

KARTULI PRODUKTSIOONIPROTSESSI DÜNAAMILINE MUDEL JA SELLE RAKENDUSED

J. Kadaja

ABSTRACT. *Dynamic model of potato production process and its applications.* The method of reference yields is described as a conceptual basis for composing models of agricultural crops. This method considers four yield levels: potential yield (PY), meteorologically possible yield (MPY), actually possible yield (APY) and commercial yield (CY). PY expresses the radiation resources, MPY the agrometeorological or agroclimatic resources and APY the soil resources for cultivation of variety in the units of yield.

This concept is applied in the dynamic model POMOD for modeling potato production process and yield. In present state POMOD allows computing PY and MPY. Model is based on balance equations and takes into consideration photosynthesis, respiration and growth. Photosynthesis is calculated by hourly steps on the basis of distribution of solar radiation inside the canopy. Respiration consists of maintenance respiration and growth respiration. Growth of plant organs is calculated using differential or integral functions of growth. The time step of growth is one day. MPY is calculated taking into account air temperature and soil moisture. The last is computed by the equation of water balance. The model was verified against field observations and data of variety network. Its sensibility was analyzed regarding variations in photosynthesis parameters and the averaging level of meteorological data.

The model has been applied in evaluation of agrometeorological, agroclimatic and radiation resources for potato cultivation in Estonia, other Baltic Republics and Komi (the last at the northern boundary of potato cultivation area). The model has been as basis in working out the method of probabilistic yield forecasts and in evaluation of climate change impact to the potato cultivation, it has been used as instrument for different model experiments.

Keywords: production process, dynamic model, potato, reference yields, growth functions, model applications, PAR, soil water content, temperature.

Sissejuhatus

Tänapäeva teaduses on matemaatilised mudelid kujunenud oluliseks abivahendiks keerukate ja aeganõudvate protsesside käitumise uurimisel ja prognoosimisel, seda ka põllumajandusega seotud teadusvaldkondades. Kuigi ükski mudel ei võimalda kirjeldada keerulisi stohhastilisi protsesse nende täiuslikkuses, võimaldavad nad lühikese ajaga läbi mängida palju erinevaid versioone väga erinevates tingimustes, milles saadud tulemuste tõesust on võimalik kontrollida suhteliselt väikese arvu sihipäraselt planeeritud katsetega. Samuti on mudelite osa küllaltki oluline mitmesuguste hinnangute ja prognooside, näiteks saagiprognoside andmisel. Tänuväärseid tulemusi on mudelid andnud sordiareetuses.

Põllukultuuride saagi arvutamiseks loodud matemaatilisi mudeleid on kirjanduses liigitatud üldjoontes kolme gruppi (Sirotenko, 1981): statistilisteks, füüsikalisteks ja dünaamilisteks.

Statistilised mudelid kujutavad endast ühest või mitmest faktorist sõltuvat statistilist seost, millest enam levinud on regressioonivõrrandid. Selliseid mudeleid on lihtne koostada ja kasutada, neid ei saa aga rakendada väljaspool selle valimi piire, mille baasil nende seoste parameetrid on määratud. Seega ei või me nende mudelitega minna sellisele territooriumile, mille andmed puudusid mudeli koostamisel kasutatud algandmete kogumis. Samuti ei saa me sellise mudeli abil käsitleda ekstreemseid tingimusi, milleni lähteandmete kogumis esinenud väärtused ei küündinud. Põhjuseks on asjaolu, et antud seoste parameetrid on puhtstatistilised, neil puudub füüsikaline sisu. Statistilisi mudeleid kasutatakse põhiliselt prognoosiks.

Füüsikalisteks on hakatud nimetama lihtsaid mudeleid, mis põhinevad mingil põhjuslikul seaduspärasusel. Nende mudelite parameetrid on füüsikaliselt põhjendatud ja neid saab kasutada ulatuslikel territooriumidel. Samas on tegemist lihtsate, aega mitte sisaldavate arvutusskeemidega. Seetõttu on nende kasutamine lihtne, täpsus aga mitte eriti suur. Näiteks saagi prognoosiks mingil piiratud alal, mille kohta esineb statistiliste seoste koostamiseks piisavalt lähteandmeid, jäävad füüsikalised mudelid täpsuses statistilistele tavaliselt alla. Füüsikalisi mudeleid on väga edukalt kasutatud geograafilist mastaapi üldistuste tegemisel.

Kõige rohkem võimalusi pakkuva, aga ka kõige töömahukama grupi, seda nii koostamise kui kasutamise seisukohalt, moodustavad dünaamilisteks nimetatavad mudelid. Nagu nimetuski ütleb, on tegemist mudelitega, mis kirjeldavad uuritava objekti ajalist arengut. Modelleerimise objektiks ei ole siin ainult lõppsaak või mõni teine üksik parameeter, vaid kogu produktsiooniprotsess, s.o taimes ja nende koosluses toimuvate protsesside kogum, millest põhilisteks on füsioloogilised protsessid, nagu fotosüntees, hingamine ja kasv, mis toimub

olemasolevate keskkonnatingimuste mõju all. Seetõttu nimetatakse neid mudeleid ka produktsiooniprotsessi mudeliteks. Seda tüüpi mudelid võimaldavad kirjeldada kogu taimse produktsiooni kujunemise käiku, võttes arvesse väga paljude erinevate faktorite mõju. Dünaamiliste mudelite kasutusvaldkond on märgatavalt laiem kui eelpool vaadeldud mudelite liikidel. Lisaks prognoosidele, hinnangutele ja geograafilistele üldistustele on seda tüüpi mudelid mitmekülgselt uurimistöö vahenditeks.

Käesoleva artikli eesmärgiks on anda ülevaade ühest kontseptsioonist dünaamiliste mudelite ülesehitamiseks ning selle konkreetsest rakendusest kartuli produktsiooniprotsessi mudelis POMOD. Vaadeldakse mudeli kasutamisel saadud tulemusi ja planeeritakse edaspidiseid arengusuundi.

Võtmesõnad: produktsiooniprotsess, dünaamiline mudel, kartul, etalonsaagid, kasvufunktsioonid, mudeli rakendused, fotosünteetiliselt aktiivne kiirgus, mulla veevaru, temperatuur.

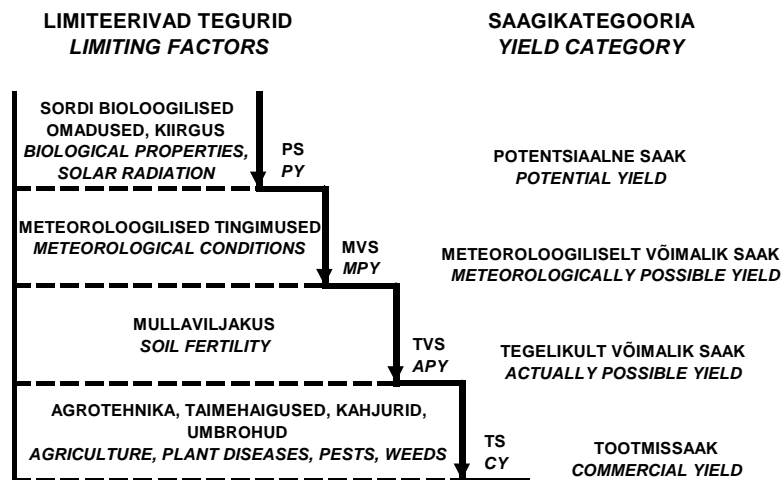
Kontseptuaalsed lähtealused

Produktsiooniprotsess ja selle tulemiks olev saak sõltuvad väga paljudest erinevatest faktoritest, mille limiteerivad mõjud on omavahel tihedalt läbi põimunud. See muudab nende korraga mudelisse lülitamise üpris keerukaks. Seepärast on välja töötatud lähenemissuund, mida nimetatakse etalonsaakide meetodiks. Selle meetodi lähtealuseks on maksimaalse produktiivsuse printsiip, mille kohaselt taimede adaptatsioon on suunatud maksimaalse efektiivsuse ja nende koosluse maksimaalse produktiivsuse tagamisele (Tooming, 1977; 1984; 1988). Etalonsaakide meetod vaatleb maksimaalset produktsiooni ja maksimaalseid saake erinevatesse agroökoloogiliste gruppidesse jaotatud faktorite mõju all. Kõige üldisemalt moodustuvad need grupid bioloogilistest, meteoroloogilistest, mullastikulistest ja agrotehnilistest faktoritest. Maksimaalseid saake, mida iga grupi faktorite mõju all on võimalik saada ja mis ühtlasi on piirväärtusteks üleminekul ühelt grupilt teisele, nimetatakse etalonsaakideks. Etalonsaagid moodustavad agroökoloogiliselt põhjendatud taustsüsteemi, mis on paljude probleemide lahendamisel sobivaks võrdlusaluseks nii mudelitega arvutatud kui tegelikkuses saadud saakidele.

Etalonsaakide meetod on algselt välja töötatud H. Toominga (1977; 1984) poolt ning seda on täiendatud tema, E. E. Žukovski ja käesoleva artikli autori koostöös (Žukovski jt, 1989). Etalonsaakide põhikategooriatena vaadeldakse potentsiaalset, meteoroloogiliselt võimalikku, tegelikult võimalikku ja tootmissaaki (joonis 1).

Potentsiaalne saak (PS) on maksimaalne saak, mida on võimalik saada antud bioloogiliste omadustega kultuurilt või sordilt olemasolevates kiirgustingimustes. Seega määravad PS väärtuse sordi bioloogilised omadused ja kasutada olevad kiirgusressursid. Kõigi teiste faktorite mõju loetakse optimaalseks. Sisuliselt väljendab see saagikategooria kiirgusressursse antud kultuuri või sordi kasvatamiseks, väljendatuna saagi ühikutes.

Meteoroloogiliselt võimalik saak (MVS) on saak, mille määravad ära meteoroloogilised tingimused. Teiste sõnadega on see maksimaalselt võimalik saak, mida antud sordilt on võimalik saada olemasoleva päikesekiirguse ja meteoroloogiliste tingimuste korral. Optimaalseteks loetakse kõik mullaviljakuse ja agrotehnikaga seotud mõjurid. Seega väljendab MVS saagi ühikutes avaldatud agrometeoroloogilisi, pikemas perspektiivis aga agrokliimaatilisi ressursse.



Joonis 1. Etalonsaagid ja nendes arvesse võetavad limiteerivad tegurid
Figure 1. Reference yields and limiting factors taken into account in each

Tegelikult võimaliku saagi (TVS) väärtuse määramisel osalevad peale PS ja MVS juures nimetatud mõjurite veel mullaviljakusest tingitud faktorid. Optimaalseks loetakse selle saagikategooria korral agrotehnika, puuduvaks taimehaiguste, -kahjurite ja umbrohtude mõju. TVS näol on tegemist mullastiku ressursse väljendava näitajaga tegelike meteoroloogiliste või kliimatingimuste korral.

Tootmissaak (TS) on saagikategooria, mille korral tulevad arvesse kõik saagi kujunemist mõjutavad faktorid. Lisaks sordi bioloogilistele omadustele, meteoroloogilisele keskkonnale ja mullaviljakusele võetakse selle kategooria määramisel arvesse puudulikust agrotehnikast, taimehaigustest, -kahjuritest, umbrohtudest jms tingitud saagi vähenemine. See on saak, mida saadakse reaalses põllutingimustes.

Etalonsaakide meetodi eeliseks on asjaolu, et ta võimaldab läheneda terviklikule produktsiooniprotsessile n-õ ülaltpoolt, alustades kõige kõrgematelt saagitasemetelt ja võttes kõigepealt arvesse need tegurid, mille mõju ei sõltu või sõltub vähem teistest mõjuritest ja mida inimtegevuse tulemusena on raskem muuta. Sellisteks on näiteks sordi bioloogilised omadused, mis määravad saagi, kui kõik keskkonnatingimused on optimaalsed. Samuti ei sõltu ülejäänud taime jaoks arvesse tulevatest mõjuritest päikesekiirgus. Edasi võetakse selle skeemi kohaselt arvesse meteoroloogilised faktorid, esmajärjekorras temperatuur ja veega varustus. Seejärel kumuleeritakse eelnevatele juurde mullaviljakusest põhjustatud faktorid ja lõpuks puudulikust agrotehnikast tingitud piirangud.

Loomulikult on etalonsaakide süsteemi võimalik edasi diferentseerida, abstraherides omakorda mõne eelpool vaadeldud grupi raames kokku võetud faktorite mõju. Näiteks on ühes varasemas töös MVS gruppi kuuluvatest meteoroloogilistest faktoritest vaadeldud temperatuuri ja sademeid eraldi, tuues nende mõju potentsiaalsele saagile ükshaaval juurde (Sepp, 1988c). Samuti võimaldab vaadeldav ideoloogia tuua eraldi sisse erinevaid mullaviljakuse komponente ning võtta ükshaaval arvesse praegusel juhul väga mitmepalgelisse agrotehnika gruppi arvatud faktorid. Erinevate ülesannete lahendamisel võib ka sisse toodavate mõjurite või nende gruppide järjestust muuta, näiteks määrata mullaviljakuse mõju tingimustes, kus kõik teised keskkonnatingimused on optimaalsed. Viimati nimetatud operatsioonide läbiviimiseks tuleb mudel koostada lihtsalt ümbermängitavana. Mudeli esialgse ülesehituse seisukohalt võib aga eeltoodud neljaastmelist järjestust pidada optimaalseks.

Lisaks võimaldavad toodud saagikategooriad võrrelda erinevate faktorite gruppide osakaalu. Näiteks võib tuua järgnevad suhted, mis omavad küllaltki olulist sisulist tähendust:

meteoroloogiliste tingimuste soodsuse koefitsient: $K_m = MVS/PS$,

mullastikutingimuste soodsuse koefitsient: $K_p = TVS/MVS$,

agrometeoroloogiliste ressursside kasutamise efektiivsus: $K_E = TS/MVS$,

agrometeoroloogiliste ja mullastikuressursside kasutamise efektiivsus: $K_A = TS/TVS$.

Kartuli produktsiooniprotsessi mudel POMOD

Kartuli produktsiooniprotsessi mudel POMOD (POtato MODeL) on koostatud algselt kaheksakümnendatel aastatel Eesti Agrometeoroloogia Laboratooriumis suunitlusega agrometeoroloogiliseks uurimistööks ja prognooside andmiseks. POMOD on üles ehitatud lähtuvalt etalonsaakide meetodist ning on võimeline praeguses seisus arvutama potentsiaalset ja meteoroloogiliselt võimalikku saaki (Sepp, Tooming, 1982; 1991; Kadaja, 2001). Rakendades ilmastikutingimuste kasutamise efektiivsuse koefitsiente K_E , on teda kasutatud ka tegelike saakide prognoosiks.

Mudeli struktuur

Potentsiaalse saagi arvutus. Mudeli põhiparameetriteks on üldine biomass ning erinevate organite biomassid maapinna ühiku kohta. Vastavalt bilansi võrrandile avaldub üldine biomass M samm-sammult kujul

$$M_j = M_{j-1} + \Delta M_j, \quad (1)$$

kus j – sammu järk nr (mudeli POMOD põhiversioonis on biomass arvutamise sammuks üks ööpäev);

ΔM_j – biomassi juurdekasv sammul j .

Analoogne arvutus viiakse läbi taime erinevate organite i masside m leidmiseks. Kartuli puhul vaadeldakse eraldi lehti ($i = 1$), varsi ($i = 2$), juuri ($i = 3$) ja mugulaid ($i = 4$):

$$m_{i,j} = m_{i,j-1} + \Delta m_{i,j}, \quad (2)$$

kus $\Delta m_{i,j}$ – organi i juurdekasv sammul j .

Biomassi üldine juurdekasv arvutatakse valemiga

$$\Delta M_j = \int_0^t \int_0^{L_0} \varepsilon (\Phi - R_1) dL d\tau - R_2, \quad (3)$$

kus Φ – fotosünteesi intensiivsus, $\text{mg CO}_2 \text{ dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$;
 R_1 – kasvuhingamise intensiivsus, $\text{mg CO}_2 \text{ dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$;
 R_2 – säilitushingamine, g m^{-2} ;
 ε – ülemineku tegur gaasivahetuselt biomassile, $\text{mg kuivainet} / \text{mg CO}_2$;
 τ – aja muutuja ööpäevases tsüklis, avaldatud tunninurkana;
 L – lehepinna indeksi muutuja külvi sees, mis iseloomustab antud tasemest kõrgemale jäävat lehepinna, $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$.

Integreerimine ajas toimub numbrilisel meetodil tunniste vahemike järel nullist kuni mudeli ajalise sammu pikkuseni t . Integreerimine üle lehepinna indeksi L toimub suunaga lehestiku ülapiirilt alla kuni eelmise sammu lõpuks saadud kogu külvi lehepinna indeksi väärtuseni L_0 .

Üldise biomassi juurdekasvu jaotamiseks taime erinevate organite vahel kasutatakse kasvufunktsioone (Ross, 1966). Viimased tulenevad organi juurdekasvu kiirust kirjeldavast kasvuvõrrandist

$$\frac{\Delta m_i}{\Delta t} = A_i \frac{\Delta M}{\Delta t} + B_i m_i, \quad (4)$$

kus kordajaid A_i nimetatakse vegetatiivseteks ja kordajaid B_i reproduktiivseteks kasvufunktsioonideks.

Vegetatiivse kasvu funktsioonid A_i näitavad üldise juurdekasvu ΔM jaotumist erinevate organite vahel. Neid arvutatakse ainult juhul, kui $\Delta m_i > 0$. Sel juhul loetakse $B_i = 0$ ja A_i avaldub valemist

$$A_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta M}. \quad (5)$$

Kui $\Delta m_i < 0$, võetakse $A_i = 0$.

Reproduktiivsed kasvufunktsioonid B_i iseloomustavad organite massi vähenemist seoses biomassi üleminekuga seemnetesse ja säilitusorganitesse pärast vastava organi vegetatiivse kasvu lõppu, s.o juhul kui $A_i = 0$. Seda arvestades saame võrrandist (4)

$$B_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta t} \cdot \frac{1}{m_i}. \quad (6)$$

Et B_i määrataks perioodi kohta, mil $\Delta m_i < 0$, on B_i väärtused negatiivsed.

Arvestades, et taimedes toimuvad protsessid nn bioloogilises ajas, mille käik seostub märgatavalt paremini temperatuuride summa kui kronoloogilise ajaga, rakendatakse kasvufunktsioonid mudelis temperatuuride summa funktsioonina. Kartuli puhul tehtud arvutused näitasid, et kõige parema kokkulangevuse erinevate aastate kasvufunktsioonide vahel andis positiivsete temperatuuride summa kasutamine (Sepp, 1983b). See tähendab, et temperatuuride summa leitakse üle 0°C temperatuuride liitmise teel.

Kasvufunktsioonide väärtused A_i ja B_i on määratavad empiiriliselts biomeetriliste mõõtmiste baasil. Joonisel 2 on toodud varasematel aastatel määratud vegetatiivse kasvu funktsioonid varasele sordile 'Valgevene varane' ja keskilisele sordile 'Sulev' ning 2001.–2003. a katses olnud hilisele sordile 'Anti'. Mudel kasutab neid funktsioone tabeli kujul.

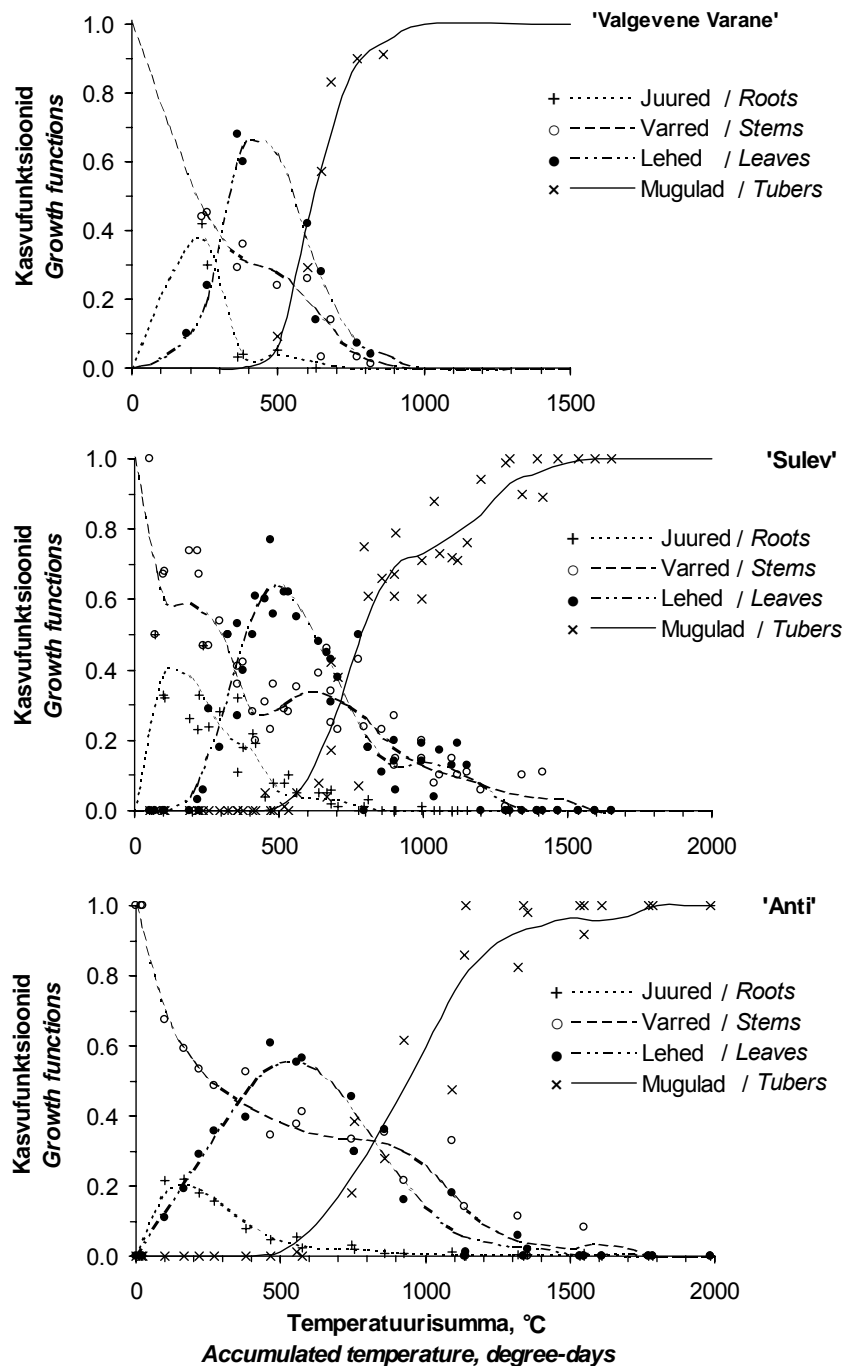
Reproduktiivsete kasvufunktsioonide väärtuseks leiti 'Sulevi' korral $B_{i,j} = -0.00030 \text{ deg}^{-1}$ (Sepp, 1983b), mis näitab, et organi biomass väheneb ühe kraadi kohta keskmises ööpäevases temperatuuris $0,03\%$. Ööpäevase vähenemise saamiseks tuleb B_i läbi korrutada keskmise ööpäevase temperatuuriga. 'Anti' korral saadi 2001. a andmetel $B_{i,j} = -0.00057 \text{ deg}^{-1}$. Reproduktiivsete kasvufunktsioonide määramisel lähtuti tingimustest, et $A_i = 0$ kogu mõõtmiste vahemikus ning et ei esineks veel massilist pealsete kuivamist haiguste tõttu. Viimase tingimuse tõttu kujutas reproduktiivsete kasvufunktsioonide arvulise väärtuse määramine endast sisuliselt valemi (6) järgi arvutatud väärtuste alumise piirväärtuse leidmist. Kui ei esine perioode, mil mõlemad tingimused on täidetud, on põhimõtteliselt võimalik arvutada B_i väärtused, arvestades biomassi vähenemist kuivanud taimeosade ja varise arvel. Viimaste määramisel võib aga kergesti esineda allahindamist tuulekande ja teiste kadude tõttu. Seetõttu, nagu näitavad arvutused 2002. ja 2003. a kohta, saadi B_i väärtused, mis ületasid 2001. a tulemusi kuni kaks korda. Mugulatesse ülekantuks arvestatakse mudelis vegetatiivsete organite vähenemisest siiski ainult 30% , ülejäänud osa loetakse ülekandega seotud kuludeks või biomassist väljalangenuks. Viimase seose sissetoomine põhines hinnangul, et taime koed lõpetavad funktsioneerimise, kui nad on keskmiselt 30% oma massist teistesse organitesse ära andnud (Polevoi, 1983).

Organi biomassi juurdekasvu $\Delta m_{i,j}$ arvutus toimub mudelis kasvuvõrrandi (4) alusel, milles kalendaarne aeg t on asendatud positiivsete temperatuuride summaga:

$$\Delta m_{i,j} = A_{i,\Sigma T} \Delta M_j + B_{i,j} T_j m_{i,j}, \quad i = 1,2,3, \quad (7)$$

$$\Delta m_{4,j} = A_{4,\Sigma T} \Delta M_j - 0,3 \sum_{j=1}^3 B_{i,j} T_j m_{i,j},$$

kus T_j – temperatuurisumma sammul j (kui sammuks on üks ööpäev, siis keskmine ööpäevane temperatuur).
Teine võrrand valemitest (7) kirjeldab mugulate biomassi muutumist.



Joonis 2. Vegetatiivsed kasvufunktsioonid varasele kartulisordile 'Valgevene varane', keskhilisele sordile 'Sulev' ja hilisele sordile 'Anti'

Figure 2. Functions of vegetative growth for early potato variety *Valgevene varane* half-late variety *Sulev* and late variety *Anti*

Seni vaadeldud kasvufunktsioone A_i ja B_i võib tinglikult nimetada ka diferentsiaalseteks kasvufunktsioonideks, kuna vaadeldakse biomassi muutumise jaotumist erinevate organite vahel. Alternatiivse võimalusena võib mudelis kasutada ka integraalseid kasvufunktsioone, mille korral vaadeldakse kogu olemasoleva biomassi jaotumist erinevate organite vahel (Tooming jt, 1986):

$$D_{i,j} = \frac{m_{i,j}}{M_j} \quad (8)$$

Integraalsete kasvufunktsioonide eeliseks on vajaduse puudumine raskesti määratavate reproduktiivsete kasvufunktsioonide sisetoomiseks, puuduseks aga nende väiksem tundlikkus ja märgatavalt suurem inertsus tagasiside suhtes. Integraalseid kasvufunktsioone võib pidada sobivateks vähem komplitseeritud ülesannete lahendamisel ja lihtsamates mudelites. Mudel POMOD on võimeline töötama nii diferentsiaalsete kui ka integraalsete kasvufunktsioonide baasil.

Fotosünteesi intensiivsus Φ , mida vajatakse ΔM_j arvutamiseks valemis (3), avaldatakse maksimaalse produktiivsuse printsiibist lähtuva valemiga (Tooming, 1970; 1977; 1984; 1988):

$$\Phi = \frac{a\Pi(L, \tau)}{1 + \frac{\sqrt{c}}{1 - \sqrt{c}} \cdot \frac{\Pi(L, \tau)}{\bar{\Pi}}} \quad (9)$$

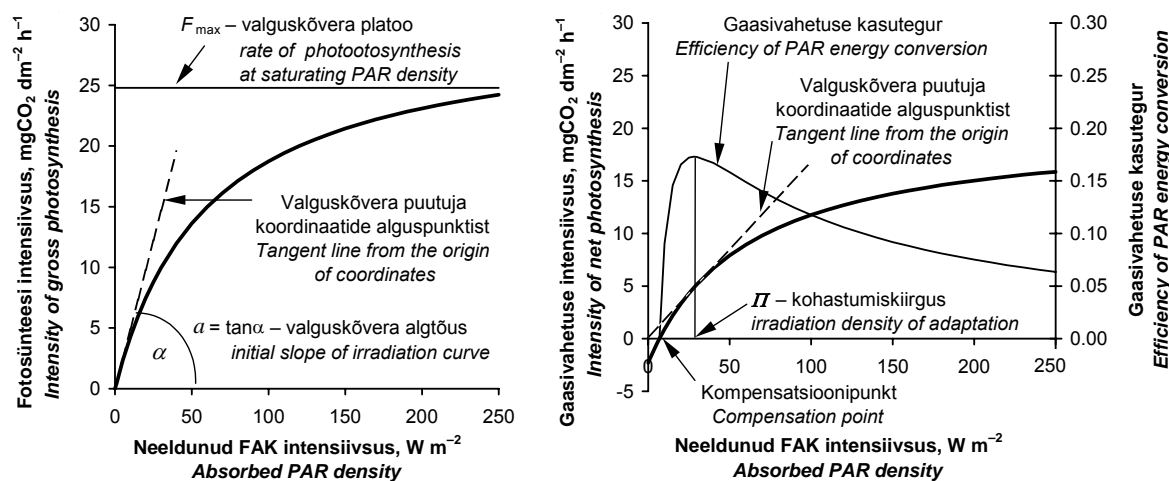
kus $\Pi(L, \tau)$ – taime sees neeldunud fotosünteesiliselt aktiivse kiirguse (FAK) intensiivsus, $W m^{-2}$;

a – fotosünteesi valguskõvera alg tõus ($mg CO_2 \cdot dm^{-2} h^{-2} / (W \cdot m^{-2})$);

$\bar{\Pi}$ – kohastumiskiirus ehk fotosünteesiliselt aktiivse kiirguse (FAK) väärtus, mille korral gaasivahetuse kasutegur on maksimaalne, st selle FAR väärtuse juures kasutatakse kiirgust kõige efektiivsemalt, $W m^{-2}$;

$c = \sigma_2 / \sigma_1$ – hingamise koefitsient valgusküllastuse tingimustes, s.o hingamise ja fotosünteesi intensiivsuste suhe valguskõvera platoo juures (sealjuures on σ_1 ja σ_2 avaldatud lehepinna massiühiku kohta – $mg CO_2 g^{-1} \cdot h^{-1}$).

Fotosünteesi ja gaasivahetuse valguskõveraid iseloomustavate parameetrite tähendusest annab ülevaate joonis 3. Fotosünteesi valguskõvera alg tõus on kõverale koordinaatide alguspunkti tõmmatud puutuja tõusnurga tangens. Kohastumiskiirus on FAK väärtus, mille korral gaasivahetuse valguskõverat puutub talle koordinaatide alguspunkti tõmmatud puutuja.



Joonis 3. Fotosünteesi ja gaasivahetuse (fotosünteesi ja hingamise vahe) valguskõverad koos neid iseloomustavate parameetritega (Tooming, 1984)

Figure 3. Light curves of photosynthesis and gas exchange with their characteristics (Tooming, 1984)

a , $\bar{\Pi}$, σ_1 , σ_2 väärtused hinnati esialgselt kirjanduses ilmunud andmete alusel (Tooming, 1977) ja täpsustati hiljem kalibreerimise meetodil biomeetriliste katseandmete baasil. Nende suuruste katseline määramine, mis mudeli seisukohalt oleks väga oluline, eeldab taimede CO_2 vahetust mõõtva portatiivse mõõteseadme olemasolu, mille kasutamise võimalust seni kahjuks ei ole.

Nagu valemist (3) nähtub, vaadeldakse hingamist kahekomponendilise, koosnevana kasvuhingamisest, mis on seotud fotosünteesi ja selle produktide ümberformeerumisega, ning säilitushingamisest ehk pimehingamisest, mis on pidevalt taimedes toimuvate elutegevusprotsesside energiaga varustajaks. Kasvuhingamine loetakse mudelis võrdeliseks fotosünteesiga (McCree, 1970; 1974):

$$R_1 = c_1 \Phi, \quad (10)$$

säilitushingamine aga võrdeliseks vastava organi biomassiga:

$$R_2 = \sum_{i=1}^4 c_{2,i} m_i, \quad (11)$$

kus c_{1j} ja $c_{2,i}$ on vastavalt kasvu- ja säilitushingamise koefitsiendid.

Fotosünteesi valemist (9) selgub, et fotosünteesi seisukohalt mängib olulist rolli kiirguse jaotus külvi sees. Viimane on omakorda lehepinna funktsioon. Lehepind on mudelis selleks suuruseks, mille kaudu avaldub tagasiside taimede seisundilt fotosünteesi protsessile. Lehepinda on võimalik arvutada lehtede biomassi ja pindtiheduse m_t suhtena:

$$L_j = m_{1,j} / m_t. \quad (12)$$

Pindtihedus on ühikulise lehepinna mass, mis tavaliselt defineeritakse kuivkaalu alusel. Lähtudes maksimaalse produktiivsuse printsiibist (Tooming, 1977; 1984), on pindtihedus seotud fotosünteesi parameetritega kujul

$$\mu = \frac{a}{\sigma_1} \cdot \frac{1 - \sqrt{c}}{\sqrt{c}} \bar{\Pi}. \quad (13)$$

Koosluse sees neeldunud FAK arvutatakse valemiga

$$\Pi(L, \tau) = (1 - A_F) \left(c_S S' \frac{\partial a_S}{\partial L} + c_D D \frac{\partial a_D}{\partial L} \right), \quad (14)$$

kus A_F – taimkatte albeedo FAK piirkonnas;

S' – otsese päikesekiirguse intensiivsus horisontaalsele pinnale külvi kohal, Wm^{-2} ;

D – hajuskiirguse intensiivsus külvi kohal, Wm^{-2} ;

c_S, c_D – ülemineku koefitsiendid vastavalt otseselt ja hajusalt integraalselt kiirguselt FAK-le;

a_S, a_D – kiirguse läbitulekukoefitsiendid otsesele ja hajusale kiirgusele.

Otsese kiirguse üleminekukoefitsient FAK-le c_S on aproksimeeritud päikese kõrgusest sõltuva küllastuva kõverana (Sepp, Tooming, 1987; 1991), mis päikese lähenemisel horisondile läheneb nullile, päikese kõrguse suurtel väärtustel omandab aga peaaegu püsiva väärtuse 0,42. Hajuskiirguse korral on vastav üleminekukoefitsient c_D võetud võrdseks 0,6. Summaarse kiirguse jaotamine otseseks ja hajusaks toimub seoste abil, mis võtavad arvesse päikese kõrguse ning tegeliku ja maksimaalselt võimaliku kiirguse vahekorra (Sepp, Tooming, 1987; 1991). Maksimaalselt võimalik kiirgus selge taeva korral arvutatakse Berljandi (1961) valemist.

Kiirguse läbitulekukoefitsiendid sõltuvad taimkatte geomeetrisest struktuurist. Kartuli korral on otsese kiirguse läbituleku koefitsient aproksimeeritud empiiriliste andmete baasil järgmisel kujul (Tammets, 1984):

$$a_S(L) = \exp(0,85L). \quad (15)$$

Sellisel juhul on kiirguse läbituleku koefitsientide tuletised valemis (14) avaldatavad kujul

$$\frac{\partial a_S}{\partial L} = \frac{\partial a_D}{\partial L} = 0,85 \exp(-0,85L) \quad (16)$$

ja valem (14) omandab kuju

$$\Pi(L, \tau) = 0,85(1 - A_F) Q_F \exp(-0,85L), \quad (17)$$

kus Q_F on külville langeva summaarse FAK voo tihedus.

Paigutades $\Pi(L, \tau)$ fotosünteesi valemisse (9), on fotosünteesi integreerimine üle lehepinna võimalik teostada analüütiliselt:

$$\Phi_L = \int_0^{L_0} \Phi dL = \frac{\Phi_{max}}{0,85} \ln \frac{1 - \frac{0,85 a (1 - A_F)}{\Phi_{max}} Q_F}{1 + \frac{0,85 a (1 - A_F)}{\Phi_{max}} Q_F e^{-0,85 L_0}}, \quad (18)$$

kus fotosünteesi valguskõvera platoo Φ_{max} , mis võimaldab valemis (18) lühemat üleskirjutust, seostab lähtudes maksimaalse produktiivsuse printsiibist fotosünteesi ja gaasivahetuse parameetrid järgmisel kujul (Tooming, 1977; 1984):

$$\Phi_{max} = a \bar{\Pi} (1 - \sqrt{c}) / \sqrt{c}. \quad (19)$$

Φ_L jääb seejuures ajast sõltuvaks FAK intensiivsuse Q_F kaudu. Seega saame valemi (3) avaldada kujul

$$\Delta M_j = \varepsilon (1 - c_1) \int_0^t \Phi_L d\tau - \sum_{i=1}^4 c_{2,i} m_{i,j}. \quad (20)$$

Meteoroloogiliselt võimaliku saagi määramine. Senine arvutuse käik määras potentsiaalse saagi. Üleminekul meteoroloogiliselt võimaliku saagi arvutusele võtab POMOD arvesse õhutemperatuuri mõju fotosünteesile ja hingamisele ning mullaniiskuse mõju fotosünteesile.

Fotosüntees korrutatakse igal ajasammul läbi normeeritud mõjufunktsiooniga Ψ .

$$\Phi_{MVS} = \Psi \cdot \Phi. \quad (21)$$

Mõjufunktsioon Ψ integreerib mudeli käesolevas seisus õhutemperatuuri ja mullaniiskuse limiteeriva mõju. Kummagi faktori mõjufunktsioonid on avaldatud maksimumiga kõverana, mille maksimum asub faktori optimaalses piirkonnas.

Temperatuuri mõjufunktsioon fotosünteesile toodi mudelisse traditsiooniliselt eksponentsiaalsel kujul (Dmitrenko, 1976; Polevoi, 1983), selle parameetrid määrati kirjandusest saadud andmete põhjal (Winkler, 1971):

$$\Psi_T = \exp[-a_T (T - T_{opt})^2], \quad (22)$$

kus T – õhutemperatuur, °C;
 $T_{opt} = 18,6$ °C – fotosünteesi jaoks optimaalne temperatuur;
 $a_T = 0,0038$ K⁻² – empiiriline parameeter.

Mullaniiskuse mõjufunktsioon esitatakse laiema maksimumiga kõverana:

$$\Psi_W = \begin{cases} \exp\left[-b_1 \left(\frac{W_{opt1} - W}{W_{opt1}}\right)^2\right] & \text{kui } W < W_{opt1} \\ 1 & \text{kui } W_{opt1} < W < W_{opt2} \\ \exp\left[-b_2 \left(\frac{W - W_{opt2}}{W_{max} - W_{opt2}}\right)^2\right] & \text{kui } W > W_{opt2} \end{cases}, \quad (23)$$

kus W – mulla produktiivne veevaru, s.o mulla kogu veevaru ja närbumisniiskusele vastava veevaru vahe, mm;
 W_{opt1} , W_{opt2} – produktiivse veevaru optimaalse diapasooni piirid, mis sõltuvad mulla tüübist ning võeti mudelis võrdseks vastavalt 60% ja 100% väliveemahutavusele vastava veevaruga, mm;
 b_1 , b_2 – empiirilised koefitsiendid, mille väärtused leiti kalibreerimise meetodil, kasutades baasandmetena agrometeoroloogiasõrgus tehtud mullaniiskuse mõõtmisi ja produktiivsuse määramisi. Selle analüüsi tulemusena kasutatakse mudelis väärtusi $b_1 = 1,4$ ja $b_2 = 0,7$.

Faktorite Ψ_T ja Ψ_W koosmõju arvestamisel on lähtutud miinimumi (Liebigi) reeglist:

$$\Psi_l = \min(\Psi_T, \Psi_W). \quad (24)$$

See reegel on seda täpsem, mida lühema ajavahemiku suhtes teda vaadeldakse. Kõige korrektsem on ta momendi andmete korral. Et antud mudelis kasutatakse ööpäeva keskmisi parameetreid, on limiteerivale tegurile arvatud tema jäikust vähendav parand, millega koos ta avaldub kujul (Sepp, Tooming, 1991)

$$\Psi = \Psi_l \cdot [1 \pm (1 - \Psi_T)(1 - \Psi_W)]. \quad (25)$$

Parand võetakse arvesse positiivse märgiga, kui $T < T_{opt}$ ja $W < W_{opt1}$ või $T > T_{opt}$ ja $W > W_{opt2}$, ning negatiivse märgiga, kui $T < T_{opt}$ ja $W > W_{opt2}$ või $T > T_{opt}$ ja $W < W_{opt1}$.

Lisaks fotosünteesile arvestatakse temperatuuri mõju säilitushingamise koefitsientide määramisel, kasutades selleks valemit (Curry, 1971)

$$c_2 = a_0 2^{T/10}, \quad (26)$$

kus a_0 on empiiriline kordaja. Valem (26) näitab, et hingamine loetakse kahekordistuvaks, kui temperatuur tõuseb 10 °C võrra.

MVS määramisel kasutatakse mudeli põhiversioonis keskmisi ööpäevaseid õhutemperatuuri väärtusi, milleks võivad olla näiteks meteoroloogilises vaatlusvõrgus määratud keskmised õhutemperatuurid. Väikeste muudatuste sisseviimise korral on võimalik kasutada ka igatunniseid või teisi ööpäevast käiku kirjeldavaid temperatuuri väärtusi, samuti ka keskmisi dekaaditemperatuure (Sepp, 1983a).

Otseselt mõõdetud mulla veevarude väärtusi on kasutada vähe, samuti on see suurus territoriaalselt väga muutlik ja sõltub erinevatest faktoritest. Seepärast arvutatakse produktiivne veevaru W mudelis, kasutades selleks mulla veebilansi võrrandit:

$$W = W_0 + U - E - V, \quad (27)$$

kus W_0 – algne produktiivne veevaru, mm;
 U – sademed, mm;
 E – evapotranspiratsioon, mm;
 V – ära- ja läbivool, mm.

Sademete andmetena kasutatakse veebilansi võrrandis mõõdetud sademete väärtusi.

Evapotranspiratsiooni arvutus toimub summaarset kiirgust ja taimkatte lehepinda arvesse võtva empiirilise valemiga, mille parameetrid on määratud katseandmete alusel, kasutades selleks taimedega ja ilma taimedeta aurumismõõtjate kaalumisel saadud tulemusi (Sepp, Tooming, 1991):

$$E = Q(0,0872 + 0,0406 \sqrt{L_0}) \min(1, W / W_{opt1}), \quad (28)$$

kus Q – summaarne kiirgus, MJ m⁻²,
 L_0 – külvi lehepinna indeks, m² m⁻².

Veevaru väärtus W hakkab valemi (28) tulemust mõjutama juhul, kui ta langeb alla optimaalse piiri, st $W < W_{opt1}$.

Äravoolu hinnang saadi kõrvutades põldkatsetel ja agrometeoroloogiapostides määratud mullaniiskuse käike bilansivõrrandi järgi arvatutega ja leiti, et “üleliigseks” osutusid päevased sademed, mis ületavad 20 mm. 2001. aasta katse tulemused näitasid, et ilmselt on pikemate intensiivsete sajuperioodide korral sellest äravooluks vähe. Samas oli ilmne, et ühe ööpäeva kohta antud piiri madaldada ei või, sest see viiks veebilansi paigast ära üksikult esinevate suure sademete hulgaga päevade korral. Loogiliselt vajas sisseviimist täiendav äravool, mis kõrvaldaks osa pikema perioodi vältel kumuleerunud suurtest sademetest. Vastava perioodi pikkuse ja sademete piirkoguse varieerimine näitas, et sobivaimaks lahenduseks võib pidada lisatingimust, mille kohaselt loetakse äravooluks ka iga selline sademete kogus, mis kümne järjestikuse päeva jooksul ületab 60 mm.

Kui on kasutada veevarude mõõtmisandmed, võib mulla veebilansi arvutusi alustada kevadiste mulla algveevarude määramise momendist. Samuti saab algmomendina kasutada mulla parasniiske seisundi saabumist, mida hinnatakse meteoroloogilises vaatlusvõrgus visuaalsete meetoditega. Viimasel juhul loetakse mulla algniiskus võrdseks väliveemahutavusega. Mudeli põhivariandis arvutatakse mulla veebilanss poolmeetrisel kihil kohta. Kevadiste algveevarudega alustatud veebilansi arvutused toimuvad mudelis kogu vegetatsiooniperioodi ulatuses.

Meteoroloogiliselt võimaliku saagi arvutamisel võetakse kartuli mahapaneku ajaks temperatuuri püsiv üleminek üle 8 °C, juhul kui muld on kevadel liigniiske, siis väliveemahutavuse saabumise moment. Hiliste kevadiste öökülmade korral nihutatakse mahapaneku aega veelgi edasi nii, et hilised öökülmad ei kahjustaks kartuli tõusmeid. Biomassi dünaamika arvutus algab momendist, kus uue kuivaine tootmine juurtes, vartes ja lehtedes ületab kuivaine vähenemise emamugulas. Temperatuuride summa mahapanekust momendini, kus uute organite juurdekasv ületab emamugula kahanemise, määrati spetsiaalsete, kaalutud emamugulatega tehtud katsete abil. Sordi 'Sulev' korral saadi vastavaks temperatuuride summa väärtuseks 380°. Sordi 'Anti' puhul oli 2001. a tugevalt eelidandatud seemne korral tulemuseks 390°, 2002. a praktiliselt eelidandamata seemne korral 460°. Antud momendiks saavutatud lehepinna indeksid olid 'Anti' korral märgatavalt suuremad – 0,15 m²/m², 'Sulevil' 0,05 m²/m². Arvutused lõpetatakse sügisese esimese alla –2 °C öökülma esinemisel või keskmise ööpäevase temperatuuri püsival langemisel alla 7 °C.

Mudeli sisendinformatsioon

Mudeli poolt kasutatava sisendinformatsiooni võib jagada nelja gruppi: igapäevane meteoroloogiline informatsioon, ühekordne iga-aastane informatsioon, koha parameetrid ja sordi parameetrid.

Igapäevasest meteoroloogilisest informatsioonist vajab POMOD summaarse kiirguse päevasummasid, ööpäeva keskmisi temperatuure ja sademete summasid. Summaarse kiirguse päevasummad võivad olla arvatud ka päikesepaiste kestuse või pilvisuse kaudu, kasutades selleks regressioonivõrrandeid, mille parameetrid omavad aastast käiku. Et vaadeldav periood – ööpäev – on suhteliselt lühike, on ümberarvutusteks soovitamam kasutada päikesepaiste kestuse andmeid.

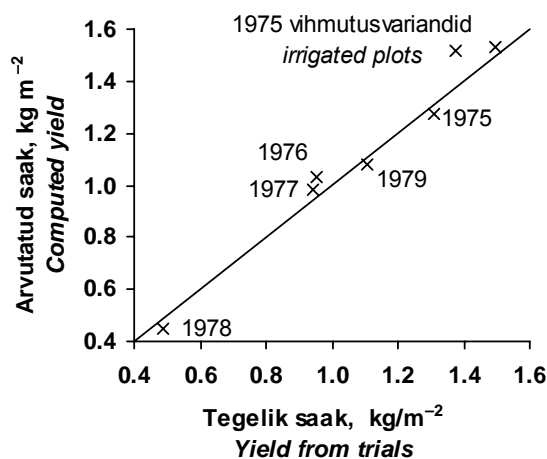
Iga-aastane informatsioon sisaldab aastaarvu, mulla kevadist algveevaru ja järgmisi daatumeid: mulla kevadiste algveevarude mõõtmine, mulla parasniiske seisundi saabumine, temperatuuri püsiv üleminek üle 8 °C, viimaste kevadiste öökülmade ≤ -2 °C esinemine, esimeste sügiseste öökülmade ≤ -2 °C esinemine, temperatuuri püsiv langus alla 7 °C.

Koha parameetritena lähevad mudelisse geograafiline laius, kasutatava meteoroloogiajaama identifikaator (kui kasutatakse meteoroloogilise vaatlusõrgu andmeid) ja mulla produktiivsed veevarud: $W_{opt 1}$, $W_{opt 2}$ (vastab väliveemahutavusele), W_{max} (vastab maksimaalsele veemahutavusele).

Sordi parameetritena vajab mudel kasvufunktsioone A_{ij} ja B_{ij} (või D_{ij}), fotosünteesi ja gaasivahetuse valguskõverate parameetreid a , $\bar{\Pi}$, σ_1 , σ_2 ning külvi albeedot A_F .

Mudeli kontroll

Iga mudeli koostamise üheks etapiks on tema kontroll. Mudeli POMOD kontroll viidi läbi kaheetapilisena. Esiteks võrreldi arvutustulemusi perioodil 1974–1979 läbiviidud põldkatsete andmetega. Küllalt suurelt osalt oli see siiski sõltuv materjal, kuna nende katsete andmeid kasutati mudeli parameetrite identifitseerimisel. Sõltumatud olid 1975. a vihmutusvariandid ja 1978. a andmed. Arvutatud MVS ja katsest määratud saakide kokkulangevust võib pidada heaks (joonis 4), seda eriti arvestades, et sõltumatud variandid kujutasid endast ülejäänud valimi suhtes ekstreemalseid väärtusi.



Joonis 4. Mudeliga arvutatud MVS funktsioonina põldkatsetel saadud saakidest

Figure 4. MPY computed by model as function of real yields in field trials

Teiseks võrreldi nelja sordikatsepunkti (Suure-Jaani, Võru, Saare ja Saue) andmetel kartulisordi 'Sulev' sordikatsetest saadud ja mudeliga arvutatud saagi kõikumisi 20 aasta pikkuse rea korral. Sordikatsepunktides ei ole tagatud otseselt meteoroloogiliselt võimalik saak, kuid agrotehnika ja väetamine on läbi aastate ligikaudu ühtlasel tasemel. Arvutustes kasutati tegelikke mahapaneku-, tõusmete- ja koristusaegu. Lisaks PS ja MVS väärtustele arvutati mudeliga välja ka sellised variandid, kus arvestati lehepinna kahanemist lehemädaniku tõttu. Lehepinna kahanemine kirjeldati iga-aastaste vaatlusandmete baasil aproksimeeritud eksponentsiaalsete kõveratega. Kui MVS arvutati lehemädaniku mõju arvestades, võib korrelatsioone arvutatud ja tegelike saakide vahel pidada heaks Suure-Jaani korral ning rahuldavaks Võru ja Saare puhul (tabel 1). Saue sordikatsepunkti kohta ei õnnestunud usaldatavat korrelatsiooni saada. Nagu näitab korrelatsiooni täielik puudumine MVS ja Saue saagiandmete vahel, ei ole saakide kõikumised selles sordikatsepunktis tingitud meteoroloogilistest faktoritest. Põhjusteks võivad olla täieliku viljavaheldussüsteemi puudumine, põhjavete mõju ning võib-olla ka katsete läbiviimise kvaliteet.

Tabel 1. Korrelatsioonikoeffitsiendid tegelike saakide ja erinevate arvutatud saagikategooriate vahel neljas sordikatsepunktis

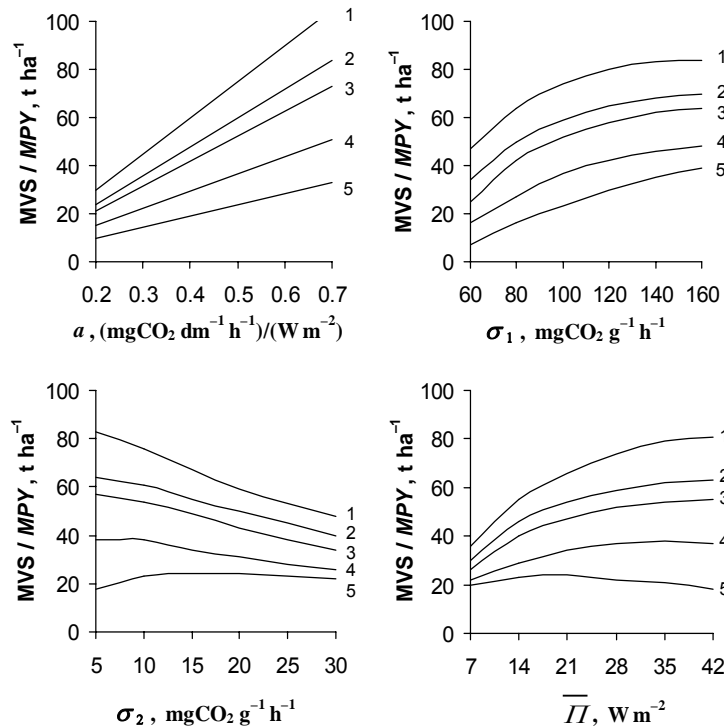
Table 1. Correlation coefficients between actual yield and computed yield categories in four stations of variety control network

Saagikategooria / Yield category	Sordikatsepunkt / Station of variety control network			
	Suure-Jaani	Võru	Saare	Saue
PS/PY	0,45	0,04	0,03	0,14
PS+lehemädanik / PY+late blight	0,58	0,52	0,29	0,26
MVS/APY	0,79	0,38	0,54	0,03
MVS+lehemädanik / APY+late blight	0,85	0,64	0,70	0,30

Mudeli analüüs

Mudeli POMOD tundlikkust on analüüsitud bioloogiliste parameetrite muutumise ja mudelis kasutatava meteoroloogilise informatsiooni keskmistatuse taseme suhtes.

Mudeli tundlikkuse analüüsil bioloogiliste parameetrite muutumise suhtes vaadeldi viit erinevat aastat, millest ühe saagikus vastas ligikaudu pikaajalisele keskmisele väärtusele, kaks olid ekstreemsed saagiaastad (üks hea, teine halb) ja kaks vahepealsed (joonis 5). Iga vaadeldava parameetri väärtust muudeti etteantud piirides, saades nii kõverate parved, mis iseloomustavad mudeli tundlikkust nende parameetrite suhtes.



Joonis 5. Mudeli tundlikkuse analüüsi tulemused fotosünteesi ja gaasivahetuse parameetrite a , $\bar{\Pi}$, σ_1 , ja σ_2 suhtes. Numbrid tähistavad: 1 – ekstremaalselt head, 2 – head, 3 – keskmiist, 4 – halba ja 5 – ekstreemselt halba saagiaastat

Figure 5. Results of analysis of sensibility of model against the parameters of gross and net photosynthesis a , $\bar{\Pi}$, σ_1 , and σ_2 . The numbers mark years of: 1 – extremely high, 2 – high, 3 – mean, 4 – low, 5 – extremely low yield

Nagu jooniselt 5 nähtub, on fotosünteesi kõvera algtõusu a mõju mudeliga arvatud saagile lineaarne, a kasvades kasvab lineaarselt ka saak. Valgusküllastuse juures esineva fotosünteesi intensiivsuse σ_1 suurendamine suurendab saaki peamiselt σ_1 madalate väärtuste piirkonnas. Platoole lähenemine toimub seda varem, mida sobivama meteoroloogiliste tingimustega aastaga on olnud tegemist. Hingamise intensiivsuse σ_2 kasv toob endaga üldjuhul kaasa saagitaseme languse. Erandiks on ainult väga halbade meteoroloogiliste tingimustega aastad, mil tundlikkuse kõver on maksimumiga ning ka madal σ_2 väärtus põhjustab saagi vähenemist. Ka kohastumiskiirguse $\bar{\Pi}$ suhtes annab mudel ootuspäraselt maksimumiga tundlikkuse kõverad, kuigi paremate saagiaastate korral jääb parameetri vaadeldud ulatuses veel maksimum saavutamata.

Mudeli tundlikkuse analüüsil erinevalt keskmistatud meteoroloogilise informatsiooni suhtes võrreldi igatunnise, keskmise ööpäevase ja keskmiste dekaadiandmete alusel arvatud saake. Selleks viidi läbi kaks mudeleksperimenti. Esimene mudeleksperiment toimus ühe aasta andmetel, kus erinevad variandid saadi maha-panekuaegade ja algveevardude varieerimisel. Võrreldes igatunniste andmete kasutamisel saadud tulemustega andsid päevaandmed maksimaalse vea 2%. Dekaadikeskmiste meteoandmete rakendamise põhjustatud vead olid aga juba kuni 7–8% (Sepp, 1983a). Teine mudeleksperiment võrdles igapäevaste ja dekaadiandmete kasutamist 16 a jooksul kuues meteoroloogiajaamas. Kuigi keskmiselt ei ületanud arvatud saakide erinevus 6%, esines üksikutel aastatel kõrvalekaldeid kuni 12%. Nii keskmistes kui maksimaalsetes kõrvalekalletes võis täheldada vea ebasümmeetrilisust. Dekaadikeskmiste andmete kasutamine põhjustas rohkem saagi suurenemist kui vähenemist. Siit võis järeldada, et andmete keskmistamisega kaasneb süstemaatiline viga arvutustulemuste suurenemise suunas.

Eelmine tulemus, meetodiline viga keskmistatud andmete kasutamisel, muutis küsitavaks ka pikaajaliste keskmiste meteoroloogiliste andmete kasutatavuse mudelites ja saagiprognooosi meetodites. Selle küsimuse

uurimiseks viidi läbi eraldi mudeleksperiment. Võrreldi eraldi 16 aasta andmetel arvutatud ja seejärel keskmistatud ning ühekordselt kliimanormi alusel arvutatud saake (Sepp, 1988c). Lisaks potentsiaalse saagi ja meteoroloogiliselt võimaliku saagi kategooriatele vaadeldi veel varianti, kus temperatuuri limiteerivat mõju arvestati, sademete oma aga mitte. See võimaldas välja tuua erinevate faktorite osa vea tekkel. Keskmiselt ületas kliimanormi alusel arvutatud PS üle paljude aastate keskmistatud PS väärtust 4,4%, temperatuuri arvestamine suurendas erinevuse 10%-le ja MVS korral ületas kliimanormi alusel arvutatud saak iga-aastase tegeliku andmestiku baasil saadu 24%. Põhjuseks on siin asjaolu, et keskmised paljuaastased tingimused langevad küllaltki hästi kokku kartuli jaoks optimaalsete tingimustega, iga-aastased kõikumised aga mitte.

Mudeliga saadud resultaate

Kiirgusressursside ning agrometeoroloogiliste ja agrokliimaressursside hinnang kartulikasvatuseks

Traditsiooniliselt hinnatakse agrokliimaressursse kui faktorite kogumit, mis määrab põllumajanduslike kultuuride produktiivsuse, vaadeldes neid faktoreid eraldi (nt: temperatuurisumma, sademete summa, öökülmadeta perioodi pikkus jne). Sellisel lähenemisel on rida puudusi:

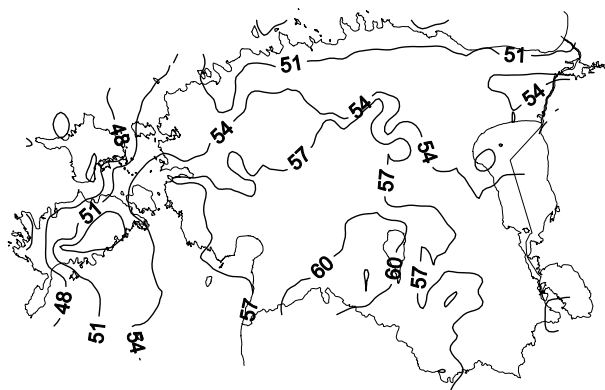
- 1) aolisi komplekse on raske võrrelda, puudub ühtne kvantitatiivne näitaja;
- 2) meteoroloogilised faktorid ei mõjuta produktsiooniprotsessi isoleeritult, vaid komplekselt, olles üksteisega vastasmõjus, mida traditsiooniline lähenemine ei arvesta;
- 3) meteoroloogiliste faktorite koosmõju tulemus sõltub uuritavast objektist, st vaadeldava sordi või liigi bioloogilistest omadustest ja taimede seisundist.

Meteoroloogiliselt võimaliku saagi mõiste võimaldab tema pikaajalist keskmist väärtust vaadelda kui agrokliimaressursside hinnangut konkreetse kultuuri kasvatamiseks, kusjuures ressursid on esitatud ühe kvantitatiivse näitajana – saagi ühikutes. Veelgi enam, MVS definitsioon võimaldas meil sisse tuua ka agrometeoroloogiliste ressursside mõiste, s.o ajalisel järjestatud agrometeoroloogiliste tingimuste kogum, mis mõjub produktsiooniprotsessile ja saagi formeerumisele antud aastal ning avaldub samuti saagi ühikutes.

Analoogselt väljendab liigi või sordi potentsiaalne saak kiirgusressursse tema kasvatamiseks.

Selline kiirgus- ja agrokliimaressursside hinnang on läbi viidud Eesti territooriumi ning Baltikumi kohta tervikuna (Sepp, Tooming, 1983; 1984; 1988; 1991; Kadaja, 1994). Eesti ulatuses muutub 1965–1996 keskmine MVS 45 t ha⁻¹ saartel kuni üle 60 t ha⁻¹ Sakala kõrgustiku alal (joonis 6). Kuigi MVS saavutab oma miinimumväärtused üksikutel liigniisketel aastatel, jääb pikemas lõikes domineerivaks siiski saagikadu, mis tekib saartel ja rannikualadel veedefitsiidi tõttu. Viimane ongi põhjuseks, miks MVS on saartel märgatavalt madalam kui mandril. Ilmne on ka agrokliimaressursside kasv kartulikasvatuseks põhjast lõunasse, mida põhjustavad kiirgusressursside ja vegetatsiooniperioodi pikkuse kasv. MVS kasv lõuna suunas jätkub ka väljaspool Eesti territooriumi. Leedu lõunaosas ulatuvad tema väärtused kuni 67 t ha⁻¹. Potentsiaalse saagi arvutused näitavad, et kartuli vegetatsiooniks sobival perioodil on kiirgusressurssidele vastavaks saagiks Eestis 67 kuni 76 t ha⁻¹, Baltikumi lõunapiiril kuni 80 t ha⁻¹.

Analoogsed agrometeoroloogiliste ja agrokliimaressursside arvutused viisime läbi ka Komimaa kohta, mis asub kartulikasvatuse areaali põhjapiiril (Sepp jt, 1989). Nendes tingimustes oli ilmne vegetatsiooniperioodi pikkuse määrav roll saagi kujunemisele. Korrelatsioonikoeffitsiendid MVS ja kartuli jaoks kasutada olnud temperatuurisummade vahel ületasid 0,9. Eesti tingimustes osutus samal ajal juhtiva limiteeriva faktori väljatoomine võimatuks.



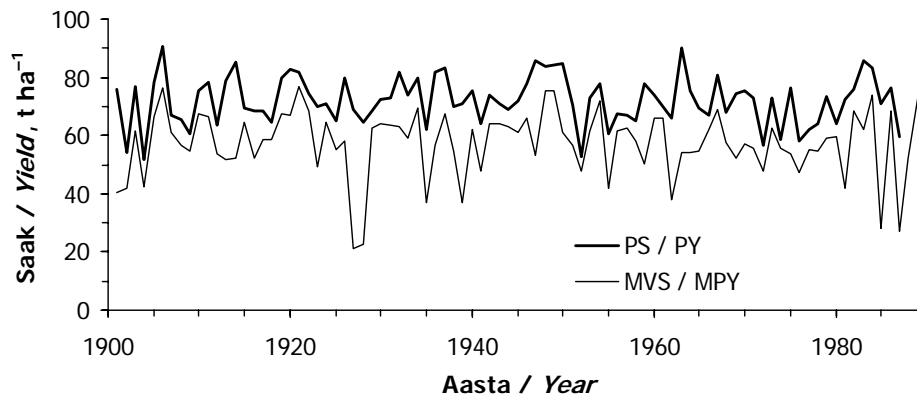
Joonis 6. Agrokliimaressursside väljendav keskmine MVS kartulisordile 'Sulev' Eestis, arvatuna ajavahemiku 1965–1996 ilmastikutingimuste alusel, t ha⁻¹

Figure 6. Agroclimatic resources represented by mean MPY for potato variety Sulev in Estonia calculated on the basis of weather conditions of period 1965–1996, tons per ha

Saagiridade statistiline analüüs

Kui sordi parameetrid on teada, on võimalik tema MVS rida arvutada välja pikema perioodi ulatuses. Oluline on ainult see, et vajalik meteoroloogiline informatsioon antud perioodi kohta eksisteeriks. Rakendatud on mudelit POMOD seni vaadeldud sortide korral saagiridade arvutamiseks Tartu (alates 1901), Kuressaare

(alates 1923), Sõrve (alates 1901, kuid mõningate aukudega andmerekas) ja Leningradi oblastis asuva Belogorka (alates 1894) meteoroloogiliste andmete baasil (Sepp, Tooming, 1991). Arvutatud saagiread võimaldasid hinnata vaadeldud sordi käitumist erinevates tingimustes, hinnata saagiridade jaotusi ja tagatusi ning võrrelda neid üksikute meteoroloogiliste faktorite vastavate näitajatega. Näiteks PS ja MVS read sordile 'Sulev' alates 1901. a Tartus demonstreerivad saagi ekstreemseid väärtusi just sellisel perioodil, kui vaadeldavat sorti ennast veel ei eksisteerinud, s.o enne 1949. aastat (joonis 7).



Joonis 7. Potentsiaalse (PS) ja meteoroloogiliselt võimaliku saagi (MVS) read Tartus kartulisordile 'Sulev' alates XX sajandi algusest, t ha⁻¹

Figure 7. Yield series for potential (PY) and meteorologically possible yield (MPY) for potato variety Sulev in Tartu from the beginning of 20-th century, tons per ha

Tõenäoline saagiprognosis

Üheks olulisemaks mudeli POMOD alusel saadud tulemuseks võib pidada tõenäosusliku saagiprognosisi meetodika väljatöötamist (Sepp, 1988b; Žukovski jt, 1989; 1990; Kadaja, 1999). Tõenäosuslik saagiprognosis põhineb skeemil, kus prognoosi andmise momendini toimub arvutus tegelikult eksisteerinud andmete baasil, edasi aga jätkub erinevates variantides, kas näiteks eelnevate aastate andmete baasil või kasutades ilmageneraatoriga arvutatud tingimusi (Beltšenko, 1989). Saadud erinevad saagi väärtused võimaldavad esitada oodatava saagi tõenäosusliku jaotusena, näiteks tagatuskõverana. Sama meetodikaga enne külvi antud prognoos, mil konkreetse aasta andmed on veel teadmata, annab meile klimatoloogilise tõenäosusliku saagiprognosisi. Antud prognoosimeetodit on kasutatud ka tegeliku saagi prognoosimiseks. Selleks leiti konkreetse aasta MVS suhe tema paljuaastasest keskmisse, mis näitab ilmastikutingimuste suhtelist soodsust antud aastal. Selle suhte korrutis paljuaastase keskmise tootmissaagi või tolle trendi järgi arvutatud väärtusega annabki tootmissaagi prognoosi, mis võtab arvesse ilmastiku otsest mõju.

Kliimamuutuste mõju hindamine kartulikasvatusele

Seniste ilmastikuandmete põhjal välja arvutatud MVS read eelmise sajandi 60–90-aastaste perioodide kohta mingit usaldatavat trendi ei näita (Tooming, 1988). Samuti ei esine usaldatavaid trende saagi muutlikkuse karakteristikutes – standardhälbes ja entroopias.

MVS reaktsioon Balti regiooni jaoks välja pakutud võimalikele kliimamuutuste stsenaariumidele (Keevallik, 1998) on märgatav. Kliima üldisel soojenemisel baseeruvad stsenaariumid toovad kartulikasvatuseks optimaalse piirkonna märgatavalt põhja poole. Väiksemaid muutusi kajastavad stsenaariumid jätavad kartulikasvatuseks soodsamad ilmastikutingimused veel Lõuna-Eestisse, keskmised stsenaariumid nihutavad selle aga juba Põhja-Eestisse. See tähendab, et praegu Valgevene aladel paiknev ilmastiku poolst optimaalseim kartulikasvatuse ala asetuks nende stsenaariumide täitumisel Eesti piirkonda. Suuri muutusi pakkuvate stsenaariumide korral nihkub see edasi Soome laiuksle. Kui kaks esimest stsenaariumi suurendavad agrokliimaressurssi kartulikasvatuseks Eestis keskmiselt 6%, siis viimase korral halveneks tingimused kartulikasvatuseks võrreldes praeguse seisuga kuni 17%.

Lisaks eelpool toodule on mudelit POMOD kasutatud mitmesuguste mudeleksperimentide tegemiseks. Hinnatud on näiteks külviaja (Sepp, 1988a) ja maapinna kallakuse mõju saagile (Tooming, Sepp, 1983).

Mudeli edasiarenduse perspektiividest

Kokkuvõtlikult võib eelneva põhjal öelda, et mudel POMOD võimaldab praeguses seisus arvutada potentsiaalset ja meteoroloogiliselt võimalikku saaki, st võtta arvesse sordi bioloogilisi omadusi, päikesekiirgust ja meteoroloogilisi tingimusi, viimasest peamiselt termilist ja niiskusrežiimi. Mudel oli seni identifitseeritud kahe sordi, keskhilise sordi 'Sulev' ja varase sordi 'Valgevene varane' jaoks.

Mudeli edasiseks rakendamiseks nii uurimistöös kui prognooside andmisel on alates 2001. a alustatud mudeli bioloogiliste parameetrite määramisega (kasvufunktsioonid, fotosünteesi parameetrid jt) praegu enam levinud ja perspektiivsetele sortidele. Vastavad katsed on seni toimunud sortidega 'Anti', 'Ants' ja 'Agria'.

Teiseks oluliseks töösuunaks mudeli edasiarendamisel, millega alustati 2002. a, on täiendavate plokkide väljatöötamine mullaviljakuse arvessevõtuks mudelis. Teiste sõnadega tähendab see võimalust tegelikult võimaliku saagi (TVS) arvutamiseks.

Edasises perspektiivis oleks tootmissaagi (TS) kategooria alla paigutatud mõjurite järkjärguline sissetoomine. Ilmselt kujuneb see etapp kõige keerukamaks, kuna seal arvesse tulevad tegurid, nagu taimehaigused, umbrohud, puudused agrotehnikas, on omakorda sõltuvad ilmastikust ja mullastikust ning nõuavad igaüks oma alamudeliliste koostamist.

Kokkuvõtteks võib öelda, et märkimisväärne töö kartuli mudeli arendamisel on tehtud, kuid suurem töö seisab veel ees. Nagu aga senised tulemused näitavad, tasub see töö vaeva, sest üks korralik mudel võimaldab lahendada mitmesuguseid ülesandeid, nii uurimuslikust kui praktilisest valdkonnast.

Tänuavaldus

Mudeli edasine arendamine on saanud võimalikuks tänu Eesti Teadusfondi toetusele, kes alates 2002. a eraldas tööde tegemiseks teadusgrandi nr 5020. Autor tänab prof Heino Toomingat artikli läbivaatamise ja kasulike soovitude eest.

Kirjandus

- Beltšenko: Бельченко Г. Г. 1989. Разработка статистического имитатора погоды. – Научн. техн. бюл. по агр. физике, 70. АФИ, Ленинград, с. 51–56.
- Berljand: Берлянд, Т. Г. 1961. Распределение солнечной радиации на континентах. Ленинград: Гидрометеиздат, 227 с.
- Curry R. B., 1971. Dynamic simulation of plant growth. I. Development of model. – Trans. ASAE, 14 (5), p. 946–949.
- Dmitrenko: Дмитренко, В. П. 1976. Оценка влияния температуры воздуха и осадков на формирование урожая основных зерновых культур. Методическое пособие. Ленинград: Гидрометеиздат, 49 с.
- Kadaja, J. 1994. Agrometeorological resources for a concrete agricultural crop expressed in the yield units and their territorial distribution for potato. – GIS – Baltic Sea States' 93 Proceedings. Eds. Vilu, H., Vilu, R. Tallinn, p. 139–149.
- Kadaja, J. 1999. Agrometeoroloogiliste ressursside tõenäosuslik prognoos. – Eesti Geograafia Seltsi Aastaraamat 32, Teaduste Akadeemia Kirjastus, lk 43–50.
- Kadaja, J. 2001. Kartuli produktsiooniprotsessi mudel POMOD. Akadeemilise Põllumajanduse Seltsi toimetised, 14, lk 75–78.
- Kadaja, J., Tooming, H. 1998. Climate change scenarios and agricultural crop yields. – Country case study on climate change impacts and adaptation assessments in the Republic of Estonia. Eds. Tarand, A., Kallaste, T. Ministry of the Environment of the Republic of Estonia, SEI, CEF, UNEP, Tallinn, p. 39–41.
- Keevallik, S. 1998. Climate change scenarios for Estonia. – Country case study on climate change impacts and adaptation assessments in the Republic of Estonia. Eds. Tarand, A., Kallaste, T. Ministry of the Environment of the Republic of Estonia, SEI, CEF, UNEP, Tallinn, p. 30–35.
- McCree, K. J. 1970. An equation for the rate of respiration of white clover plants grown under controlled conditions. – Prediction and measurement of photosynthetic productivity, Pudoc, Wageningen, p. 221–230.
- McCree, K. J. 1974. Equations of the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum, as functions of dry weight, photosynthetic rate and temperature. – Crop Science, 14 (4), 509–514.
- Polevoi: Полевой, А. Н. 1983. Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур. – Ленинград: Гидрометеиздат, 175 с.
- Ross: Росс, Ю. К. 1966. К математическому описанию роста растений. – ДАН СССР, 171 (26), с. 481–483.
- Sepp*: Сепп, Ю. В. 1983a. Методические аспекты использования метеорологической информации в динамической модели продукционного процесса. – Агроклиматические условия и продуктивность сельскохозяйственных культур. Труды ВНИИСХМ 11, с. 40–45.
- Sepp: Сепп, Ю. В. 1983b. Экспериментальное определение функции роста картофеля. – Агроклиматические условия и продуктивность сельскохозяйственных культур. Труды ВНИИСХМ 11, с. 36–40.
- Sepp: Сепп, Ю. В. 1988a. Влияние задержки срока посадки на урожайность картофеля. – Вопросы агро-климатологии и агрометеорологии. Труды ВНИИСХМ 23, с. 123–128.
- Sepp: Сепп, Ю. В. 1988b. Влияние метеорологических условий различных периодов на продуктивность картофеля и расчёт обеспеченности урожайности. – Вопросы агроклиматологии и агрометеорологии, Труды ВНИИСХМ 23, с. 116–122.

* Autori enne 1992. a ilmunud tööd on avaldatud nime Sepp all.

- Sepp: Сепп, Ю. В. 1988с. Оценка использования климатических норм в динамической модели. – Вопросы агроклиматологии и агрометеорологии. Труды ВНИИСХМ 23, с. 111–115.
- Sepp, Tooming: Сепп, Ю. В., Тооминг, Х. Г. 1982. Продукционный процесс и действительно возможный урожай картофеля (динамическая модель). – С.-х. биология, 17 (1), с. 89–97.
- Sepp, Tooming: Сепп, Ю. В., Тооминг, Х. Г. 1983. Климатические ресурсы производства картофеля в Прибалтике. – Вестн. с.-х. науки, (8), с. 58–63.
- Sepp, Tooming: Сепп, Ю. В., Тооминг, Х. Г. 1984. Использование климатических ресурсов для получения высокой продуктивности картофеля (на примере Прибалтики). – С.-х. биология, (9), с. 26–31.
- Sepp, Tooming: Сепп, Ю. В., Тооминг, Х. Г. 1987. Динамическая модель продукционного процесса картофеля и её применение для решения некоторых агрометеорологических задач. Проект методических указаний. Москва: Гидрометеиздат, 44 с.
- Sepp, Tooming: Сепп Ю. В., Тооминг Х. Г. 1988. Действительно возможная урожайность и эффективность производства картофеля в административных районах Прибалтики. – Вопросы агроклиматологии и агрометеорологии, Труды ВНИИСХМ 23, с. 98–110.
- Sepp, Tooming: Сепп, Ю. В., Тооминг, Х. Г. 1991. Ресурсы продуктивности картофеля. Ленинград: Гидрометеиздат, 261 с.
- Sepp jt: Сепп, Ю. В., Тооминг, Х. Г., Швецова, В. М. 1989. Сравнительная оценка продуктивности картофеля в Коми АССР и Прибалтике методом динамического моделирования. – Физиология растений, 36, (1), 68–75.
- Sirotenko: Сиротенко, О. Д. 1981. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. Ленинград: Гидрометеиздат, 167 с.
- Žukovski jt: Жуковский, Е. Е., Сепп, Ю. В. Тооминг, Х. Г. 1989. О вероятностной концепции расчета и прогноза эталонных урожаев. – Вестник с.-х. науки, (5), с. 68–79.
- Žukovski jt: Жуковский, Е. Е., Сепп, Ю. В., Тооминг, Х. Г. 1990. Вероятностные прогнозы эталонных урожаев. – Метеорология и гидрология, (1), с. 95–102.
- Tammets: Тамметс, Т. Х. 1984. Архитектура и радиационный режим посевов картофеля. – С.-х. биология, (10), с. 16–22.
- Tooming, H. 1970. Mathematical description of net photosynthesis and adaptation processes in the photosynthetic apparatus of plant communities. – Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity, Pudoc, Wageningen, p. 103–114.
- Tooming: Тооминг, Х. Г. 1977. Солнечная радиация и формирование урожая. Ленинград: Гидрометеиздат, 200 с.
- Tooming: Тооминг, Х. Г. 1984. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. Ленинград: Гидрометеиздат, 264 с.
- Tooming, H. 1988. Principle of maximum plant productivity. – Lectures in theoretical biology. Eds. Kull, K., Tiivel, T. Tallinn: Valgus, p. 129–138.
- Tooming, H. 1998. Climate change and estimation of ecologically founded yields. – Climate change studies in Estonia, Ministry of the Environment of the Republic of Estonia. Eds. Kallaste, T., Kuldna, P. SEI, Tallinn, p. 141–152.
- Tooming jt: Тооминг, Х. Г., Мяэталу, Х. Й., Тамметс, Т. Х., Абдурахманов, З. Ш. 1986. Уравнения роста растений с использованием функции относительной биомассы их органов. – С.-х. биология, (4), с. 115–119.
- Tooming, Sepp: Тооминг, Х. Г., Сепп, Ю. В. 1983. Оценка методом динамического моделирования влияния микроклимата на урожай картофеля на склонах. – Метеорология и гидрология, (4), 97–104.
- Winkler, E. 1971. Karetoffelbau in Tirol II. Photosynthesevermögen und Respiration von verschiedenen Kartoffelarten. – Potato research, 14, 1–18.

Dynamic model of potato production process and its applications

J. Kadaja

Summary

The method of reference yields, based on the principle of maximum plant productivity, is described as a conceptual basis for composing models of agricultural crops. According to the principle of maximum plant productivity such adaptation processes take place in a plant and plant community which are directed towards providing the maximum productivity of net photosynthesis possible under the existing environmental conditions. Proceeding from this principle, the maximum production and yields are observed under different limiting factors divided into agroecological groups: in general into biological, meteorological, soil and agrotechnical groups.

According to the concept of reference or model yields these groups are included in the model separately, step by step, starting from optimal conditions for plant community. The main categories of reference yields are, as accounted from above: the potential yield (PY) – the yield of the variety in real radiation but ideal meteorological and soil conditions; the meteorologically possible yield (MPY) – the maximum yield in the real meteorological conditions; the actually possible yield (APY) – the maximum yield in the real meteorological and soil conditions; the commercial yield (CY) – the yield in real field conditions (Figure 1). This set of yield categories gives us an ecologically grounded reference system for comparison and analysis of different yield values obtained from field as well as from model experiments. Additionally, each of these categories represents some kind of ecological resources for plant growth: PY expresses the radiation resources, MPY the agrometeorological or agroclimatic resources and APY the soil resources for cultivation of variety in the units of yield.

This concept is applied in the dynamic model POMOD for modeling potato production process and yield. In present state POMOD allows computing PY and MPY. Model is based on balance equations (1–2) and takes into consideration photosynthesis, respiration and growth. Formula for gross photosynthesis (9) was used in the form derived solving a variation problem on the basis of the principle of maximum productivity. The parameters of this formula are characterized on Figure 3. The gross photosynthesis is calculated by hourly steps on the basis of distribution of solar radiation inside the canopy (14–17). The product of net photosynthesis (3) is calculated as a integral from the difference between gross photosynthesis and respiration. Respiration consists of growth respiration (10) and maintenance respiration (11), the last depends on temperature (26). Growth of plant organs (7) is calculated using differential (5–6) or integral (8) functions of growth. The growth functions are determined on the basis of field experiments as functions of accumulated temperature (Figure 2). The time step of the growth calculations is one day.

MPY is determined taking into account air temperature and soil water, which influence is computed using exponential formulas (22–23). The total simultaneous limitation is calculated by Liebig minimum law adapted for using for daily mean input values (26–27). The calculations of soil available water content are preferred using the equation of water balance (29). A simple formula (30) was elaborated for evapotranspiration based on solar radiation, leaf area index and soil water content.

The environmental input of the model consists of everyday information (global radiation or sunshine duration, air temperature, precipitation), annual information (date and the value of initial available water content, the dates of the permanent rise of temperature over 8 °C and the last night-frost ≤ -2 °C in spring, the first night-frost ≤ -2 °C and the permanent drop of temperature below 7 °C in autumn) and information of location (geographical latitude, field and maximum water capacities).

The model was verified against field observations and data of the Estonian Variety Control Network. The comparison of computed and experimental yields (Figure 4) expressed good compatibility included in independent extreme 1975 (irrigated plots) and 1978 years. Correlation coefficients between computed and actual yields in four stations of the Estonian Variety Control Network demonstrate good results in one and satisfactory results in two cases (Table 1). For one station the correlation was not reliable.

The model sensibility was analyzed regarding variations in photosynthesis parameters (Figure 5) and the averaging level of meteorological data.

The model identified for the variety Sulev was used for calculating and mapping of agroclimatic resources in yield units for potato cultivation in Estonia (Figure 6) and in two other Baltic republics: Latvia and Lithuania. Similar estimations of resources were carried out for the Komi territory situated near the polar circle. These estimations gave good possibility for the analysis of the influence of weather conditions on potato yield in extremely cold conditions.

Using the longest available series of meteorological data for Estonia and neighboring Russian areas the PY and MPY series were calculated from the end of the nineteenth and beginning of the twentieth century (Figure 7). It allowed to analyze the impact of weather on potato yield long before the variety itself came into existence.

On the basis of the reference yield concept and the POMOD model, the probabilistic yield forecast method was elaborated. The probabilistic yield forecast is given in the form of cumulative distribution.

An output of model POMOD was the estimation of the impact of possible climate changes on the potato yield in our regions. Neither significant trends in mean MPY nor in its standard deviation and entropy were observed in the course of 60 to 90 year periods of the previous century. The reactions of MPY to the possible climate scenarios for the Baltic region were evident. These scenarios, describing global warming, shift the optimum areas of potato cultivation to the north. Low- and medium-change scenarios move it from Byelorussia to our region, high rise scenarios to Finland worsening the conditions for potato cultivation in Estonia compared to the present state.

The further development of the model is directed to the identification of the model parameters for new varieties. Up to now three varieties: Anti, Ants and Agria have been under observation. Another problem under development is elaboration of the soil fertility submodel for the POMOD model, for doing it able for calculation of APY.