www.wordlyknowledge.uz Volume: 1, Issue: 2, 2023

УДК:577.4:66.012.3

ЭКОТИЗИМЛАРДА ТУРБУЛЕНТ ОҚИМЛАРНИ ЎЛЧАШ УЧУН ЭДДИ КОВАРИАЦИЯ (ЕС) ТЕХНИКАСИДАН ФОЙДАЛАНИШ

Эшонқулов Р.А.

ТИҚХММИ МТУнинг Қарши ирригация ва агротехнологиялар институти профессори, DSc.

Мирзаев С.С.

Қарши муҳандислик-иқтисодиёт институти Экология ва атроф-муҳит муҳофазаси кафедраси стажёр-ўқитувчиси.

Аннотация: Мақолада бугунги кунда замонавий Эдди Ковариация (Eddy Covariance, EC) техникаси билан агроэкотизимларда ўлчанган турбулент оқимлар, радиация ва ер ости иссиқлик оқимларда мавжуд муаммоларни ҳал қилишда айрим йўллари келтирилган. Юқорида келтирилган энергия оқимларини ўлчашда энергия балансини ёпилиши (Energy balance closure, EBC, ЭБЁ) муаммоси мавжуд бўлиб, бу ер юзасидаги модда ва энергия алмашинуви моделларининг ишочлилигини тасдиқлаш учун жуда муҳим ҳисобланади. Энергия балансини ёпилишидаги муаммони ҳал этишда тупроқ-ўсимлик-атмосфера тизимида қўшимча энергия заҳиралари яъни ўсимлик қопламидаги энтальпия ўзгаришини, ҳаво энтальпиясининг ўзгаришини, фотосинтез ва нафас олиш орқали энергия сарфи ва чиқарилишини ва атмосферадаги намликнинг ўзгариши ўлчанди ва ҳисобланди (2015 йилнинг 127-159 ЙК-йил кунларида ва 2016 йилнинг 168-202 ЙКда). Тажриба таҳлил натижаларига асосланиб энергия балансини ёпилиши ҳиссаси бўйича таклифлар келтирлган.

Калит сўзлар: Эдди ковариация, турбулент оқимлар, энергия, футпринт, кичик миқдорли энергия, энтальпия, углерод оксиди, эвапотранспирация.

Аннотация: В статье представлены некоторые способы решения проблем турбулентных, геотермальных течений, радиации измеряемых в агроэкосистемах, с использованием современных методов Эдди Ковариации (ЕС).

В вышеупомянутых измерениях потока энергии существует проблема закрытия энергетического баланса (ЗЭБ), которая очень важна для подтверждения надежности моделей поверхностного вещества и энергообмена. При решении проблемы закрытия энергетического баланса были измерены и рассчитаны дополнительные запасы энергии в системе почва-растительность-атмосфера, такие как изменения энтальпии в растительности, изменения энтальпии воздуха, расход и выделение энергии посредством фотосинтеза и дыхания, а также изменения в атмосферной влажность (127–159 День года (ДГ), 2015 г.) и 168–202 г. в 2016 г.). По результатам экспериментального анализа были внесены предложения по вкладу закрытия энергетического баланса.

Ключевые слова: Эдди ковариация, турбулентные потоки, энергия, футпринт (площадь потока), малое количество энергии, энтальпия, окись углерода, эвапотранспирация.

www.wordlyknowledge.uz Volume: 1, Issue: 2, 2023

Abstract: The article provides some ways to solve the problems of turbulent fluxes, radiation and ground heat fluxes measured in agroecosystems using modern Eddy Covariance (EC) techniques. In the above energy flux measurements, there is the problem of energy balance closure (EBC), which is very important to validation the reliability of surface matter and energy exchange models. In solving the problem of energy balance closure, additional energy storage terms in the soil-vegetation-atmospheric system were measured and calculated, such as enthalpy changes in the plant canopy, the air enthalpy change, the energy consumption and release by photosynthesis and respiration, and the atmospheric moisture change (DOY 27-159, 2015) and DOY 168-202 in 2016). Based on the results of the experimental analysis, recommendations were made for the contribution of closing the energy balance.

Keywords: Eddy covariance, turbulent fluxes, energy, footprint, minor energy storage terms, enthalpy, carbon dioxide, evapotranspiration

Кириш:Эдди ковариация техникаси қуруқлик ва атмосфера ўртасида сув, энергия ёки кичик миқдордаги газларнинг турбулент алмашинувини баҳолаш учун кенг тарқалган микро-метеорологик усул ҳисобланади. Ер юзасидаги энергия оқимларини ўрганиш учун ЕС усулини қўллаш муайян камчиликлар билан боғлиқ. Термодинамиканинг биринчи қонунига биноан қуруқлик юзасида кирувчи ва чиқувчи энергия ўзаро мувозанатда бўлиши керак. Бироқ, ЕС ўлчовларидан келиб чиқадиган турбулент оқимлар умумий олганда қуруқлик юзасида ўлчанган мавжуд энергиядан тизимли равишда кичикроқ. Ушбу энергия балансидаги бўшлиқ микрометеорологик тадқиқотларда кенг қамровли ва доимий муаммо бўлиб ҳисобланади [1,4].

Одатда, ер юзасидаги энергия балансини турбулент оқимларнинг йиғиндисидан яъни сезилувчан иссиқлик (H) ва яширин иссиқлик (LE), кичик сақлаш муддатлари (S_p, S_c, S_a *ва* S_q), мавжуд энергия, яъни умумий радиация (R_n) ва ер ости иссиқлик оқимининг (G) фарқи билан тавсифланувчи энергиялар билан ҳисоблаш мумкин [2]:

$$H + LE + S_a + S_q + S_p + S_c = R_н - G \quad (1)$$

бу ерда S_a (Вт/м^2) - ҳаво энтальпиясининг ўзгариши, S_q (Вт/м^2) - атмосферадаги намликнинг ўзгариши, S_p (Вт/м^2) - фотосинтез ва нафас олишдаги энергия сарфи ва ажралиб чиқиши, S_c (Вт/м^2) - бу ўсимлик қопламида энтальпиянинг ўзгариши. Барча оқимлар Вт/м^2 да берилган. Стандарт ЕС тадқиқотларда тенгламанинг чап томонидаги сақлаш муддатлари одатда ҳисобга олинмайди.

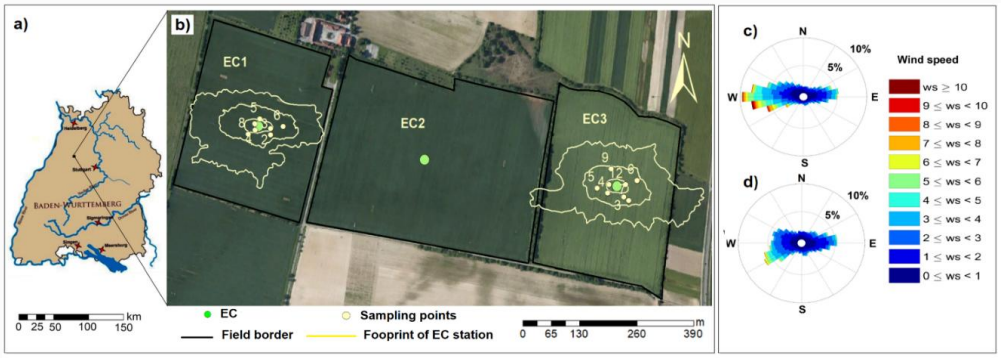
Энергия балансининг номувофиқлиги амалий жиҳатда турбулент оқимларнинг етарлича баҳоланмаслиги ёки мавжуд энергиянинг ортиқча баҳоланиши билан боғлиқ бўлиши мумкин. ЭББёнинг одатдий қийматлари $(H+LE)/(R_n-G)$ деб белгиланганлиги каби аксарият агроэкотизимлар учун 70 дан 90% гача бўлиб [4,6,9], бу сабабларга ЕС ўлчовларининг инструментал хатолари [1,17], тупроқ, ҳаво ва ўсимликларда энергия сақлаш муддатларинии эътиборсиз қолдириш [2,18] ёки радиацияни ўлчаш билан боғлиқ муаммоларни [3] кўрсатиш мумкин.

Ушбу тадқиқотнинг мақсади энергияни кичик сақлаш муддатларининг ҳиссасини баҳолаш орқали ЕББёдаги бўшлиқни камайтиришга қаратилган. Бунда асосий тадқиқот иши ЕС футпринтидаги (ЕС қурилмаси энергия оқимларини қайд эта оладиган майдон юзаси) кичик сақлаш муддатларини баҳолашнинг ЕББёга қандай ҳисса қўшганлигини аниқлаш олиб борилди.

Материаллар ва методлар

www.wordlyknowledge.uz Volume: 1, Issue: 2, 2023

Тадқиқот “Казаринеталерхоф” фермер хўжалиги далаларида (48.92°N, 8.70°E, 320 д.с.б.) Краихгау (Kraichgau) шаҳрида ўтказилди. Краихгау Германиянинг энг илиқ минтақаларидан биридир. 1981-2010 йилларда ўртача йиллик ҳарорат 9,4°C ва ўртача йиллик ёғингарчилик йиғиндиси 889 мм бўлди. Шамолнинг доминант йўналиши жанубий-ғарбий йўналиш ҳисобланади. Ушбу тадқиқотнинг кузатувлари 2015 йилда EC1 атрофидаги майдонда ва 2016 йилда EC3 майдонида ўтказилди (1-расм).



1-расм. Тадқиқот майдонининг географик кўриниши (расм манбаси: Google Earth нинг 2013-йил 16-июндаги космик сурати).

Турбулент оқимлар EC техникаси ёрдамида олиб борилди. Барча станциялар LI-7500 очиқ йўлли инфрақизил CO_2/H_2O газ анализатори ва уч ўлчамли CSAT3 русумли товуш анемометри билан жиҳозланган. EC1 ва EC3 тадқиқот майдонларида товуш анемометрлар ва газ анализаторлари 2,94 ва 2,68 м баландликда ўрнатилди. Маълумотлар ўртача 30 дақиқалик интерваллар билан 10 Гц частотада автоматик тарзда қайд қилинди. Ер юзасига кирувчи ва чиқувчи узун ва қисқа тўлқинли радиация 4 компонентли радиометр ёрдамида ўлчанди. Радиометрлар EC станциялари ёнида, ердан тахминан 2 м баландликда буғдой даласида жойлаштирилди. Ҳар бир EC станциясида ҳавонинг ҳарорати ва намлиги ҳарорат ва нисбий намлик қурилмаси ёрдамида 2 м баландликда ўлчанди. Тупроқ ҳароратини ўлчайдиган 107 термистор қурилмаси 0,02, 0,06, 0,15, 0,30 ва 0,45 м тупроқ чуқурликларида ўрнатилди. EC станциялари яқинидаги ер ости иссиқлик оқимини ўлчаш учун учта иссиқлик оқими пластинкалари 0,08 м чуқурликда кўмилди. TK3.1 дастурий таъминоти EC маълумотларини қайта ишлаш ва махсус яширин иссиқликнинг оқими (*LE*), сезилувчан иссиқлик (*H*) оқимларини ҳамда CO_2 нинг умумий экотизим алмашинуви (NEE) ҳисоблаш учун ишлатилди. Барча қайд этилган маълумотлар учун ҳисоблаш вақти оралиғи 30 минут қилиб олинди.

EC ўлчовларидан ҳисобланиб олинган ер юзаси ЕБЁ ни турбулент оқимларнинг (*LE*+*H*) мавжуд энергияга нисбатан оддий чизиқли регрессияси (ordinary linear regression, OLR, ОЧР) билан баҳолаш мумкин. Иккинчиси яъни мавжуд энергия умумий радиация (R_n) ва ер ости иссиқлик оқими (*G*) ўртасидаги фарқ сифатида қабул қилинади. OLR натижаси мукаммал ЕБЁ ни ифодалайди, агарда қиялик (*slope*) 1 га ва кесишиш нуқтаси (*intercept*) 0 га тенг бўлса энергия баланси ёпиқ ҳисобланади.

Ҳаво ҳароратининг ўзгариши туфайли сақланган ёки чиқарилган энергия қуйидаги тенглама билан ҳисоблаб чиқилади:

$$S_a = p_a \cdot C_a \cdot \frac{\Delta T_a}{\Delta t} \cdot L_{EC} \quad (2)$$

www.wordlyknowledge.uz Volume: 1, Issue: 2, 2023

бу ерда p_a (кг/м^3) - атмосфера намлигининг зичлиги, C_a (Ж/кг*К)- нам ҳавонинг солиштирма иссиқлик сиғими, ΔT_a (К) - ҳаво ҳароратининг ўзгариши, L_{EC} (м) - газ анализатори билан ўсимлик қопламининг юқори учи тугаш қисми орасидаги масофа ва Δt (с) – вақт бўйича ўртачалаш оралиғи. Ҳавонинг ҳарорати ва атмосфера босими асосида ҳисобланган атмосфера намлигининг зичлиги 1,15 дан 1,27 кг/м^3 гача оралиқда ўзгарди. C_a кўрсаткичи учун стандарт қиймат 1004 Ж/кг*К га тенг.

Атмосферадаги намликнинг ўзгариши аниқлаш учун қуйидаги тенгламадан фойдаланилди:

$$S_q = \frac{p_a \cdot L_v \cdot \Delta q}{\Delta t} \cdot L_{EC} \quad (3)$$

бу ерда L_v (Ж/кг) – буғланиш учун яширин иссиқлик (2400 МЖ/кг) ва Δq (кг/кг) атмосферанинг ўзига хос намлигининг ўзгариши.

Тупроқ-ўсимлик тизими ва атмосфера ўртасидаги CO_2 алмашинуви натижасида сақланган ёки чиқарилган энергия Leuning ва бошқ. (2012) бошқалар бўйича ҳисобланди:

$$S_p = -a_p \cdot \overline{FCO_2} \quad (4)$$

бу ерда α_p фотосинтез энергиясини ўтказиш (айлантириш) коэффициенти (0.469 Ж/μмол) ва $\overline{FCO_2}$ - бу ЕС станциясида ўлчанган CO_2 оқими (μмол/м*с) бўлиб, одатда CO_2 нинг умумий экотизим алмашинуви (NEE) деб аталади. Бу ёндашув дастлаб Blanken ва бошқ. (1997) ўрмон экотизимлари учун ва кейинчалик қишлоқ хўжалик экотизимлари учун бир нечта тадқиқотларда ишлатилган [10].

Ўсимлик қопламидаги сақланган энергиянинг вақт оралиғидаги ўзгариши қуйидагича ҳисобланади:

$$S_c = \frac{\Delta T_c (m_w \cdot C_w + m_{om} \cdot C_{om})}{\Delta t} \quad (5)$$

бу ерда ΔT_c (К) - бу учта ҳароратни ўлчаш асбоблари томонидан аниқланган ўсимлик қопламидаги ўртача ҳароратнинг ўзгариши, m_w (кг/м) – бир бирлик майдон учун ўсимлик танасидаги сув массаси, m_{om} (кг/м^2) - берилган бир бирлик майдон учун ўсимликнинг органик массаси, C_w (Ж/кг* К) - сувнинг солиштирма иссиқлик сиғими, C_{om} (Ж/кг*К) - органик моддаларнинг солиштирма иссиқлик сиғими ва Δt (с) - бу ўртача вақт оралиғи (30 мин олинган). Сувнинг солиштирма сиғими (C_w) ва биомассанинг (C_{om}) органик моддалари мос равишда 4190 Ж/кг*К ва 1920 Ж/кг*К деб олинди (Jacobs ва бошқ., 2008).

Натижалар

Вақт бўйича берилган маълумотлардан энергия балансининг тўртала таркибий қисми мавжуд, ўртача қийматлар ва ўртача суткалик ўзгаришлар ҳисоблаб чиқилган. Барча даврларда, умумий радиациянинг энг катта қисми яширин иссиқликка айлантирилди. *LE* вегетация даврида анча барқарор бўлган бўлса, *H* ҳар икки йилда ҳам биринчи даврдан иккинчи давргача ўсди. Тўрт даврнинг учтасида, қолдиқ энергия сезилувчан иссиқлик оқимидан юқори ва тўрт давр давомида ер ости иссиқлик оқимидан юқори бўлди. Бундан ташқари, ўртача қолдиқ энергия 2015 йилда EC1да 2016 йилда EC3 га нисбатан икки баравар катта бўлди.

www.wordlyknowledge.uz Volume: 1, Issue: 2, 2023

Энергия балансининг ёпилиши ҳар иккала жойда ойларга қараб ўзгариб турди. 2015 йилда (EC1) энг юқори ЕБЁ июлда кузатилган бўлса, 2016 йилда (EC3) энг юқори ёпилиш июнь ойида олинди. Иккала жойда ҳам ЭБЁ иккинчи кузатув даврида юқори бўлди. Бироқ, маълум бир ой ёки даврдан қатъий назар, 2016 йилда EC3 да етиштирилган қишги буғдойга нисбатан энергия мувозанати мунтазам равишда пастроқлигини кўрсатди.

Энг кичик сақлаш муддатлари ҳаво энтальпиясининг ўзгариши (S_a) ва атмосферадаги намликнинг ўзгариши (S_q) бўлиб, улар 1,8 дан -1,9 Вт/м^2 гача бўлган қийматларга етди. Энг катта сақланган энергия муддати S_p бўлиб, бу биринчи даврда ўртача кунлик қиймати 28,4 Вт/м^2 2015 йилда (127−159 ЙК) ва 2016 йилда 168–202 ЙК давомида минимал 8,7 Вт/м^2 ни ташкил етди. Ўсимлик қопламининг энтальпиясининг ўзгариши кунлик ўртача -8,8 Вт/м^2 (2015 йилда 168-202 ЙК) ва 9,5 Вт/м^2 (2016 йилда 127-159 ЙК) ўртасида ва ҳар икки йилда ҳам жуда ўхшаш бўлди.

Кутилганидек, турбулент оқимларга ($LE+H$) кичик сақлаш муддатларини ($S_a+S_q+S_p+S_c$) қўшиб, мавжуд энергияга қарши чизилган чизиқли регрессия нишаблигида кўрсатилгандек, барча баҳоланган даврларнинг ЕБЁларини қисқартирди. Ушбу таъсир 2016 йилнинг 127-159 ЙК (абсолют яхшиланиш 9%) давомида энг юқори даражада бўлди, энг паст кўрсаткич шу йилнинг 168-202 ЙК даврида кузатилди (мутлақ яхшиланиш 4%).

Муҳокамалар

S_p нинг ер юзаси энергия балансига қўшган ҳиссаси тадқиқ етилган кичик сақлаш муддатлари орасида энг юқори кўрсаткичга эга бўлиб, 2015 ва 2016 йилларда интенсив вегетация даврида (май ойи) мос равишда 7,1 ва 6,8% ни ташкил етди. Қишки буғдойнинг пишиб етилиш даврида (июль ойи), 2015 ва 2016 йилларда S_p мос равишда 2,1 ва 1,9% билан ЕБЁга кам ҳисса қўшди. Бизнинг натижаларимиздан шу келиб чиқадики, S_p нинг потенциал юқори ҳиссаси туфайли юза энергия балансларини ҳисоблашга киритиш ниҳоятда мақсадга мувофиқдир [12].

Кичик миқдордааги энергия шартлари орасидаги ЭБЁга иккинчи даражали ҳисса қўшган ўсимлик қопламидаги сақланган захираси (S_c) 2016 йил июнь ойида максимал 1,8% га яхшилади. Ушбу шарт ЭБЁни Хитойдаги субалп яйловида 1,0% га [11] ва Голландиядаги майсазорда 0,5% га яхшилаган [2]. Бизнинг тадқиқотимизда қишки буғдой қопламининг ўртача сув миқдори 3,6 кг/м^2 ташкил этди, Wang va Zhang (2011) тадқиқотида 3,0 кг/м^2, Jacobs ва бошқаларнинг (2008) тадқиқотида 1,7 кг/м^2 ташкил этиб, бу S_c нинг турли катталикларини тушунтиради.

Ҳаво энтальпиясининг ўзгариши (S_a) энергия балансидаги бўшлиқни ўртача 0,24% га камайтирди. Ҳаво энтальпиясининг ўзгаришининг ЕБЁга бўлган улушининг турлича бўлишининг сабаблари бўлиб жойлар ва фасллар ўртасидаги ҳарорат ўзгарувчанлигидаги фарқлари бўлиши мумкин [5,7].

Атмосфера намлигининг ўзгариши (S_q) билан боғлиқ энергия ўлчов баландлиги ва ўсимлик қоплами ўртасида сув буғида сақланади. Шунинг учун S_q нинг ЕБЁга ижобий ҳиссасини фақатгина ўсимлик қоплами устида сув буғининг аниқ тўпланиши даврида тадқиқ этиш мумкин.

www.wordlyknowledge.uz Volume: 1, Issue: 2, 2023

Хулосалар

Экин майдонларида яхши ЕБЁга эришиш учун фотосинтез ва нафас олиш орқали энергия истеъмоли ва чиқарилишини (S_p), шунингдек ўсимлик қопламидаги энтальпиянинг ўзгаришини (S_c) ҳисобга олишни тавсия етилади. Пластинка маълумотларига асосланган гармоник таҳлил калориметрик усулга қараганда юқори ер ости иссиқлик оқимларини натижаларини берди. Чунки тупроқнинг, ўсимликларнинг ва радиациянинг фазовий ўзгарувчанлиги сабабли ер ости иссиқлик оқимининг бир жойдаги ўлчовлар EC футпринти учун тўлиқ репрезентатив бўлмаслиги мумкин. 83 дан 89% гача бўлган ЕБЁнинг энг катта яхшиланиш кичик миқдордаги сақланган энергияларни ($S_a+S_q+S_p+S_c$) ва иссиқлик оқими плиталари маълумотлари асосидаги гармоник таҳлил билан ҳисобланган ер ости иссиқлик оқимига асосланган ҳолда эришилди. Бироқ, мавжуд бўлган энергиянинг камида 11% ҳали ҳам ёпилмай қолди. Хулоса қилишимизча, кичик миқдордаги оқим ва сақлаш шартлари энергия балансидаги бўшлиқни тушунтиришга катта ҳисса қўшади, аммо уларни ҳисобга олиш бу бўшлиқни тўлиқ қоплай олмайди. Бизнинг топган натижаларимиз шуни кўрсатадики, энергия балансидаги бўшлиқни 100% ташкил этадиган ЕБЁни тузатиш йўллари турбулент энергия каби баҳоланиши турбулент оқимларни юқори даражада баҳолаб юбориши мумкин.

1. Foken, T. (2008). *Micrometeorology* (1st ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74666-9_6
2. Jacobs, A. F. G., Heusinkveld, B. G., & Holtslag, A. A. M. (2008). Towards closing the surface energy budget of a mid-latitude grassland. *Boundary-Layer Meteorology*, *126*(1), 125–136. https://doi.org/10.1007/s10546-007-9209-2
3. Kohsiek, W., Liebethal, C., Foken, T., Vogt, R., Oncley, S. P., Bernhofer, C., & Debruin, H. A. R. (2007). The Energy Balance Experiment EBEX-2000. Part III: Behaviour and quality of the radiation measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, *123*(1), 55–75. https://doi.org/10.1007/s10546-006-9135-8
4. Wang, R., & Zhang, Q. (2011). An assessment of storage terms in the surface energy balance of a subalpine meadow in Northwest China. *Advances in Atmospheric Sciences*, *28*(3), 691–698. https://doi.org/10.1007/s00376-010-9152-x
5. Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, P., Bernhofer, C., Ceulemans, R., Dolman, H., Field, C., Grelle, A., Ibrom, A., Law, B. ., Kowalski, A., Meyers, T., Moncrieff, J., Monson, R., Oechel, W., Tenhunen, J., … Verma, S. (2002). Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, *113*(1–4), 223–243. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00109-0
6. Kidston, J., Brümmer, C., Black, T.A., Morgenstern, K., Nesic, Z., McCaughey, J.H., Barr, A.G., 2010. Energy balance closure using eddy covariance above two different land surfaces and Implications for CO2 flux measurements. Boundary-Layer Meteorol. 136, 193–218.
7. Meyers, T.P., Hollinger, S.E., 2004. An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean. Agric. For. Meteorol. 125, 105–115.