

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;

$\varphi, K_b$  – 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  $\varphi$

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

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.

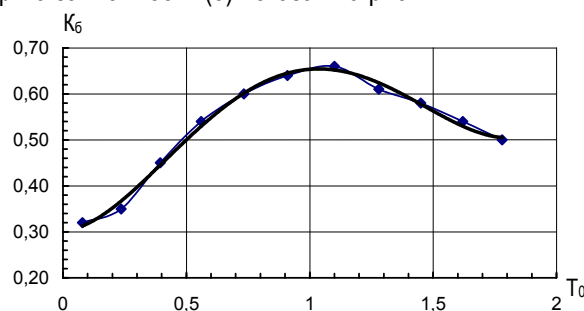


Рис. 1. Биологическая кривая водопотребления свеклы столовой в температурной шкале

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;

$\lambda$  – 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  $t_{\text{cp}}^i$  – 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.

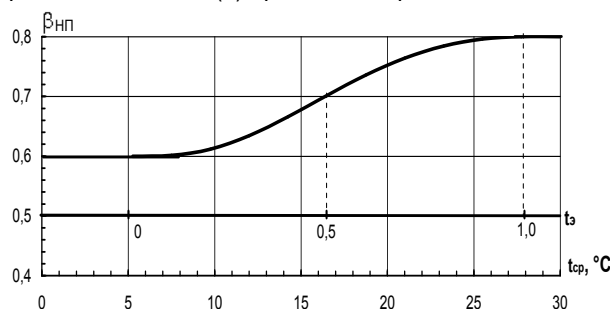


Рис. 2. График зависимости  $\beta_{\text{нп}} = f(t_3)$  для пастбища на среднем суглинке

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  $\delta$  – 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  $K_{\phi}$  – средневзвешенный по слоям коэффициент фильтрации почвогрунта.

Остальные обозначения прежние.

Выполняя совместное преобразование зависимостей (9) – (11), получим расчетные формулы  $\Delta H_{i_c}$  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  $\Delta H_{i_v}$  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  $\Delta H_d^i$  на  $\Delta H_m$ .

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;

$\Sigma d_n$  – сумма среднесуточных дефицитов влажности воздуха за указанный период, мб.

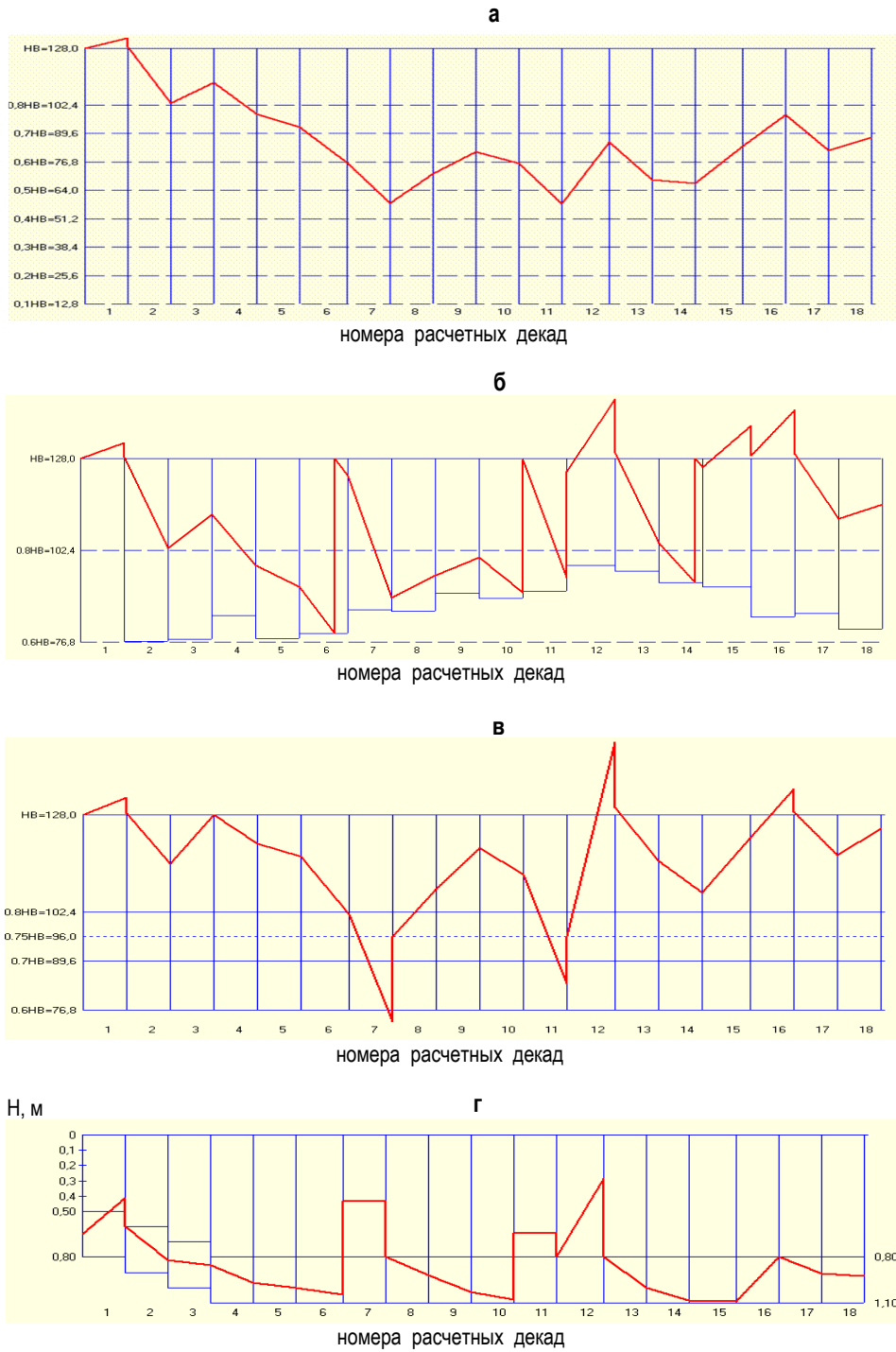
В качестве основных исходных параметров для выполнения компьютерных расчетов по программам RETRO–1,2,3 вводятся: наименование опорной метеостанции и сельскохозяйственной культуры; метод расчета водопотребления культуры; расчетные многолетний и вегетационный периоды, тип и гранулометрический состав почвы. 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»**

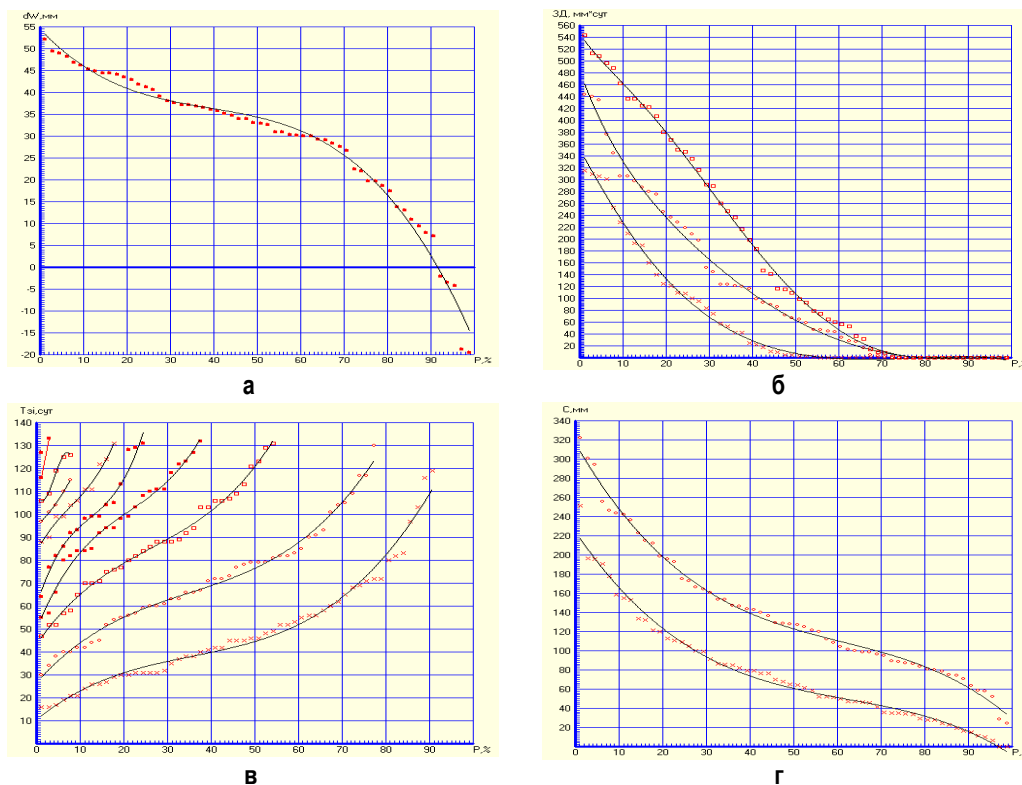
№ п/п	Показатели	Единица измерения	Вид показателя	Характер показателя
<b>RETRO - 1</b>				
1	Время снижения влагозапасов почвы до уровней (0,8...0,1) $W_{нв}$	сут	НВЯ	Векторный
2	Время наступления почвенной засухи (от начала вегетации)	»	НВЯ	»
3	Общая продолжительность почвенной засухи	»	НВЯ	Скалярный
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	»
<b>RETRO - 2</b>				
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
<b>RETRO - 3</b>				
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.*