

А. А. АРАКЕЛЯН, С. В. НЕРПИН, М. Г. САНОЯН

О СВЯЗИ МЕЖДУ ТРАНСПИРАЦИЕЙ РАСТЕНИЙ И ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПОЧВЫ

Рассматривая влагообмен в системе почва—растение—приземный воздух, можно выделить три сопряженных подсистемы: почва, растение (включая корневую систему), приземный воздух. Движение влаги в почве и приземном воздухе представляет собой только физический процесс массообмена. Влияние растения на эти процессы проявляется лишь в условиях, создающихся на границах лист—атмосфера и корень—почва. В первом случае эти условия определяются движением устьиц, во втором—значением потенциала корневой системы. Поток влаги в самом растении подчиняется также физическим закономерностям, однако механизм управления влагопереносом определяется в основном регуляторными функциями растений.

В зависимости от времени суток и метеорологических условий каждое растение стремится выделить в атмосферу определенное количество влаги E_0 . Если при некоторой влажности корневая система обеспечивает подачу такого количества влаги, то дальнейшее увеличение ее не приводит к повышению транспирации и она сохраняет стабильное значение E_0 . Наименьшее значение влажности почвы, при котором достигается стабильный уровень транспирации E_0 , может быть названо критическим. При снижении влажности ниже этого уровня величина транспирации лимитируется подачей влаги из почвы корневой системой.

Для каждого растения при определенных почвенно-физических условиях существует некоторая предельная величина $E_{0.пр}$, больше которой данное растение не может выделить влаги в атмосферу, сколько бы не увеличивались влажность почвы и напряженность атмосферных условий. При соблюдении условия $E_{0.пр} \geq E_0$ управление водным режимом растений может осуществляться за счет изменения влажности почвы непосредственно в корнеобитаемом слое. При несоблюдении этого условия, что характерно, например, при суховеях, борьба с недостатком влаги должна включать такие мероприятия, как общее обводнение территорий, лесомелиорация, импульсное дождевание и подбор засухоустойчивых культур.

В настоящей работе рассматривается только первый случай, когда управление водным режимом осуществляется за счет гидромелиоративных мероприятий на данном поле.

На рис. 1а показан характер изменения транспирации в зависимости от влажности почвы и стабильного значения транспирации E_0 , определяемого метеорологическими условиями и временем суток. На рис. 1б эти же зависимости аппроксимированы прямыми.

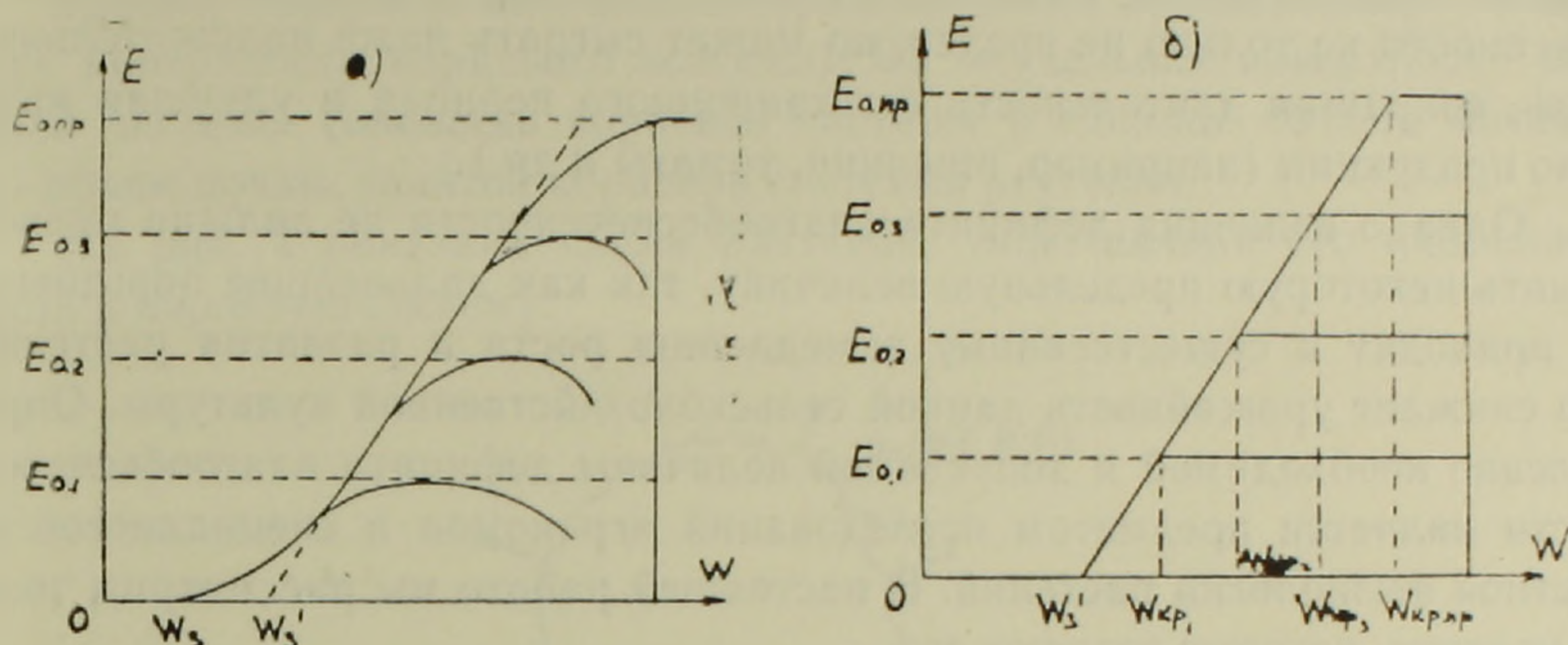


Рис. 1. Зависимость транспирации от влажности почвы. а) аппроксимируемая функция; б) аппроксимирующая функция.

Как видно из рисунка, зависимость транспирации E от влажности почвы W можно разделить на два участка: участок возрастающей скорости транспирации и участок постоянной скорости. В первом случае, т. е. при влажности ниже критической, транспирация практически не зависит от метеорологических условий и определяется влагосодержанием почвы. Во втором случае она не зависит от влажности и определяется физиологическими потребностями растения при данных метеорологических условиях. Функция $E(W)$ при аппроксимации ее прямыми может быть записана в виде:

$$E = \begin{cases} W_3' + aW & \text{при } W_{кр} > W > W_3, \\ E_0 & \text{при } W \geq W_{кр} \end{cases} \quad (1)$$

где W_3 — влажность завядания, W_3' и a — параметры прямой.

Соотношение (1) иллюстрирует упрощенную математическую модель влагообмена в системе почва—растение—атмосфера, соответствующую экспериментальным исследованиям ряда авторов [1—4].

Из сопоставления рис. 1а и 1б видно, что параметр W_3' несколько превышает значение влажности завядания W_3 . Критическая влажность почвы $W_{кр}$, характеризующая точку перехода от наклонного участка прямой $E(W)$ к участку постоянной транспирации, соответствует условию достаточной увлаженности почвы при данных метеорологических условиях. Величина $W_{кр}$ зависит от стабильной транспирации E_0 . Чем выше E_0 , тем больше должна быть влажность почвы, обеспечивающая нормальное водообеспечение растений, и наоборот.

Исходя из предположения, что на участках недостаточной увлажненности, характеризуемых прямой $E = W_3' + aW$, величина транспирации зависит только от влажности почвы, можно дать математическое описание влагообеспеченности растения, рассматривая условия движения влаги в почве к его корневой системе.

Влага, которую транспирирует растение, передавая ее через стебель и листья в атмосферу, собирается из почвы разветвленной корневой системой. Если в почве нет достаточного количества влаги, возникает дефицит влагообеспеченности растений. Следует здесь отметить, что на определенных стадиях развития растений некоторый дефицит влагообеспеченности не только не вреден, но может сыграть даже положительную роль, сокращая длительность вегетационного периода и улучшая качество продукции (например, пшеница, томаты и др.).

Однако величина дефицита влагообеспеченности не должна превосходить некоторую предельную величину, так как дальнейшее повышение ее приводит к существенному замедлению роста и развития растений, что снижает урожайность данной сельскохозяйственной культуры. Определение необходимой и допустимой величины дефицита влагообеспеченности является предметом исследований агрономов и специалистов по частной физиологии растений. В настоящей работе мы рассмотрим только условия, которые создают его.

Обозначим количество поступающей из почвы влаги в корни растений, при определенных метеорологических условиях и неограниченных влагозапасах в почве, через Q_0 , а максимальное количество воды, которое растение способно получить из почвы при заданной влажности ее и передать через стебель к листовой поверхности,—через $Q_{пр}^1$.

При условии $Q_{пр} < Q_0$ возникает дефицит влагообеспеченности, абсолютная величина которого будет равна

$$\Delta Q = Q_0 - Q_{пр}, \quad (2)$$

а отношение $b = \frac{Q_{пр}}{Q_0}$ представляет собой показатель, характеризующий относительную необеспеченность растений влагой.

Очевидно, что

$$b = 1 - \frac{\Delta Q}{Q_0}. \quad (3)$$

При $Q_{пр} = Q_0$ ($b = 1$) дефицит влаги будет отсутствовать, а в случае, если $Q_{пр} > Q_0$ ($b > 1$) имеет место избыток влаги в почве.

В соответствии с задачей, поставленной в настоящей работе, найдем зависимость показателя влагообеспеченности от метеорологических и почвенных условий. Причем, учитывая, что от напряженности атмосферных условий зависит величина Q_0 , мы будем искать зависимость $b = f(W, Q_0)$, где W —влажность почвы.

Рассмотрим факторы, определяющие предельную величину потока влаги, которую корневая система способна направить по стеблю растения.

¹ По аналогии с величиной $E_{0, пр}$ для данного растения существует предельное значение $Q_{0, пр}$, соответствующее полной увлажненности почвы.

Расход воды, поступающей из почвы в корневую систему одного растения, может быть выражен зависимостью:

$$Q = q \Omega_k V. \quad (4)$$

Здесь q — скорость впитывания (расход влаги, приходящийся на единицу поверхности корневого волоска); Ω_k — удельная поверхность корневой системы (площадь корневой системы в единице объема почвы); V — объем почвы, занятой корневой системой растения.

На рис. 2 показана схема растения, включающая его надземную часть и корневую систему.

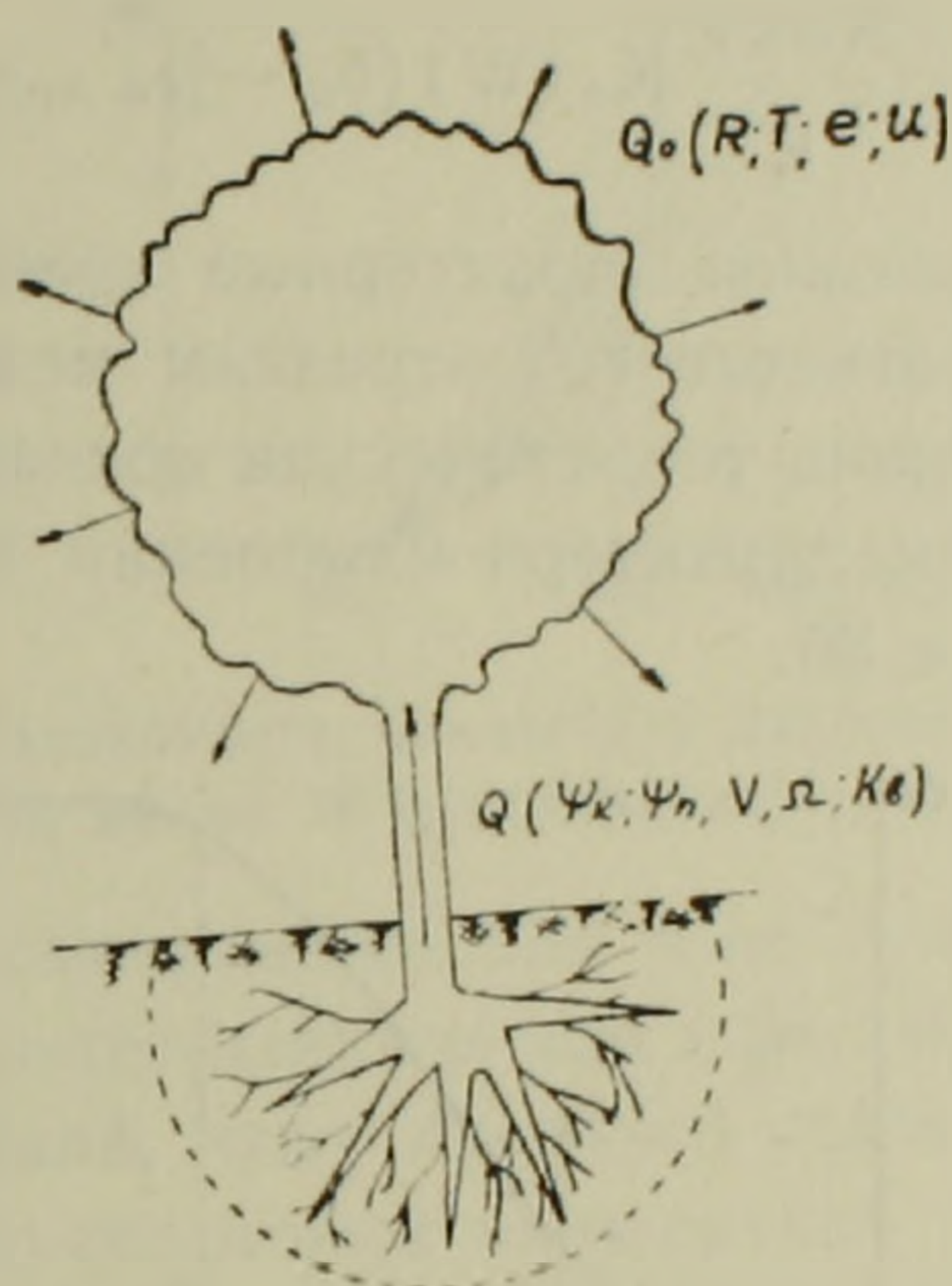


Рис. 2. Общая схема растения.

Полагая, что при корневом впитывании влаги создаются достаточно высокие градиенты потенциала, примем, что коэффициент влагопроводности не зависит от величины градиента и, следовательно, будем пренебрегать пластическим сопротивлением сдвигу в почвенном растворе, учитывая только его вязкость [5]. Тогда для скорости впитывания можно написать выражение:

$$q = K_v(W) J_k, \quad (5)$$

где $K_v(W)$ — коэффициент влагопроводности, зависящий только от влажности почвы; J_k — градиент напорной функции у поверхности корня по нормали к ней.

Полагая, что $J_k \equiv \psi_n - \psi_k$, где ψ_k — потенциал на поверхности корневой системы (потенциал, соответствующий понятию „сосущая сила“ корневой системы) и ψ_n — потенциал почвенной влаги, можно написать:

$$J_k = A \frac{(\psi_k - \psi_n)}{g}, \quad (6)$$

Здесь g — ускорение силы тяжести; A — численная величина, учитывающая геометрические особенности поля фильтрации.

Учитывая соотношение (5) и (6), получим следующие выражения для Q .

$$Q = \frac{A\Omega_k V}{g} K_v(W) (\psi_n - \psi_k). \quad (7)$$

Если в выражение (7) вместо величины ψ_k поставить его предельное значение $\psi_{k. пр}$, которое растение может создавать, получим формулу расхода влаги $Q_{пр}$, которая может быть получена из почвы разветвленной корневой системой при данной влажности ее и предельной величине «сосущей силы».

$$Q_{пр} = \frac{A\Omega_k V}{g} K_v(W) (\psi_n - \psi_{k. пр}). \quad (8)$$

На рис. 3а и 3б показаны характерные кривые $K_v(W)$ и $\psi(W)$. Разность $(\psi_n - \psi_{k. пр})$ соответствует отрезкам между линиями $\psi_{k. пр}$ и $\psi_n(W)$. На рис. 3в показана теоретическая кривая $Q_{пр}(W)$, полученная по формуле (8) с учетом характера изменений $K_v(W)$ и $\psi(W)$, изображенных на рис. 3а и 3б.

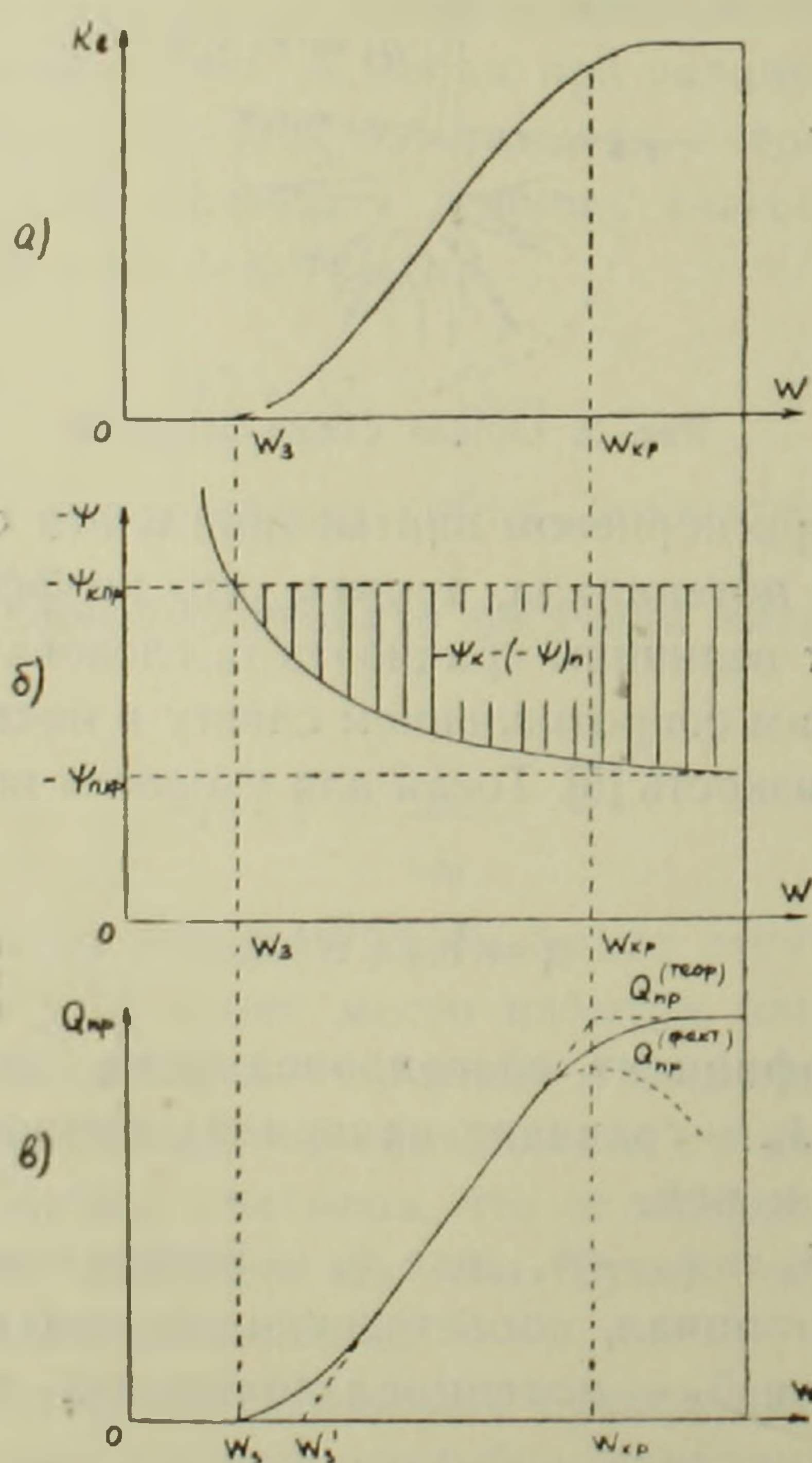


Рис. 3. Характерные кривые а) $K_v(W)$, б) $\psi(W)$, в) $Q_{пр}(W)$.

При полном насыщении величина K_v представляет собой коэффициент фильтрации K_f , а величина $Q_{пр}$ достигает значения $Q_{0. пр}$, т. е.

$$Q_{0. пр} = \frac{A \Omega_k V}{g} K_{\phi} (\psi_{п} - \psi_{к. пр}). \quad (9)$$

Для различных значений Q_0 , отражающих возможное различие метеорологических условий, получим семейство кривых влагообеспеченности $b=f(W)$, каждая из которых соответствует определенной напряженности атмосферных условий (рис. 4). Действительная часть кривых показана сплошными линиями.

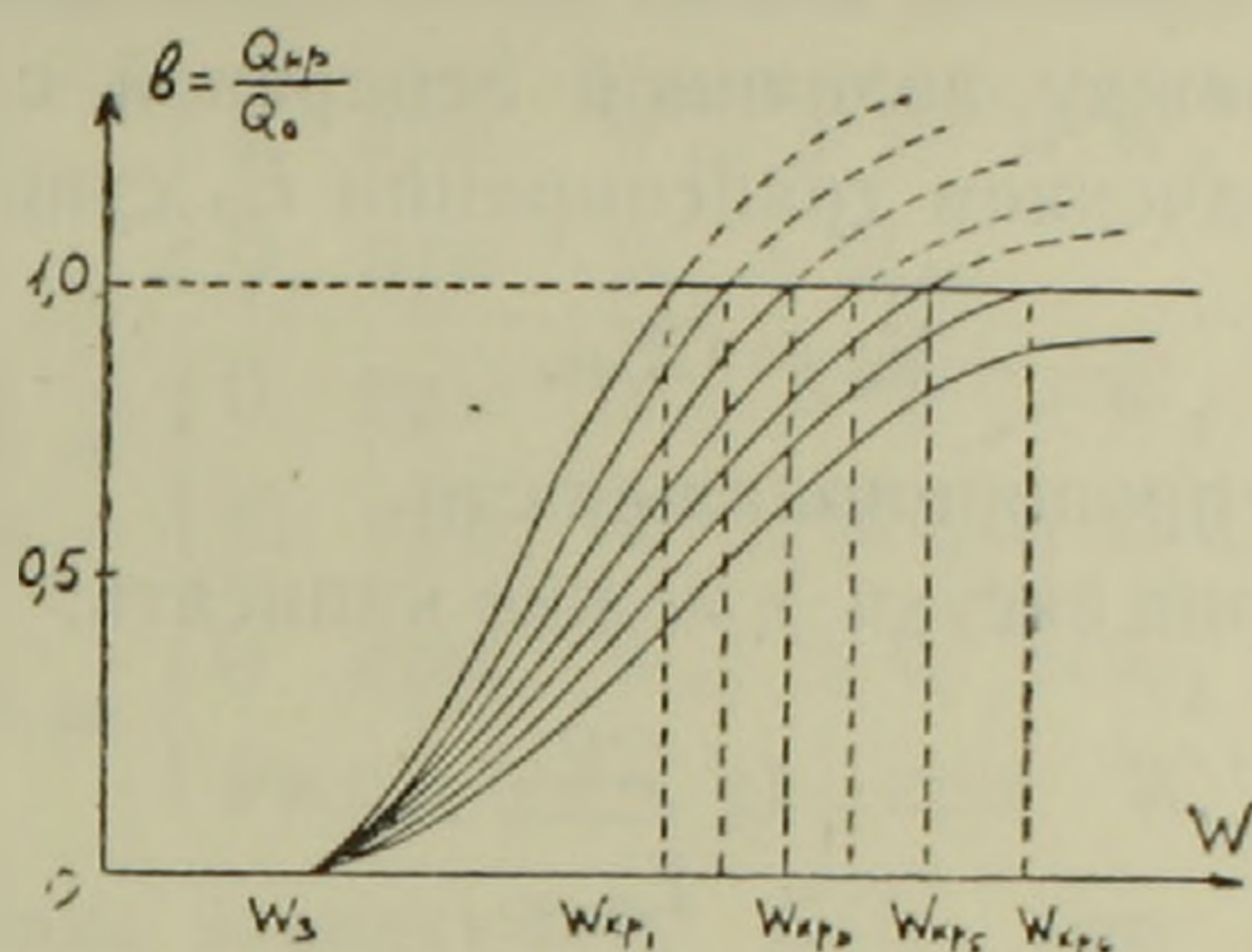


Рис. 4. Зависимость показателя влагообеспеченности b от влажности почвы W и потенциального расхода влаги Q_0 .

Здесь мы рассматривали, как уже отмечалось, только случай не слишком жестких метеорологических условий для данной культуры и фазы развития растений, чему отвечает условие $E_{0. пр} \geq E_0$. Однако это условие в ряде случаев может нарушаться. Так, например, в случае суховея даже при достаточной влажности и оптимальной плотности почвы величина $E_{0. пр}$ может оказаться недостаточной для сохранения растений. В случае же очень высокой плотности почвы (малая оструктуренность, неудовлетворительная обработка) условие $E_{0. пр} \geq E_0$ может нарушиться даже при относительно мягких агрометеорологических условиях.

Напряженность атмосферных условий можно оценить, введя в качестве критерия отношение фактической величины E_0 к максимальному для данной культуры и фазы развития значению потенциальной транспирации $E_{0. пр}$. Величина $\eta = \frac{E_0}{E_{0. пр}}$ характеризует степень засухи и, следовательно, может быть использована для прогноза суховеев. Условие $\eta \leq 1$ ($E_{0. пр} \geq E_0$) соответствует отсутствию засухи, а при $\eta > 1$ ($E_0 > E_{0. пр}$) наступает засуха.

Таким образом, произведя измерение параметра E_0 и пользуясь данными по $E_{0. пр}$, можно осуществить оперативный контроль за величиной показателя засухи η и соответственно регулировать микроклимат растений с помощью, например, дождевальных систем. Для определения величины E_0 , или так называемой испаряемости, применяют различные методы: по дефициту влажности воздуха, по радиационному балансу, по сумме температур воздуха и др. Наиболее точным и универсальным для определения величины E_0 является комплексный метод [3], учитывающий

все основные факторы, влияющие на испаряемость (радиационный баланс, теплообмен в почве, температура и влажность воздуха).

В случае несоблюдения условия $E_0 < E_{0, \text{пр}}$ указанные экспериментальные методы определения величины E_0 для вычисления показателя засухи η , как и сама величина E_0 , как параметр, отражающий стабильную транспирацию, теряют смысл. В этом случае для оценки степени засухи и выбора необходимых мелиоративных мероприятий или статистической оценки засушливых периодов может быть предложен следующий прием.

Известно, что между величиной испарений с водной поверхности E_B и значением транспирации E_0 существует зависимость:

$$E_0 = CE_B, \quad (10)$$

где C — коэффициент пропорциональности.

Тогда для критерия засухи η можно написать:

$$\eta = \frac{CE_B}{E_{0, \text{пр}}}. \quad (11)$$

При экстерполяции функции $E = CE_B$ за пределами действительных значений E_0 , т. е. при $CE_B > E_{0, \text{пр}}$, может быть найдено значение η для оценки степени засухи в этих условиях.

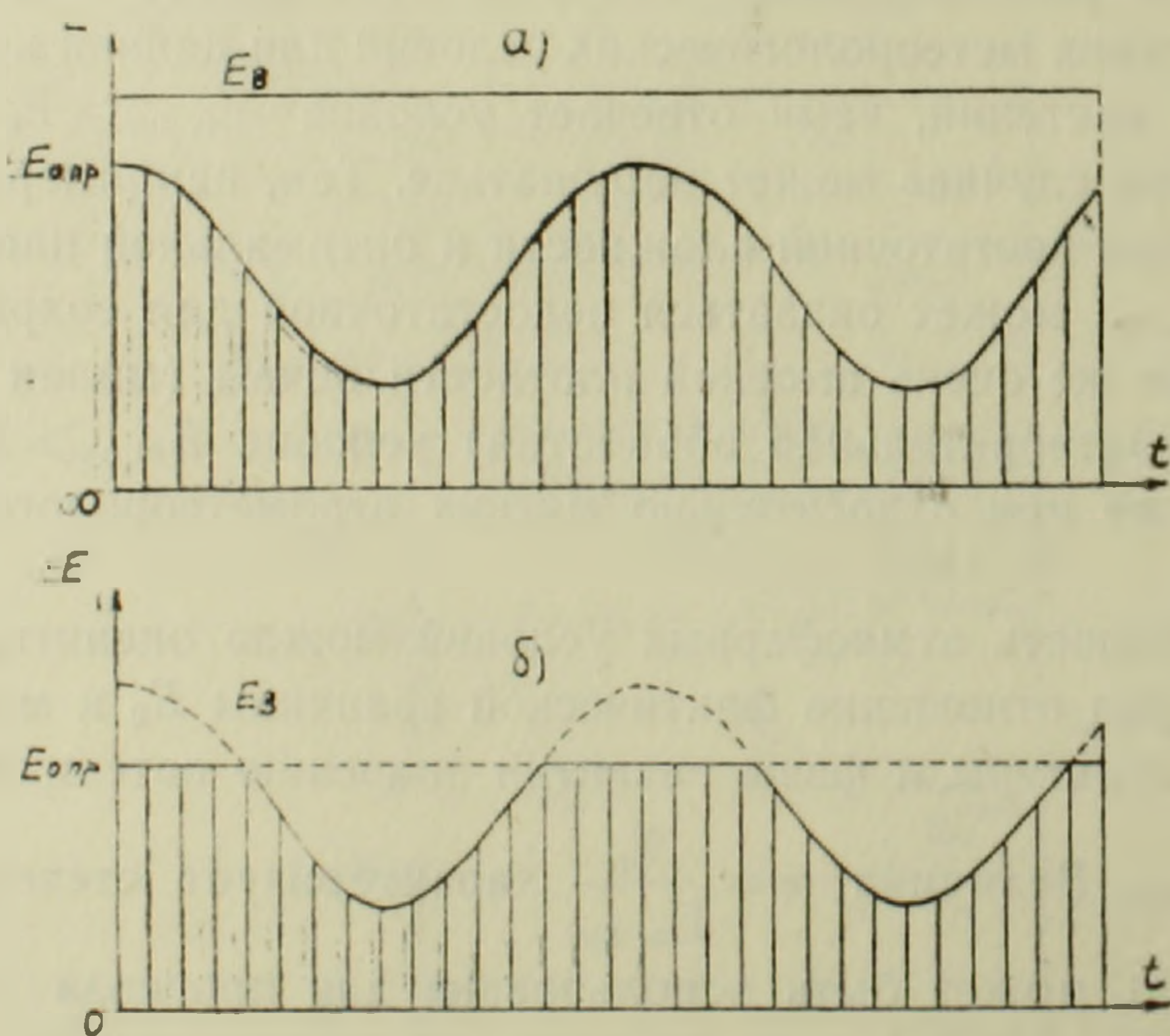


Рис. 5. Временной ход транспирации а) $E_B < E_{0, \text{пр}}$,
б) $E_B > E_{0, \text{пр}}$.

Для определения влагообеспеченности растений в течение суток необходимо знать также зависимость транспирации E_0 в функции времени t с периодом T_0 , равным 24 часам. Разложив функцию $E_0(t)$ в ряд Фурье и рассмотрев лишь постоянную составляющую и основную гармонику ряда, получим:

$$E_0(t) = N + F \sin(\omega t + \varphi). \quad (12)$$

Здесь N —среднесуточное значение транспирации; F —суточная амплитуда транспирации, уменьшенная на величину N ; $\omega = \frac{2\pi}{T}$ — частота колебаний (очевидно, что $\omega = \frac{\pi}{12}$); φ — фаза, соответствующая началу отсчета времени.

Используя выражения (1), (10) и (12), можно дать следующее описание семейства кривых $E(W; E_B; t)$:

$$\frac{\partial E}{\partial W} = \begin{cases} a & \text{при } W_{кр} > W > W_3 \\ 0 & \text{при } W > W_{кр} \end{cases} \quad (13)$$

$$\frac{\partial E}{\partial E_B} = \begin{cases} 0 & \text{при } W_{кр} > W > W_3 \\ C & \text{при } W > W_{кр} \text{ и } E < E_{0. пр} \end{cases} \quad (14)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \begin{cases} 0 & \text{при } W_{кр} > W > W_3 \\ F\omega \cos(\omega t \times \varphi) & \text{при } W > W_{кр} \end{cases} \quad (15)$$

На рис. 5а показана зависимость $E(t)$ при соблюдении условия $W > W_{кр}$ на протяжении суток, а на рис. 5б—при несоблюдении этого условия в средней части суток.

Агрофизический научно-исследовательский
институт ВАСХНИЛ,
Армянский сельскохозяйственный институт

Поступило 16.XII 1970 г.

Ա. Հ. ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ, Ս. Վ. ՆԵՐՊՈՒՆ, Մ. Դ. ՍԱՆՈՅԱՆ

ԲՈՒՅՍԵՐԻ ՏՐԱՆՍՊԻՐԱՏԻԱՅԻ ԵՎ ՀՈՂԻ ԶՐԱ-ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԿԱՊԻ ՄԱՍԻՆ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Աշխատության մեջ տրվում է բույսերի արմատային ներծծման ու տրանսպիրացիայի պրոցեսների մաթեմատիկական արտահայտությունը հողային և ֆիզիկական տարբեր պայմանների դեպքում: Առաջարկվում է ջրապահովության չափանիշ, որն իրենից ներկայացնում է որոշակի օդերևութաբանական պայմաններում հողից բույսի արմատը ներծծված ջրի հոսքի հարաբերությունը այն մաքսիմալ ծախսին, որ արմատային սիստեմն ընդունակ է վերցնել հողից և ցողունով փոխանցել տերեւային մակերևույթին: Դիտարկվում են այն պայմանները, որոնք բույսերի ջրապահովության պակաս են ստեղծում հողարմատ ու բույս-մթնոլորտ սահմաններում և համապատասխանորեն կապ է ստեղծվում շրջանի ցուցանիշի մեծության ու արտաքին միջավայրի ֆիզիկական գործոնների միջև: Մթնոլորտային պայմանների լարվածության գնահատման համար չափանիշ է ծառայում գոլորշունակությունը, որի մեծությունը որոշվում է որպես պոտենցիալ տրանսպիրացիա (ոչ շատ սուր օդերևութաբանական պայմանների դեպքում) կամ որպես գոլորշիացում ջրի մակերևույթից (երաշտի ժամանակ, հողի մեծ խտություն ունենալու կամ անբավարար մշակված լինելու դեպքում):

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Алматъев А. М. Влагооборот культурных растений. Гидрометеониздат, Л., 1954.
2. Будаговский А. И. Испарение почвенной влаги. Изд-во «Наука», М., 1964.
3. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Гидрометеониздат, Л., 1956.
4. Мичурин Б. Н. Испарение воды почвой. В кн.: «Основы агрофизики». Физматгиз, М., 1959.
5. Нерпин С. В., Чудновский А. Ф. Физика почвы. Изд. «Наука», М., 1967.