ÓÄÊ 551.521.13

Ë.À. Õâîðîâà, Â.Ì. Áðûêñèí, Ò.Ñ. Ñêîáîâà

Ìîäåëèðîâàíèå òåïëîâîãî ðåæèìà ïî÷âû ñ ó÷åòîì ïðèõîäÿùåé äëèííîâîëíîâîé ðàäèàöèè

Ìîäåëè òåïëîâîãî ðåæèìà ïî÷â è äëèííîâîëíîâîé ðàäèàöèè ÿâëÿþòñÿ áëîêàìè êîìïëåêñíîé ìîäåëè ïðîäóêòèâíîñòè àãðîýêîñèñòåì. Ïðè ìîäåëèðîâàíèè òåïëîâîãî ðåæèìà ïî÷âû èñïîëüçóåòñÿ óðàâíåíèå òåïëîïðîâîäíîñòè ñî ñëåäóþùèìè ãðàíè÷íûìè óñëîâèÿìè: íèæíÿÿ ãðàíèöà ïîìåùàåòñÿ íà ãëóáèíå, íà êîòîðîé òåìïåðàòóðà ëèáî ïîñòîÿííà, ëèáî èçâåñòíà; â êà÷åñòâå âåðõíåãî ãðàíè÷íîãî óñëîâèÿ çàïèñûâàåòñÿ ñîîòíîøåíèå, îáåñïå÷èâàþùåå «ñøèâàíèå» ðåøåíèé çàäà÷è â ïî÷âå è â ïðèçåìíîì âîçäóõå – óðàâíåíèå òåïëîâîãî áàëàíñà íà ïîâåðõíîñòè ïî÷âû.

1. Ââåäåíèå. Ïîñòàíîâêà çàäà÷è. Êîëåáàíèÿ òåìïåðàòóðû – âàæíûé êîìïîíåíò ïî÷âåííîãî ìèêðîêëèìàòà. Òåìïåðàòóðà ïî÷âû îêàçûâàåò ñóùåñòâåííîå âëèÿíèå íà ìíîãèå ïðîòåêàþùèå â íåé ïðîöåññû. Ñ òåìïåðàòóðîé ñâÿçàíû íà÷àëî è êîíåö âåãåòàöèîííîãî ïåðèîäà, ïðîñòðàíñòâåííîå ðàñïðåäåëåíèå ðàñòåíèé, õàðàêòåð ðàñïðîñòðàíåíèÿ êîðíåâûõ ñèñòåì, ñêîðîñòü ïîòðåáëåíèÿ êîðíÿìè ïèòàòåëüíûõ ýëåìåíòîâ.

Òåïëîâàÿ ýíåðãèÿ â ïî÷âå èìååò íåñêîëüêî èñòî÷íèêîâ: 1) ëó÷èñòàÿ ýíåðãèÿ ñîëíöà; 2) àòìîñôåðíàÿ ðàäèàöèÿ; 3) âíóòðåííÿÿ òåïëîòà çåìíîãî øàðà; 4) ýíåðãèÿ áèîõèìè÷åñêèõ ïðîöåññîâ ðàçëîæåíèÿ îðãàíè÷åñêèõ îñòàòêîâ; 5) ðàäèîàêòèâíûé ðàñïàä. Âêëàä äâóõ ïîñëåäíèõ èñòî÷íèêîâ íè÷òîæíî ìàë è îáû÷íî íå ïðèíèìàåòñÿ âî âíèìàíèå â áàëàíñîâûõ ðàñ÷åòàõ. Âíóòðåííÿÿ òåïëîòà çåìíîãî øàðà òàêæå íåçíà÷èòåëüíà. Âêëàä ýòîãî èñòî÷íèêà â òåïëîâîé ïîòîê âåëèê ëèøü â ðàéîíàõ àêòèâíîé âóëêàíè÷åñêîé äåÿòåëüíîñòè. Ãëàâíûì èñòî÷íèêîì òåïëîòû â ïî÷âå ÿâëÿåòñÿ ëó÷èñòàÿ ýíåðãèÿ ñîëíöà [1].

Òåïëîòà, ïîñòóïàþùàÿ íà ïîâåðõíîñòü ïî÷âû, ïîä äåéñòâèåì ñîçäàâàåìîãî ãðàäèåíòà òåìïåðàòóð ïåðåðàñïðåäåëÿåòñÿ â ïî÷âåííîì ïðîôèëå. Óðàâíåíèå òåïëîïåðåíîñà â ïî÷âå èìååò îáû÷íûé âèä [2]:

$$c\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(l\,\frac{\partial T_s}{\partial x}\right), \qquad (1)$$

ãäå c – êîýôôèöèåíò òåïëîåìêîñòè ïî÷âû, Äæ/(ã·ãðàä); l – êîýôôèöèåíò òåïëîïðîâîäíîñòè, Äæ/(ñì·ñ·ãðàä); T_s – òåìïåðàòóðà ðàçëè÷íûõ ñëîåâ ïî÷âû, ãðàä.

Â óðàâíåíèè (1) x – âåðòèêàëüíàÿ êîîðäèíàòà, íàïðàâëåííàÿ ââåðõ; t – âðåìÿ. Êîýôôèöèåíò òåïëîåìêîñòè c è òåïëîïðîâîäíîñòè l çàâèñèò îò âëàæíîñòè ïî÷âû w_s:

$$c = c(w_s(t, x)),\quad l = l\,(w_s(t, x)).$$

Óäåëüíàÿ òåïëîåìêîñòü ïî÷âû îïðåäåëÿåòñÿ êàê ñðåäíåâçâåøåííàÿ òåïëîåìêîñòü âîäû c_w è ïî÷âåííîãî ñêåëåòà c_s:

$$c(w) = c_s r_s + c_w w_s,$$

ãäå r_s – ïëîòíîñòü ïî÷âû. Ýêñïåðèìåíòàëüíûå èññëåäîâàíèÿ ïîêàçûâàþò, ÷òî òåïëîïðîâîäíîñòü âîçðàñòàåò ñ ðîñòîì âëàæíîñòè, äîñòèãàÿ ìàêñèìóìà ïðè áîëüøèõ çíà÷åíèÿõ âëàæíîñòè. Â ÷àñòíîñòè, ñâÿçü òåïëîïðîâîäíîñòè è âëàæíîñòè ïî÷âû õîðîøî àïïðîêñèìèðóåòñÿ êâàäðàòè÷íîé çàâèñèìîñòüþ âèäà

$$l(w) = c(w)\cdot(l_1(w-l_4)^2 + l_2 r_s + l_3).$$

Êîýôôèöèåíòû êâàäðàòè÷íîé çàâèñèìîñòè äëÿ íåêîòîðûõ ïî÷â ïðèâåäåíû, íàïðèìåð, â [2].

Ðàññìîòðèì ãðàíè÷íûå óñëîâèÿ. Íèæíÿÿ ãðàíèöà ïîìåùàåòñÿ, êàê ïðàâèëî, íà ãëóáèíå, íà êîòîðîé òåìïåðàòóðà ëèáî ïîñòîÿííà, ëèáî çàâèñèò îò âðåìåíè èçâåñòíûì îáðàçîì. Ñëåäîâàòåëüíî, ïðè $x = -H$

$$T_s(t,-H) = j_H(t).$$

Â êà÷åñòâå âåðõíåãî ãðàíè÷íîãî óñëîâèÿ ñëåäóåò çàïèñàòü ñîîòíîøåíèå, îáåñïå÷èâàþùåå «ñøèâàíèå» ðåøåíèé çàäà÷è â ïî÷âå è â ïðèçåìíîì âîçäóõå. Ýòî óñëîâèå òåïëîâîãî áàëàíñà íà ïîâåðõíîñòè ïî÷âû

$$(1-A_s)\cdot Q(0) + \Delta F(0) = r_a c_p D^T_{soil}(T_0 - T_a(NL)) +$$
$$+ r_a c \cdot D^q_{soil}(q_0 - q_a(NL)) + \frac{2}{h_0 + h_1}\, l_{0,1}(T_0 - T_1).$$

Â ëåâóþ ÷àñòü ýòîãî ñîîòíîøåíèÿ âõîäÿò ïðèõîäíûå ñîñòàâëÿþùèå áàëàíñà: áàëàíñ êîðîòêîâîëíîâîé $(1-A_s)\cdot Q(0)$ è äëèííîâîëíîâîé $\Delta F(0)$ ðàäèàöèè; A_s – àëüáåäî ïî÷âû. Ñëàãàåìûìè ïðàâîé ÷àñòè ÿâëÿþòñÿ ñòàòüè ðàñõîäà: çàòðàòû òåïëà íà òóðáóëåíòíûé ïåðåíîñ â àòìîñôåðó è èñïàðåíèå, à òàêæå ïîòîê òåïëà â ïî÷âó. Çäåñü r_a – ïëîòíîñòü âîçäóõà; c_p – òåïëîåìêîñòü âîçäóõà ïðè ïîñòîÿííîì äàâëåíèè; D^T_{soil}, D^q_{soil} – êîýôôèöèåíòû ïðîâîäèìîñòè òåïëà è ïàðîâ âîäû; T_0, T_1 – òåìïåðàòóðà âåðõíèõ ñëîåâ ïî÷âû; $T_a(NL)$ – òåìïåðàòóðà íèæíåãî ÿðóñà ïîñåâà, íîìåð êîòîðîãî ðàâåí NL; c – ñêðûòàÿ òåïëîòà ïàðîîáðàçîâàíèÿ; q_0 – êîíöåíòðàöèÿ ïàðîâ âîäû â ïîðîâîì ïðîñòðàíñòâå ïî÷âû ó ïîâåðõíîñòè; $q_a(NL)$ – óäåëüíàÿ âëàæíîñòü âîçäóõà; h_0, h_1 – âûñîòû âåðõíèõ ñëîåâ ïî÷âû; $l_{0,1}$ – êîýôôèöèåíò òåïëîïðîâîäíîñòè âåðõíåãî ñëîÿ ïî÷âû.

Êàê ïðàâèëî, âñå ðàçðàáîòàííûå ìîäåëè ïðîäóêòèâíîñòè ðàññìàòðèâàþò òîëüêî ðåæèì êîðîòêîâîëíîâîé ðàäèàöèè è ÔÀÐ, ïîýòîìó ðàñ÷åòû ïðîâîäÿòñÿ òîëüêî â ïåðèîä âåãåòàöèè è îò âîñõîäà ñîëíöà äî çàõîäà. Äåéñòâèòåëüíî, òåïëîâàÿ ÷àñòü ñïåêòðà â äíåâíûå ÷àñû ìîæåò ñîñòàâëÿòü ëèøü íåáîëüøóþ äîëþ â îáùåì áàëàíñå, íî÷üþ ýòà ñòàòüÿ áàëàíñà ÿâëÿåòñÿ åäèíñòâåííîé. Âêëþ÷åíèå â ìîäåëü òåïëîâîãî ðåæèìà ïî÷âû áëîêà äëèííîâîëíîâîé ðàäèàöèè îáåñïå÷èò óñòîé÷èâîñòü ÷èñëåííûõ ñõåì ïðè ðàñ÷åòå òåìïåðàòóðû ëèñòüåâ è ïîâåðõíîñòè ïî÷âû.

2. Ìîäåëü äëèííîâîëíîâîé ðàäèàöèè. Ðàññìîòðèì äâóõïîòîêîâóþ ìîäåëü äëèííîâîëíîâîé ðàäèàöèè (ò.å. ýôôåêòèâíîå èçëó÷åíèå áóäåì ðàññìàòðèâàòü êàê ðàçíîñòü äâóõ ïîòîêîâ: íèñõîäÿùåãî è âîñõîäÿùåãî). Êàæäûé ñëîé àòìîñôåðû èçëó÷àåò òåì áîëüøå âîäÿíîãî ïàðà è óãëåêèñëîãî ãàçà, ÷åì áîëüøå èõ â íåì è ÷åì âûøå òåìïåðàòóðà. Èçëó÷åíèå ñëîÿ, íàïðàâëåííîå âíèç, îò÷àñòè ïîãëîùàåòñÿ è îñëàáåâàåò â íèæíèõ ñëîÿõ, íî çàòî ê íåìó ïðèñîåäèíÿåòñÿ èçëó÷åíèå ýòèõ ïîñëåäíèõ. Ýòîò ïðîöåññ íàçûâàåòñÿ ïåðåíîñîì èçëó÷åíèÿ. Íà çåìëå ìû íàáëþäàåì èçëó÷åíèå àòìîñôåðû êàê ñóììó òàêèõ ÷àñòè÷íî îñëàáëåííûõ èçëó÷åíèé îòäåëüíûõ ñëîåâ. Â àòìîñôåðå íà âûñîòå, íàïðèìåð z, ìû ìîæåì íàáëþäàòü íå òîëüêî íèñõîäÿùèé ïîòîê òàêîãî èçëó÷åíèÿ $F^{\downarrow}(z)$, íî è âîñõîäÿùèé ïîòîê $F^{\downarrow}(z)$, ñêëàäûâàþùèéñÿ èç èçëó÷åíèÿ ïîâåðõíîñòè Çåìëè è íèæíèõ ñëîåâ àòìîñôåðû, îñëàáëåííîãî ïî ïóòè äî âûñîòû z. Çíà÷åíèÿ $F^{\downarrow}(z)$ è $F^{\downarrow}(z)$ çàâèñÿò îò âûñîòû [2].

Âåëè÷èíà

$$D=F^{\downarrow}(z)-F^{\downarrow}(z+\Delta z)+F^{\uparrow}(z+\Delta z)-F^{\uparrow}(z)$$

íàçûâàåòñÿ äèâåðãåíöèåé èçëó÷åíèÿ (ðàäèàöèè) â ñëîå Δz. Ïðè $D < 0$ ïîòîêè $F^{\downarrow}(z)$ è $F^{\downarrow}(z)$ ïðîèçâîäÿò íàãðåâàíèå ñëîÿ âîçäóõà Δz, ïðè $D < 0$ – åãî îõëàæäåíèå.

Ðàññìîòðèì ãîðèçîíòàëüíûé ñëîé àòìîñôåðû òîëùèíîé dz. Îáîçíà÷èì ÷åðåç $F^{\downarrow}(z)$ ïîòîê äëèííîâîëíîâîãî èçëó÷åíèÿ àòìîñôåðû, èäóùèé ñâåðõó âíèç. Èç ýòîãî ïîòîêà â ñëîå ïîãëîòèòñÿ

$$dF^{\downarrow}=arF^{\downarrow}dz,$$

ãäå a – êîýôôèöèåíò ïîãëîùåíèÿ äëèííîâîëíîâîãî èçëó÷åíèÿ; r – ïëîòíîñòü ïîãëîùàþùåãî âåùåñòâà.

Íà íèæíåé ãðàíèöå ñëîÿ dz ê ïîòîêó $F^{\downarrow}(z)$ ïðèñîåäèíÿåòñÿ èçëó÷åíèå ñàìîãî ñëîÿ. Ïîòîê åãî âûðàæàåòñÿ êàê

$$dE=-arfEdz,$$

ãäå $E=\sigma T^4$; êîýôôèöèåíò $f<1$ ââåäåí ïîòîìó, ÷òî â äëèííîâîëíîâîé ÷àñòè ñïåêòðà àòìîñôåðà èçëó÷àåò ìåíüøå, ÷åì àáñîëþòíî ÷åðíîå òåëî («ñåðîå» òåëî); çíàê ìèíóñ îçíà÷àåò, ÷òî $F^{\downarrow}(z)$ óâåëè÷èâàåòñÿ âíèç íà dE.

Â ðåçóëüòàòå ïîëó÷èì

$$\frac{dF^{\downarrow}}{dz}=ar\left(F^{\downarrow}-fE\right).$$

Íàâñòðå÷ó $F^{\downarrow}(z)$ ñíèçó íàïðàâëåí ïîòîê äëèííîâîëíîâîãî èçëó÷åíèÿ Çåìëè è àòìîñôåðû, êîòîðûé ìû îáîçíà÷èì ÷åðåç $F^{\downarrow}(z)$. Ñëîé dz ïîãëîòèò èç íåãî, êàê è èç $F^{\downarrow}(z)$,

$$dF^{\uparrow}=-arF^{\uparrow}dz,$$

à íà âåðõíåé ãðàíèöå ñëîÿ ê ïîòîêó $F^{\downarrow}(z)$ ïðèñîåäèíÿåòñÿ èçëó÷åíèå ñàìîãî ñëîÿ

$$dE=arfEdz,$$

òàê ÷òî îêîí÷àòåëüíî

$$\frac{dF^{\uparrow}}{dz}=ar\left(fE-F^{\uparrow}\right).$$

Òàêèì îáðàçîì, óðàâíåíèÿ ïåðåíîñà äëèííîâîëíîâîé ðàäèàöèè èìåþò âèä:

$$\frac{dF^{\downarrow}}{dz}=ar\left(F^{\downarrow}-fE\right),$$

$$\frac{dF^{\uparrow}}{dz}=ar\left(fE-F^{\uparrow}\right).$$

Èëè

$$\frac{dF^{\downarrow}}{dz}=bar\left(F^{\downarrow}-B\right), \qquad (2)$$

$$\frac{dF^{\uparrow}}{dz}=bar\left(B-F^{\uparrow}\right), \qquad (3)$$

ãäå $b\approx 1{,}66$ – ÷èñëåííûé êîýôôèöèåíò; $B=B(l,T)$ – ôóíêöèÿ Ïëàíêà:

$$B=\frac{8phc}{l^5}\cdot\frac{1}{e^{hc/lkT}-1},$$

ãäå h = 1,0545887 * 10^{-34} Äæ·ñ – ïîñòîÿííàÿ Ïëàíêà; $d=0{,}95$, k = 1,38*10^{-23}, Äæ·ñ – ïîñòîÿííàÿ Áîëüöìàíà; c = 299792458 ì/ñ – ñêîðîñòü ñâåòà; T – òåìïåðàòóðà âîçäóõà íà çàäàííîé âûñîòå.

Ïîòîêè $F^{\downarrow}(z)$ è $F^{\downarrow}(z)$ óäîâëåòâîðÿþò ãðàíè÷íûì óñëîâèÿì [3]:

$$F^{\downarrow}\to 0 \text{ ïðè } z\to\infty,$$

$$F^{\uparrow}=dB+(1-d)F^{\downarrow}, \text{ ïðè } z\to 0.$$

Ââåäåì áåçðàçìåðíóþ âåëè÷èíó $b = hc/lkT$ = 4,9651142, òîãäà ôóíêöèÿ Ïëàíêà ïðèìåò âèä:

$$B=\frac{8pk^5b^5}{h^4c^4}\cdot\frac{T^5}{e^b-1}.$$

Ôîðìóëû (2) è (3) çàïèøåì â âèäå:

$F^{\downarrow}{}_z = barF^{\downarrow} - barB$, (4)

$F^{\uparrow}{}_z = barB - barF^{\uparrow}$. (5)

Ðåøåíèå óðàâíåíèÿ (5) èìååò âèä:

$$F^{\uparrow}(z) = e^{-barz}\left[F^{\uparrow}(0) + bar\int_0^z B(z)e^{barz}dz\right],$$

ãäå

$$F^{\uparrow}(0) = -bar*\int_0^H B(z)e^{barz}dz.$$

Ðåøåíèå óðàâíåíèÿ (4), ñ ó÷åòîì ãðàíè÷íûõ óñëîâèé, èìååò âèä:

$$F^{\downarrow}(z) = e^{-z}\left[\frac{F^{\uparrow}(0) - dB(0)}{1-d} - bar*\int_0^z B(z)e^{barz}dz\right].$$

3. Ìîäåëü òåìïåðàòóðíîãî ðåæèìà ïî÷âû. Ðàññìîòðèì óðàâíåíèå òåïëîïåðåíîñà â ïî÷âå:

$$c\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(l\frac{\partial T_s}{\partial x}\right).$$

Ïðåîáðàçóåì äàííîå óðàâíåíèå:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{1}{c}\cdot\frac{\partial l}{\partial x}\cdot\frac{\partial T_s}{\partial x} + \frac{l}{c}\cdot\frac{\partial^2 T_s}{\partial^2 x}.$$

Êîíå÷íî-ðàçíîñòíûé àíàëîã óðàâíåíèÿ äëÿ *l(x,t)* è $T_s(x,t)$ ñ èñïîëüçîâàíèåì ñîîòâåòñòâóþùèõ àïïðîêñèìàöèé èìååò âèä:

$$T_s^{k+1}(x_i) = T_s^k(x_i) + \frac{\Delta t}{c}\cdot\frac{l^k(x_{i+1}) - l^k(x_{i-1})}{2\Delta x}\cdot \frac{T_s^k(x_{i+1}) - T_s^k(x_{i-1})}{2\Delta x} + \frac{l^k(x_i)\cdot\Delta t}{c}\times \frac{T_s^k(x_{i+1}) - 2T_s^k(x_{i-1})}{(\Delta x)^2}.$$

Ðåøåíèå äàííîãî óðàâíåíèÿ ìîæíî íàéòè ïðè ïîìîùè ìåòîäà ñåòîê äëÿ óðàâíåíèÿ òåïëîïðîâîäíîñòè.

4. Ðåçóëüòàòû ÷èñëåííûõ ýêñïåðèìåíòîâ. Ïðè ÷èñëåííîé ðåàëèçàöèè ìîäåëè (4)–(5) àòìîñôåðà ðàçáèâàåòñÿ íà êèëîìåòðîâûå ñëîè. Ñ èñïîëüçîâàíèåì ýêñïåðèìåíòàëüíûõ è ëèòåðàòóðíûõ [4] äàííûõ ìîäåëü ïîçâîëÿåò ÷åðåç ôóíêöèè èçëó÷åíèÿ îïðåäåëÿòü òåìïåðàòóðó ëþáîãî ñëîÿ àòìîñôåðû, à òàêæå äåÿòåëüíîé ïîâåðõíîñòè ïî÷âû.

Äëÿ ðåàëèçàöèè ÷èñëåííîé ñõåìû ðàñïðåäåëåíèÿ òåìïåðàòóðû ïî ïî÷âåííîìó ïðîôèëþ âîçíèêëà çàäà÷à îïðåäåëåíèÿ òåìïåðàòóðû íà ïîâåðõíîñòè ÷åðåç çíà÷åíèÿ äëèííîâîëíîâîé ðàäèàöèè. Ïðîáëåìà ñîñòîÿëà â òîì, ÷òîáû îïðåäåëèòü âèä è ñòåïåíü ýòîé âçàèìîñâÿçè.

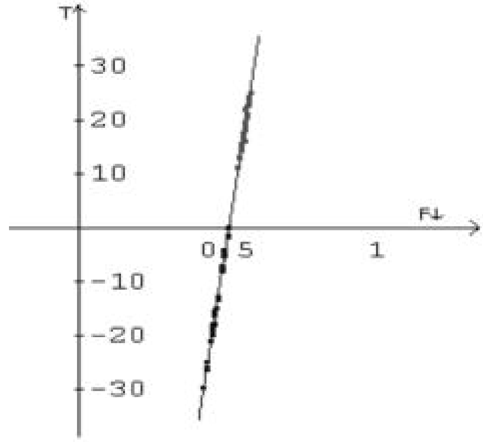
Ïðåäâàðèòåëüíîå ïðåäïîëîæåíèå ñîñòîÿëî â òîì, ÷òî ýòà çàâèñèìîñòü äîëæíà áûòü ëèíåéíîé. Íà ýòîì ýòàïå èññëåäîâàíèÿ ïðåíåáðåãëè íàëè÷è-åì ðàñòèòåëüíîñòè íà ïîâåðõíîñòè ïî÷âû. Íà îñíîâàíèè ðåãðåññèîííîãî àíàëèçà íàáëþäàåìîå çíà÷åíèå òåìïåðàòóðû íà ïîâåðõíîñòè ïî÷âû àïïðîêñèìèðóåòñÿ óðàâíåíèåì ëèíåéíîé ðåãðåññèè

$$T_s = a\cdot F\downarrow + b,$$

ãäå T_s – òåìïåðàòóðà íà ïîâåðõíîñòè ïî÷âû; $F\downarrow$ – ïðèõîäÿùàÿ äëèííîâîëíîâàÿ ðàäèàöèÿ. Ïàðàìåòðû *a*, *b* îöåíèâàëèñü ïî âûáîðî÷íîìó, íî äîñòàòî÷íî áîëüøîìó ðÿäó ýêñïåðèìåíòàëüíûõ çíà÷åíèé òåìïåðàòóðû íà ïîâåðõíîñòè ïî÷âû T_s è ðàñ÷åòíûìè çíà÷åíèÿìè $F\downarrow$ ïî ìîäåëè (4)–(5) íà îñíîâå óðàâíåíèÿ ìåòîäîì íàèìåíüøèõ êâàäðàòîâ (ÌÍÊ). Ýìïèðè÷åñêîå óðàâíåíèå ðåãðåññèè èìååò âèä

$T_s = 351{,}61\cdot F\downarrow - 176{,}774.$ (6)

Íà ðèñóíêå ïðåäñòàâëåí ãðàôèê çàâèñèìîñòè (6) è ýêñïåðèìåíòàëüíûå çíà÷åíèÿ òåìïåðàòóðû íà ïîâåðõíîñòè ïî÷âû.



Ãðàôèê ëèíåéíîé çàâèñèìîñòè òåìïåðàòóðû ïî÷âû

Ïîëó÷åííóþ çàâèñèìîñòü (6) áóäåò âêëþ÷åíà â ìîäåëü â êà÷åñòâå ñâÿçóþùåãî çâåíà ìåæäó áëîêàìè ðàñ÷åòà òåìïåðàòóðíîãî ðåæèìà ïî÷âû, ïðîâåäåì îöåíêó ïàðàìåòðîâ ðåãðåññèè è âñåãî óðàâíåíèÿ â öåëîì (àäåêâàòíîñòü è òî÷íîñòü) [5, 6].

1. Äëÿ óñòàíîâëåíèÿ òåñíîòû êîððåëÿöèîííîé ñâÿçè ìåæäó âåëè÷èíàìè T_s è $F\downarrow$ áûë âû÷èñëåí êîýôôèöèåíò êîððåëÿöèè $r \approx 1$, âåëè÷èíà êîòîðîãî ïîäòâåðæäàåò ãèïîòåçó î òåñíîé ëèíåéíîé çàâèñèìîñòè ìåæäó T_s è $F\downarrow$.

2. ×àñòü ïîëíîãî ðàññåÿíèÿ çíà÷åíèé T_s, îáúÿñíåííóþ èçìåí÷èâîñòüþ $F\downarrow$, õàðàêòåðèçóåò êîýôôèöèåíò äåòåðìèíàöèè $h = r^2 \approx 1$. Ýòî îçíà÷àåò, ÷òî 100% îáùåé äèñïåðñèè òåìïåðàòóðû T_s îáóñëîâëåíî âàðèàöèåé ðåãðåññèè $F\downarrow$.

3. Ñðåäíÿÿ îòíîñèòåëüíàÿ îøèáêà àïïðîêñèìàöèè äëÿ òåìïåðàòóðû íà ïîâåðõíîñòè ïî÷âû, âû÷èñëåííàÿ ïî ôîðìóëå (6), ðàâíà 3,84%, äëÿ ðàñïðåäåëåíèÿ òåìïåðàòóðû ïî ñëîÿì àòìîñôåðû ýòà îøèáêà ñîñòàâèëà 0,008%, ò.å. îøèáêè íå ïðåâîñõîäÿò 15% òî÷íîñòè. Çàâèñèìîñòè äëÿ îïðåäåëåíèÿ òåìïåðàòóðû íà ïîâåðõíîñòè ïî÷âû (6) è ðàñïðåäåëåíèÿ òåìïåðàòóðû ïî ñëîÿì àòìîñôåðû ñ÷èòàþòñÿ ïðèåìëåìûìè.

4. Ïðîâåðêà êîýôôèöèåíòîâ ðåãðåññèè íà çíà÷èìîñòü (ñ óðîâíåì çíà÷èìîñòè ðàâíûì 5%) ïîäòâåðäèëà ãèïîòåçó î çíà÷èìîñòè íàéäåííûõ êîýôôèöèåíòîâ óðàâíåíèÿ (6). Ïðîâåðêà àäåêâàòíîñòè ïîëó÷åííûõ îöåíîê íå ÿâëÿåòñÿ ñàìîöåëüþ, ýòî ëèøü íåîáõîäèìûé ïðîìåæóòî÷íûé ýòàï. Îñíîâíîå – ýòî âîçìîæíîñòü èñïîëüçîâàíèÿ ìîäåëåé äëÿ àíàëèçà è ïðîãíîçà ïîâåäåíèÿ èçó÷àåìûõ ÿâëåíèé.

5. Ñ âåðîÿòíîñòüþ 0,95 ìîæíî óòâåðæäàòü, ÷òî èñòèííûå çíà÷åíèÿ ïàðàìåòðîâ óðàâíåíèÿ ñâÿçè (6) ëåæàò â ïðåäåëàõ 262,81 < a < 440,41, 172,33 < b < 181,22.

Ëèòåðàòóðà

1. Ïî÷âîâåäåíèå: Ó÷åáíèê äëÿ óíèâåðñèòåòîâ: Â 2-õ ÷. ×. 1: Ïî÷âà è ïî÷âîîáðàçîâàíèå. Ì., 1988.

2. Ïîëóýêòîâ Ð.À. Äèíàìè÷åñêèå ìîäåëè àãðîýêîñèñòåìû. Ë., 1991.

3. Ìàòâååâ Ë.Ò. Êóðñ îáùåé ìåòåîðîëîãèè. Ôèçèêà àòìîñôåðû. Ë., 1984.

4. Ãëàãîëåâ Þ.À. Ñïðàâî÷íèê ïî ôèçè÷åñêèì ïàðàìåòðàì àòìîñôåðû. Ë., 1970.

5. Çàãñ Ë. Ñòàòèñòè÷åñêîå îöåíèâàíèå. Ì., 1976.

6. Êîëåìàåâ Â.À., Ñòàðîâåðîâ Î.Â., Òóðóíäàåâñêèé Â.Á. Òåîðèÿ âåðîÿòíîñòåé è ìàòåìàòè÷åñêàÿ ñòàòèñòèêà. Ì., 1991.