Central Asian Research Journal of Natural and Exact Sciences
INTERNATIONAL SCIENTIFIC, APPLIED AND THEORETICAL JOURNAL
2026 / № 1(3)
SCIENCE FOR A SUSTAINABLE CENTRAL ASIA

GIDROELEKTR STANSIYALARIDA ELEKTR ENERGIYASI ISHLAB CHIQARISH UCHUN SUV OMBORLARINI ILG‘OR TEXNOLOGIK BOSHQARISH

Hamadulloyev Diyorbek Hasanboy o‘g‘li

Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, 89M-25 guruh talabasi
E-mail: khamadulloyevdiyor007@gmail.com

Annotatsiya. Maqolada gidroelektr stansiyasida suv resurslarini boshqarish va elektr energiyasi ishlab chiqarish jarayonini takomillashtirish uchun ilg‘or texnologik boshqaruv tizimini ishlab chiqish hamda amaliyotga joriy etish masalalari yoritilgan. Tadqiqot obyekti sifatida rostlash zatvori orqali o‘zaro bog‘langan ikkita suv ombori va elektr energiyasi ishlab chiqaruvchi gidroturbinalardan tashkil topgan gidroenergetik tizim o‘rganilgan. Dastlab stansiyaning mavjud ishlash tartibi tahlil qilinib, boshqariladigan, nazorat qilinadigan va tashqi ta’sir etuvchi o‘zgaruvchilar aniqlangan. Jarayonning matematik modeli fizik qonuniyatlar va tajriba ma’lumotlari asosida shakllantirilgan. Suv omborlaridagi suv hajmini belgilangan chegaralarda saqlash, suv tanqisligi va ortiqcha oqimning oldini olish hamda elektr energiyasi ishlab chiqarish rejasiga rioya qilish maqsadida modelga asoslangan bashoratli boshqaruv (MPC) usuli qo‘llanilgan. Taklif etilgan tizimda ma’lumotlarning ishonchliligini tekshirish, model nomuvofiqligini kompensatsiyalash va aqlli avariya-ogohlantirish signallarini shakllantirish modullari ham nazarda tutilgan. Virtual sinovlar va real obyekt natijalari tizim suv resurslaridan foydalanishni optimallashtirishi hamda ishonchli ishlashini ko‘rsatgan.

Kalit so‘zlar: gidroelektr stansiya, avtomatlashtirilgan boshqaruv, suv ombori, ilg‘or texnologik boshqaruv, modelga asoslangan bashoratli boshqaruv, MPC, SCADA, PLC, suv sarfi, gidroagregat.

Kirish

Gidroelektr stansiyalarida suv resurslaridan samarali foydalanish elektr energiyasi

ishlab chiqarishning iqtisodiy va texnologik samaradorligini belgilovchi muhim omillardan biridir. GES faoliyatida suvning ortiqcha sarflanishiga yo‘l qo‘ymaslik, suv omborlaridagi sathni me’yoriy chegaralarda ushlab turish, gidroagregatlarning belgilangan elektr yuklamasini bajarishini ta’minlash va quyi oqimdagi suv ta’minotini muvofiqlashtirish talab etiladi. Ushbu vazifalar ko‘plab o‘zaro bog‘liq parametrlar, kechikishlar va tashqi ta’sirlar mavjud bo‘lgan murakkab texnologik jarayonni tashkil etadi.

So‘nggi yillarda gidroenergetika obyektlarida raqamlashtirish, ma’lumotlarni yig‘ish va qayta ishlash, SCADA tizimlari hamda ilg‘or boshqaruv algoritmlaridan foydalanish kengaymoqda. An’anaviy avtomatik rostlash tizimlari odatda alohida qurilma yoki parametrni boshqarishga yo‘naltirilgan bo‘lsa, ilg‘or texnologik boshqaruv (APC) butun jarayonning o‘zaro bog‘liq holatini hisobga oladi. Bunda operator yuqori boshqaruv darajasida nazoratni amalga oshiradi, boshqaruv algoritmi esa joriy va bashorat qilingan holatlarga asoslanib optimal boshqaruv ta’sirini hisoblaydi.

Zanoli va hammualliflarining tadqiqotida suv omborlari sathini boshqarish uchun MPC usuliga asoslangan APC tizimi ishlab chiqilgan. Ishning asosiy maqsadi suv omborlaridagi suv hajmini cheklovlar doirasida saqlash, elektr energiyasi ishlab chiqarish rejasini bajarish va suv resurslarining samarasiz sarflanishini kamaytirishdan iborat.

Mavzuga oid adabiyotlar sharhi

Gidroenergetika obyektlarida optimallashtirish masalalari uzoq, o‘rta va qisqa muddatli elektr energiyasi ishlab chiqarish jadvallarini shakllantirish, gidroagregatlar o‘rtasida yuklamani taqsimlash hamda suv omborlarining ishlash rejimini belgilashni qamrab oladi. Ilmiy ishlarda genetik algoritmlar, zarrachalar to‘dasi optimallashtirishi va boshqa metaevristik usullar yordamida suv resurslaridan foydalanish samaradorligini oshirish yo‘llari taklif etilgan.

Gidroagregatlarning elektr quvvati, chastotasi va kuchlanishini boshqarish bo‘yicha tadqiqotlarda ichki modelga asoslangan boshqaruv, oldindan ta’sir etish

(feedforward), noaniq mantiq va robust boshqaruv usullari ko‘rib chiqilgan. Boshqa tadqiqotlarda esa suv omborlari sathi va hajmini boshqarish, toshqin xavfini kamaytirish hamda bir nechta o‘zaro bog‘langan suv omborlari ishini muvofiqlashtirish uchun bashoratli boshqaruv algoritmlari qo‘llanilgan.

Ko‘rib chiqilayotgan maqolaning o‘ziga xos jihati shundaki, unda faqat boshqaruv algoritmini ishlab chiqish bilan cheklanilmaydi. Jarayonni oldindan o‘rganish, datchiklardan ma’lumotlarni tanlash va yig‘ish, ma’lumotlar sifatini tekshirish, matematik modelni identifikatsiya qilish, tashqi ta’sirlarni bashoratlash, virtual muhitda sinash va real GESda ishga tushirish bosqichlari yagona metodologiya sifatida bayon qilingan.

Tadqiqot obyekti va boshqaruv masalasining qo‘yilishi

Tadqiqot Italiyaning Alto Adige hududida joylashgan gidroelektr stansiyasida olib borilgan. Jarayonning asosiy elementlari ikkita sun’iy suv ombori, ularni bog‘lovchi rostlash zatvori, suv uzatish tunnellari, bosimli quvur va elektr energiyasi ishlab chiqaruvchi Frensis turbinlaridan iborat. Stansiyada umumiy samarali quvvat 22 MW bo‘lgan ikki guruh Frensis turbinlari o‘rnatilgan. Yillik o‘rtacha elektr energiyasi ishlab chiqarish 86,81 GWh ni tashkil etadi.

Yuqori joylashgan suv omboridan suv rostlash zatvori orqali tunnelga, undan quyi suv omboriga uzatiladi. Quyi suv omboridan esa suv tunnel va bosimli quvur orqali GESga yetkaziladi. Rostlash zatvorining kapalak turidagi klapani o‘rnatilgan PLC orqali boshqariladi; gidravlik yuritma zatvorning mexanik harakatini ta’minlaydi. Zatvor bo‘yicha suv sarfi topshirig‘i 0 dan 8 m^3/s gacha o‘zgartirilishi mumkin, biroq stansiyaning odatiy ish sharoitida yuqori qiymat odatda 7 m^3/s bilan cheklanadi.

Tadqiqotda boshqaruv o‘zgaruvchisi (MV) sifatida rostlash zatvorining suv sarfi topshirig‘i tanlangan. Boshqariladigan o‘zgaruvchilar (CV) yuqori va quyi suv omborlaridagi suv hajmlaridan iborat. O‘lchanadigan tashqi ta’sirlar (DV) esa yuqori omborga keluvchi asosiy va qo‘shimcha suv oqimlari, quyi omborga qum tutgich orqali keluvchi oqim hamda quyi ombordan GES tomon chiqariladigan suv sarfini o‘z ichiga

oladi. Suv omborlari hajmi bevosita o‘lchanmagan; ular sath datchiklari ko‘rsatkichlari asosida hisoblangan.

Mavjud boshqaruv asosan qo‘lda va yarim avtomatik rejimlarda, operatorlarning tajribasi hamda empirik qoidalarga tayangan holda amalga oshirilgan. Yangi tizim oldiga quyidagi talablar qo‘yilgan:

– yuqori va quyi suv omborlaridagi suv hajmini belgilangan ruxsat etilgan chegaralarda saqlash;

– suv omborlaridan suvning toshib ketishiga yo‘l qo‘ymaslik;

– ayniqsa quyi suv omborida suv tanqisligi yuzaga kelishining oldini olish;

– GESning elektr energiyasi ishlab chiqarish rejasiga rioya qilish;

– rostlash zatvorining fizik va texnik-ekspluatatsion cheklovlarini hisobga olish;

– zatvorni tez-tez harakatlantirishni kamaytirish va shu orqali mexanik yeyilishni cheklash.

Ma’lumotlarni yig‘ish va qayta ishlash

Boshqaruv tizimini yaratishdan oldin texnologik jarayonning mavjud holati o‘rganilgan. Datchiklar, PLC qurilmalari va mahalliy rostlagichlardan olinadigan signallar tanlangan. Jumladan, zatvorning suv sarfi topshirig‘i va haqiqiy qiymati, suv omborlari sathi, kiruvchi va chiquvchi suv oqimlari hamda turbinalarning elektr quvvati ma’lumotlari yig‘ilgan. Elektr energiyasi ishlab chiqarishning kunlik rejasi ham yuqori darajadagi dispetcherlik tizimidan oldindan olinadi.

Ma’lumotlarni yig‘ish arxitekturasida PLC qurilmalari texnologik obyektlardan signallarni uzatadi. Stansiyada o‘rnatilgan serverda SCADA tizimi va ma’lumotlar bazasi ishlaydi. Boshqaruv xonasidagi mijoz kompyuter operatorlar, muhandislar va rahbarlarga kerakli ma’lumotlarni qulay grafik ko‘rinishda taqdim etadi. Shu tariqa quyi darajadagi boshqaruv qurilmalari, SCADA, ma’lumotlar bazasi va operator interfeysi o‘zaro bog‘langan.

Ma’lumotlar sifatini baholashda datchiklarning o‘lchash diapazonlari, keskin sakrashlar, o‘zgarmay qolgan signallar, aloqa uzilishlari va yetishmayotgan qiymatlar

tekshirilgan. Noto‘g‘ri yoki yetishmayotgan ma’lumotlar aniqlanganda tegishli qayta ishlash va regressiya usullari qo‘llanilgan. Shuningdek, sirg‘aluvchi o‘rtacha qiymat filtri yordamida o‘lchovlardagi tasodifiy tebranishlar kamaytirilgan:

$$mf(k) = [m(k) + m(k-1) + \ldots + m(k-N+1)] / N$$

Bu yerda m(k) — k vaqt onidagi datchik o‘lchovi, N — filtrlash oynasidagi namunalar soni, m_f(k) esa filtrlangan qiymatdir. Tadqiqotda ayrim signallar uchun 20 ta namunadan, ya’ni 20 minutlik oynadan foydalanilgan.

Mahalliy boshqaruv konturlarining ishlashi ham tekshirilgan. Zatvor topshirig‘i o‘zgartirilganda o‘tish vaqti, ortiqcha rostlash, turg‘unlashish vaqti hamda topshiriq bilan haqiqiy qiymat o‘rtasidagi og‘ishlar baholangan. Elektr energiyasi ishlab chiqarish rejasi bilan haqiqiy ishlab chiqarish taqqoslanib, reja bajarilmagan holatlarni aniqlash uchun aqlli ogohlantirish mexanizmi kiritilgan.

Jarayonning matematik modeli

MPC algoritmini qo‘llash uchun suv omborlaridagi hajm o‘zgarishini ifodalovchi matematik model ishlab chiqilgan. Model fizik qonuniyatlar va obyektning tarixiy ma’lumotlariga asoslangan. Yuqori suv ombori uchun suv hajmining o‘zgarishi kiruvchi oqimlar yig‘indisidan zatvor orqali chiqayotgan oqimni ayirish bilan aniqlanadi:

$$dW_1/dt = Q_1 + Q_2 - Q_3$$

Quyi suv ombori uchun esa:

$$dW_2/dt = Q_3 + Q_3(t - 43) - Q_4(t - 3)$$

Bu yerda W_1 va W_2 — mos ravishda yuqori va quyi suv omborlaridagi suv hajmi; Q_1 va Q_2 — yuqori omborga kiruvchi asosiy va qo‘shimcha oqimlar; Q_3 — rostlash zatvori orqali uzatiladigan oqim; Q_3 — quyi omborga qum tutgich orqali keladigan oqim; Q_4 — quyi ombordan chiqariladigan oqim. Tenglamalarda kiruvchi oqimlar musbat, chiquvchi oqimlar manfiy ishora bilan olinadi.

Tadqiqotda zatvor orqali uzatilgan suvning quyi omborga ta’siri taxminan 43 minut kechikish bilan namoyon bo‘lishi aniqlangan. Quyi ombordan chiqariladigan suv oqimini o‘lchash joylashuvi sababli ushbu parametrda ham 3 minutlik kechikish hisobga

olingan. Bunday kechikishlar boshqaruv algoritmi tomonidan oldindan hisobga olinmasa, suv ombori sathini aniq bashorat qilish qiyinlashadi.

Suv ombori sathi va hajmi o‘rtasidagi bog‘lanish ombor geometriyasi to‘g‘risidagi ma’lumotlar cheklanganligi sababli bo‘lakli-chiziqli bog‘lanish bilan yaqinlashtirilgan. Bunda ma’lum sath-hajm juftliklari orasida interpolatsiya bajariladi. Model uzluksiz va diskret vaqt ko‘rinishlariga keltirilib, 60 sekundlik namuna olish oralig‘i qo‘llanilgan.

Rostlash zatvorining maksimal fizik jihatdan erishishi mumkin bo‘lgan suv sarfi Torricelli qonuni asosida baholangan:

$$Q_{max} = S \cdot \sqrt{(2g\Delta h)}$$

Bu yerda S — quvur kesim yuzasi, g — erkin tushish tezlanishi, Δh — suv sathi bilan chiqish nuqtasi orasidagi balandlik farqi. Mazkur bog‘lanish zatvor uchun ruxsat etiladigan yuqori suv sarfi chegarasini real vaqt rejimida moslashtirishga xizmat qiladi.

Bashoratli boshqaruv algoritmi va tizim arxitekturasi

Tadqiqotda modelga asoslangan bashoratli boshqaruv (Model Predictive Control — MPC) usuli tanlangan. Ushbu usul jarayonning matematik modeli yordamida kelajakdagi holatlarni bashorat qiladi va belgilangan cheklovlarni hisobga olgan holda boshqaruv ta’sirini optimallashtiradi. Har bir hisoblash siklida algoritm bashorat ufqi davomida suv omborlari hajmining kutilayotgan o‘zgarishini baholaydi, so‘ng zatvor uchun optimal suv sarfi topshirig‘ini tanlaydi. Keyingi siklda yangi o‘lchovlar olinib, hisoblash qayta bajariladi.

Tizimning bashorat ufqi 130 minut qilib tanlangan. Bu qiymat jarayon modeli, suv oqimlarining kechikishlari va tashqi ta’sirlarni oldindan baholash imkoniyatlari asosida belgilangan. Quyi suv ombori yuqori omborga nisbatan ustuvor deb olingan, chunki quyi omborda suv yetishmasligi elektr energiyasi ishlab chiqarish rejasining bajarilmasligiga olib kelishi mumkin. Shu bilan birga, suv omborlarining yuqori va quyi sath chegaralari hamda zatvorning texnik cheklovlari optimallashtirish masalasiga kiritilgan.

Maqolada klassik MPC tuzilmasiga qo‘shimcha ravishda ikkita muhim modul kiritilgan. Birinchi modul noto‘g‘ri ma’lumotlarni aniqlash, ma’lumotlarni shartlash va

tashqi ta’sirlarni bashorat qilish vazifalarini bajaradi. Ikkinchi modul MPC parametrlarini joriy va bashorat qilingan texnologik holatga qarab tanlaydi. Ushbu modullar datchik yoki aloqa nosozligi, mahalliy rostlash konturidagi muammo, elektr energiyasi ishlab chiqarish rejasidan og‘ish va model nomuvofiqligini aniqlashga yordam beradi.

Matematik model bilan real obyekt xatti-harakati o‘rtasida farq yuzaga kelishi mumkin. Bunga datchik aniqligi, sizib chiqishlar, yog‘ingarchilik, hisobga olinmagan suv kirim-chiqimlari va suv sathi-hajmi bog‘lanishining taxminiyligi sabab bo‘ladi. Shu sababli model nomuvofiqligini kompensatsiyalash uchun qo‘shimcha ekvivalent oqimlar va chiqishdagi tuzatish vektori kiritilgan. Bu yondashuv model bashoratining real jarayondan uzoqlashib ketishini kamaytiradi.

Elektr energiyasi ishlab chiqarish rejasi oldindan ma’lum bo‘lgani sababli quyi suv omboridan GESga uzatiladigan suv sarfini ham bashorat qilish mumkin. Tadqiqotda ushbu oqim bilan umumiy elektr quvvati o‘rtasida taxminan quyidagi empirik bog‘lanish olingan:

$$Q_4 \approx P_{total} / 2{,}1$$

Bu ifoda muayyan tadqiqot obyektining tarixiy ma’lumotlari asosida olingan empirik munosabat bo‘lib, boshqa GESlarda bevosita qo‘llashdan oldin alohida tekshirish va kalibrlash talab etiladi.

Tahlil va natijalar

Dastlabki ma’lumotlar tahlili avvalgi qo‘lda va yarim avtomatik boshqaruv jarayonida zatvorning suv sarfi topshirig‘i bilan haqiqiy oqim o‘rtasida ayrim davrlarda barqaror og‘ishlar mavjudligini ko‘rsatgan. Bunga suv sathi pasaygan holatlarda zatvor uchun ruxsat etilgan maksimal suv sarfi chegarasining real vaqt rejimida moslashtirilmagani sabab bo‘lgan. Torricelli qonuni asosida yuqori chegarani qayta hisoblash boshqaruv konturining to‘g‘ri ishlashi uchun muhim deb topilgan.

Elektr energiyasi ishlab chiqarishning haqiqiy qiymati rejalashtirilgan qiymatdan ayrim vaqtlarda taxminan 80 minut oldinga siljigan holat aniqlangan. Bunday

nomuvofiqlik MPC tizimi uchun ishonchli bashorat olishga to‘sqinlik qiladi. Shu sababli reja bajarilmagan holatlarni aniqlovchi aqlli signal va ma’lumotlar ishonchliligi bayrog‘i joriy etilgan. Ma’lumotlar ishonchliligi talabga javob bermagan paytda APC tizimining avtomatik boshqaruvi cheklanishi yoki vaqtincha to‘xtatilishi ko‘zda tutilgan.

Modelni tekshirish tajribalari zatvor orqali yuborilgan suv oqimining quyi suv ombori sathiga ta’siri taxminan 43 minutdan keyin kuzatilishini tasdiqlagan. Model nomuvofiqligini kompensatsiyalash usuli qo‘llanilgach, hisoblangan sath bilan real o‘lchovlar orasidagi farq kamaygan. O‘lchangan tashqi ta’sirlarni bashoratlashda elektr quvvati rejasi va quyi ombordan chiqariladigan suv sarfi o‘rtasidagi empirik bog‘lanishdan foydalanilgan.

Real obyektga o‘rnatishdan oldin tizim virtual muhitda sinovdan o‘tkazilgan. Simulyatsiyada model va obyekt o‘rtasiga ataylab nomuvofiqlik kiritilib, kompensatsiya mexanizmi ham tekshirilgan. Natijalar MPC algoritmi suv tanqisligi kutilmagan paytda zatvorni keraksiz harakatlantirmasligini, suv tanqisligi bashorat qilinganda esa quyi suv omboriga yetarli suv uzatish uchun boshqaruv topshirig‘ini moslashtirishini ko‘rsatgan.

Real GESdagi natijalarga ko‘ra, kuzatilgan sutkada elektr energiyasi ishlab chiqarish rejasi bajarilgan. Yuqori suv omborining sathi belgilangan chegaralarda saqlangan. Quyi suv ombori sathi ayrim ikki holatda quyi yumshoq cheklovdan pastga tushgan bo‘lsa-da, maksimal og‘ish yuqori va quyi chegaralar orasidagi diapazonning 2 foizidan kam bo‘lgan va maqolada ahamiyatsiz darajadagi og‘ish sifatida baholangan. Birinchi ishlab chiqarish davrida quyi ombordagi mavjud suv hajmi yetarli bo‘lgani uchun zatvor topshirig‘i oldindan oshirilmagan; ikkinchi davrda esa boshlang‘ich sath pastroq bo‘lgani sababli suv oldindan uzatilgan.

Tizim ishga tushirilganidan taxminan uch yil o‘tgach ham uning xizmatda bo‘lish ko‘rsatkichi 90 foizdan yuqori bo‘lgan. Bu ko‘rsatkich taklif etilgan boshqaruv yechimining real vaqt rejimida ishonchli ishlashi va amaliy qo‘llashga yaroqliligini tasdiqlaydi.

Xulosa

Tadqiqotda gidroelektr stansiyasida suv omborlarini boshqarish va elektr energiyasi ishlab chiqarish rejasini bajarishga yo‘naltirilgan ilg‘or avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimi ishlab chiqilgan. Tizimning asosini matematik modelga tayanuvchi bashoratli boshqaruv — MPC tashkil etadi. Boshqaruv algoritmi ikkita o‘zaro bog‘langan suv omborining hajmi, kiruvchi va chiquvchi suv oqimlari, zatvorning texnik cheklovlari hamda elektr energiyasi ishlab chiqarish jadvalini birgalikda hisobga oladi.

Ishning muhim natijalaridan biri ma’lumotlar sifati, model nomuvofiqligi va mahalliy boshqaruv konturlarining holatini real vaqt rejimida nazorat qiluvchi qo‘shimcha modullarning joriy etilishidir. SCADA va ma’lumotlar bazasi orqali texnologik parametrlar yig‘iladi, saqlanadi va operatorga taqdim etiladi. Virtual sinovlar hamda real obyekt natijalari taklif etilgan yechimning samaradorligini ko‘rsatgan; tizimning xizmatda bo‘lish ko‘rsatkichi uch yildan keyin ham 90 foizdan yuqori bo‘lgan.

Mazkur tadqiqot natijalari GESlarda АСУ ТПni takomillashtirish, suv resurslaridan oqilona foydalanish, dispetcherlik boshqaruvini axborot bilan ta’minlash va operatorning qaror qabul qilish sifatini oshirish bo‘yicha foydali ilmiy-amaliy asos bo‘la oladi. Biroq maqoladagi sonli parametrlar va empirik bog‘lanishlar Italiyaning muayyan GESiga tegishli. Ularni Chorvoq GES yoki boshqa stansiyaga tatbiq etishdan oldin mahalliy texnologik sxema, gidravlik xususiyatlar, datchiklar va tarixiy ma’lumotlar asosida qayta identifikatsiya qilish zarur.

Keyingi tadqiqotlarda matematik modelni yanada takomillashtirish, boshqaruv algoritmini rivojlantirish va stansiyaning umumiy samaradorligini oshiruvchi yuqori darajadagi dispetcherlik optimallashtirish vositalarini ishlab chiqish ko‘zda tutilishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Zanoli S.M., Pepe C., Astolfi G., Luzi F. Reservoir Advanced Process Control for Hydroelectric Power Production // Processes. 2023. Vol. 11. Article 300. DOI: https://doi.org/10.3390/pr11020300.

2. Yang W. Hydropower Plants and Power Systems—Dynamic Processes and Control for Stable and Efficient Operation. Springer, 2019.

3. Munoz-Hernandez G.A., Mansoor S.P., Jones D.I. Modelling and Controlling Hydropower Plants. Springer, 2013.

4. Maciejowski J.M. Predictive Control with Constraints. Prentice-Hall, 2002.

5. Thaeer Hammid A. et al. A Review of Optimization Algorithms in Solving Hydro Generation Scheduling Problems // Energies. 2020. Vol. 13. Article 2787.

6. Maestre J.M. et al. A Comparison of Distributed MPC Schemes on a Hydro-Power Plant Benchmark // Optimization and Control Applications Methods. 2015. Vol. 36. P. 306–332.

7. Vinatoru M. Monitoring and Control of Hydro Power Plant // IFAC Proceedings Volumes. 2007. Vol. 40. P. 44–55.