

УДК 631.425.(476)

**ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ВОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ
И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИДРОМЕЛИОРАТИВНЫХ РЕЖИМОВ ПОЧВ В БЕЛАРУСИ**

В.И. Вихров, кандидат технических наук
Белорусская государственная сельскохозяйственная академия
Горки, Республика Беларусь

Ключевые слова: водный баланс почв, ретроспективный метод, неблагоприятные водные явления, гидромелиоративные режимы, проектирование

Введение

Неустойчивый характер естественной влагообеспеченности территории Беларуси, как одно из проявлений современного изменения климата, обуславливают необходимость применения статистически обоснованных методов проектирования и прогноза гидромелиоративных режимов почв [1, 2].

В ряде существующих методов на этапе проектирования водобалансовые расчеты выполняются для типовых лет, характеризующихся различной обеспеченностью климатических показателей (осадки, температура воздуха и т.п.). Очевидно, что в этом случае моделируется некий абстрактный (не существующий реально) сценарий водного режима почвы. При этом сезонный ход используемых в расчетах климатических показателей существенно сглажен и не отражает их динамику в реальные годы.

Наиболее объективным и статистически обоснованным подходом является ретроспективный расчет водного баланса почвы за длительный ряд реальных лет и получение на этой основе его обеспеченных элементов (ЭВБ), вероятности наступления неблагоприятных водных явлений (НВЯ) и проектных параметров гидромелиоративных режимов (ГМР). Применение этого метода предполагает весьма большой объем вычислений и необходимость использования ПЭВМ [2].

С учетом изложенного нами разработаны ретроспективные алгоритмы, основу которых составляют подекадные расчеты водного баланса почв за вегетационные периоды календарных лет многолетнего ряда с использованием базы декадных метеоданных с 1945 г. по 30 опорным метеостанциям Беларуси. Компьютерное программное обеспечение, выполненное в лаборатории компьютеризации БГСХА, предусматривает три варианта формирования водного режима почв: 1 – естественные условия формирования (программа RETRO-1); 2 – условия оросительных мелиораций (программа RETRO-2); 3 – условия осушительно-увлажнительных мелиораций (программа RETRO-3).

С целью получения сопоставимых результатов о вероятности наступления НВЯ и проектных параметров ГМР в условиях вариантов 1, 2 и 3 расчеты основаны на единых

общих принципах и алгоритмах с использованием однородного исходного уравнения водного баланса корнеобитаемого слоя почвы.

Программа RETRO-2 составлена для условий орошения дождеванием при глубоком залегании уровня грунтовых вод. Программа RETRO-3 разработана для условий гарантированного подпочвенного увлажнения с подачей воды в истоки дрен, обеспечивающего требуемое по алгоритму расчетное быстродействие мелиоративной системы. При этом ее алгоритм построен на текущей взаимосвязи водобалансового уравнения с декадной динамикой УГВ, регулируемой в пределах требуемого безопасного диапазона:

$$\begin{cases} W_k^i = W_n^i + K_n P^i - \varphi K_b E^i + V_r^i - C^i; \\ H_k^i = H_n^i - \Delta H_{c(v)}^i - n_d q, \end{cases} \quad (1)$$

где W_k^i, W_n^i – влагозапасы почвы на конец и начало i -й декады, мм;

$K_n P^i$ – исправленные осадки, выпавшие в течение i -й декады, мм;

E^i – декадное водопотребление культуры, мм;

φ, K_b – коэффициенты корректировки водопотребления [1] и влагообмена;

V_r^i – подпитывание расчетного слоя почвы от УГВ, мм;

C^i – почвенный сток, мм;

H_k^i, H_n^i – расчетный уровень грунтовых вод соответственно на конец и начало i -й декады, м;

$\Delta H_{c(v)}^i$ – изменение уровня грунтовых вод, вызванное почвенным стоком (C^i) или подпитыванием расчетного слоя (V_r^i), м;

q – естественный приток или отток ($-q$) грунтовых вод, м/сут.

n_d – число суток в декаде.

В программах выполнены следующие элементы совершенствования методики и алгоритма расчетов.

1. Использование коэффициента корректировки водопотребления [1] и его адаптация для декадных интервалов расчета способом итерации.

С целью корректного применения биоклиматического метода в условиях, отличных от оптимального увлажнения почвы, в расчетах использована разработанная А.П. Лихацевичем [1] модель снижения интенсивности эвапотранспирации в виде коэффициента корректировки φ

$$\varphi = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{W_{нв}}{W_n^i} - 1 \right)^2 \right], \quad (2)$$

где $W_{нв}$ – влагозапасы почвы при наименьшей влагоемкости, мм;

Остальные обозначения прежние.

Следует отметить большую практическую значимость данного коэффициента, поскольку он позволяет использовать существующие достаточно обоснованные методы

расчета водопотребления орошаемых культур в других условиях формирования водного режима почв. Поскольку для декадного интервала значение W_n не отражает средний уровень влагозапасов W_{cp}^i , при расчетах по формуле (2) нами применен метод итерации путем последовательной замены в ней W_n на $W_{cp}^i = 0,5(W_n + W_k)$ [3].

2. Адаптация биоклиматических моделей водопотребления сельскохозяйственных культур с S-образной формой аппроксимации биологических кривых.

Для расчета водопотребления культур в алгоритме адаптированы три варианта биоклиматического метода [3] с исходными декадными биоклиматическими коэффициентами (K_6), а также корреляционная модель суточного водопотребления многолетних сенокосных трав автора [4]. С целью учета S-образного закона развития растений календарные значения K_6 аппроксимированы полиномами 4-й степени в температурной шкале расчетов:

$$K_6 = a_0 + a_1 T_0 + a_2 T_0^2 + a_3 T_0^3 + a_4 T_0^4; \quad (3)$$

$$T_0 = 0,001(\sum t_1 + \sum t_2 + \dots + 0,5 \sum t_i), \quad (4)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 – эмпирические коэффициенты культуры;

T_0 – уменьшенная в 10^3 раз сумма среднесуточных температур воздуха, накопленная от начала вегетации к середине расчетной декады;

$\sum t_1, \sum t_i$ – суммы среднесуточных температур воздуха 1 и i -й декад, °С.

Пример графика зависимости (3) показан на рис. 1.

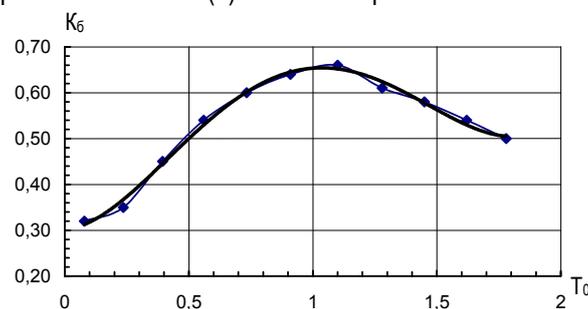


Рис. 1. Биологическая кривая водопотребления свеклы столовой в температурной шкале

Для сенокосных трав используется корреляционная модель суточного водопотребления автора [4]:

$$\begin{cases} E^i = n_d K_6 d^{0,63} K_y; \\ K_6 = 11,84 \quad \gamma t_0^{-2,5} \exp - 2,5 \gamma_0 \pm 0,04, \end{cases} \quad (5)$$

где d – среднесуточный дефицит влажности воздуха, мб;

K_y – параметр урожайности трав [4];

$\sum t_0$ – относительная сумма температур воздуха [4].

3. Учет переменной нижней границы регулирования влагозапасов орошаемых почв ($b_{нп}$) с использованием нелинейной зависимости (программа RETRO-2).

Опираясь на результаты исследований [1, 5], разработана и адаптирована в алгоритм расчетов следующая зависимость для $\beta_{\text{нп}}$:

$$\beta_{\text{нп}} = 6,623 \exp(-3,5 t_3) t_3^{3,5} + \lambda, \quad (6)$$

где $\beta_{\text{нп}}$ – нижний предел оптимальной влажности почвы, выраженный в долях наименьшей влагоемкости;

λ – коэффициент аппроксимации;

t_3 – относительная эффективная (действующая) температура воздуха.

$$t_3 = \frac{t_{\text{cp}}^i - t_{\text{min}}}{t_{\text{max}} - t_{\text{min}}}, \quad (7)$$

где t_{cp}^i – среднесуточная температура воздуха i -й декады, °С;

$t_{\text{min}}, t_{\text{max}}$ – минимальная и максимальная границы диапазона среднесуточной температуры воздуха, в котором наблюдается изменчивость $\beta_{\text{нп}}$, °С.

Пример графика зависимости (6) приведен на рис. 2.

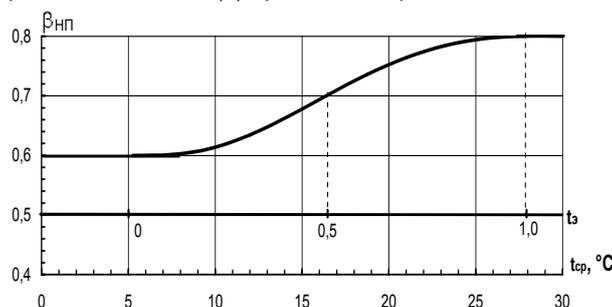


Рис. 2. График зависимости $\beta_{\text{нп}} = f(t_3)$ для пастбища на среднем суглинке

4. Введение переменной границы почвенного стока в зависимости от гранулометрического состава почв.

Величина декадного почвенного стока (C^i , мм) определяется на основе следующей зависимости:

$$C^i = K_C (W_k - W_{\text{нв}}), \quad (8)$$

где W_k – влагозапасы почвы на конец i -й декады, превышающие наименьшую влагоемкость $W_{\text{нв}}$, мм;

K_C – коэффициент почвенного стока, зависящий от гранулометрического состава почвы ($K_C \leq 1$). В декадном интервале расчетов K_C рекомендуется принимать равным 1,0; 0,95 и 0,85 соответственно для легких, средних и тяжелых по гранулометрическому составу минеральных почв.

5. Учет водобалансовой взаимосвязи изменения УГВ, почвенного стока, подпитки расчетного слоя с дренажным стоком и водоотдачей почвогрунта (программа RETRO-3).

Необходимый контроль и регулирование УГВ, согласно (1), выполняется следующим образом.

За счет почвенного стока УГВ повышается на величину

$$\Delta H_{i_c} = 10^{-3} C_i \delta^{-1}, \quad (9)$$

где δ – водоотдача почвогрунтов, рассчитываемая по формулам Г.Д. Эркина (минеральные) и А.И. Ивицкого (торфяные почвогрунты):

$$d = 0,056 \sqrt{K_{\phi}} \sqrt[3]{\Delta H_i}; \quad (10)$$

$$\delta = 0,116 K_{\phi}^{3/8} \Delta H_i^{3/4}, \quad (11)$$

где K_{ϕ} – средневзвешенный по слоям коэффициент фильтрации почвогрунта.

Остальные обозначения прежние.

Выполняя совместное преобразование зависимостей (9) – (11), получим расчетные формулы ΔH_{i_c} соответственно для минеральных и торфяных почвогрунтов:

$$\Delta H_{i_c} = 0,049 C_i^{0,750} K_{\phi}^{-0,375}; \quad (12)$$

$$\Delta H_{i_c} = 0,066 C_i^{0,571} K_{\phi}^{-0,214}. \quad (13)$$

За счет подпитывания расчетного слоя происходит сработка УГВ на величину

$$\Delta H_{i_v} = -10^{-3} V_i \delta^{-1}. \quad (14)$$

Путем преобразования (10), (11) и (14) получим аналогичные (12) и (13) расчетные формулы

$$\Delta H_{i_v} = -0,049 V_i^{0,750} K_{\phi}^{-0,375}; \quad (15)$$

$$\Delta H_{i_v} = -0,066 V_i^{0,571} K_{\phi}^{-0,214}. \quad (16)$$

Величина подпитывания расчетного слоя почвы от УГВ рассчитывается по формуле С.Ф. Аверьянова [2].

В результате совместного воздействия величин $\Delta H_{i_{c(v)}}$ и ΔH_{i_v} значение H_k^i , согласно (1), может выходить за пределы минимальной (H_{\min}) и максимальной (H_{\max}) границ безопасного диапазона УГВ. Поэтому выполняется необходимое регулирование УГВ на начало следующей декады (H_n^{i+1}) исходя из условий:

$$H_n^{i+1} = \left\{ \begin{array}{l} H_{\min}^{i+1}, \text{ если } H_k^i < H_{\min}^{i+1}; \\ H_k^i, \text{ если } H_{\min}^{i+1} \leq H_k^i \leq H_{\max}^{i+1}; \\ H_{\max}^{i+1}, \text{ если } H_k^i > H_{\max}^{i+1}. \end{array} \right\} \quad (17)$$

В первом условии выражения (17) необходимо понижение УГВ на величину $\Delta H_d^i = H_{\min}^{i+1} - H_k^i$ за счет дренажного стока (C_d^i , мм), равного:

$$C_d^i = 10^3 \Delta H_d^i \delta. \quad (18)$$

С учетом формул (10), (11) и (18) получим расчетные зависимости дренажного стока соответственно для минеральных и торфяных почвогрунтов:

$$C_d^i = 56 \sqrt{K_{\phi}} \Delta H_d^i \sqrt[1,333]{\delta}; \quad (19)$$

$$C_d^i = 116 K_{\phi}^{0,375} (\Delta H_d^i)^{1,750}. \quad (20)$$

В третьем условии (17) необходимо повышение УГВ: $\Delta H_m = H_k^i - H_{\max}^{i+1}$ за счет водоподачи в зону аэрации нормой ($m_{бр}^i$, мм), которая рассчитывается по формулам (19) и (20) с заменой в них ΔH_d^i на ΔH_m .

Декадная норма увлажнения расчетного слоя ($m_{нт}^i$, мм) вычисляется традиционным способом по величине снижения W_k относительно нижней границы регулирования влагозапасов $W_{нп}$.

6. Дифференцированная оценка влагозапасов почвы на начало первой расчетной декады каждого года многолетнего ряда.

В отличие от имеющихся рекомендаций в данном алгоритме расчеты влагозапасы почвы на начало вегетационного периода (W_n^1 , мм) не приравниваются наименьшей влагоемкости ($W_{нв}$, мм), а рассчитываются по зависимости

$$W_n^1 = W_{нв} + K_n P_n - K_d \Sigma d_n, \quad (21)$$

где $K_n P_n$ – исправленные осадки за период с 1 апреля до начала вегетации, мм;

K_d – коэффициент испарения с поверхности поля до начала вегетационного периода, принимаемый равным 0,20 и 0,25 соответственно для пашни и лугопастбищных угодий;

Σd_n – сумма среднесуточных дефицитов влажности воздуха за указанный период, мб.

В качестве основных исходных параметров для выполнения компьютерных расчетов по программам RETRO–1,2,3 вводятся: наименование опорной метеостанции и сельскохозяйственной культуры; метод расчета водопотребления культуры; расчетные многолетний и вегетационный периоды, тип и гранулометрический состав почвы. Для учета конкретных почвенных условий также вводятся: расчетный слой почвы (h , м); его наименьшая влагоемкость ($b_{нв}$, %); нижний предел оптимального увлажнения K_{\min} ; коэффициенты влагообмена (K_b), фильтрации (K_f , м/сут), максимального увлажнения (K_{\max}) и стока (K_c); максимальная высота капиллярного поднятия ($H_0, м$); требуемый безопасный диапазон УГВ ($H_{\max}^i - H_{\min}^i$, м).

Расчеты предусмотрены для следующих сельхозугодий и культур: сенокос, пастбище, капуста поздняя, свекла столовая, картофель, зерновые (ячмень и яровая пшеница). Варианты почв – песок; супесь рыхлая и связная; суглинок легкий, средний и тяжелый; торф.

На первом этапе выполняется многолетний расчет декадной динамики влагозапасов почвы. Примеры графиков расчета для одного года приведены на рис. 3 (нумерация декад дана с апреля по сентябрь).

С целью сравнения специфики формирования расчетного водного режима отдельных вариантов примеры выполнены для одинаковых метеорологических условий, одной и той же почвы и культуры.

На основании указанных расчетов для каждого года многолетнего ряда вычисляются сезонные показатели элементов водного баланса (ЭВБ), неблагоприятных водных явлений (НВЯ) и гидромелиоративных режимов почвы (ГМР). Состав определяемых показателей приведен в таблице.

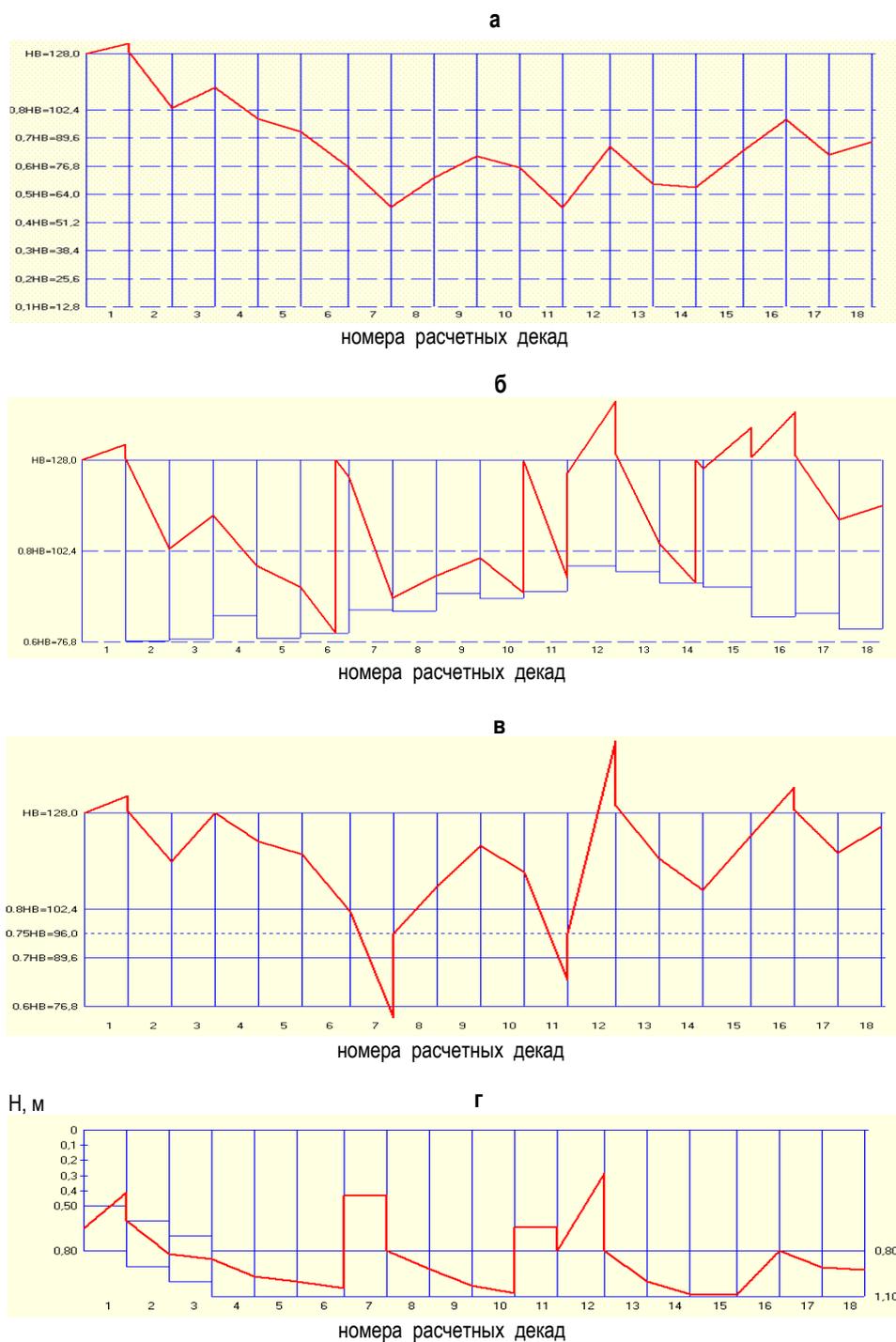


Рис. 3. Графики динамики влагозапасов легкосуглинистой почвы (а, б, в) и уровня грунтовых вод (г), рассчитанные для пастбища по метеостанции Минск за 2004 г.: а – RETRO-1; б – RETRO-2; в, г – RETRO-3

Состав сезонных показателей водного режима почв, рассчитываемых программой «RETRO»

| № п/п | Показатели | Единица измерения | Вид показателя | Характер показателя |
|------------------|---|-------------------|----------------|---------------------|
| RETRO - 1 | | | | |
| 1 | Время снижения влагозапасов почвы до уровней (0,8...0,1) $W_{нв}$ | сут | НВЯ | Векторный |
| 2 | Время наступления почвенной засухи (от начала вегетации) | » | НВЯ | » |
| 3 | Общая продолжительность почвенной засухи | » | НВЯ | Скалярный |
| 4 | Непрерывность почвенной засухи | » | НВЯ | » |
| 5 | Степень почвенной засухи | мм | НВЯ | » |
| 6 | Засушливость i-й декады | мм·сут | НВЯ | » |
| 7 | Общая засушливость вегетационного периода | » | НВЯ | » |
| 8 | Относительная засушливость вегетационного периода | коэф. | НВЯ | » |
| 9 | Время наступления периодов переувлажнения | сут | НВЯ | Векторный |
| 10 | Общая продолжительность периодов переувлажнения | » | НВЯ | Скалярный |
| 11 | Непрерывная продолжительность периодов переувлажнения | » | НВЯ | » |
| 12 | Сезонное водопотребление сельскохозяйственной культуры | мм | ЭВБ | » |
| 13 | Сезонный почвенный сток | » | ЭВБ | » |
| RETRO - 2 | | | | |
| 1 | Оросительная норма | мм | ГМР | Скалярный |
| 2 | Даты начала поливов (наступления засушливых периодов) | сут | ГМР | Векторный |
| 3 | Минимальный межполивной интервал | » | ГМР | Скалярный |
| 4 | Сезонное водопотребление орошаемой культуры | мм | ЭВБ | » |
| 5 | Сезонный почвенный сток | » | ЭВБ | » |
| 6 | Даты наступления периодов переувлажнения | сут | НВЯ | Векторный |
| RETRO - 3 | | | | |
| 1 | Сезонный почвенный сток | мм | ЭВБ | Скалярный |
| 2 | Дренажный сток | » | ГМР | » |
| 3 | Даты наступления периодов переувлажнения | сут | НВЯ | Векторный |
| 4 | Сезонная норма увлажнения | мм | ГМР | Скалярный |
| 5 | Сезонная норма водопадачи | » | ГМР | » |
| 6 | Сезонное водопотребление культуры | » | ЭВБ | » |
| 7 | Даты наступления засушливых периодов | сут | ГМР | Векторный |

На основании ежегодного расчета приведенных в таблице показателей формируются их многолетние хронологические и ранжированные ряды. При этом для построения кривых вероятности векторных показателей используются возрастающие ряды, а для построения кривых обеспеченности скалярных показателей – убывающие. В обоих случаях эмпирические кривые строятся на основе формулы Н.Н. Чегодаева [2].

С целью практического использования (получения проектных показателей) в программах «RETRO» применяются варианты кусочно-линейного, полиномиального и экспоненциального сглаживания эмпирических кривых. При соответствующем обосновании [4] предусмотрено также применение теоретических кривых распределения Крицкого-Менкеля, Вейбулла, биномиального и др.

Для получения обобщенных по гидролого-климатическим зонам Республики Беларусь сезонных показателей водного режима почв и их последующего территориального

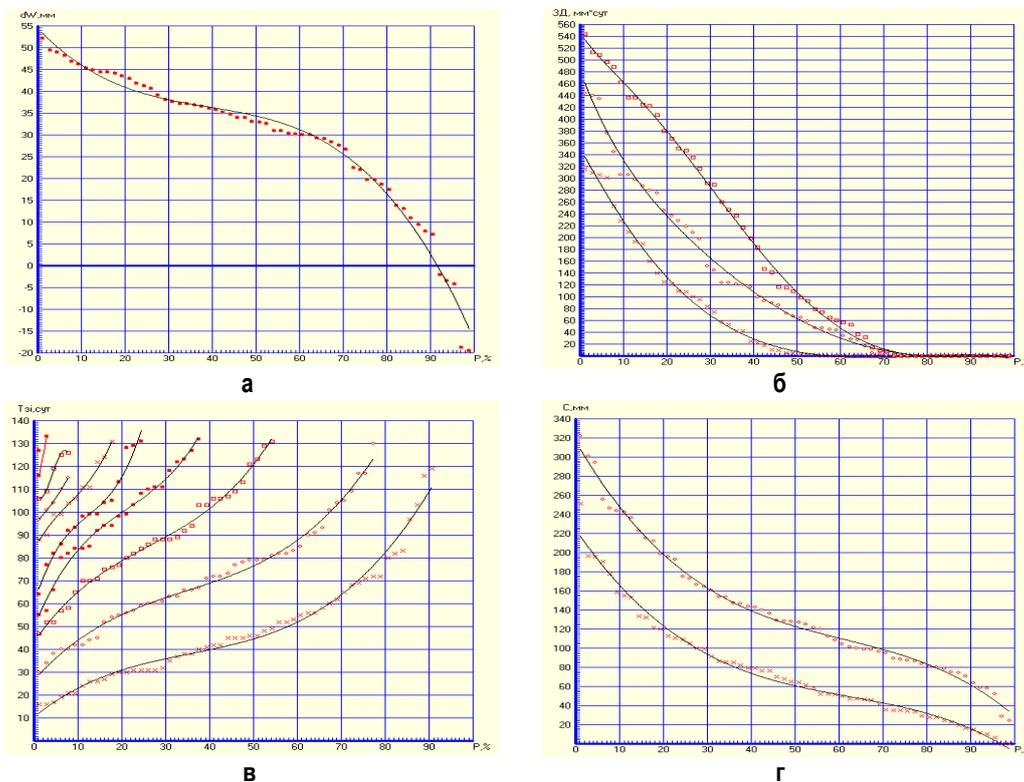


Рис. 4. Кривые обеспеченности степени почвенной засухи (а – RETRO-1); засушливости первой (x), второй (o) и третьей (□) декад мая (б – RETRO-1); почвенного (x) и дренажного (o) стока (в – RETRO-3) и вероятности наступления 1 (x), 2 (o) и т.д. поливов (г – RETRO-2). Метеостанция: Минск, культура: пастбище, почва: легкий суглинок, расчетный период: 1945-2005 гг.

нормирования программами предусмотрено осреднение эмпирических кривых вероятности и обеспеченности совокупности отдельных метеостанций.

Примеры кривых обеспеченности и вероятности для метеостанции Минск приведены на рис. 4.

Выводы

Использование разработанных программ «RETRO» позволяет:

1. Дать количественную оценку вероятности наступления неблагоприятных водных явлений на почвах сельскохозяйственного назначения в разных условиях формирования их водного режима.
2. Рассчитать проектные (обеспеченные) параметры поливного и осушительно-увлажнительного режимов при проектировании и реконструкции гидромелиоративных систем.
3. Осуществить нормирование указанных параметров по гидролого-климатическим зонам Беларуси.

4. Обеспечить исходные статистические ряды показателей водного режима почв для исследования их пространственно-временной изменчивости, климатической трансформации и прогноза.

Литература

1. Лихацевич А.П., Стельмах Е.А. Оценка факторов, формирующих неустойчивую влагообеспеченность сельскохозяйственных культур в гумидной зоне (на примере Беларуси, Центрального и Волго-Вятского регионов Российской Федерации). – Мн.: ООО «Белпринт», 2002. – 212 с.
2. Вихров В.И. Методика оценки вероятности неблагоприятных водных явлений на минеральных почвах Беларуси // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2005. – №1. – С. 92-94.
3. Вихров В.И. Адаптация биоклиматических моделей водопотребления сельскохозяйственных культур для ретроспективных воднобалансовых расчетов с применением ПЭВМ // Вестник Белорус. гос. сельскохоз. акад.. – 2004. – №3. – С. 72-75.
4. Вихров В.И. Оперативное планирование и прогноз режима орошения многолетних трав на минеральных почвах Белоруссии: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / Вихров Владимир Иванович; ВНИИГиМ. – М., 1988. – 24 с.
5. Шавлинский О.А. Об определении нижней границы оптимального увлажнения при орошении овощных культур // Проблемы мелиорации, водохозяйственного строительства и обустройства сельских территорий на современном этапе. – Горки, 2001. – С. 146-149.

Summary

Vikhrov V. Calculation program of possible unfavorable water conditions and design of irrigation and drainage soil conditions in Belarus

Given: specification and algorithm base of software for retrospective calculation of soil water balance in various conditions of water supply. Presented: examples of calculations, original data and calculated indexes, methods of probability line design of unfavorable water conditions and parameters of irrigation and drainage soil conditions.

Поступила 13 мая 2007 г.