekerdy, Z., Halupka, G. 2024. Comparative Study of In Situ Chlorophyll-a Measuring Methods and Remote Sensing Techniques Focusing on Different Applied Algorithms in an Inland Lake. *Water* 2024, 16, 2104.
- Kilpys, J., Jukna, L., Stonevičius, E., Šimanauskienė, R., Bevainis, L. 2021. Žemės stebėjimas iš kosmoso. Vilniaus universiteto leidykla, 2021. ISBN 978-609-07-0574-2.
- Masek, J.G., Wulder, M.A., Markham, B., McCorkel, J., Crawford, C.J., Storey, J., Jenstrom, D.T. 2020. Landsat 9: Empowering open science and applications through continuity. *Remote Sensing of Environment* 248 (2020) 111968.
- Niroumand-Jadidi, M., Bovolo, F., Bresciani, M., Gege, P., Giardino, C. 2022. Water Quality Retrieval from Landsat-9 (OLI-2) Imagery and Comparison to Sentinel-2. *Remote Sens*, 2022, 14, 4596.
- Litchman, E., Klausmeier, C.A. 2008. Trait-Based Community Ecology of Phytoplankton. *The Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*. 2008. 39:615–39.
- Tech Note. The Basics of Chlorophyll Measurement. A xylem brand. 0113T606-01.
- Measurement and Control, 2025. <https://www.bellflowsystems.co.uk>.
- YSI Incorporated, 2025. <https://www.ysi.com/accessory/id-6025/6025-chlorophyll-sensor>.

PRIEDAI

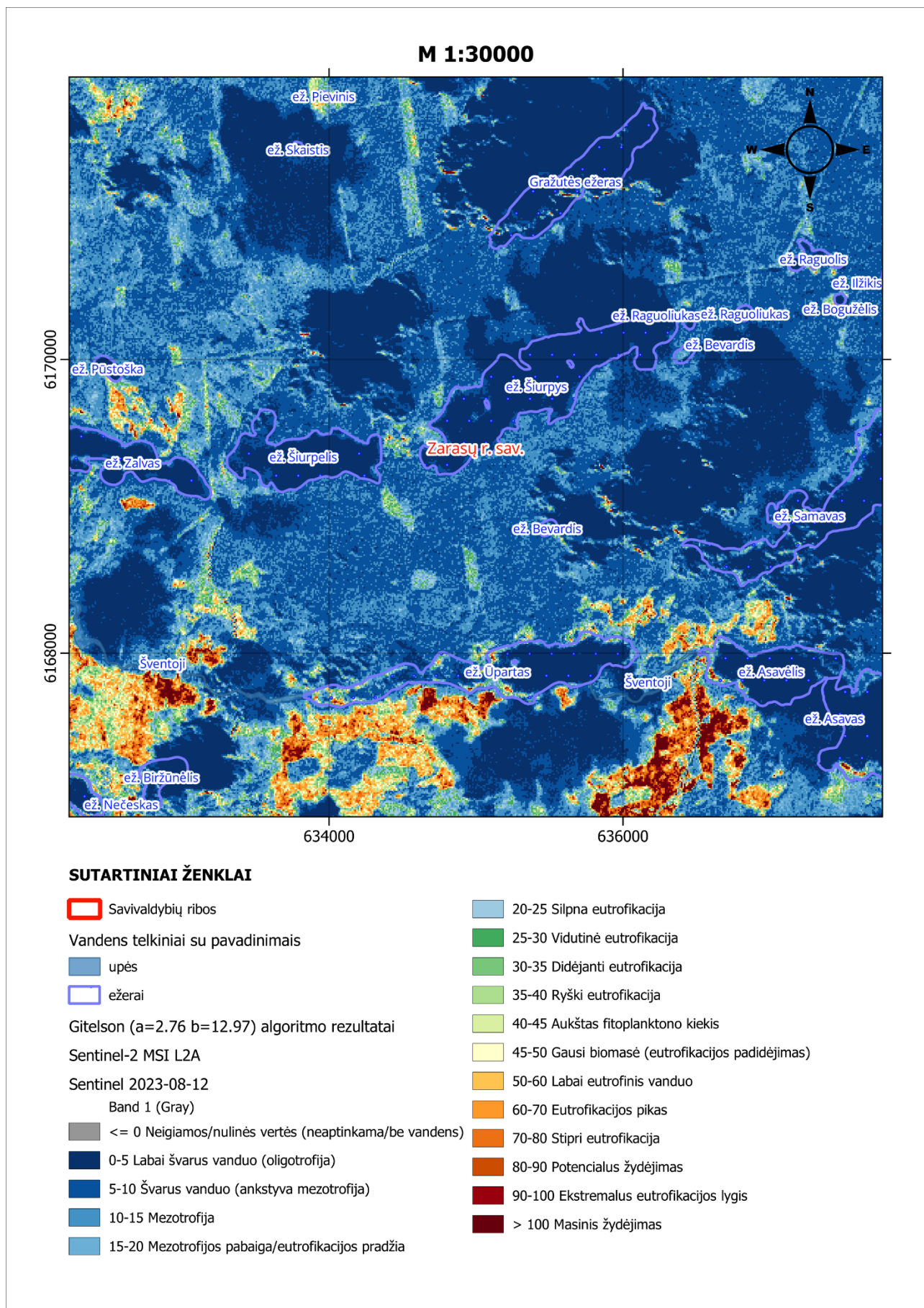
1 priedas. *Chl-a* koncentracijos (pagal pradinus koeficientus) erdvinis pasiskirstymas 2023 m. rugpjūčio 12 d. (*Sentinel-2 MSI L2A* duomenys)



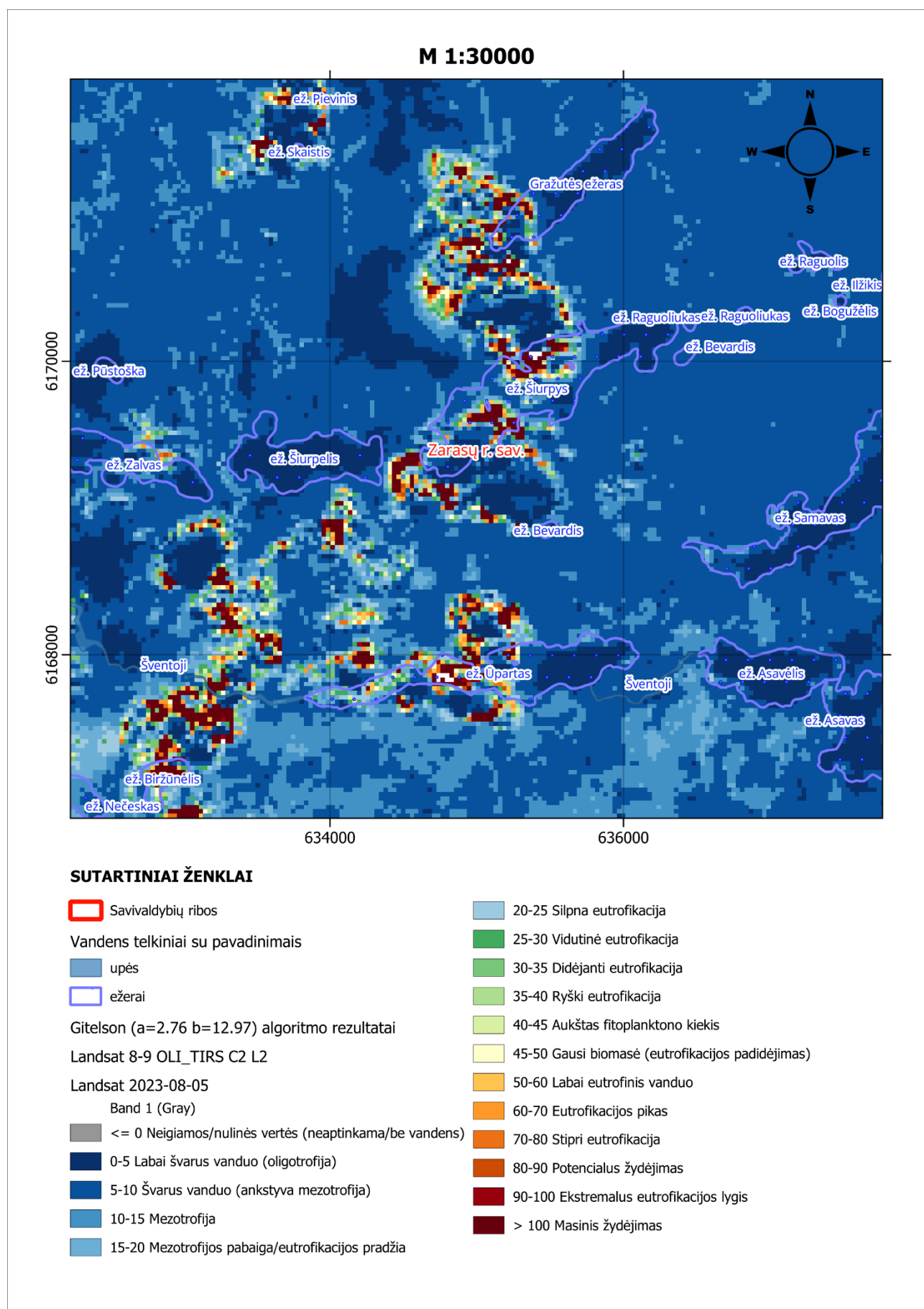
2 priedas. *Chl-a* koncentracijos (pagal pradinis koeficientus) erdvinis pasiskirstymas 2023 m. rugpjūčio 5 d.
(Landsat 8-9 OLI_TIRS C2 L2 duomenys)



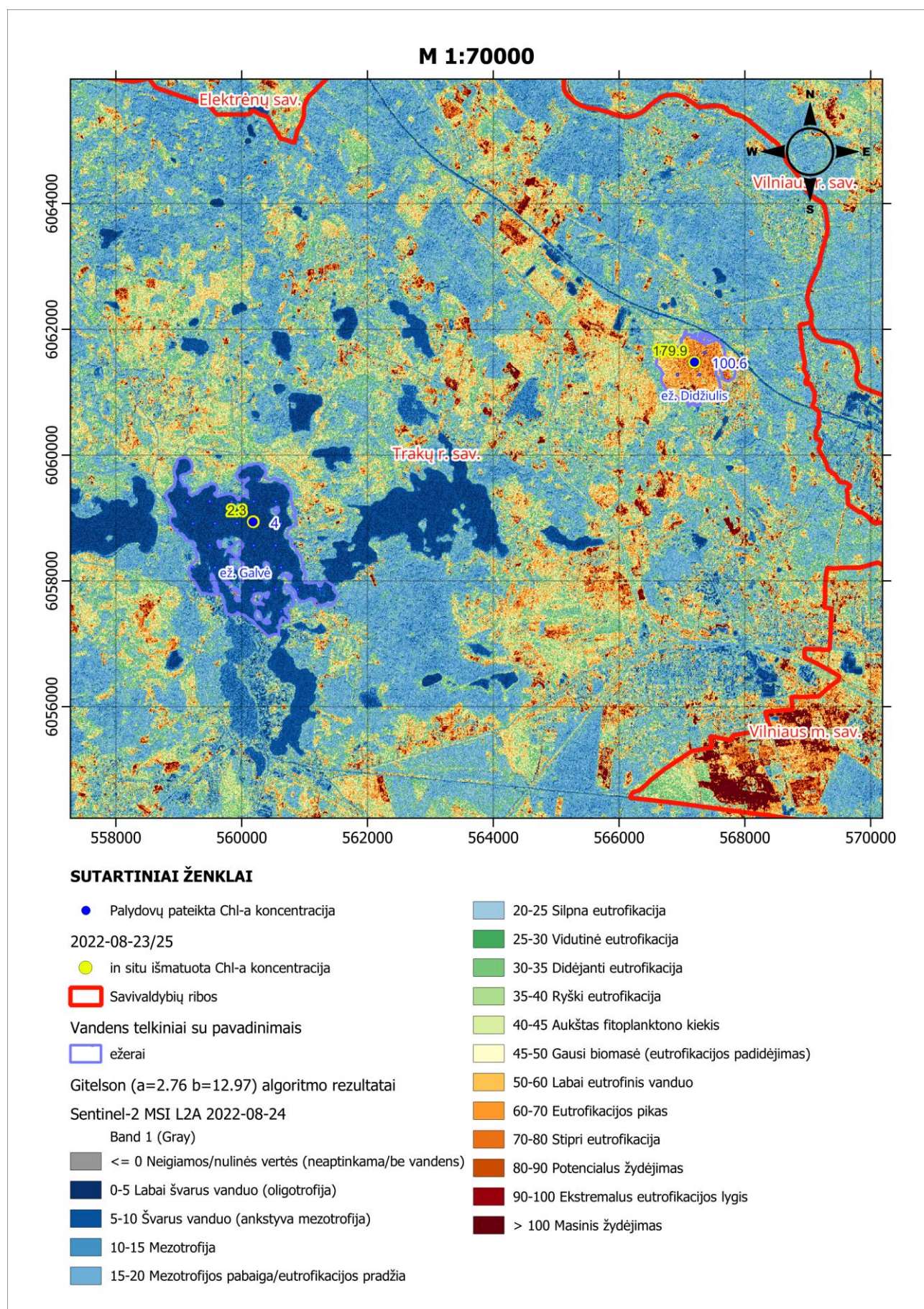
3 priedas. *Chl-a* koncentracijos (pagal lokalizuotus koeficientus) erdvinis pasiskirstymas 2023 m. rugpjūčio 12 d. (*Sentinel-2 MSI L2A* duomenys)



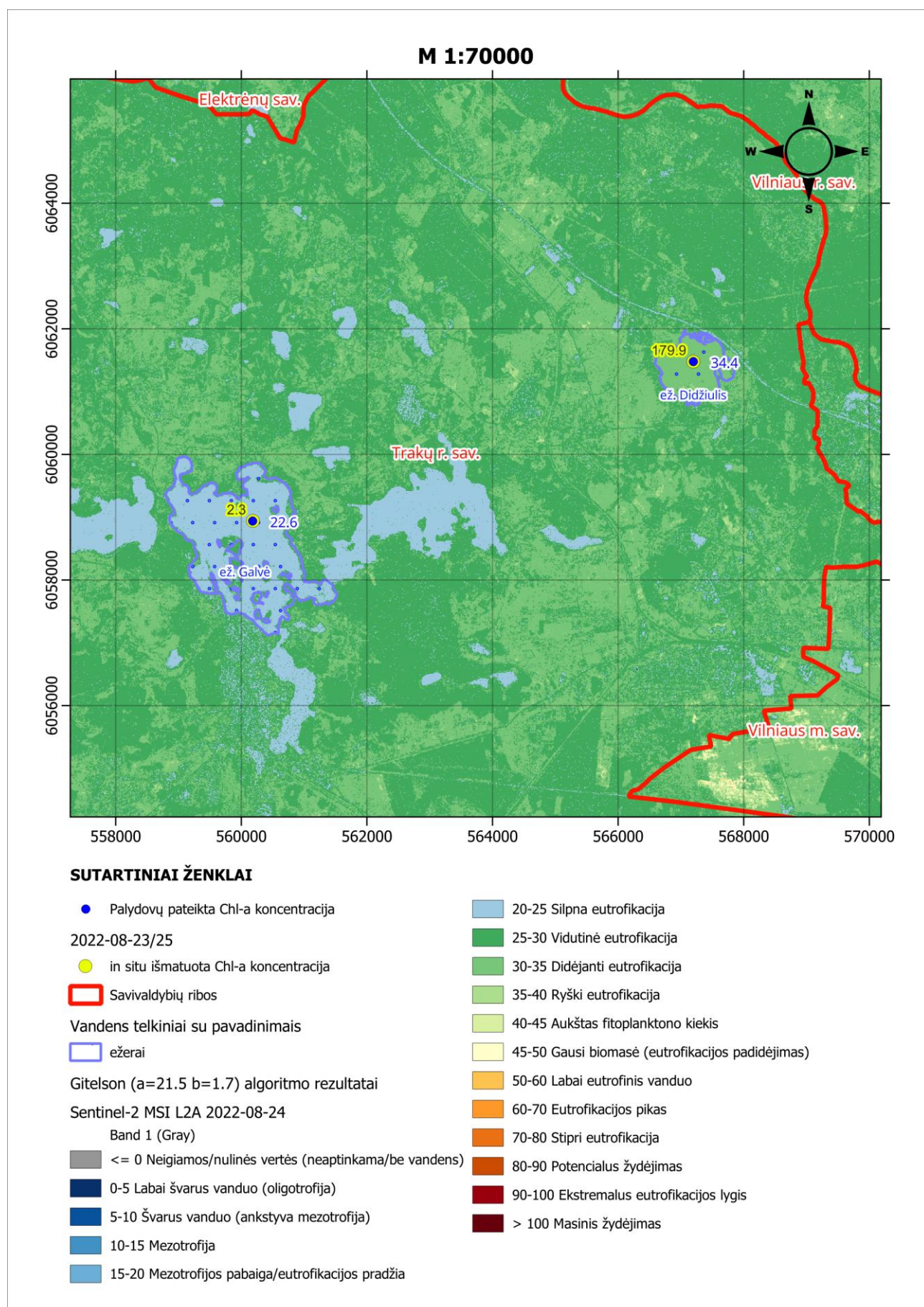
4 priedas. *Chl-a* koncentracijos (pagal lokalizuotus koeficientus) erdvinis pasiskirstymas 2023 m. rugpjūčio 5 d. (*Landsat 8-9 OLI_TIRS C2 L2* duomenys)



5 priedas. *Chl-a* koncentracijos (pagal lokalizuotus koeficientus) erdvinis pasiskirstymas 2022 m. rugpjūčio 24 d. (Landsat 8-9 OLI_TIRS C2 L2 duomenys)



6 priedas. *Chl-a* koncentracijos (pagal pradinis koeficientus) erdvinis pasiskirstymas 2022 m. rugpjūčio 24 d. (*Landsat 8-9 OLI_TIRS C2 L2* duomenys)



SUTIKIMAS DĖL ASMENS DUOMENŲ NAUDOJIMO

2025-05-29

Šiuo sutikimu aš, Andrėj Kozliuk (toliau – Duomenų subjektas) sutinku, kad Vilniaus Gedimino technikos universitetas, juridinio asmens kodas 111950243, adresas Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius (toliau – Duomenų valdytojas), tvarkytų mano asmens duomenis kitų studentų mokymosi tikslu. T. y. tvarkytų (*pažymėkite tinkamą*):

- ☐ vardą, pavardę, bakalauro baigiamąjį darbą;
- ☐ bakalauro baigiamąjį darbą, nenurodant vardo, pavardės;
- ☐ vardą, pavardę, magistro baigiamąjį darbą;
- ☒ magistro baigiamąjį darbą nenurodant vardo, pavardės.

Šiuo tikslu tvarkomų asmens duomenų Duomenų valdytojas neperduos jokiems tretiesiems asmenims, studentams su baigiamaisiais darbais bus leidžiama susipažinti vidinėje informacinėje sistemoje. Duomenų subjekto asmens duomenys šiuo tikslu bus naudojami ne ilgiau nei 5 metai.

Šiuo sutikimu Duomenų subjektas patvirtina, kad yra supažindintas su šiomis teisėmis:

- Susipažinti su savo duomenimis ir kaip jie yra tvarkomi (teisė susipažinti);
- Reikalauti ištaisyti arba, atsižvelgiant į asmens duomenų tvarkymo tikslus papildyti asmens neišsamius asmens duomenis (teisė ištaisyti);
- Savo duomenis sunaikinti arba sustabdyti savo duomenų tvarkymo veiksmus (išskyrus saugojimą) (teisė sunaikinti ir teisė „būti pamirštam“);
- Reikalauti, kad asmens duomenų valdytojas apribotų asmens duomenų tvarkymą (teisė apriboti);
- Teise į duomenų perkėlimą (teisė perkelti);
- Nesutikti, kad būtų tvarkomi asmens duomenys, kai šie duomenys tvarkomi ar ketinami tvarkyti kitais tikslais;
- Pateikti skundą Valstybinei duomenų apsaugos inspekcijai;

Duomenų subjektas turi teisę bet kuriuo metu atšaukti savo sutikimą.

Andrėj Kozliuk

Duomenų valdytojo rekvizitai:
Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Juridinio asmens kodas: 111950243
Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius
Tel. (8 5) 274 5030
Faks. (8 5) 270 0112
El. paštas: vilniustech@vilniustech.lt
PVM mokėtojo kodas: LT119502413

Duomenų apsaugos pareigūno tel. (8 5) 251 2191, el. paštas: dap@vilniustech.lt