

Э. А. Струнников

**ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ВЛАГОЙ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ  
КУЛЬТУР  
НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ СССР**



Э. А. Струнников

**ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ВЛАГОЙ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ  
КУЛЬТУР  
НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ СССР**



ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1976

Отв. редактор д-р с.-х. наук А. М. АЛПАТЬЕВ

Рассматриваются вопросы влагообеспеченности культурных растений на Северо-Западе и связанные с ними мелиоративные мероприятия (преимущественно орошение). Приводится зональность рассчитанных биологических кривых испарения, с помощью которых определены динамика и нормы водопотребления некоторых фитоценозов, связь между влагообеспеченностью фитоценозов и их урожаем. Показана целесообразность орошения ряда фитоценозов в условиях Северо-Запада, предложена принципиальная схема биофизического метода расчета систем орошения в зависимости от величины планируемого урожая.

Рассчитана на агрометеорологов, мелиораторов, агрономов и других специалистов сельского хозяйства.

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе хозяйственного строительства нашей страны при решении многих народнохозяйственных проблем сознательное преобразование природы сейчас часто выступает не как возможное, а как необходимое действие. Одной из причин этого является тот существенный факт, что многие из природных ресурсов нашей планеты перестают быть неисчерпаемыми. В связи с этим сознательное использование и воспроизводство природных ресурсов имеет тенденцию развиваться вглубь и вширь, выступая в конечном итоге не как случайный и малозначимый факт, а как главное, магистральное направление развития взаимодействия человека и природы.

Г. Ф. Хильми [62] так представляет себе эту закономерность: «Наступит время, когда созданная человеком природа и технические средства, воздействующие на нее, сольются в единую систему. Начав с преобразования природы, человек будет вынужден создать принципиально новую биосферу, состоящую из физической среды, населяющих ее организмов и включенных в природу технических средств, контролирующих физическую среду и в значительной мере ее создающих».

Интересную мысль высказывает Ю. П. Трусов [58]: «Человечество ныне находится на пороге той эпохи, когда будет в самых широких масштабах осуществляться не только традиционное производство по схеме: сырье (исходный материал) — промышленное (или сельскохозяйственное) предприятие — продукт, но и производство благоприятных для общества природных условий».

Философское обоснование взаимосвязи и взаимообусловленности истории общества и истории природы изложено уже в ранних работах К. Маркса и Ф. Энгельса, которые считали понимание этой связи одним из важных элементов материалистического представления законов развития общества.

В разработке проблем взаимодействия природы и общества важную роль призвана сыграть география.

Как отмечает А. Г. Доскач [20], «...среди других наук о Земле география отличается тем, что изучает не только отдельные природные объекты и процессы, но рассматривает сложные системы взаимодействующих объектов, фиксируя внимание на закономерностях этого взаимодействия, на анализе движущих сил развития каждой системы и среды в целом. Это органически комплексная наука, которая в настоящее время не просто усиливает внимание к прикладному аспекту, каким является преобразование географической среды и регулирование природных процессов, но ставит своей целью разработку научной теории и принципов этого преобразования, анализируя изменения динамики и структуры сложных географических систем

в ходе естественной эволюции и при активном на них воздействии».

Такое представление о географии как о науке, стремящейся к глубокому познанию природной среды с целью ее последующего преобразования и управления, было сформулировано еще в тридцатые годы. С тех пор это кардинальное положение в разной форме разрабатывается многими учеными-географами. К ним следует отнести И. П. Герасимова, М. И. Будыко, А. М. Алпатьева, Д. Л. Арманда, И. М. Забелина, С. В. Калешника, М. И. Львовича, В. Л. Дзержеевского, Е. К. Федорова, А. М. Шульгина и многих других [5, 13, 14, 15, 16, 19, 62 и др.].

Особо значительные задачи стоят перед физической географией в области сельского хозяйства. На состоявшемся в 1957 г. в Институте географии АН СССР координационном совещании были подробно рассмотрены вопросы теплового и водного баланса земной поверхности в свете задач физической географии. После всестороннего обсуждения проблема, получившая название «Преобразование водного и теплового режима сельскохозяйственной территории», была признана важнейшей среди главных направлений, по которым должна строиться и развиваться работа географических учреждений нашей страны.

Необходимость выделения этого направления обусловлена его теоретической и практической перспективностью, что должно обеспечить физико-географическим работам наиболее активный, преобразовательный характер.

Основная идея проблемы заключается в том, что водно-тепловой режим в природной географической среде является тем главным механизмом, который контролирует интенсивность и характер динамических изменений всех прочих форм обмена энергией и веществом между составляющими географической среды.

Важную роль в изучении тепло- и влагообмена преобразуемых территорий должна сыграть мелиоративная география — один из новейших разделов современной физической географии. Перспективной в этом плане является и такая зарождающаяся научная дисциплина, как мелиоративная гидрология.

Особенностью рассматриваемой проблемы является исключительная сложность взаимосвязанных процессов обмена вещества и энергии в геосферах, и в том числе в биосфере. Поэтому в методическом отношении ее рационально (в отдельных случаях) изучать по частям — группам слагаемых элементов. Одну из таких частей составляют вопросы, связанные с водопотреблением и водообеспеченностью культурных растений.

Известно, что водный режим фитоценозов является на Северо-Западе Европейской территории СССР одним из основных факторов формирования урожая. Особенности режима увлажнения районированных здесь культур, связь их с урожаем изучены пока недостаточно. Предлагаемая работа является попыткой

осветить некоторые из этих вопросов. Для решения их использован перспективный биоклиматический метод, рассматривающий процесс потребления растениями воды как биогеографическую категорию. Своеобразие географических условий Северо-Запада и прежде всего особенности климата обусловили необходимость развития этого метода применительно к рассматриваемым районам.

Возможные критические замечания и пожелания автор просит направлять по адресу: 199053. Ленинград, 2-я линия, д. 23, Гидрометеиздат.

## КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСПАРЯЕМОСТИ С ПОВЕРХНОСТИ СУШИ

Для решения многих научных и практических вопросов, связанных с потребностью растений во влаге и обеспеченностью влагой, необходимы сведения об испаряемости. В современном представлении под испаряемостью понимают максимально возможное испарение с подстилающей поверхности, влагозапасы которой неограниченны.

С физических позиций испаряемость определяется совместным действием ряда метеорологических факторов, оказывающих влияние на процесс влагообмена между подстилающей поверхностью и нижними слоями атмосферы. Для осуществления процесса максимально возможного испарения необходимо наличие трех основных условий:

- 1) тепловая энергия для превращения воды в пар;
- 2) бесперебойное снабжение растений достаточным для поддержания оптимальной транспирации количеством влаги;
- 3) постоянный отвод водяных паров из среды растений.

Первое условие означает, что испаряемость зависит от теплоэнергетических ресурсов территории. Теплоэнергетические ресурсы, в свою очередь, определяются тепловым балансом испаряющей поверхности, в котором основным компонентом прихода энергии является остаточная радиация (радиационный баланс). Кроме метеорологических условий, на величину испаряемости оказывают влияние размеры испаряющей поверхности и ее вид. Характер связи испаряемости с размерами испаряющей поверхности показан в ряде работ А. Р. Константинова [30, 31, 33]. Многофакторность связи испаряемости с определяющими ее величинами, различие методик ее расчета, отсутствие четких критериев при выборе вида подстилающей поверхности привели к довольно существенным различиям в оценке испаряемости одних и тех же почвенно-климатических зон.

В агрометеорологических расчетах в качестве подстилающей поверхности можно принимать поверхность, создаваемую любой сельскохозяйственной культурой в период ее активной вегетации при условии формирования сомкнутого травостоя. Необходимость последнего объясняется тем, что разные культуры, имея сомкнутый травостой, характеризуются близкими величинами альбедо, что предполагает практически одинаковые энергетические ресурсы испарения. Поэтому под испаряемостью в агрометеорологии следует понимать интенсивность испарения любого фитоценоза в период его активной вегетации при сомкнутом тра-

востое, если почва при этом увлажнена оптимально [5, 17, 30, 31, 33]. Однако, как подчеркивают А. М. Алпатов, Ф. Ф. Давитая, А. Р. Константинов и другие, при оценке испаряемости за малые внутривегетационные периоды времени учет вида и состояния растений обязателен. Причиной этого является различие растений в фазах развития, физиологическом состоянии, величине отражательной способности по отношению к падающей радиации и пр.

Оба приведенных положения принципиально важны и поэтому их необходимо учитывать в агрометеорологических расчетах. Касаясь последних, укажем, что расчетная величина испаряемости фитоценозов является показателем их потребности во влаге при различных условиях погоды. Сравнение потребности фитоценозов во влаге с осадками и другими компонентами прихода влаги дает возможность определить такую важную характеристику, как влагообеспеченность растений. Величина влагообеспеченности полей часто используется в агрономической практике как мерило целесообразности таких агротехнических мероприятий, как подъем зяби, боронование, борьба с сорняками, мульчирование почвы и т. д. Влагообеспеченность территории в агроклиматическом плане является одним из основных расчетных факторов при проектировании мелиоративных систем.

Учитывая сказанное, рассмотрим основные методы определения испаряемости применительно к природным условиям Северо-Запада. При этом особое внимание обратим на возможность использования методов в широкой агрономической практике.

## 1. Метод теплового баланса

Этот метод, предназначенный для расчета испарения, может быть использован и для расчета испаряемости при условии оптимального атмосферного увлажнения почвы или орошения. Физически он является наиболее обоснованным.

В основе метода лежит уравнение теплового баланса, которое имеет вид

$$R = LE + P + Q, \quad (1)$$

где  $R$  — радиационный баланс,  $P$  — турбулентный теплообмен,  $LE$  — затраты тепла на испарение ( $E$  — испарение,  $L$  — скрытая теплота испарения),  $Q$  — теплообмен в почве.

При такой записи уравнения теплового баланса вследствие незначительности пренебрегают затратами энергии на фотосинтез растений, теплом, выделяемым при конденсации паров, и некоторыми другими столь же малыми компонентами. Величина испарения из равенства (1) определится как остаточный член:

$$E = \frac{1}{L} (R - P - Q). \quad (2)$$

Непосредственно использовать для расчета испарения равенство (2) затруднительно, ибо в настоящее время нет методики надежного и независимого определения величины турбулентного теплообмена  $P$  для различных условий. Поэтому в практических расчетах величину  $P$  обычно заменяют из «соотношения Боуэна» произведением величины испарения на отношение градиента температуры к градиенту упругости водяного пара. В результате этой замены для определения испарения с поверхности суши получают расчетную формулу

$$E = \frac{R - Q}{1 + 0,64 \frac{\Delta T}{\Delta e}}, \quad (3)$$

где  $E$  — испарение в мм/ч;  $R, Q$  — указанные ранее величины, измеряемые в кал/см<sup>2</sup>·мин;  $\Delta T, \Delta e$  — градиенты температуры и упругости водяного пара.

В настоящее время на сетевых гидрометеорологических станциях из всех составляющих теплового баланса непосредственно измеряют только значения радиационного баланса. Используемая при этом специальная аппаратура (балансометр, актинометр, гальванометр или самописцы радиаций) требует тщательного ухода и частой проверки.

Как указывает С. И. Харченко [61], величины потоков тепла в почве на богарных землях и участках с поливами весьма близки. Поэтому в обоих случаях для определения потоков тепла в почве рекомендуется одна формула:

$$Q = \frac{c}{\tau} \left( s_1 - \frac{a}{H_1 - H_2} s_2 \right), \quad (4)$$

где  $c$  — объемная теплоемкость почвы;  $\tau$  — интервал времени, для которого находят среднее значение потока;  $s_1$  — величина, характеризующая изменение температуры в слое почвы 0—20 см (определяется с помощью коленчатых термометров Савинова);  $a$  — средний коэффициент температуропроводности слоя почвы 0—20 см;  $H_1$  и  $H_2$  — фиксированные глубины в этом слое;  $s_2$  — величина, характеризующая изменение во времени разности температур почвы.

Измерения температуры и влажности воздуха на двух стандартных высотах, необходимые для определения градиентов температуры и влажности, обычно производятся с помощью аспирационных психрометров или дистанционных полупроводниковых термометров сопротивления. Используемый иногда термобалансограф системы АФИ дает возможность производить автоматически и достаточно часто измерения радиационного баланса, температуры и влажности на двух высотах и потока тепла в почву. Однако этот самописец, к сожалению, пока является редким прибором.

Из сказанного следует, что определение испарения методом теплового баланса в настоящее время является достаточно трудоемким процессом, который не под силу даже сетевым станциям. Поэтому данный метод в основном применяется на специализированных гидрометеорологических станциях, стационарных базах научных учреждений, в экспедициях, оснащенных необходимыми приборами и имеющих подготовленных специалистов. В таких условиях целесообразно выполнять расчеты на электронных вычислительных машинах (ЭВМ). Для этого разработан алгоритм и составлена программа расчета испарения по методу теплового баланса на ЭВМ «Наири» [41].

Наряду с техническими трудностями отметим и некоторые другие недостатки метода. Так, оказалось, что метод дает неточные результаты днем при пасмурной погоде, ибо в это время затраты тепла на испарение соизмеримы с ошибками, обусловленными малой точностью определения других компонентов теплового баланса. Весьма неточно определяется величина испарения в утренние и вечерние часы. По данным А. Р. Константинова [31], ошибка, связанная с этими недостатками, может достигать до 100%. С. И. Харченко [61] отмечает слабую разработанность метода для высокорослых технических культур.

Естественно, что все указанные недостатки ограничивают диапазон применения метода теплового баланса. Однако по сравнению с другими фундаментальными методами этому методу следует отдать предпочтение, если имеется возможность его использовать, ибо он позволяет игнорировать влияние грунтовых вод при близком их залегании.

Для оценки точности метода теплового баланса П. П. Кузьмин [34] использовал способ, основанный на положениях классической теории ошибок. Согласно его расчетам, методом теплового баланса месячные суммы испарения определяются с точностью  $\pm 19\%$ , а годовые  $\pm 5\%$ .

## 2. Метод водного баланса

Общее уравнение водного баланса корнеобитаемого слоя почвы ограниченного участка территории для определенного промежутка времени можно записать в следующем виде:

$$X + Y_{п. п} + Y_{п. поч} - Y_{п} - Y_{поч} - E \pm \Delta W_h + K_h - I_h = 0, \quad (5)$$

где  $X$  — атмосферные осадки;  $Y_{п. п}$ ,  $Y_{п. поч}$  — приток воды со стороны поверхностных и внутрипочвенных вод;  $Y_{п}$ ,  $Y_{поч}$  — сток поверхностных и внутрипочвенных вод;  $\Delta W_h$  — изменение влагозапасов корнеобитаемого слоя толщиной  $h$ ;  $K_h$  — приход за счет восходящего потока капиллярной, пленочной и парообразной влаги или подпитывание корнеобитаемого слоя за счет грунтовых вод;  $I_h$  — расход влаги за счет нисходящего потока

(инфильтрация) за пределы корнеобитаемого слоя;  $E$  — испаряемость (при условии оптимального увлажнения почвы).

Если рассматривать водный баланс орошаемого поля, то в уравнение (5) необходимо включить дополнительные компоненты в виде оросительной нормы, сброса избыточных вод и т. д.

Для средних многолетних условий, как отмечает А. Р. Константинов [30], изменением влагозапасов в слое почвы активного влагообмена можно пренебречь. В работе Б. В. Полякова показано, что величина бокового влагообмена обратно пропорциональна площади водосбора [45б]. Вследствие этого для средних и больших водосборов также можно пренебречь многолетним боковым водообменом. В летний период, как правило, отсутствуют поверхностные сток и приток воды. Учитывая все эти обстоятельства, уравнение (5), решенное для испаряемости, можно записать в виде

$$E = X + K_n - I_n. \quad (6)$$

В уравнение (6) входят компоненты вертикального влагообмена корнеобитаемого слоя с нижними слоями почвы и грунтовыми водами. Следует отметить, что необходимость учета  $K_n$  и  $I_n$  возрастает по мере сокращения расчетного интервала и поднятия уровня грунтовых вод, однако вычисление этих величин связано с известными трудностями. В зоне достаточного и избыточного увлажнения при глубоком залегании грунтовых вод вертикальный влагообмен представляет собой поток воды, направленный вниз и обусловленный в основном движением капиллярной воды и некоторой фильтрацией, связанной с осадками. Этот поток, по данным многих авторов [3, 6, 61], существенно меньше (по крайней мере на порядок) величины испарения, что дает возможность пренебречь им.

Таким образом, на практике довольно часто величина испаряемости определяется по иной формуле:

$$E = \Delta W_n + X. \quad (7)$$

Нужно иметь в виду, что определение  $\Delta W_n$  характеризуется значительными случайными ошибками. Основным источником этих ошибок является естественная вариация влажности почвы в поле. Считают, что ошибка, связанная с определением влагозапасов почвы, увеличивается с уменьшением интервала времени между двумя измерениями влагозапасов. Однако точность расчета испарения в этом случае правильнее связывать не с длительностью периода, а с числом повторностей определения влажности почвы и величиной испарения [31]. А. К. Филиппова [60] показала, что при четырехкратном взятии проб на влажность средние ошибки ее определения будут составлять для однородных почвогрунтов метрового слоя 2—5 мм, а при крайнем разнообразии и неоднородности состава почвогрунтов — около 40—45 мм.

Таким образом, применяемая в настоящее время на сети агрометеорологических станций методика, при которой осуществляется бурение почвы с четырехкратной повторностью, обеспечивает хорошие результаты расчетов влагозапасов на сравнительно однородных почвогрунтах. Если при этом наблюдается глубокое залегание грунтовых вод, что позволяет пренебречь компонентами вертикального влагообмена в зоне аэрации, то метод водного баланса вполне применим для расчета месячных, а иногда и декадных величин испаряемости и испарения даже при четырехкратной повторности определения влажности почвы [61]. При неглубоком залегании грунтовых вод, когда возникает необходимость надежного определения составляющих влагообмена по вертикали, метод водного баланса может быть применен в исследовательских целях, а при достаточной точности вычисления всех компонентов — как контроль для других методов. Так, из работы [61] следует, что при точности определения осадков 10%, испарения 10—12%, изменения влагозапасов 10—12% расчет баланса по формуле (5) за месяц и даже декаду можно произвести с погрешностью 10—12% для однородных почвогрунтов и с погрешностью порядка 15% для неоднородных.

Следует иметь в виду, что метод водного баланса дает возможность рассчитывать лишь осредненную величину испаряемости и не позволяет выявить ее структуру в зависимости от метеорологических, биологических и других факторов. Это является существенным недостатком метода водного баланса при его применении к фитоценозам.

Поскольку в настоящей работе широко используются данные испарителей, возникает необходимость кратко остановиться на методе водного баланса монолитов. Этот метод, как известно, применяется в двух вариантах: для изучения испарения с верхнего, деятельного слоя почвогрунтов по испарителям и для изучения суммарного испарения и вертикального влагообмена по лизиметрам. Для массовых наблюдений за суммарным испарением с различных сельскохозяйственных угодий при глубоком залегании грунтовых вод Государственным гидрологическим институтом рекомендованы наиболее простые приборы ГГИ-500-50 и ГГИ-500-100. (Следует согласиться с мнением А. Р. Константинова, предложившего в целях унификации наблюдений и сокращения трудоемкости работ во всех климатических зонах СССР применять один испаритель — ГГИ-500-100.)

В последние годы широкое распространение получают гидравлические испарители, выгодно отличающиеся от весовых возможностью увеличения размеров почвенного монолита и высокой точностью.

Установленный на испарительной площадке Валдайской научно-исследовательской гидрологической лаборатории (ВНИГЛ) в 1950 г. гидравлический испаритель большой модели (БГИ) вмещает почвенный монолит площадью 5 м<sup>2</sup> при глубине 2 м.

Использование в этом испарителе нескольких параллельных и независимых способов измерения вертикальных перемещений плавающей системы дает возможность определять величину испарения с поверхности монолита с точностью до 0,01 мм. Наряду с измерением испарения в испарителе предусмотрена возможность раздельного учета осадков, конденсации паров и инфильтрации. Этим прибор обеспечивает возможность изучения всех составляющих водного баланса. С 1950 по 1955 г. на испарителе культивировалась луговая растительность, а далее он был включен в севооборот, принятый в Валдайском районе. Поэтому на испарителе в 1956 г. культивировался лен, в 1957 г. — картофель, в 1958 г. — овес и т. д.

Многолетние наблюдения показали, что состояние луговой растительности и сельскохозяйственных культур на почве монолита ничем не отличается от их состояния на окружающем поле. Специальными измерениями доказано, что благодаря большому объему режим температуры и влажности почвы монолита практически не отличается от аналогичных режимов окружающего поля. Таким образом, есть все основания считать, что испарение и транспирация с поверхности монолита тождественны испарению и транспирации с окружающего сельскохозяйственного поля.

При оптимальном атмосферном увлажнении почвы гидравлический испаритель, естественно, должен фиксировать испаряемость. Все вышеизложенное позволяет считать, что этот прибор на Северо-Западе может быть использован в качестве эталона при оценке испаряемости и испарения. Аналогичный вывод можно сделать и для гидравлических почвенных испарителей малой модели (ГПИ).

Особую ценность имеют данные измерений испаряемости и испарения по этим приборам за сутки. Точное определение этих величин за столь малые промежутки времени невозможно никакими иными современными методами или приборами, в то время как разрабатываемые в последние годы методы определения сроков полива в своей основе должны базироваться на закономерностях динамики суточных величин испаряемости и испарения.

### **3. Комплексные методы расчета испаряемости**

Группа методов основана на определении испаряемости исходя из уравнения водного баланса с привлечением отдельных элементов теплового баланса.

Широкое распространение за рубежом получил метод расчета, предложенный Пенманом [71]. Его основу составляют уравнение теплового баланса и отдельные компоненты водного баланса. Используя выявленные эмпирические связи, Пенман получил

следующее равенство для расчета испаряемости с водной поверхности:

$$E = (\Delta R_b + \gamma E_a) (\Delta + \gamma), \quad (8)$$

где  $R_b$  — радиационный баланс водной поверхности;  $\gamma$  — психрометрическая константа;  $\Delta$  — наклон кривой насыщения при заданной температуре воздуха;

$$E_a = f(u) (e_n + e),$$

здесь  $e_n$  и  $e$  — измеренная и насыщенная упругость водяного пара при данной температуре;  $f(u)$  — некоторая функция от скорости ветра.

Для перехода от испаряемости с водной поверхности к испаряемости с растительного покрова Пенман ввел в расчеты эмпирический коэффициент, неизменный для каждого вида растений, но изменяющийся в течение года в зависимости от климатических условий. Определение оросительных норм по методу Пенмана дало удовлетворительные результаты в Англии, Голландии, Австралии и некоторых других странах.

Значительное распространение за рубежом имеет метод расчета испаряемости Торнтвайта [31].

В Советском Союзе широко известен метод расчета испаряемости, предложенный М. И. Будыко [9, 12] и развитый в отдельных положениях Л. И. Зубенок [21, 22]. Будыко рассматривает две стадии испарения с почвы. Одна из них соответствует критически (оптимально) увлажненной почве, когда испарение равно испаряемости. Другая стадия — когда влажность почвы ниже критической и испарение меньше испаряемости, что учитывается соответствующей формулой. Величина испаряемости, по Будыко, определяется из соотношения

$$E_0 = \rho D (q_n - q), \quad (9)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха,  $D$  — интегральный коэффициент турбулентной диффузии,  $q_n$  — удельная влажность насыщенного пара при температуре подстилающей поверхности,  $q$  — наблюдаемая удельная влажность воздуха.

Для определения  $q_n$  необходимо знать температуру подстилающей поверхности. С этой целью совместно решаются уравнения Магнуса и теплового баланса относительно удельной влажности насыщенного пара воздуха.

Таким образом, для расчета величины испаряемости по этому методу необходимо знать многие характеристики: радиационный баланс, температуру и влажность воздуха, теплообмен в почве, коэффициент турбулентной диффузии. Это затрудняет использование комплексного метода, особенно когда необходимы расчеты испаряемости за длительный период времени.

Л. И. Зубенок, развивая комплексный метод, предложила определять испаряемость для каждого месяца в зависимости от

среднемесячного дефицита влажности воздуха и поправки, определяемой особенностями географических условий среды. На этой основе ею были построены мировые карты испаряемости [22].

Не останавливаясь на достоинствах метода, которые очевидны, укажем на его некоторые недостатки. Коэффициент турбулентной диффузии определен на основе большого числа осреднений как по территории, так и во времени, поэтому для конкретных видов фитоценозов и резко меняющихся условий погоды Северо-Запада его использовать, видимо, нельзя. Кроме того, поскольку метод в целом применим для сравнительно больших территорий (отдельных видов ландшафта, крупных сельскохозяйственных районов, водосборов), он непригоден для сельскохозяйственных полей Северо-Запада, большая часть которых имеет незначительные размеры.

Разработанный в Государственном гидрологическом институте метод С. И. Харченко [61] также основан на совместном решении уравнений водного и теплового балансов с привлечением ряда эмпирических зависимостей. Метод позволяет вычислять как суммарное испарение, так и испаряемость. Для расчета оптимального водопотребления (испаряемости)  $E_{оп}$  предложена формула

$$E_{оп} = \frac{\beta (R_0 - P_0) W_{лнв}}{L\gamma}, \quad (10)$$

где  $R_0$  — радиационный баланс,  $P_0$  — поток тепла в почву,  $L$  — скрытая теплота испарения,  $W_{лнв}$  — запасы влаги в расчетном слое почвы при наименьшей влагоемкости,  $\gamma$  — параметр, вычисленный как разность между наименьшей влагоемкостью и влажность завядания,  $\beta$  — коэффициент, зависящий от фазы развития растений и состояния деятельной поверхности.

Достоинствами метода является четкая физическая основа, учет биологических особенностей растений и влагообмена по вертикали в почвогрунтах. Проверка его в условиях Ростовской области дала удовлетворительные результаты в расчетах поливного режима: получена прибавка в урожае ряда сельскохозяйственных культур на 10—20%, эксплуатационные затраты сокращены на 5—10%.

На Северо-Западе метод Харченко испытан не был, однако в превентивном порядке можно указать на ряд трудностей при возможном использовании его в этом географическом районе. Параметр  $\beta$ , учитывающий биологию растений, величину турбулентного теплообмена и ряд других факторов, определен в условиях юга Европейской части Советского Союза для территорий порядка нескольких тысяч гектаров. Для сельскохозяйственных полей существенно меньших размеров, которые характерны для Северо-Запада, эта величина не определена. Следует указать, что испытание метода в Ростовской области показало необходимость уточнения этого параметра даже для районов юга [37].

Параметр  $\beta$  определен для сравнительно малого числа культур. Метод, дающий в принципе хорошие результаты, является трудоемким, так как требует использования значительного числа компонентов, точность вычисления которых должна быть велика.

#### 4. Метод турбулентной диффузии

Из других методов довольно большое распространение в нашей стране имеет метод турбулентной диффузии, наиболее подробно разработанный в варианте А. Р. Константинова. Используя этот метод, по двум элементам (среднегодовым значениям температуры воздуха и упругости водяного пара) можно рассчитывать нормы испарения с больших территорий, а при дополнительном учете скорости ветра, осадков и шероховатости испаряющей поверхности — величину испарения за конкретные годы и месяцы [30, 33]. Если учитывать вид культуры и фазу ее развития, то с помощью вспомогательных графиков, рассчитанных опытным путем, можно определять испарение с отдельных сельскохозяйственных полей.

Несомненным достоинством метода является простота и доступность расчетов. Последние при проведении их в условиях оптимального увлажнения должны давать величины потребности растений во влаге. Однако испаряемость для любой климатической зоны, в том числе и для Северо-Запада, можно рассчитать и по специальному графику, полученному экспериментально. И в этом случае исходными являются температура воздуха и упругость водяного пара. Проверка метода, проведенная авторским коллективом, показала, что величина вероятного отклонения в расчетах по сравнению с испарителями за отдельные месяцы конкретных лет для паровых полей составила 35%, а для испарителей с зерновыми культурами 25—30%. Поэтому метод не рекомендуется Константиновым для использования в расчетах за периоды времени менее месяца. Одну из причин, существенно влияющих на точность метода, Константинов видит в нарушении тесноты связи между температурой и влажностью воздуха по высоте при смене условий погоды. Поскольку такой характер погоды типичен для Северо-Запада, следует ожидать, что в этой климатической зоне ошибки будут наибольшие.

#### Выводы

1. Анализ фундаментальных методов по расчету испаряемости показывает, что для большинства из них характерны значительная сложность, необходимость учета с достаточной точностью многих компонентов, ограничительных условий. Многие методы не учитывают особенностей почвенно-климатических условий Северо-Запада, физиологию растений. Поэтому такие методы (теплового баланса, комплексные, турбулентной диффузии

и др.), несмотря на солидную теоретическую основу, не получили широкого распространения в агрометеорологических расчетах на Северо-Западе.

2. Необходимость расчетов испаряемости в условиях Северо-Запада требует разработки менее сложных методов, в основе которых должна лежать связь испарения с ограниченным числом факторов, поддающихся прямому определению. Важно, чтобы такие методы имели в своей основе связь испарения с биологическими особенностями растений, что позволит применять их для отдельных фитоценозов с охватом внутривеgetационных периодов.

3. Методы, разрабатываемые для Северо-Запада, должны полнее учитывать специфику географических условий этого района и прежде всего климата.

Применительно к рассматриваемой проблеме специфика климата проявляется в усиленной циклонической деятельности, частой смене различных воздушных масс и в резких колебаниях метеозлементов (прежде всего температуры и влажности воздуха). Так, до 60% летних осадков на Северо-Западе обусловлено деятельностью арктического фронта и связанных с ним циклонов. Изменения в циклогенезе определяют неравномерный характер выпадения осадков при их значительной общей годовой сумме. Частая смена воздушных масс (арктических, умеренных широт и реже тропических) усложняет процесс испарения и, следовательно, выбор его показателей по сравнению с южными районами ЕТС.

## БИОКЛИМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО ИСПАРЕНИЯ

### 1. Общие положения

Как в Советском Союзе, так и за рубежом осуществлено много попыток по выявлению связи испарения с ограниченным числом факторов, поддающихся прямому определению. В результате этой работы различными авторами предложены формулы, связывающие испарение с дефицитом упругости водяного пара, температурой, психрометрической разностью, радиационным балансом и другими метеорологическими факторами. В нашей стране такие формулы предложены Э. Ольдекопом, Р. Э. Давидом, А. Н. Костяковым, Н. Ивановым, П. П. Кузиным, А. М. Алпатьевым, А. Будаговским, Д. И. Шашко, А. В. Процеровым, В. Колпаковым, Ф. Ф. Давитая, Д. Б. Циприсом и многими другими исследователями. За рубежом такие формулы разработаны Х. Брейни, Блэйни-Кридллом, П. Торнтвайтом, Л. Тюрком, М. Пиха.

В эмпирических формулах в большинстве случаев испарение выражается уравнением вида

$$E = kf(t; R; v; d), \quad (11)$$

где  $E$  — испарение или испаряемость,  $t$  — температура воздуха,  $R$  — радиационный баланс,  $v$  — скорость ветра,  $d$  — дефицит упругости водяного пара (ранее эта величина менее точно называлась дефицитом влажности воздуха) и прочие элементы,  $f$  — символическое обозначение функции,  $k$  — постоянный или переменный коэффициент.

Особенностью таких эмпирических формул, как известно, является необходимость их использования в тех физико-географических условиях, для которых они получены. Тем не менее многие из этих формул нашли достаточно широкое применение, особенно при решении практических вопросов орошаемого земледелия. Это тем более обоснованно, что, как показали исследования, некоторые из этих формул дают результаты с такой же точностью (или несущественным для практики понижением ее), что и указанные выше фундаментальные методы расчета испарения. Так, за рубежом для расчета испарения с орошаемых полей длительное время и достаточно успешно используются эмпирические формулы Пенмана, Тюрка, Торнтвайта.

В нашей стране в таких формулах в качестве характеристики теплоэнергетических ресурсов атмосферы наиболее часто используется температура воздуха или дефицит упругости пара.

Прочие метеорологические параметры используются реже. Так, например, формула Шарова имеет вид:

$$S = k \sum t + 4b, \quad (12)$$

где  $S$  — суммарное испарение ( $\text{м}^3/\text{га}$ );  $\sum t$  — сумма средних суточных температур воздуха за рассматриваемый период;  $b$  — число дней в периоде;  $k$  — испарение на  $1^\circ\text{C}$  средней суточной температуры.

По данным И. Я. Делибалтова, Х. Х. Христова, И. Б. Цонева, Г. К. Льгова, суммарное испарение более точно выражается температурой воздуха, чем дефицитом упругости пара. Другие исследователи (Д. И. Шашко, А. М. Алпатьев, А. Остроменский), наоборот, предпочитают отдавать характеристикам влажности воздуха.

Чтобы правильно разобраться в этом вопросе, необходимо применить статистический анализ к наблюдениям строго определенной климатической зоны. Использование наблюдений за возможно короткие периоды (сутки) позволяет свести к минимуму ошибки, связанные с усреднением.

Статистический анализ случайных величин, как известно, сводится к определению соответствующих коэффициентов регрессии, парных, частных и множественных коэффициентов корреляции. Он позволяет из большого числа факторов, влияющих на расчетную величину, отобрать наиболее существенные в целях последующего выявления наиболее надежных зависимостей. Важным шагом в решении такого рода задач явилось создание в ГГИ гидравлических почвенных испарителей, дающих возможность измерять суточные величины испарения с точностью до 0,1 мм. Постепенное накопление таких данных позволило подвергнуть их статистической обработке.

Одной из первых интересных работ в этом направлении явилось исследование А. Д. Клещенко [25]. Им сделана попытка установить уравнения регрессии для определения суточных величин суммарного испарения картофеля и кукурузы в зонах достаточного и избыточного увлажнения. В работе рассмотрено 11 переменных (суммарная радиация, осадки, дефицит упругости пара, ветер, облачность и пр.). Вычисление нормированной корреляционной матрицы и матрицы корреляционных отношений произведено на ЭВМ «Минск-2». Как показала статистическая обработка, лучше всего с суммарным суточным испарением коррелируют суммарная солнечная радиация, дефицит упругости пара, максимальная и средняя суточные температуры воздуха (коэффициенты корреляции соответственно равны 0,55; 0,47; 0,45 и 0,32). Это дало основание Клещенко в дальнейшем ограничиться рассмотрением указанных величин.

Недостатком исследования Клещенко является привлечение данных разных климатических зон и испарителей разных конструкций. Примерно такого же плана работа В. В. Рогоцкого;

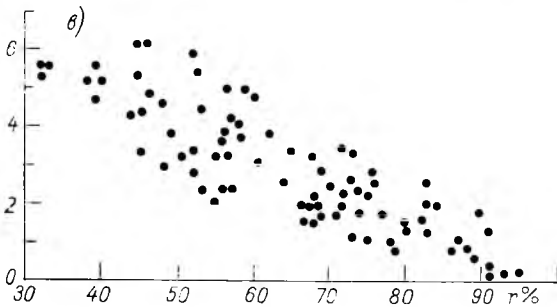
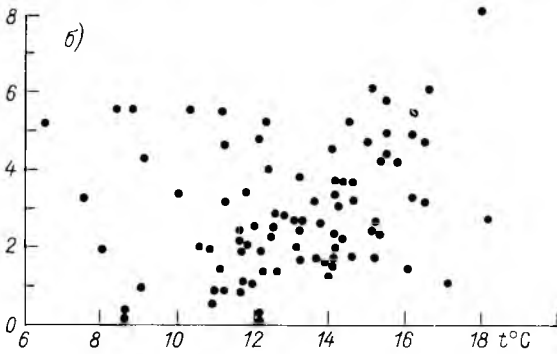
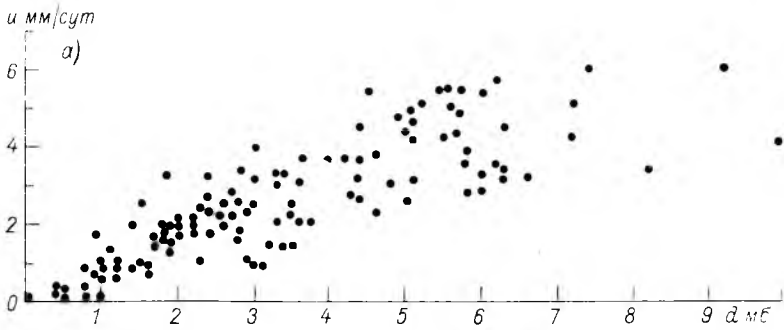
в нашем случае она не представляет значительного практического интереса, ибо в ней рассмотрены связи метеофакторов с суточными (и другими) величинами испарения в условиях года средней водности.

Нами для решения указанной задачи использованы суточные величины испарения, определенные по гидравлическому испарителю большой модели (Валдай) в условиях оптимального увлажнения влажного 1962 г. На рис. 1 представлены связи суммарного испарения  $u$  за сутки со средним суточным дефицитом упругости водяных паров  $d$ ; средней суточной температурой воздуха  $t$ ; минимальной за сутки относительной влажностью воздуха  $r$ ; радиационным балансом  $B_p$  и суммарной радиацией  $Q$ . При построении рис. 1 *а, г, д* использованы ежесуточные данные за май—август, а при построении рис. 1 *б, в* — аналогичные данные за июнь—август. В каждом случае исключено из обработки 5 наблюдений, связанных с засушливыми условиями погоды. Радиационный баланс подстилающей поверхности и суммарная радиация подсчитаны как сумма наблюдаемых значений за сроки 6, 9, 12, 15 и 18 ч.

Как показала статистическая обработка, в условиях оптимального увлажнения на Северо-Западе коэффициенты парной корреляции суточного суммарного испарения составляют: с минимальной относительной влажностью 0,83; средним суточным дефицитом водяного пара 0,80; суммарной радиацией 0,79; радиационным балансом 0,79 и средней суточной температурой воздуха 0,18. Все коэффициенты корреляции, исключая последний, значимы на 1%-ном уровне.

В принципе возможно некоторое увеличение тесноты связи между испарением и радиационными характеристиками, если последние более точно определять с помощью самописцев. Существенной представляется наиболее тесная связь суммарного испарения с минимальной (за день) относительной влажностью воздуха. По-видимому, это объясняется тем, что экстремальные (за день) значения метеоэлементов более точно характеризуют энергетические ресурсы атмосферы по сравнению с их средними суточными величинами. Важным является факт отсутствия значимой связи между средней суточной температурой воздуха и испарением за сутки. В подобных случаях это следует объяснить тем, что в условиях Северо-Запада частая смена воздушных масс может сопровождаться малым изменением температуры воздуха и резким изменением его влажности. Графическая проверка этих выводов на материалах наблюдений других влажных лет (с использованием гидравлических испарителей) дала примерно такие же результаты.

Таким образом, одно из принципиальных отличий климатических и погодных условий Северо-Запада от континентальных районов Европейской части страны заключается в том, что температура воздуха является здесь ненадежным показателем



теплоэнергетических ресурсов атмосферы, особенно за короткие промежутки времени. Возможно, что теснота связи между этими величинами будет увеличиваться (вплоть до значимой) в условиях господства одной воздушной массы, что может наблюдаться в засушливые или острозасушливые годы. Определенным указанием на это является успешная проверка на Северо-Западе методики орошения, разработанной Северным научно-исследовательским институтом гидротехники и мелиорации (СевНИИГиМ).

С гораздо большей степенью достоверности можно использовать на Северо-Западе в качестве характеристик теплоэнергетических ресурсов атмосферы такие величины, как радиационный

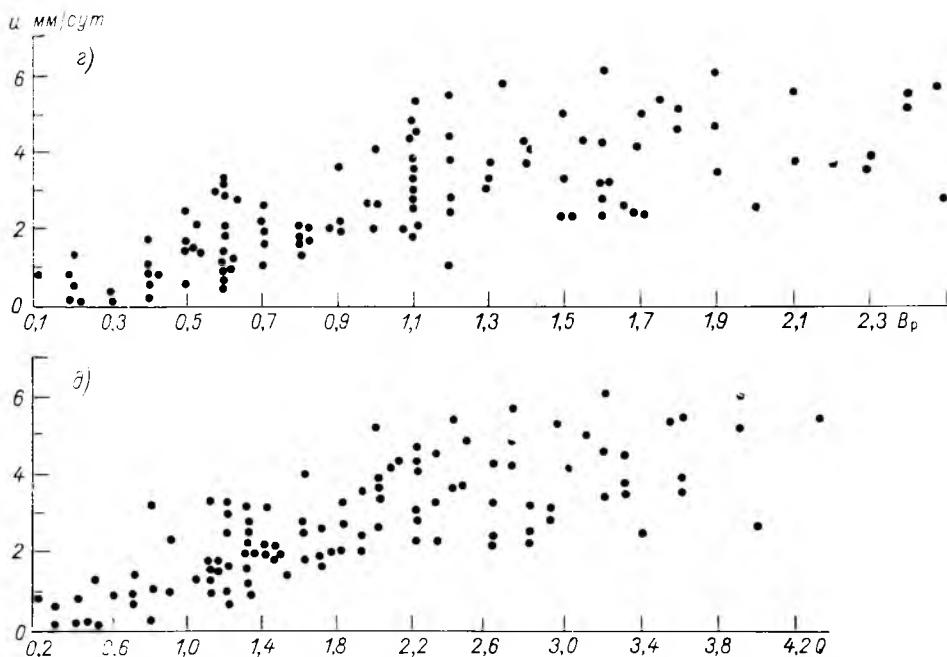


Рис. 1. Связь суммарного испарения клевера  $E$  за сутки со средним суточным дефицитом упругости водяного пара  $d$  (а), со средней суточной температурой воздуха  $t$  (б), с минимальной за сутки относительной влажностью воздуха  $r$  (в), с радиационным балансом  $B_p$  (в), с суммарной солнечной радиацией  $Q$  (д).

баланс, суммарная радиация, влажность воздуха. Меньшая возможность использования радиационных характеристик определяется трудностью их измерения (особенно при использовании самошнецев), малым количеством станций, измеряющих радиационные потоки, незначительной длиной рядов наблюдений. В качестве наиболее надежных и практически более доступных параметров в своеобразных условиях Северо-Запада лучше использовать характеристики влажности воздуха.

В нашей стране одним из первых исследователей этого направления был Э. Ольдекоп. Им впервые была физически обоснована тесная связь, существующая между испарением и дефицитом упругости водяного пара. Глубокую теоретическую и практическую проработку этого вопроса впервые осуществил А. М. Алпагьев. Его обширные исследования в этом направлении положили начало развитию нового, биоклиматического метода расчета режимов орошения сельскохозяйственных культур не только в Советском Союзе, но и за рубежом. К таким странам прежде всего следует отнести Болгарию, Чехословакию, Польшу.

В основе биоклиматического метода лежит установленный теоретически и проверенный на практике факт, что расход влаги орошаемым полем при нормальном развитии растительной массы (высоких урожаях) определяется теплоэнергетическими ресурсами атмосферы. Если растительная масса развита недостаточно, что соответствует плохим урожаям, то расход влаги в значительной мере определяется и уровнем ее развития. В целом это означает, что потребление растениями воды при оптимальной влагообеспеченности изменяется под влиянием географических условий среды (главным образом климата) и биологических особенностей растений. Следовательно, потребление растениями воды является биогеографической категорией. Эти закономерности отражены в уравнении вида

$$E = k \sum d, \quad (13)$$

где  $\sum d$  — сумма среднесуточных дефицитов упругости пара,  $k$  — биологический коэффициент испарения.

В качестве основного элемента, определяющего величину испарения, Алпатьев выбрал дефицит упругости пара, поскольку он как производная от температуры и влажности воздуха является комплексным показателем условий испарения. На это, в частности, указывает тот факт, что дефицит упругости пара по сравнению с другими метеорологическими факторами находится в достаточно тесной корреляции с оптимальным испарением.

Вторым компонентом в расчетном уравнении (13) является так называемый биологический коэффициент испарения, или называемый некоторыми авторами несколько иначе — коэффициент суммарного испарения. В физической основе этого коэффициента, по Алпатьеву, «лежит сложившийся в филогенезе наследственный ритм развития растения, связанный с сезонным ритмом климата; ход накопления растительной массы одновременно с качественным изменением самого растения; степень затенения почвы и устойчивость фитоклимата». Эти зависимости дали основание Алпатьеву и другим исследователям полагать, что коэффициент  $k$  отражает главным образом биологические особенности развития растений.

Многими работами показано, что в условиях оптимального водоснабжения и хорошего развития растений суммарное испарение представляет собой прежде всего физический процесс, обусловленный физическими факторами испарения [3, 5, 6, 17, 33]. Однако на конечных периодах вегетации, когда растительная масса еще недостаточна или уже мала для предохранения почвы от прямого нагревания, когда заметно проявляются биологические особенности роста или старения растения, нет условий для формирования устойчивого фитоклимата. В эти периоды вегетации коэффициенты имеют другие значения. В силу биологических особенностей растения могут иметь неодинаковую

длину вегетационного периода, разные сроки сева и уборки, что также сказывается на величине биологических коэффициентов. Поэтому возникает необходимость раздельного учета коэффициентов испарения на протяжении всего периода вегетации, что приводит фактически к расчету биологической кривой испарения. Коэффициент биологической кривой на каком-либо интервале вегетации определится для любого растения из зависимости (13), трансформированной в виде

$$k = E / \sum d. \quad (14)$$

Фактическое испарение  $E$  в уравнении (14) рассчитывается как разность влагозапасов определенного слоя почвы с учетом выпавших атмосферных осадков. При этом необходимо использовать данные наблюдений за влажностью почвы, полученные в условиях оптимального водного режима, высокого фона агротехники и хорошего урожая. Чтобы не усложнять расчетов, рекомендуется использовать данные тех сельскохозяйственных полей, на которых грунтовые воды залегают достаточно глубоко (более 3,5—4,0 м в период вегетации). Специальными исследованиями установлено, что коэффициенты биологической кривой, рассчитанные для какой-либо культуры и определенных физико-географических условий, будут достаточно устойчивыми, если период их осреднения составит 4—5 лет.

Вычисленные таким образом биологические коэффициенты использованы исследователями для определения суммарного испарения за разные периоды вегетации, установления поливных режимов, агроклиматического районирования и пр.

Покажем возможность использования биоклиматического метода в таких расчетах прежде всего на примере автора этого метода — Алпатьева (табл. 1).

Как видно из табл. 1, расхождение между фактическими и вычисленными величинами испарения в большинстве случаев вполне удовлетворительное как в целом за вегетацию, так и за отдельные ее периоды.

В последние годы многочисленные последователи биоклиматического метода занялись его проверкой и определением возможности использования в различных почвенно-климатических условиях Советского Союза.

Так, Г. Г. Белобородова, проведя опыты на полях Института земледелия Казахской академии сельскохозяйственных наук и в колхозе им. Ленина Каскеленского района Алма-Атинской области, а также используя данные Гидрометслужбы, рассчитала коэффициенты биологических кривых для сахарной свеклы, кукурузы, картофеля, яровой пшеницы. На основании этих коэффициентов она определила потребность во влаге указанных культур для климатических условий предгорья Заилийского Алатау, а также проверила возможность определения режима орошения по биоклиматическому методу. В итоге этих

Таблица 1

Сравнение фактического и вычисленного суммарного испарения (мм)  
Культура — ячмень. Пушкинская база ВИР

Период наблюдений	Суммарное испарение		Примечание
	фактическое	вычисленное	
1950 г.			
16 V — 7 VI	26	40	Полив 9 VI — 50 мм
8 VI — 9 VI	5	5	
10 VI — 17 VII	113	108	Полив 23 VII — 50 мм
18 VII — 23 VII	20	18	
24 VII — 17 VIII	68	56	
16 V — 17 VIII	232	227	
1951 г.			
1 VI — 22 VI	60	62	Полив 26 VI — 65 мм
23 VI — 27 VII	101	108	
28 VII — 8 VIII	40	33	
9 VIII — 27 VIII	35	38	
1 VI — 27 VIII	236	241	
1952 г.			
30 V — 30 VI	51	80	Полив 30 VI — 70 мм
1 VII — 11 VII	54	53	Полив 27 VII — 65 мм
12 VII — 23 VII	25	33	
24 VII — 22 VIII	46	47	
30 V — 22 VIII	176	213	

Таблица 2

Сроки поливов кукурузы, установленные по влажности почвы  
и с помощью биологической кривой

Дата	Отклонение вычисленной влажности от фактической (% от сухой почвы)	Срок поливов		Отклонение (сутки)
		по влажности	по биологической кривой	
27 VII	11,2	21 V	20 V	1
8 VIII	0,1	28 VI	1 VII	3
16 VIII	0,9	30 VII	28 VII	2
28 VIII	0,8	15 VIII	13 VIII	2

исследований Белобородова [10] пришла к выводу о возможности использования биоклиматического метода для решения разных задач: расчета суммарного испарения различных сельско-

хозяйственных культур, установления сроков поливов, агроклиматической оценки территории.

И. А. Чхенкели, П. С. Сичинава, Д. И. Губеладзе [65] показали возможность применения биоклиматического метода для расчета суммарного испарения и назначения сроков полива кукурузы в условиях Восточной Грузии. В подтверждение этого приведем часть их расчетных данных (табл. 2).

Используя биоклиматический метод, Чхенкели произвел районирование оросительных норм и режимов орошения указанной территории для культуры кукурузы.

П. Г. Тузов в результате шестилетней работы установил коэффициенты биологической кривой для кукурузы в условиях правобережья р. Алазани и затем применил их для расчета влажности почвы и сроков полива в этом районе. Результаты его исследований частично приведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетное и фактическое водопотребление кукурузы (1959 г.)

Период вегетации	Число дней в периоде	Водопотребление (мм)	
		расчетное	фактическое (по влажности почвы)
22 IV—6 V	15	27	18
7 V—12 V	6	10	17
13 V—30 V	18	35	24
31 V—12 VI	13	22	27
13 VI—24 VI	12	33	57
25 VI—11 VII	17	73	57
12 VII—16 VII	5	29	18
17 VII—28 VII	12	44	44
29 VII—8 VIII	11	44	55
9 VIII—21 VII	13	68	70
22 VII—28 VIII	7	27	28
Сумма	—	412	415

Н. В. Данильченко [18] произвел сравнительную оценку определения суммарного водопотребления сельскохозяйственных культур методами теплового баланса, турбулентной диффузии, водного баланса и дефицита испаряемости. Согласно его данным, большей надежностью и точностью отличается биоклиматический метод. Для условий предгорной зоны юго-востока Казахстана Данильченко рассчитал биологические коэффициенты испарения для зерновых колосовых, кукурузы, сахарной свеклы, гороха. На основании этих коэффициентов им осуществлено районирование территории Алма-Атинской и Джамбульской областей по нормам орошения.

Ю. С. Мельник рассчитал биологическую кривую испарения подсолнечника для условий юго-восточного района Европейской территории Советского Союза. Выявленная им тесная связь между урожаем и влагообеспеченностью этой культуры позволила сделать вывод: «полученные коэффициенты биологической кривой могут быть использованы в практике агрометеорологического обслуживания для количественной оценки влагообеспеченности и условий формирования урожая подсолнечника» [40]. На основе этой связи он определил нормы водопотребления подсолнечника за вегетационный период применительно к почвенно-климатическим условиям Северного Кавказа и Поволжья.

Широко известны и используются на практике [26, 46] биологические коэффициенты испарения, предложенные для умеренной зоны А. В. Процеровым (зерновые), Б. Н. Пономаревым (картофель), О. М. Конторщиковой (сахарная свекла).

На Украине, в Херсонской области значительные исследования, связанные с биоклиматическим методом, проведены Д. А. Штойко [67, 68]. На основании многолетних наблюдений им определены биологические коэффициенты испарения для культур: озимой пшеницы, люцерны, гороха, картофеля весенней и летней посадок. Используя их, Штойко проверил возможность применения биоклиматического метода для расчета и корректировки сроков полива. По его данным, ошибка в определении срока очередного полива составляет 3—4 дня. Это дало основание Штойко рекомендовать биоклиматический метод как для прогнозирования поливов, так и «для проектного обоснования режима водопотребления сельскохозяйственных культур» [67].

Большая работа по развитию биоклиматического метода проведена С. М. Алпатьевым и рядом сотрудников Украинского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации (УкрНИИГиМ). Поставив специальные опыты, а также используя данные Гидрометслужбы и некоторые другие материалы, они рассчитали биологические коэффициенты испарения для большинства сельскохозяйственных культур степной зоны Украины и всего юга Европейской территории Советского Союза. В целях совмещения пофазных значений коэффициентов они впервые выразили вегетационные периоды нарастающей суммой температур с приведением их к 12-часовой длине светового дня.

На основе этих разработок С. М. Алпатьевым установлены режимы орошения сельскохозяйственных культур на годы разной обеспеченности осадков и дефицита водного баланса, составлены картограммы суммарного испарения по декадам вегетационного периода [6, 7, 8].

А. Р. Константинов, Н. И. Астахова и А. А. Левенко [33] предложили биологические кривые водопотребления для ряда культур: льна, клевера, проса, люцерны, кукурузы, яровой и озимой пшеницы. По их мнению, «биологические кривые водо-

потребления являются устойчивыми внешними характеристиками влияния биологических свойств растений на процесс их водопотребления при оптимальных влагозапасах». Авторы пришли к заключению, что методика расчета испарения по биологическим кривым проста, удобна и весьма перспективна.

Аналогичные исследования проведены в ряде зарубежных стран. Так, М. Пиха на основании рассчитанных им биологических коэффициентов определил потребность ряда культур во влаге по основным областям ЧССР для вероятностей превышения 1, 10, 25 и 50%. В 1962 и 1963 гг. он проверил возможность использования биоклиматического метода для установления сроков и норм полива раннего картофеля. Результаты проверки показали, что сроки поливов, установленные биоклиматическим методом и непосредственным определением влажности почвы, хорошо совпадали в течение обоих лет.

Д. Велев и Г. Марков [69] рассчитали биологические коэффициенты испарения для физико-географических условий Болгарии. На основании этих коэффициентов они определили оросительные нормы и поливные режимы основных сельскохозяйственных культур для лет разной обеспеченности осадков и дефицита упругости пара. Впоследствии ими на основе биоклиматического метода осуществлено водохозяйственное районирование территории Болгарии [70].

И. Делибалтов, И. Цонев и Х. Христов в Болгарии также подтвердили на практике возможность использования биоклиматического метода для установления сроков и норм поливов.

По данным В. С. Положая [45а], в Соединенных Штатах Америки для определения сроков и норм полива, помимо приборных измерений влажности почвы, в большой мере используется метод, основанный на измерении метеорологических показателей — дефицита упругости пара или относительной влажности воздуха вместе с температурой.

На основании вышесказанного можно заключить, что биоклиматический метод дает возможность рассчитывать суммарное испарение различных фитоценозов как в целом за вегетацию, так и на отдельных ее отрезках; это позволяет оценить динамику водопотребления фитоценозов в онтогенезе, выявить критические периоды их влагообеспеченности. Посредством биоклиматического метода можно ретроспективно рассчитывать водопотребление сельскохозяйственных культур за длинный ряд лет; это позволяет определить нормы водопотребления сельскохозяйственных растений, предельные отклонения от них, элементы векового хода водопотребления и цикличность водообеспеченности.

Как будет показано ниже, удовлетворительная связь между суммарным испарением за сутки и средним суточным значением дефицита упругости пара может быть использована как основа новой методики назначения сроков полива.

Учитывая положительные стороны биоклиматического метода и связанные с ним возможности, Научно-технический совет Министерства мелнорации и водного хозяйства СССР принял решение рекомендовать его в качестве расчетного.

Разумеется, метод не лишен недостатков, связанных главным образом с недостаточным уровнем его разработки. Прежде всего сюда следует отнести проблему зональности биологических кривых, проявляющуюся в резко контрастных климатических зонах. Это обстоятельство выдвигает на первый план задачу определения границ каждой зоны, в пределах которой биологические коэффициенты будут постоянными. Должны изменяться биологические коэффициенты и в пределах одной почвенно-климатической зоны, если резко изменяются условия погоды в период вегетации. Пока проблема возможной изменчивости коэффициентов для разных высот и разных типов почв не исследована.

## 2. Биологические коэффициенты испарения для климатических условий Северо-Запада

Используя метод А. М. Алпатьева, мы рассчитали биологические кривые испарения для сельскохозяйственных культур: картофеля среднепозднего, клевера красного одноукосного, клевера красного двухукосного, ржи озимой, овса. Расчет биологических коэффициентов произведен подекадно по формуле

$$k = E / \sum d. \quad (15)$$

где  $\sum d$  — сумма средних суточных дефицитов упругости водяного пара (мб),  $E$  — суммарное испарение сельскохозяйственной культуры, определяемое по формуле

$$E = W_{II} + X - W_K \pm B, \quad (16)$$

в которой  $W_{II}$  — запас влаги в метровом слое почвы в начале расчетного периода (мм),  $W_K$  — запас влаги в том же слое почвы в конце расчетного периода (мм),  $X$  — осадки (мм),  $B$  — влагообмен с нижележащими слоями почвы (мм).

Чтобы избежать определения влагообмена с нижележащими слоями почвы, нами в расчетах использованы наблюдения таких агрометеорологических станций, на которых в вегетационный период грунтовые воды находятся на глубине более 4 м (Белогорка, Пушкин, Боровичи). Возможная диффузия парообразной воды и передвижение пленочной влаги не учитывались, так как, по данным С. И. Харченко [61] и других исследователей, эти величины настолько малы, что пренебрежение ими не сказывается на результатах измерений. Случаи, для которых характерно значительное количество осадков, могущее привести к инфильтрации влаги, из обработки исключались. При выборе данных влагозапасов использовались такие периоды вегетации, когда увлажнение метрового слоя почвы было оптимальным (не менее 70%

полевой влагоемкости). В работе М. С. Кулика [35] показано, что «пересыхание верхнего пахотного слоя (0—20 см) оказывает заметное влияние на действие минеральных удобрений во все периоды развития сельскохозяйственных культур. Однако иссушение этого слоя в фазу выхода в трубку и колошения у зерновых, в период интенсивного роста корней у корнеплодов, развития клубней у картофеля, накануне выбрасывания метелки у кукурузы приводит к наиболее резкому снижению урожая». В связи с этим данные наблюдений с пересохшим верхним пахотным слоем нами из обработки также исключались, хотя в отдельных случаях общие влагозапасы метрового слоя почвы были близки к оптимальным.

Водопотребление культуры будет оптимальным, соответствующим теплоэнергетическим ресурсам атмосферы, если растения развиваются нормально, что в конечном итоге определяется величиной урожая. Поэтому в расчетах биологических коэффициентов использованы материалы лишь тех лет, когда урожай сельскохозяйственных культур были достаточно высокими (картофеля — не менее 200 ц/га, овса — не менее 20—25 ц/га, сена

Таблица 4

**Биологические коэффициенты для Северо-Запада Европейской территории СССР**

Месяц	Декада	Озимая рожь	Клевер одноукосный	Клевер двухукосный	Картофель среднепоздний	Овес
Май	1	0,40	0,39	0,41	—	—
	2	0,44	0,47	0,44	—	—
	3	0,57	0,51	0,50	—	0,54
Июнь	1	0,60	0,56	0,55	—	0,58
	2	0,65	0,60	0,59	0,48	0,63
	3	0,63	0,63	0,61	0,51	0,68
Июль	1	0,62	0,64	0,44	0,58	0,71
	2	0,60	0,49	0,51	0,65	0,67
	3	0,53	0,50	0,54	0,71	0,63
Август	1	0,47	0,51	0,57	0,73	0,60
	2	—	0,52	0,60	0,65	0,55
	3	—	0,55	0,61	0,59	0,51
Сентябрь	1	—	0,51	0,57	0,53	—
	2	—	—	—	—	—
Среднее		0,56	0,53	0,53	0,60	0,61

Примечание. Сорта: озимая рожь — сорт Вятка 1 и отчасти Вятка 2; клевер красный одноукосный — сорт Сиворичский 416; клевер красный двухукосный — местные сорта, культивируемые в Ленинградской и Новгородской областях; картофель — сорта Камераз, Берлихинген и Северная роза; овес — сорта Орел и Золотой дождь.

клевера — не менее 35—40 ц/га, ржи — не менее 20—25 ц/га). Рассчитанные таким образом биологические кривые, полученные путем осреднения частных значений подекадных коэффициентов за период времени не менее 5 лет, представлены в табл. 4.

Известно, что даже на Северо-Западе Европейской территории СССР климатические условия отдельных районов несколько отличаются друг от друга. Поэтому для использования биологических коэффициентов в районах с различным климатом, а также в связи с необходимостью сопоставления коэффициентов вегетационные периоды выражены нами также нарастающей суммой температур воздуха (табл. 5).

Таблица 5

**Биологические коэффициенты для Северо-Запада, соответствующие нарастающей сумме температур**

Сумма температур (°С)	Картофель	Овес	Клевер одноукосный	Рожь
0—100	0,50	0,55	0,40	0,40
100—200	0,54	0,59	0,47	0,47
200—300	0,59	0,63	0,51	0,57
300—400	0,63	0,66	0,55	0,59
400—500	0,68	0,69	0,58	0,63
500—600	0,71	0,71	0,60	0,64
600—700	0,73	0,69	0,62	0,62
700—800	0,72	0,66	0,63	0,62
800—900	0,69	0,64	0,49	0,61
900—1000	0,64	0,62	0,50	0,60
1000—1100	0,58	0,60	0,50	0,54
1100—1200	0,54	0,56	0,50	0,50
1200—1300	—	—	0,51	—
1300—1400	—	—	0,51	—
1400—1500	—	—	0,52	—
1500—1600	—	—	0,54	—
1600—1700	—	—	0,53	—

Указанные в таблице суммы температур определены для следующих интервалов времени: для овса сорта Золотой дождь — от всходов (25 мая) до восковой спелости (17 августа); для ржи сорта Вятка — от возобновления вегетации (28 апреля) до восковой спелости (29 июля); для картофеля среднепоздних сортов — от всходов (22 июня) до увядания ботвы (5 сентября); для клевера сорта Сиворицкий 416 — от возобновления вегетации (27 апреля) до конца августа.

Фенологические даты рассчитаны как средние из фенологических наблюдений агрометеорологических станций Ленинградской области: Белогорка, Волхов, Николаевское, Вишницы, Тихвин, Ефимовская, Будогощь, Кингисепп. При вычислении средних дат для каждой культуры использованы наблюдения не

менее 5 станций, причем каждая из них имела ряд не менее 12—20 лет. Сумма температур к концу определенного таким образом вегетационного периода округлена до 50° С.

Коэффициенты, рассчитанные нами для Северо-Запада, проверены тремя независимыми методами. В табл. 6 сопоставлены вычисленные по дефициту упругости пара (графа а) и измеренные по гидравлическому испарителю большой модели расходы влаги (графа б) для станции Валдай, показания которой к расчету биологических кривых привлекались лишь для луговой растительности. Следовательно, показания гидравлического испарителя можно считать независимыми при сравнении расходов влаги для ржи, овса, картофеля.

Прочерки в графах б (расход воды по гидравлическому испарителю) вызваны отсутствием (по различным причинам) наблюдений испарения по гидравлическому испарителю большой модели.

В 1954 г. фактическое испарение с овса определено по гидравлическому испарителю малой модели. Подекадные расчеты испарения по биологическим кривым (графа а) произведены без совмещения фаз развития растений.

В табл. 7 сопоставлены вычисленные по биоклиматическому методу и фактические расходы влаги для одной из станций, по которой рассчитывались биологические кривые. Фактические расходы определены для метрового слоя почвы методом водного баланса. Для сравнения взяты такие периоды вегетации, когда увлажнение почвы было оптимальным.

В период максимального развития растения и оптимального увлажнения почвы суммарное испарение с поля близко к испаряемости. В табл. 8 сравниваются нормы суммарного испарения, рассчитанные по биоклиматическому методу, и нормы испаряемости, определенные двумя методами: комплексным методом ГГО и методом турбулентной диффузии в варианте А. Р. Константинова. Испаряемость по методу Константинова рассчитана для площади 1 га.

Анализ приведенных сравнений дает возможность сделать вывод, что биологические коэффициенты, определенные нами для Северо-Запада, являются объективными.

Точность определения суммарного испарения по предложенным коэффициентам такова. Расчет водопотребления сельскохозяйственных культур за вегетацию по сравнению с эталоном дает ошибку не более  $\pm 15\%$ . Число измерений суммарного испарения за месяц для всех культур (см. табл. 6) составляет 33 (сюда входят и измерения испарения за две декады). Отсюда отклонение месячных величин испарения, рассчитанных по биологическим кривым, от эталона до 10% обеспечивается на 21%; до 20% — на 70% и до 25% — на 82%. Число измерений суммарного испарения всех культур за декаду в этой же таблице составляет 82. Отсюда отклонение расчетных декадных величин



Месяц	Декада	1957 г.			1961 г.			1960 г.			1954 г.			1956 г.		
		картофель			клеввер			осиная рожь			овес					
		а	б	а-б	а	б	а-б	а	б	а-б	а	б	а-б	а	б	а-б
Май	1	—	—	—	18	15	0	16	22	-6	—	—	—	—	—	—
	2	—	—	—	14	35	-1	32	38	-6	—	—	—	—	—	—
	3	—	—	—	27	68	-8	41	43	-2	—	—	—	—	—	—
	Сумма	—	—	—	59	109	-9	89	103	-14	—	—	—	—	—	—
Июнь	1	—	—	—	54	47	+7	—	—	—	—	—	—	—	—	+6
	2	21	21	0	40	36	+4	40	35	+5	25	22	27	20	28	-8
	3	14	23	-9	30	26	+4	24	29	-5	52	39	34	34	35	-1
	Сумма	35	44	-9	124	109	+15	64	64	0	77	61	81	81	84	-3
Июль	1	23	31	-8	30	23	+7	26	30	-4	47	44	41	45	4	-4
	2	48	49	-1	22	25	-3	—	—	—	33	31	29	33	4	-4
	3	39	45	-6	—	—	—	42	19	+23	29	21	33	40	7	-7
	Сумма	110	125	-15	52	48	+4	68	49	-19	109	96	103	118	15	-15
Август	1	21	29	-8	27	26	+1	26	16	+10	19	19	20	31	11	-11
	2	22	21	+1	12	16	+4	—	—	—	28	18	12	18	6	-6
	3	13	15	-2	12	23	-11	—	—	—	15	18	13	17	4	-4
	Сумма	56	65	-9	51	65	-14	26	16	+10	62	55	45	66	21	-21
Сумма	201	234	-33	286	290	-4	247	232	+15	248	212	229	268	39	-39	
Ошибка			-140%			-10%			+60%							-150%
																+170%

**Фактические и расчетные расходы воды**  
Станция Белогорка

Культура	Год	Период вегетации	Суммарный расход (мм)		Разность	
			фактиче- ский	расчетный	мм	%
Картофель Берли- хинген	1960	17 VI— 7 VIII	170	183	—13	—8
	1965	17 VI—17 VIII	162	180	—18	—10
Клевер красный	1957	7 V—27 VI	150	151	—1	0
	1958	17 V—27 VI	154	131	+23	+15
Овес Золотой дождь	1960	7 VI— 7 VIII	196	210	—14	—7
	1961	17 V—17 VIII	303	329	—26	—9

Таблица 8

**Нормы суммарного испарения и испаряемости**  
Станция Белогорка

Культура	Период вегетации	Суммарное испа- рение (мм/сутки)	Испаряемость (мм/сутки)	
			метод ГГО	метод Константинова
Картофель	Июль	4,0	3,8	4,2
Клевер красный	Июнь	3,6	3,9	4,2
Овес	Июль	4,1	3,8	4,2

испарения от эталона с ошибкой до 25% обеспечивается на 72%.

Таким образом, можно считать, что в условиях Северо-Запада биоклиматический метод дает достаточно удовлетворительные результаты в расчетах суммарного оптимального испарения за вегетацию, месяц, декаду.

Следует иметь в виду, что приведенные результаты сравнения будут лучшими, если учесть два обстоятельства. В исследуемые годы (см. табл. 6), несомненно, наблюдались засушливые периоды хотя бы в течение нескольких дней, что занижало величину измеренного испарения. Кроме того, в пасмурную и дождливую погоду, когда абсолютная величина суммарного испарения невелика, относительная ошибка расчетного испарения увеличивается, хотя для практики это не имеет существенного значения. Увеличение ошибки в таких случаях объясняется некоторым увеличением фактического испарения по сравнению с расчетным, что можно в принципе учесть, исследовав эту закономерность.

### 3. Зональность биологических кривых

Простота и достаточная точность биоклиматического метода привели к тому, что метод нашел широкое распространение как у нас в стране, так и за рубежом.

В табл. 9 представлены средние за вегетацию коэффициенты, предложенные разными авторами для территории Советского Союза, а также результаты аналогичных расчетов для некоторых зарубежных стран.

В целях сопоставимости все коэффициенты в таблице пересчитаны для суммы дефицитов упругости пара, выраженной в миллибарах.

Анализируя результаты таблицы, можно видеть, что даже в пределах Европейской территории Советского Союза биологические коэффициенты существенно отличаются друг от друга. Так, если на юге коэффициенты колеблются в пределах 0,35—0,48, то на Северо-Западе предел их изменений составляет 0,53—0,61 (Ленинградская область). В более низких широтах (Узбекистан, районы орошаемого земледелия) биологические коэффициенты понижаются до 0,22 (А. К. Абдулаев). Коэффициенты примерно того же порядка (или несколько большие) характерны для орошаемых районов Болгарии (0,25—0,35). Некоторое различие коэффициентов для одной почвенно-климатической зоны и одних и тех же культур следует объяснить несовершенством методики их определения (недостаточная точность вычисления влагозапасов почвы, разная методика учета осадков и пр.). Однако эти различия в данном случае не являются принципиальными. Существенно, что коэффициенты резко изменяются (от 0,2 до 0,6) при смене жаркого и сухого климата на прохладный и влажный. Таким образом, возникает проблема климатической, зональной изменчивости биологических коэффициентов. Эта важная проблема, к сожалению, в настоящее время не решена четко ни теоретически, ни практически.

А. М. Алпатьев считает, что «хотя коэффициенты биологической кривой для одного и того же вида и сорта растений относительно консервативны, тем не менее они носят зональный характер и должны коррелироваться при переходе от зоны к зоне» [5].

С. М. Алпатьев высказал мнение, что «пока нет достаточных оснований считать, что биологическая кривая одного и того же сорта культуры существенно изменится при выращивании культуры в разных зонах. Однако это не исключает необходимости проверки коэффициентов биологической кривой в резко различных условиях земледелия» [7].

Более категорично мнение Е. Н. Миняевой: «Ординаты биологической кривой для одних и тех же фаз развития культуры даже в различных климатических условиях не могут существенно отличаться друг от друга» [44]. И. А. Чхенкели, Д. Велев и

Средние за вегетацию биологические коэффициенты для различных культур

Район исследования	Картофель	Куркуза	Яровая пшеница	Овес	Ячмень	Хлопчатник	Трава	Озимая рожь	Озимая пшеница	Свекла	Автор
Юг Украины	0,40	0,39	—	—	0,42	—	0,48	—	0,47	0,39	Шгойко Д. А.
Юг ЕТС	0,37	0,37	0,38	—	—	—	—	—	0,43	0,42	Алпатыев С. М.
Западный Алтай	0,35	0,40	0,42	—	—	—	—	—	—	0,37	Белобородова Г. Г.
Центрально-черноземная зона	0,44	0,42	—	—	—	—	—	—	—	—	Клеценко А. Д.
Майкоп	—	0,41	—	—	—	—	—	—	—	—	Алпатыев А. М.
Краснодарский край	0,46	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Мельник Ю. С.
Болгария	—	0,25	—	0,35	0,35	—	0,35	—	—	0,35	Велев Д., Марков Г.
Узбекистан	—	—	—	—	—	0,22	—	—	—	—	Абдулаев А. К.
Грузия	—	0,41	—	—	—	—	—	—	—	—	Цхенкели И. А.
Ленинградская область	0,60	—	—	0,61	—	—	0,53	0,56	—	—	Струнинков Э. А.

Г. Марков придерживаются мнения о зональной изменчивости биологических коэффициентов.

Первая попытка показать территориальное распределение средних за вегетацию биологических коэффициентов испарения принадлежит Ю. Т. Карандееву [23]. Им впервые составлена картосхема изменчивости этих коэффициентов применительно к зерновым культурам для Европейской части Советского Союза. По данным Карандеева, биологические коэффициенты изменяются от 0,65 на Северо-Западе до 0,40 в южных районах. Однако в издаваемых в последние годы (1970—1974) агроклиматических справочниках «Агроклиматические ресурсы области» расчет испаряемости рекомендовано вести биоклиматическим методом с использованием постоянного коэффициента испарения (0,65) для всех климатических зон нашей страны (сумма дефицитов упругости пара в данном случае выражена в мм). Не касаясь пока теоретической стороны этого вопроса, покажем значимость проблемы в практических расчетах. Для этого сопоставим результаты вычисления водопотребления по коэффициентам различных авторов с величинами суммарного испарения, определенными каким-либо точным прибором. В качестве такого прибора (эталона) используем гидравлический испаритель большой модели, установленный на Валдае. Для сопоставления возьмем коэффициенты С. М. Алпатьева, разработанные в УкрНИИГиМ, и коэффициенты, рассчитанные нами для Северо-Запада.

Коэффициенты УкрНИИГиМ получены на основании специальных опытов, проверены в производственных условиях юга ЕТС и для этой зоны их следует считать объективными. Определенным указанием на их объективность является тот факт, что они не отличаются существенно от аналогичных коэффициентов других авторов для этой же климатической зоны (табл. 9).

В табл. 10 представлены расчеты водопотребления, произведенные по коэффициентам разных авторов, и суммарное испарение, определенное по эталону. Для сравнимости использованы годы хорошего увлажнения и культуры, однотипные или близкие друг другу. При сопоставлении можно исходить из следующего положения: если разница в расчетах испарения, определенного по разным коэффициентам, сравнительно с эталоном не превышает  $\pm 15\%$ , можно считать, что зональность биологических коэффициентов практического значения не имеет.

Анализ расчетов и изложенных выше материалов позволяет сделать следующие существенные выводы.

1. Положение А. М. Алпатьева о зональности биологических коэффициентов является правильным.

2. Зональность биологических коэффициентов имеет существенное практическое значение. Так, если для Северо-Запада ЕТС применять коэффициенты, разработанные для юга ЕТС,

## Сопоставление суммарного испарения, вычисленного по коэффициентам разных авторов, с эталоном

Станция Валдай

Культура	Период вегетации	Средний коэф- фициент	$\sum d$ (мм)	Суммарное испарение (мм)		Ошибка		Авторы коэффициентов
				по дан- ным ав- торов	эталон	мм	%	
1957 г.								
Картофель	10 VI—31 VIII	0,37	338	125	234	-109	-47	Алпатьев С. М.
Картофель	10 VI—31 VIII	0,60	338	303	234	-31	-13	Струнников Э. А.
1958 г.								
Яровая пше- нница	1 VI—31 VIII	0,38	358	136	268	-132	-49	Алпатьев С. М.
Яровой овес	1 VI—31 VIII	0,61	358	218	268	-50	-19	Струнников Э. А.
Яровой ячмень	1 VI—31 VIII	0,42	358	150	268	-118	-44	Штойко Д. А.

то ошибка для среднепозднего картофеля и яровых зерновых в расчетах водопотребления составит 45—50%.

3. Средние за вегетацию биологические коэффициенты для различных культур в условиях одной почвенно-климатической зоны меняются заметно и зависят от продолжительности вегетации культуры и расположения центра вегетации этой культуры относительно середины лета. Поэтому ошибки подобной величины (45—50%) будут иметь место и для других культур при соблюдении условий: период вегетации культуры по длине примерно равен периоду среднепозднего картофеля (яровых зерновых); в общем интервале теплого времени года период вегетации культуры располагается примерно симметрично периоду вегетации картофеля (яровых зерновых).

4. Во избежание указанных крупных ошибок расчет водопотребления по биологическим кривым следует производить применительно к тем почвенно-климатическим зонам, для которых они разработаны.

5. Если период вегетации культуры резко смещается от центра лета к весне или осени или охватывает значительные части этих сезонов, то по крайней мере для Северо-Запада достаточно заметно изменяется в сторону уменьшения средняя за вегетацию величина биологического коэффициента. Поэтому и величина ошибок здесь может быть иной. Примером такой культуры на Северо-Западе является клевер.

С теоретических позиций зональность биологических коэффициентов можно объяснить влиянием ряда нижеследующих физических и биологических факторов.

Под руководством А. Р. Константинова в 1963 г. в Херсонской области был проведен интересный эксперимент: исследовалась изменчивость испаряемости внутри травостоя орошаемой кукурузы в зависимости от степени сухости воздуха [32]. С этой целью специальными приборами, установленными на нескольких высотах в травостое, определялась средняя испаряемость травостоя  $E'$ . Испаряемость над травостоем  $E_0$  рассчитывалась по радиационному балансу исходя из равенства  $E_0 = R_0 : L$  (обозначения прежние). Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

Как следует из наблюдений, при малых средних суточных значениях дефицита упругости пара (порядка 3—4 мб) отношение испаряемости внутри травостоя к испаряемости над травостоем приближается к единице. Такие условия довольно часто наблюдаются на Северо-Западе при установившейся влажной погоде.

С увеличением дефицита упругости пара испаряемость внутри травостоя растет не столь быстро, как над ним. При средних суточных значениях дефицита упругости пара порядка 16—20 мб указанное соотношение испаряемостей составляет 0,3—0,4. Физически это означает, что в условиях сухого климата растения создают собственный смягченный фитоклимат, при котором испаряемость внутри травостоя меньше испаряемости вне его примерно в 1,5—2,0 раза.

Поскольку коэффициенты биологической кривой рассчитываются по формуле  $k = E' / \sum d$ , где  $\sum d$  определяется для стандартной высоты 2 м, то существенное уменьшение испаряемости травостоем в условиях более засушливого климата должно сопровождаться уменьшением биологических коэффициентов.

Определенным подтверждением указанной зависимости является рис. 8, на котором показана связь суточного испарения с дефицитом упругости пара. Степенная форма связи между этими величинами типа  $y = ax^m$  (при  $0 < m < 1$ ) подтверждает тот факт, что при условиях погоды, когда дефицит упругости пара незначителен, коэффициенты биологической кривой должны быть более аналогичных коэффициентов, рассчитанных для больших величин дефицита. Поскольку последний растет с уменьшением широты, в южных засушливых районах следует ожидать меньших средних значений биологических коэффициентов.

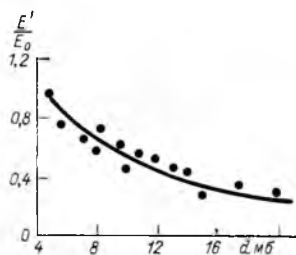


Рис. 2. Зависимость отношения средней испаряемости внутри травостоя  $E'$  к испаряемости над травостоем  $E_0$  от среднего суточного значения дефицита упругости водяного пара  $d$ .

Данная закономерность в наибольшей мере должна быть свойственна фитоклиматам, создаваемым высокорослыми культурами с большой растительной массой.

Изменчивость биологических коэффициентов связана также с изменчивостью такого процесса, как транспирация. Являясь по своей сущности физическим процессом, транспирация одновременно представляет собой сложное биологическое явление, которое в жизни растений играет значительную и многогранную роль. Известно, что в испарении растениями воды участвуют как устьица, так и остальная поверхность листьев. В последнем случае транспирацию называют кутикулярной. У большинства растений умеренных широт основная роль в испарении воды принадлежит устьицам. Интенсивность устьичной транспирации определяется рядом факторов: условиями освещения, влажностью воздуха, его температурой, содержанием воды в клетках мезофила и пр. При этом у разных растений ведущая роль в поведении устьиц принадлежит различным факторам. Эти особенности обусловлены прежде всего исторически сложившимися реакциями растений на определенное сочетание условий внешней среды. Из числа многих зависимостей важно выделить следующую: если у ксерофитов устьица остаются открытыми даже в самые жаркие часы дня, то у многих растений группы мезофитов в таких же условиях устьица, как правило, наглухо закрываются. Кутикулярная транспирация также зависит от ряда факторов (температуры листьев, влажности воздуха, скорости ветра, особенностей строения кутикулы и пр.). Однако и здесь физиологи отмечают способность растений в известной мере регулировать эту форму транспирации.

Рассматривая данный вопрос, важно выяснить, при каких критических условиях среды растения умеренных широт начинают уменьшать транспирацию. К сожалению, количественные характеристики подобного рода в физиологии разработаны слабо. Некоторые зарубежные исследователи считают, что устьица начинают закрываться хотя бы частично при испарении воды растениями более 4—5 мм в сутки. Существование этого предела Ф. Л. Милторп [43] объясняет тем, что корни и паренхима листьев не способны проводить воду со скоростью, достаточной для возмещения такой величины транспирации. Это, естественно, должно привести к снижению тургора листьев и закрытию устьиц хотя бы на часть дня. В связи с этим Милторп (при достижении транспирацией указанного предела) настоятельно рекомендует для изучения проблемы суммарного испарения исследовать поведение устьиц независимо от обеспеченности растений влагой.

Важно отметить, что в условиях Северо-Запада нашей страны транспирация более 4—5 мм в сутки наблюдается редко. Поэтому здесь (если указанный предел считать реальным) закрытие устьиц днем будет явлением нечастым. Наоборот, на юге

Европейской территории СССР закрытие устьиц днем в жаркую погоду должно быть явлением более обычным. Уменьшение транспирации в южных районах должно привести к уменьшению биологических коэффициентов испарения.

Следует отметить, что суждение о фитоценозах как биологически саморегулирующихся системах взаимодействующих растений ранее было высказано А. М. Алпатьевым. Им сформулировано важное положение, что «саморегуляция процесса испарения фитоценоза должна относительно мало или вовсе не проявляться в прохладном и влажном климате и быть вполне измерима и достаточно заметна в теплом или жарком сухом климате» [5].

Существенное значение при расчетах биологических коэффициентов испарения имеет испарение с поверхности почвы. Его особо важно учитывать для культур, не полностью закрывающих поверхность почвы, и для многих культур на конечных отрезках вегетации. Испарение с поверхности почвы в известной мере является функцией широты, что объяснимо следующим образом. Потеря воды путем испарения верхними горизонтами почвы обычно компенсируется подтоком ее из нижних, более влажных слоев. Если последний меньше скорости испарения, то испаряющая поверхность «заглубляется» в почву, в результате чего в ее верхней части образуется сухой слой. Водяной пар через него перемещается путем молекулярной диффузии, что приводит к резкому снижению скорости испарения. По данным Пенмана [43], при потенциальном испарении порядка 2,5 мм в сутки скорость испарения поддерживается на этом уровне, пока не испарится 20—25 мм. Если же возможное испарение достигает 5—6 мм в сутки, то скорость начинает уменьшаться уже после испарения первых 8—10 мм воды. В конечном итоге в отдельных случаях суммарное испарение с почвы при большой начальной скорости может быть даже меньше суммарного испарения в условиях малой начальной скорости.

Это означает, что в районах с большим потенциальным испарением расход воды из почвы зависит не столько от возможной скорости испарения, сколько от осадков, частоты их выпадения или числа поливов. Наоборот, в районах с низким потенциальным испарением расход влаги из почвы в первую очередь зависит от потенциального испарения.

Поскольку в южных районах нашей страны потенциальная скорость испарения летом существенно превышает указанный предел (2,5 мм в сутки), то здесь следует ожидать резкого уменьшения испарения с поверхности почвы спустя несколько дней после полива или выпадения осадков. Это, естественно, должно привести к уменьшению биологических коэффициентов испарения.

Важные доводы в обоснование нарушения формы связи между дефицитом упругости паров и испаряемостью при резкой

смене климата приводит М. И. Будыко. По его данным [14], в условиях влажного климата сохраняется прямая пропорциональность между степенью сухости воздуха и испаряемостью, вычисленной комплексным методом. Менее быстрый рост возможного испарения (испаряемости) по сравнению с ростом дефицита водяного пара в условиях жаркого и сухого климата Будыко объясняет двумя причинами: различием температуры испаряющей поверхности и воздуха и разностью дефицитов упругости пара в условиях орошения и реальных условиях сухого климата этого же района. Последнее обстоятельство заметно проявляется в тех случаях, когда испаряемость рассчитывают по показаниям гидрометстанций, расположенных вне орошаемых участков.

#### **4. Потребность культур во влаге и влагообеспеченность в условиях Северо-Запада**

Изучение потребности сельскохозяйственных культур во влаге является одной из важнейших задач агрометеорологии. Правильное определение этой величины является основой проектирования мелниротивных систем. В агрономической практике реальная и быстрая оценка потребности растений во влаге несложными методами окажет большую помощь работникам сельского хозяйства. Она позволит объективно оценить влагообеспеченность растений, ориентировочные виды на урожай, и как следствие этого, принять необходимые меры по регулированию водного режима почвы.

Оптимальное водопотребление (суммарное испарение), т. е. потребность сельскохозяйственных культур во влаге, зависит от многих факторов, главными из которых являются климатические и погодные условия, биологические особенности культур, уровень применяемой агротехники. Для определения потребности культур во влаге часто используют коэффициенты транспирации, водопотребления или данные опытов. В агрономической практике все еще оценивают влагообеспеченность различных фитоценозов простым сравнением количества осадков с их нормой.

Как показал А. М. Алпатьев [4, 5], численное значение транспирационного коэффициента даже для одного сорта растения может отклоняться от среднего на 200—300%. Эти отклонения могут быть вызваны изменением агротехники, условий погоды, уровнем урожая и другими причинами. Кроме того, при высоких урожаях испарение с поля определяется не величиной растительной массы, как при средних и низких урожаях, а теплоэнергетическими ресурсами атмосферы, если воды для растений достаточно [3, 30]. Важным возражением против использования коэффициентов транспирации и водопотребления является тот факт, что они не содержат в себе элемента времени, в резуль-

тате чего ими оценивается не абсолютная, а относительная потребность растений в воде. Использование этих коэффициентов не дает возможности проследить динамику водопотребления культуры в течение вегетационного сезона, что важно для установления правильного водного режима растений.

Бытующая в среде агрономов оценка влагообеспеченности путем сравнения осадков с их нормой явно недостаточна и методически неверна, так как в данном случае надо сопоставлять приход влаги с потребностью в ней.

Надежным путем установления потребности растений во влаге является экспериментальная работа и учет достижений практики непосредственно в районах проектирования мелнираций. Однако существующие на Северо-Западе научные учреждения работают еще мало в этом направлении и, главное, не охватывают всего многообразия условий территории, предназначенной для сельскохозяйственного использования.

Указанные существенные недостатки приводят к необходимости применения других методов расчета потребности растений во влаге. Предлагаемый нами для этой цели биоклиматический метод имеет ряд преимуществ. Обладая достаточной точностью, он дает возможность ретроспективно определять величину водопотребления сельскохозяйственных культур за длительные (десяtkи лет) периоды времени. Это позволяет вычислить как норму водопотребления, так и пределы отклонения от нее, вызванные контрастными условиями погоды. Коэффициенты испарения, составляющие биологическую кривую, дают возможность определять величину водопотребления на любом интервале вегетационного периода. Расчеты по методу просты, что важно при его использовании в агрономической практике.

Ниже приведены результаты расчетов норм водопотребления и некоторых других величин, определенных нами биоклиматическим методом для условий Северо-Запада. Чтобы получить возможно более полную картину, в расчетах использованы данные метеостанций, имеющих наиболее длинные ряды наблюдений.

### *Травы*

В табл. 11 приведены нормы потребности воды (оптимального водопотребления) клевера красного одноукосного, рассчитанные биоклиматическим методом по трем станциям Ленинградской области.

Из расчетов следует, что норма водопотребления красного клевера в условиях Северо-Запада за период май—август составляет 340—350 мм.

По многолетним фенологическим данным, укос красного одноукосного клевера на Северо-Западе производится в конце первой декады июля. Отсюда норма водопотребления клевера до первого укоса составит 210—220 мм. Наибольшее среднее суммарное испарение клеверного поля наблюдается в конце

Нормы водопотребления клевера красного одноукосного  
(мм за декаду)

Станция	Май			Июнь			Июль			Август			Сумма
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Кингисепп	17	24	30	34	35	43	38	30	28	26	22	23	350
Белогорка	16	23	30	34	35	40	42	30	30	25	23	22	350
Николаевское	18	25	32	34	35	39	38	27	26	25	24	23	346

июня — начале июля и составляет 3,8—4,2 мм в сутки. Этот период совпадает с большим напряжением метеорологических элементов и значительным развитием вегетативной массы клевера (фазы бутонизация — начало цветения). После укоса суммарное испарение клеверного поля заметно падает.

В табл. 6 биологическая кривая испарения, рассчитанная для клевера, была использована для определения испарения с луга, что дало удовлетворительные результаты. Следовательно, выводы для клевера вполне применимы и к луговой растительности. В подтверждение правильности полученных выводов приведем некоторые результаты других исследователей. По данным С. Ю. Шимановича, производившего исследование на Северо-Западе, клевер требователен к влаге и «хорошо растет там, где за лето выпадает не менее 250—300 мм осадков» [66]. В Литовской ССР коэффициент суммарного водопотребления трав, по данным П. К. Аксмайтиса [1], в среднем равен 50 м<sup>3</sup>/ц. Отсюда при урожае сена порядка 60—80 ц/га водопотребление трав за вегетацию составит в Литве 300—400 мм. Эксперименты в Центральной Европе показали, что настбищный травостой в июле при температуре воздуха 18°С расходует в сутки около 4,5 мм воды.

Значительный интерес представляет исследование векового хода водопотребления и водообеспеченности трав на Северо-Западе. Резкие колебания погоды в этом районе, по-видимому, должны обусловить изменчивость биологических коэффициентов испарения в наиболее контрастные годы. При этом логично допустить, что произрастание некоторых видов растений в условиях жаркого и сухого года на Северо-Западе равноценно переносу их в аналогичные условия юга Европейской территории СССР. В такой год на Северо-Западе следует ожидать физиологических реакций в растениях и физических процессов в фитоценозах, подобных тем, которые свойственны южным районам нашей страны (см. параграф 3 данной главы). Результатом этого должно явиться соответствующее погодным условиям юга уменьшение биологических коэффициентов испарения на

Северо-Западе. Проверим это предположение на данных контрольного 1972 г.

В табл. 12 приведены результаты проверки различных режимов орошения трав в опытном хозяйстве СевНИИГиМа, находящемся в пригороде Ленинграда. Четыре варианта опыта отличаются от контроля различными нормами полива (от 150 до 450 м<sup>3</sup>/га), числом поливов и, следовательно, величиной оросительной нормы (от 1630 до 2690 м<sup>3</sup>/га). Сравнительно с контролем все варианты полива в условиях жаркого и сухого лета 1972 г. дали значительную прибавку урожая (на 34 ц/га абсолютно сухого вещества в пределе). Однако наиболее рациональным был режим орошения во втором варианте, где на единицу урожая было затрачено наименьшее количество воды.

Таблица 12

**Урожай абсолютно сухого вещества травяного фитоценоза**

Пастбище опытного хозяйства СевНИИГиМа, 1972 г.

Варианты опыта	Режим орошения (м <sup>3</sup> /га)	Оросительная норма (м <sup>3</sup> /га)	Урожай по датам (ц/га)				Урожай за вегетацию (ц/га)
			6 VI	4 VII	9 VIII	26 IX	
1. Контроль (без орошения)	—	—	20,0	17,7	—	—	37,7
2. Полив нормой 150 м <sup>3</sup> /га	170 + 150 + 160 + + 50 + 200 + 250 + + 250 + 170 + + 180 + 180	1760	20,0	30,1	15,3	7,0	72,4
3. Полив нормой 300 м <sup>3</sup> /га	250 + 340 + 220 + + 330 + 210 + + 320 + 340	2010	20,0	30,9	11,8	7,7	70,4
4. Полив нормой 450 м <sup>3</sup> /га	540 + 360 + 390 + + 400 + 420 + 580	2690	20,0	32,3	12,5	7,7	72,5
5. Полив нормой 300 м <sup>3</sup> /га с учетом циклов стравливания	250 + 220 + 300 + + 350 + 350	1470	20,0	25,6	12,5	7,2	65,3

Если использовать в расчетах этот вариант опыта, то биологический коэффициент испарения за период 20 июня—10 сентября, т. е. за время после первого полива и за день до последнего полива (с учетом изменения влагозапасов почвы, орошения и осадков), составит 0,45. Сумма дефицитов упругости водяного пара за это время равна 670 мб, а за период май—август 837 мб. Такие величины недостатка насыщения воздуха парами характерны для обычной погоды юга Европейской части СССР, исключая район Поволжья.

Следовательно, уменьшение в 1972 г. на Северо-Западе коэффициента до 0,45, что обычно в условиях юга, является объективным.

Средние за вегетацию биологические коэффициенты испарения для условий влажных и прохладных лет приведены в табл. 13.

Таблица 13

**Биологические коэффициенты испарения для влажных лет**

Станция Валдай

Культура	Год	Период расчета	Суммарное испарение по гидравлическому испарителю (мм)	Сумма дефицитов упругости пара (мб)	Биологический коэффициент
Луговые ценозы	1952	Май—август	237	380	0,62
	1953	Июнь—август	255	396	0,64
Картофель	1957	Июнь—август	234	337	0,69
Овес	1958	Июнь—август	268	362	0,74
Клевер	1962	Май—август	340	452	0,75

Анализ этих данных дает возможность сделать вывод, что во влажные годы биологические коэффициенты возрастают, достигая, по-видимому, 0,65—0,75.

На рис. 3 показана изменчивость биологических коэффициентов испарения в условиях контрастных лет, как жарких, сухих, так и влажных, прохладных. Для построения графика использованы данные табл. 13. Сухой и жаркий тип года представлен одной точкой ( $k=0,45$ , 1972 г.). Точка 1 характеризует средние многолетние условия. Интерполяция полученной зависимости позволила выделить значения биологических коэффициентов с учетом «сухости» года (табл. 14). Температурный режим при этом учтен в скрытой форме через величину упругости насыщенного пара.

Полученные биологические коэффициенты и соответствующие им градации рассчитаны на небольшом экспериментальном материале, и поэтому, естественно, их следует считать ориентировочными.

Вековой ход водопотребления трав, определенный за период май—август с учетом изменчивости биологических коэффициентов испарения, и их влагообеспеченность показаны в табл. 15. Влагообеспеченность трав вычислена как разность между приходом влаги в виде осадков и расходом путем испарения (оптимальное водопотребление).

Норма водопотребления трав, рассчитанная на основе приведенных данных за 74 года, составила 344 мм, что соответствует ранее полученным результатам. Потребность трав во влаге

изменяется от 410 мм (1914 г.) до 275 мм (1903 г.). Таким образом, колебания потребности трав в воде за наиболее контрастные на Северо-Западе годы составляют относительно небольшую величину — 130—150 мм. В большей мере меняется влагообеспеченность трав: от недостатка влаги 230—250 мм за период май—август (1914, 1939, 1963 гг.) до избытка ее порядка 150—180 мм (1894, 1928 гг.). Более точной эта величина будет при условии, если учитывать продуктивные запасы влаги в почве (хотя бы сверх 70% полевой влагоемкости в метровом слое). Тогда для суглинистых почв недостаток влаги в наиболее жаркие и сухие годы на Северо-Западе за период май—август составит не более 180—200 мм.

Исследованиями СевНИИГНМ и ЛитНИИГНМ показано, что глубина расчетного орошаемого слоя при определении норм полива в условиях Северо-Запада для большинства культур должна составлять не более 30 см [64]. Тогда поливная норма для трав при нижней границе оптимальной влажности почвы 65—70% полевой влагоемкости для суглинистых почв будет равна 200—250 м<sup>3</sup>/га. Экономически эффективны для трав два полива и более. Если определять для Северо-Запада число лет, когда необходимы два полива и более, то из расчетных величин дефицита влаги в почве (табл. 15) необходимо дополнительно вычесть 40—50 мм. В количественном отношении число таких лет составит 30, а вероятность их повторения — 40%. Следовательно, в климатических условиях Северо-Запада почти каждый второй год травы нуждаются в двух поливах и более. Число лет с избыточным за вегетацию (май—август) увлажнением составляет гораздо меньшую величину — 8%.

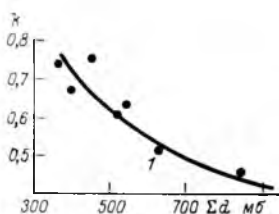


Рис. 3. Изменчивость среднего значения биологического коэффициента  $k$  в зависимости от суммы дефицита упругости водяного пара  $\Sigma d$ .

Таблица 14

**Биологические коэффициенты испарения  
в условиях контрастных лет**

Сумма $d$ (мм) за период май—август	Биологический коэффициент
> 850	0,45
849—650	0,50
649—550	0,55
549—500	0,60
499—450	0,65
< 450	0,70

Вековой ход водопотребления и влагообеспеченности трав  
Станция Николаевское, Ленинградская область

Год	Водопотребление (мм)	Влагообеспеченность (мм)	Год	Водопотребление (мм)	Влагообеспеченность (мм)
1893	301	—106	1933	343	—112
1894	313	+140	1934	315	—33
1895	318	—59	1936	376	—42
1896	326	—46	1937	341	+8
1897	328	—75	1938	410	—174
1898	304	—84	1939	352	—264
1899	350	—123	1940	400	—142
1900	413	—193	1944	352	—130
1903	275	+120	1945	346	+22
1904	296	—38	1946	335	—6
1905	326	—72	1947	356	—216
1906	345	+76	1948	328	—14
1907	335	—98	1949	334	—19
1908	332	—78	1950	342	—69
1909	323	—125	1951	389	—148
1911	378	—135	1952	367	—98
1912	397	—215	1953	340	—3
1913	326	—73	1954	348	—158
1914	366	—257	1955	360	—159
1915	323	—119	1956	354	—75
1916	312	—10	1957	315	+75
1917	338	—74	1958	352	—96
1918	333	—75	1959	370	—212
1919	308	—120	1960	331	—103
1920	385	—171	1961	342	+24
1921	315	—19	1962	312	+81
1922	309	—13	1963	380	—226
1923	302	—14	1964	348	—172
1924	317	—120	1965	340	—136
1925	346	+11	1966	339	+25
1926	312	—52	1967	314	—37
1927	326	+20	1968	313	—47
1928	279	+182	1969	354	—168
1929	375	—140	1970	346	—83
1930	331	—6	1971	356	—162
1931	300	—17	1972	334	—141
1932	350	—54	1973	323	—101

### Картофель

Нормы водопотребления картофеля среднепоздних сортов, рассчитанные по трем станциям Ленинградской области, приведены в табл. 16.

Расчеты показывают, что среднее многолетнее водопотребление картофеля среднепоздних сортов в условиях Севера-Запада за период 20 июня—10 сентября составляет 240—250 мм. В течение вегетации максимум суммарного испарения (3,5—4,0 мм

Нормы водопотребления картофеля (мм за декаду)

Станция	Июнь			Июль			Август			Сентябрь		Сумма
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
Николаевское	—	—	32	35	36	37	36	30	25	11	—	242
Белогорка	—	—	33	38	40	43	36	29	24	10	—	253
Кингисепп	—	—	35	35	40	39	37	28	25	10	—	249

в сутки) приходится на вторую и третью декады июля. Таким образом, для картофеля время наибольшего испарения не совпадает с критическим периодом этой культуры по отношению к воде.

Укажем некоторые данные других исследователей. В. Ф. Пушкарёв [47] на основе шестилетних опытов с картофелем сорта Лорх пришел к заключению, что в условиях Валдая водопотребление среднепозднего картофеля составляет в среднем за вегетацию 250 мм. Л. Г. Лорх, базируясь на своих богатых многолетних наблюдениях, указывает следующие примерные суммы осадков, необходимые для формирования среднего урожая картофеля сорта Лорх в Подмоскowie на суглинистых почвах: июнь — 70 мм, июль — 120 мм, август — 90 мм; в целом за вегетацию — 300 мм.

### Овес

В табл. 17 приведены нормы водопотребления этой культуры, рассчитанные биоклиматическим методом по трем станциям Ленинградской области. Период расчета: всходы (25 мая) — восковая спелость (17 августа).

Таблица 17

Нормы водопотребления овса (мм за декаду)

Сорт Золотой дождь

Станция	Май		Июнь			Июль			Август			Сумма
	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Кингисепп	—	14	35	37	46	43	41	35	30	16	—	297
Белогорка	—	14	35	37	43	47	42	38	29	16	—	300
Николаевское	—	15	35	37	41	43	38	33	29	18	—	289

В табл. 18 биологические коэффициенты испарения и норма водопотребления рассчитаны для межфазных периодов.

Фенологические данные определены по пяти станциям Северо-Запада: Белогорка, Волхов, Николаевское, Винницы, Тихвин. Период фенологических наблюдений на каждой из станций не менее 14 лет.

Таблица 18

**Биологические коэффициенты испарения и норма водопотребления овса за межфазные периоды**

Сорт Золотой дождь

Межфазные периоды	Коэффициент испарения $k$	$\Sigma d$ (мм)	Водопотребление (мм) за период	Число дней	Водопотребление (мм) за сутки
Всходы — 3-й лист	0,56	75	42	13	3,2
3-й лист — кущение	0,62	66	41	11	3,7
Кущение — выход в трубку	0,65	39	25	6	4,2
Выход в трубку — колошение	0,70	108	76	17	4,5
Колошение — цветение	0,67	55	37	9	4,1
Цветение — молочная спелость	0,63	55	35	11	3,2
Молочная спелость — восковая спелость	0,57	75	43	16	2,7
Сумма	—	—	299	83	—

Расчеты показывают, что в условиях Северо-Запада водопотребление овса сорта Золотой дождь за период вегетации всходы—восковая спелость составляет в среднем 290—300 мм. Наибольшее водопотребление приходится на межфазный период выход в трубку—колошение (25% всей суммы водопотребления). Интенсивность испарения в это время (конец июня—начало июля) достигает максимума—4,5 мм в сутки.

### Выводы

1. Особенностью климатических условий Северо-Запада является слабая связь температуры воздуха с суммарным испарением при оптимальном водном режиме почвы. Поэтому температура воздуха не может быть использована как надежный показатель теплоэнергетических ресурсов атмосферы в любые по погодным условиям годы.

2. С гораздо большей степенью надежности можно рекомендовать в качестве характеристик теплоэнергетических ресурсов атмосферы на Северо-Западе такие величины, как радиационный баланс, суммарную радиацию, влажность воздуха.

3. Увеличения тесноты связи с суточным испарением следует ожидать при использовании не средних суточных характеристик, а их экстремальных значений за день.

4. Рассчитанные биоклиматическим методом для условий Северо-Запада биологические коэффициенты испарения в среднем за вегетацию в зависимости от культуры изменяются заметно, от 0,55 до 0,61. Причинами изменения являются различная длина вегетационного периода, особенности расположения вегетации относительно центра лета, биология культур.

5. Зональность биологических кривых, обусловленная рядом физических и физиологических факторов, имеет существенное значение. Использование на Северо-Западе биологических коэффициентов, полученных для других почвенно-климатических зон, приводит к ошибкам в расчетах водопотребления до 40—50%. Следовательно, необходим расчет биологических кривых для различных почвенно-климатических зон.

6. В пределах одной почвенно-климатической зоны биологические коэффициенты заметно изменяются в резко контрастные по погодным условиям годы. На Северо-Западе отклонение биологических коэффициентов от их средних многолетних в такие годы достигает, по-видимому,  $\pm (0,10 \div 0,15)$ , что необходимо учитывать в водохозяйственных расчетах при использовании биоклиматического метода.

7. Оценка векового хода водопотребления и водообеспеченности трав показала, что в так называемой зоне избыточного увлажнения, к которой относится Северо-Запад, условия недостатка влаги за вегетацию (май—август) при глубоком залегании грунтовых вод возникают значительно чаще, чем избыток ее. Данный расчет произведен только для суглинистых почв.

8. В контрастные по погодным условиям годы избыток влаги для трав за вегетацию (май—август) достигает на Северо-Западе 150—180 мм, а недостаток — 230—250 мм (без учета влагозапасов почвы).

9. Существенная климатическая изменчивость влагообеспеченности растений на Северо-Западе объясняется прежде всего не колебаниями потребности растений во влаге в контрастные по погодным условиям годы, а более значительными изменениями в эти годы количества выпавших осадков.

## **ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТЬ И УРОЖАЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-ЗАПАДА**

Урожай любой сельскохозяйственной культуры определяется рядом факторов, к которым следует отнести температурный и водный режим, уровень минерального питания, условия перезимовки (для многолетних растений) и некоторые другие.

Начиная с 50-х годов нашего столетия для решения прикладных задач этого направления в работах советских агрометеорологов нашли широкое применение статистические методы. Наиболее часто используется классический регрессионный анализ, а также регрессионный анализ главных компонентов, метод разложения по собственным векторам и пр. В последнее время ряд исследователей [53] интенсивно трудится над проблемой построения комплексной динамической модели типа «погода—урожай». Для построения такой модели продукционного процесса наиболее перспективен подход, при котором структура модели должна определяться теоретическими положениями, а значения параметров — экспериментом.

Однако возможно построение многофакторных схем и менее сложными методами. Так, А. Р. Константинов предложил схему учета зависимости урожая от ряда факторов (температуры и влажности воздуха, уровня плодородия почвы, особенности агротехники и пр.) на основе метода последовательных графических приближений. Графический метод установления зависимости часто используется в агроклиматических расчетах, когда необходимо выявить характер связи функции с одной или двумя переменными. В нашей работе, когда поставлена несложная агроклиматическая задача — выявить общий и примерный для территории характер зависимости урожая от влагообеспеченности культур, для анализа данных использованы наиболее простые методы статистического анализа.

Практика показывает, что на урожай большинства культур в условиях Северо-Запада отрицательно влияют как недостаток, так и избыток влаги, однако количественно эти закономерности исследованы недостаточно. Наименее исследована проблема климатической обеспеченности урожая разной величины. Ниже предпринята попытка решить эту проблему с позиций влагообеспеченности для таких культур, как картофель, клевер, овес. Правильное решение этой проблемы представляет теоретический и практический интерес, поскольку на ее основе должны разрабатываться проекты водных мелиораций.

Для решения поставленной задачи использован биоклиматический метод, поскольку он позволяет ретроспективно за де-

сятки лет рассчитать водопотребление культур. С целью упрощения расчетов использованы постоянные биологические коэффициенты испарения, однако в данном случае это не имеет принципиального значения, ибо исследовались не абсолютные значения баланса влаги в почве, а разные урожаи, обеспеченные ими. Особенности поставленной задачи и обработки данных указывают на невозможность использования выявленных связей в конкретных случаях отдельных хозяйств.

## 1. Влагообеспеченность клевера и урожай

Для изучения этого вопроса нами использованы данные урожая сена клевера сортов Сиворицкий 416 и Суйдинец, полученные по наблюдениям госсортоучастков Валдай, Волосово, Бокситогорск. Эти сорта клевера, выведенные Северо-Западным научно-исследовательским институтом сельского хозяйства, высокоурожайны, районированы в ряде областей Северо-Запада и пока не имеют конкурентов [66]. Для указанных госсортоучастков характерны высокий фон агротехники, значительные дозы удобрений и достаточно глубокое залегание грунтовых вод в период вегетации. Данные об осадках и влажности воздуха отбирались нами исходя из следующих соображений. В ряде работ последних лет [42, 52] впервые теоретическим путем рассмотрена пространственная изменчивость таких метеорологических элементов, как осадки, температура воздуха, дефицит упругости пара и пр. О. Д. Сиротенко показал, что при экстраполяции декадных сумм осадков на расстояние 1 км средняя квадратическая ошибка составляет 23%. Поэтому нами приняты к обработке только данные об осадках, полученные на госсортоучастках.

Ю. С. Мельник и Г. В. Белухина [42] для исследования статистической структуры поля дефицита упругости пара использовали рекомендованные в теории автокорреляционные и структурные функции. Расчеты, произведенные ими на ЭВМ, показали малую пространственную изменчивость этой метеорологической характеристики. Так, средняя квадратическая ошибка экстраполяции на расстояние 50 км составляет всего 18% среднего значения дефицита упругости пара, что вполне допустимо в наших расчетах. Поэтому данные дефицита упругости водяного пара взяты нами на ближайших метеостанциях, расстояние до которых не превосходило 30 км.

Влагообеспеченность клевера определена нами как разность между осадками и потребностью его во влаге (оптимальным суммарным испарением).

Чтобы связь между урожаем клевера и влагообеспеченностью сделать по возможности однозначной, из материалов обработки исключались случаи (годы), когда на урожай влияли другие причины: неудовлетворительные условия зимовки,

засуха в предыдущий год, полегание покровной культуры, нарушения агротехники и пр. В этих же целях использовались данные урожая клевера одинакового периода развития (в абсолютном большинстве случаев второго года жизни), причем клевер культивировался примерно на одних и тех же типах суглинистых почв. Результаты расчетов представлены на рис. 4.

Анализ построения показывает, что на урожай клевера оказывает влияние как избыток, так и недостаток влаги, однако

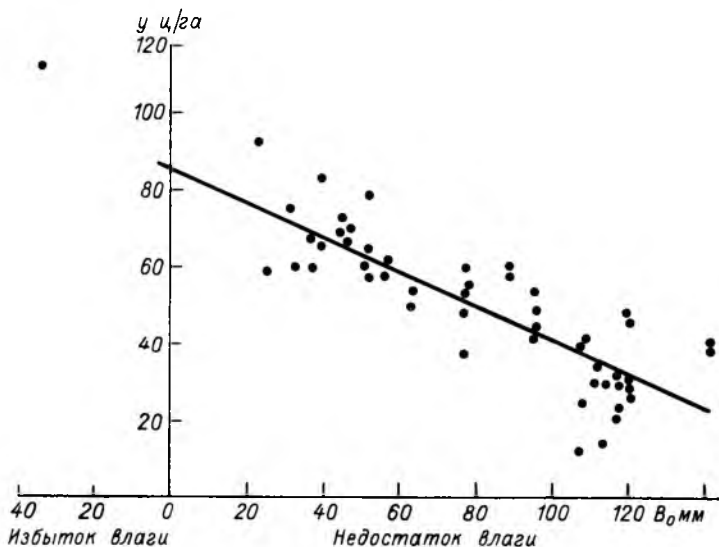


Рис. 4. Зависимость урожая клевера красного одноукосного  $y$  от влагообеспеченности  $V_0$  за период возобновление вегетации — первый укос.

количественно их связь с урожаем разная. Поскольку число наблюдений с избытком влаги невелико, статистическая обработка произведена только по наблюдениям связи урожая с недостатком влаги.

Искомое уравнение регрессии имеет вид

$$y = -0,43x + 84,5, \quad (17)$$

где  $y$  — урожай сена клевера в ц/га за период возобновление вегетации — первый укос;  $x$  — влагообеспеченность клевера за этот же период (мм). Коэффициент корреляции между указанными величинами, равный  $0,81 \pm 0,05$ , значим на 1%-ном уровне. Уравнение может быть использовано в пределах недостатка влаги 0—140 мм (за период возобновление вегетации — первый укос).

Произведенные расчеты позволяют сделать следующие выводы. Между урожаем клевера одноукосного и влагообеспечен-

ностью в условиях Северо-Запада существует тесная связь, характеризующаяся высоким коэффициентом корреляции ( $r = -0,81$ , нижний предел  $-0,76$ ). Количественно эта связь существенна: дефицит влаги в почве за период возобновление вегетации — укос порядка 100—120 мм ограничивает урожай сена клевера до 30—40 ц/га. При балансе влаги в почве, близком к нулю, урожай клевера повышается до 80—100 ц/га, т. е. в 2,5—3 раза. Важно, что даже незначительное превышение осадков над оптимальным испарением (20—30 мм) влияет положительно на урожай — он повышается до 100—110 ц/га.

Так как максимальные урожаи клевера получены при балансе влаги, близком к нулю, можно утверждать, что наивысшие урожаи клевера будут формироваться лишь тогда, когда влажность почвы на протяжении всего вегетационного периода будет на верхнем пределе оптимума, т. е. близкой к полевой влагоемкости. Поскольку такие условия даже на Северо-Западе при естественном режиме погоды создаются редко, так же редко следует ожидать здесь рекордных урожаев клевера. Это обстоятельство обуславливается другими причинами: плохой перезимовкой клевера, влиянием засушливых периодов предыдущих лет, недостаточными дозами удобрений, качеством семян.

Такой характер связи между урожаем трав и влагообеспеченностью подтверждается опытными данными. Так, на основании тщательно поставленных в условиях Валдайской научно-исследовательской гидрологической лаборатории опытов А. Р. Константинов пришел к выводу: «... что лишь при увлажнении почвы, достигающем до 85—90% полевой влагоемкости и выше, при отсутствии нарушения аэрации, испарение с луга достигает максимума. Таким образом, еще раз можно подчеркнуть, что даже в зоне избыточного увлажнения испарение с луга лишь в сравнительно редкие интервалы времени не ограничено влагозапасами почвы» [30].

По данным И. В. Ларина [36], многолетние травы хорошо развиваются в том случае, «если в почве содержится воды 80—85% полной влагоемкости». Примерно такую же величину оптимальной влажности для клевера называет П. А. Сергеев [50]. К. Куркин, анализируя советский и зарубежный опыт, заключил, что на высоком агрофоне даже такие мезофиты, как овсяница луговая и клевер красный, дают максимальный урожай при влажности почвы, равной 90% полной влагоемкости. Это означает, подчеркивает К. Куркин, что количество осадков, выпадающих в лесной зоне, явно недостаточно для получения здесь высоких урожаев трав.

Представляет большой интерес определить частоту получения на Северо-Западе урожаев разной величины, обусловленных погодой. Такой расчет позволит более правильно выбрать меры по обеспечению на Северо-Западе высоких и гарантированных

урожаев трав. Как следует из рис. 4, оптимальный режим увлажнения (в пределах  $\pm 50$  мм) способствует созданию на Северо-Западе высоких урожаев сена клевера (более 60 ц/га). При недостатке влаги за период возобновление вегетации — первый укос порядка 50—100 мм здесь формируются средние урожаи клевера (40—60 ц/га). И, наконец, при недостатке влаги за этот период более 100 мм урожаи клевера в этой зоне минимальны (20—40 ц/га). Такие условные градации использованы нами при расчете табл. 19.

Таблица 19

**Повторяемость различных градаций влагообеспеченности клевера**

Станция Николаевское

Повторяемость	Норма ( $\pm 50$ мм)	Недостаток влаги (мм)			Избыток влаги (мм)			Общая сумма
		51—100	> 100	сумма	51—100	> 100	сумма	
Число случаев	23	16	23	39	1	2	3	65
Проценты	35	25	35	60	2	3	5	100

Анализ расчетов показывает, что режим атмосферного увлажнения, способствующий получению высоких урожаев клевера (более 60 ц/га сена), создается на Северо-Западе редко — примерно каждый третий год. Обеспеченность средних (40—60 ц/га) и низких (20—40 ц/га) урожаев, обусловленная недостатком увлажнения, наоборот, велика — 60%. Примечательна значительная вероятность формирования низких урожаев клевера — 35%.

Указанные расчеты произведены в целом за период май—июнь, что примерно соответствует периоду возобновление вегетации — первый укос для одноукосных трав. Важно оценить, однако, вклад различных периодов в формирование урожая как одноукосных, так и многоукосных фитоценозов.

В табл. 20 показана повторяемость различных градаций влагообеспеченности, рассчитанная нами для каждого месяца весенне-летнего периода вегетации трав.

Анализируя результаты таблицы, можно видеть, что в мае в основном создается оптимальное увлажнение почвы. Возможность формирования значительных величин избытка и недостатка влаги невелика. Для июня характерен недостаток влаги: каждый второй или третий год в той или иной мере бывает засушливым. Данное обстоятельство должно быть особо знаменательным, если учесть, что этот месяц является основным периодом формирования урожая одноукосных трав. В июле все еще значительно сказывается недостаток влаги в почве; в августе, нао-

**Повторяемость различных градаций влагообеспеченности клевера  
по месяцам**

Станция Николаевское

Повторяемость	Месяц	Норма ( $\pm 50$ мм)	Избыток влаги (мм)			Недостаток влаги (мм)			Общая сумма
			51—100	/ 100	сумма	51—100	/ 100	сумма	
Число случаев	Май	55	5	—	5	5	—	5	65
Проценты		84	8	—	8	8	—	8	100
Число случаев	Июнь	37	1	1	2	20	6	26	65
Проценты		57	2	2	4	30	9	39	100
Число случаев	Июль	40	3	1	4	16	5	21	65
Проценты		61	5	2	7	24	8	32	100
Число случаев	Август	39	16	2	18	6	2	8	65
Проценты		60	25	3	28	9	3	12	100

борот, появляется возможность формирования некоторого избытка влаги. В целом эти закономерности позволяют уверенно утверждать, что на Северо-Западе для получения высоких и гарантированных урожаев трав необходимо предусматривать в основном полив. Разумеется, это не исключает возможности образования избытка влаги за какую-либо часть вегетации. Однако, как показано в табл. 19, вероятность таких явлений на Северо-Западе мала, и, что не менее важно, даже значительный избыток влаги (до 50 мм за май—июнь) не снижает резко урожай трав (рис. 4).

Физиологически это объясняется тем, что луговые травы являются более влаголюбивыми и менее требовательными к аэрации почвы, чем другие культуры. Так, по данным И. В. Ларина [36], красный клевер вполне удовлетворительно переносит затопление водами до 12—14 дней. Вместе с тем недостаток влаги в почве как в первый год жизни (под покровным растением), так и в последующее время вызывает значительное изреживание травостоя, вплоть до его полной гибели [50].

Указанные закономерности получены нами для условий глубокого залегания грунтовых вод. Если, однако, в районе исследования грунтовые воды располагаются близко к корнеобитаемому слою и даже частично захватывают его, то мелноративная система должна предусматривать двойное регулирование водного режима почвы (орошение и осушение).

Рассмотрим результаты исследований, проведенных в других районах зоны умеренного климата. По данным В. П. Коноплева [27], орошение трав в Европе получило широкое распространение после второй мировой войны. Так, если в Англии до 1945 г. травы почти не орошались, то уже в 1963 г. орошаемая площадь лугов и пастбищ достигла 42 000 га. К 1980 г. орошаемую площадь всех сельскохозяйственных культур в этой стране предполагается довести до 200 000 га.

В условиях Англии (по литературным источникам) потребность трав в воде колеблется в пределах 450—500 мм, в то время как среднее количество осадков за это же время (вегетацию) составляет 225—375 мм. Следовательно, расчетный недостаток влаги в климатических условиях Англии для трав составляет в среднем за вегетацию примерно 200 мм (без учета влагозапасов почвы).

В странах Скандинавии в настоящее время травы поливают главным образом на крупных фермах. Дальнейшее повышение продуктивности лугов и пастбищ здесь связывают с возможностями расширения орошения.

Таблица 21

**Экономическая эффективность орошения трав (по данным Л. А. Смирновой)**  
Ленинградская область

Показатель	Единицы измерения	1965 г.		1966 г.		1967 г.
		совхоз Федоровское	Белогорка (СЗНИИССХ)	совхоз Федоровское	совхоз Сельцо	Белогорка (СЗНИИССХ)
Оросительная норма	м <sup>3</sup>	900	685	300	500	1150
Поливы	число раз	3	2	1	2	3
Урожай зеленой массы						
с поливом	корм. ед.	6350	6260	4280	2590	6890
без полива	корм. ед.	3780	4550	3520	1350	4900
Прибавка урожая	корм. ед.	2570	1710	760	1240	1990
Стоимость прибавки урожая	руб.	180	120	53	83	139
Затраты на орошение	руб.	41	60	16	60	84
Чистый доход от орошения	руб.	139	60	37	27	56
Капитальные затраты	руб.	70	400	70	60	400
Коэффициент экономической эффективности	—	2,0	0,15	0,53	0,45	0,14
Срок окупаемости	лет	0,5	6,7	1,9	2,2	7,0

Исследования П. К. Аксомайтиса [1] показали, что в зависимости от обеспеченности осадками культурные пастбища Латвии нуждаются в орошении нормой 90—210 мм.

Рассмотрим по данным табл. 21 некоторые экономические показатели эффективности орошения трав в условиях Северо-Запада на примере ряда хозяйств Ленинградской области.

Принимая нормативный коэффициент экономической эффективности производственных фондов для пригородных хозяйств равным 0,15, можно считать, что орошение трав в условиях Северо-Запада является экономически оправданным.

Следует указать, что в табл. 21 расчет экономической эффективности орошения произведен исходя из прибавок урожая, не превышающих 2000 кормовых единиц. Как показали исследования Эстонской сельскохозяйственной академии, высокопродуктивные бобово-злаковые культурные пастбища на высоком агрофоне и при применении орошения обеспечивают увеличение урожая на 3000—4000 кормовых единиц [28]. Естественно, что в таких условиях экономический эффект орошения должен быть выше.

Приведенные примеры относятся к области орошения трав так называемыми чистыми водами. Однако, говоря об орошении лугов и пастбищ, нельзя не остановиться на проблеме использования сточных вод.

Продолжающаяся значительная индустриализация нашей страны и рост ее населения вызывают резкое увеличение объема сточных вод. Вред, приносимый ими, и трудности их очистки общезвестны. Многими исследованиями показано, что земельные поля орошения являются хорошим средством очистки сточных вод. Последние, неся с собой значительное число полезных элементов, могут являться прекрасными удобрениями. В настоящее время проблема использования сточных вод в сельском хозяйстве (на предмет их очистки и повышения урожая) сравнительно широко исследуется в Советском Союзе, Польской Народной Республике, Федеративной Республике Германии, Германской Демократической Республике и некоторых других странах. По мнению большинства специалистов, луга и пастбища являются тем незаменимым звеном, которое обеспечивает в системе севооборота правильное использование непрерывно поступающих (в течение года) сточных вод.

Следует указать, что при орошении сточными водами прежде всего может ставиться задача очистки этих вод. Однако если есть возможность правильного регулирования водного режима сельскохозяйственных растений, то экономический эффект таких систем также будет достаточно высок.

В качестве примера можно привести осушительно-орошительную систему в пойме реки Нер (Польская Народная Республика), посредством которой сточными водами орошается 4000 га трав и пастбищ.

При стоимости строительства этой системы порядка 61—65 тыс. золотых (на 1 га) срок окупаемости капиталовложений составил 10 лет. В отдельные годы урожай сена при поливе трав сточными водами достигал 150 ц/га.

В заключение кратко остановимся на перспективах развития луговодства в условиях Северо-Запада. Состоявшаяся в 1969 г. сессия ВАСХНИЛ была посвящена рассмотрению перспективного плана развития сельского хозяйства страны по природно-экономическим зонам. По существу, эта сессия подводила итоги выполнения решений майского (1966 г.) и октябрьского (1969 г.) Пленумов ЦК КПСС, которые, как известно, были посвящены задачам дальнейшего развития сельскохозяйственного производства нашей страны.

Как следует из доклада Н. П. Александрова [2], Северо-Запад Европейской территории СССР в первую очередь целесообразно специализировать на производстве молока и мяса [2]. Это направление обусловлено рядом факторов: большой сосредоточенностью промышленного производства, высокой плотностью населения, более благоприятными по сравнению с другими районами климатическими условиями. При этом уже на ближайшие годы перед Северо-Западом поставлена задача значительного увеличения производства молока и мяса.

## **2. Сравнительная оценка целесообразности выращивания различных типов клевера в условиях Северо-Запада**

По морфологическим и биологическим признакам красный клевер является сложной популяцией, представленной несколькими расами, или формами.

Культурные расы красного клевера, возделываемые в СССР, делят на два основных типа: позднеспелый, или одноукосный, и раннеспелый, или двуукосный клевер. В двуукосном клевере выделяют два подтипа: южный и северный. Северный двуукосный клевер распространен в Латвии, Литве, Эстонии, Псковской, Новгородской и Калининской областях. Одноукосный (позднеспелый клевер) культивируется во многих северо-западных, центральных и северо-восточных областях нечерноземной полосы, а также в Зауралье и Сибири [50]. В табл. 22 показано среднее многолетнее водопотребление различных типов клевера. Обращает на себя внимание тот факт, что за период май—июнь испарение с обоих типов клевера примерно одинаково (178 и 172 мм), хотя прирост растительной массы одноукосного и двуукосного клевера за этот период обычно разный. Данная закономерность пояснена многими исследователями [3, 5, 7, 30, 64]. Так, в частности, проведенные в последнее время расчеты В. В. Рахманова показали, что суммарное испарение вечнозеленых экваториальных и тропических лесов в бассейнах рек Амазонки и Меконг не только не превосходит суммарного испарения

соседних безлесных и малолесных территорий, покрытых дру- гими типами фитоценозов, но даже меньше его. Это дало Рах- манову основание еще раз подтвердить, что при определении суммарного водопотребления за основу следует брать метеоро- логические условия; такие факторы, как интенсивность накоп- ления органической массы и ряд других, существенного влия- ния на суммарное водопотребление не оказывают.

Т а б л и ц а 22

Норма водопотребления различных типов клевера

Культура	Май			Июнь			Июль			Август			Сумма	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	V-VI	V-VIII
Клевер одноуко- с- ный	16	23	30	34	35	40	42	30	30	25	23	22	178	350
Клевер двууко- с- ный	16	21	29	33	34	39	29	32	33	28	26	24	172	344

К аналогичному заключению несколько лет назад пришел Пенман [71]. По существу, такого же вывода придерживаются и современные физиологи-растениеводы, рассматривающие, вслед за К. А. Тимирязевым и Н. А. Максимовым, расход влаги растительностью как результат влияния главным образом внеш- них — метеорологических условий.

Данное обстоятельство имеет немаловажное практическое значение. Одноукосный клевер в условиях Северо-Запада до- стигает максимального развития в первой декаде июля и в это время его убирают на сено. Укос раннеспелого клевера на Се- веро-Западе производят дважды: в конце июня и в августе. При этом урожай клевера за два укоса обычно бывает при- мерно таким же, как одноукосного за один укос, или даже не- сколько ниже.

Ранее показана необходимость орошения трав как в июне, так и в июле и отчасти августе. Поскольку для получения вы- сокого урожая одноукосного клевера поливы необходимы только в июне, а для двуукосного — добавочно в июле и авгу- сте, можно считать в предварительном порядке, что одноуко- сный клевер на Северо-Западе экономически более выгоден.

### 3. Влагообеспеченность картофеля и урожай

Для выяснения характера связи между этими величинами использовались данные урожаяев госсортоучастков Луга, Бокси- тогорск, Боровичи и Новгород за последние 5—10 лет. Иссле- довались среднепоздние сорта картофеля: Камераз, Ора, Гатчинский, Столовый 19 и Берлихинген. Для того чтобы зависи-

мость между влагообеспеченностью и урожаем по возможности сделать однозначной, из обработки исключались случаи (годы) пониженного фона удобрений, поздних сроков сева, сильных заболеваний картофеля (преимущественно фитофторой).

При анализе исходных данных учитывались метеорологические показатели и прежде всего температурный режим. Так, из обработки исключались годы, когда температура воздуха

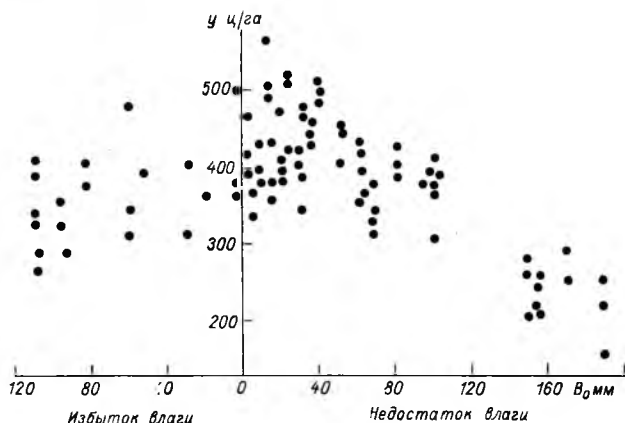


Рис. 5. Зависимость урожая картофеля среднепоздних сортов  $y$  от влагообеспеченности  $B_0$  за период бутонизация—увядание ботвы.

в период клубнеобразования опускалась ниже  $14^{\circ}\text{C}$ , что вызвало резкое ухудшение условий клубнеобразования. При обработке не учтены годы с ранними и сильными осенними заморозками порядка  $-2, -3^{\circ}\text{C}$ , которые, по И. А. Гольцберг, губительны для картофеля. Влагообеспеченность картофеля рассчитывалась по биоклиматическому методу как разность между осадками и потребностью культуры во влаге за период бутонизация—увядание ботвы.

Результаты расчетов представлены на рис. 5. Как следует из рисунка, между влагообеспеченностью картофеля и его урожаем на Северо-Западе существует параболическая связь. Довольно значительный разброс точек на рис. 5, видимо, следует объяснить недостаточным учетом температурных условий (в том числе в иные периоды вегетации), особенностями микроклимата полей, некоторым различием типов почв и другими неучтенными причинами.

Статистическая обработка наблюдений дала возможность получить искомое уравнение параболы:

$$y = -0,008x^2 + 0,31x + 416,0, \quad (18)$$

где  $y$  — урожай картофеля (ц/га);  $x$  — разность между осадками и потребностью картофеля во влаге за период бутонизация—увядание ботвы (мм).

Корреляционное отношение  $\eta$  между указанными величинами составляет  $0,81 \pm 0,03$ . Связь при  $n=85$  значима на 1%-ном уровне. Средняя ошибка уравнения криволинейной регрессии составляет 48,0 ц/га.

Высокое значение корреляционного отношения указывает на достаточно тесную связь между урожаем среднепоздних сортов картофеля и влагообеспеченностью в климатических условиях Северо-Запада. Связь количественно существенна: в резко контрастные по увлажнению годы урожай картофеля различается в 2—2,5 раза. Максимальный урожай 450—550 ц/га формируется в условиях, когда потребность картофеля во влаге удовлетворяется за счет осадков (рис. 5).

С целью выяснения вероятности различных урожаев, обусловленных режимом атмосферного увлажнения, рассчитана повторяемость градаций увлажнения. Последним соответствуют (рис. 5) следующие примерные урожаи: норма увлажнения (с пределами колебания  $\pm 50$  мм) — урожай более 400 ц/га; недостаток или избыток влаги 51—100 мм — урожай 300—400 ц/га; недостаток влаги более 100 мм — урожай 300—200 ц/га. Указанные пределы урожаев, получаемые на госсортоучастках, условно можно назвать высокими, средними и низкими. Расчет повторяемости градаций увлажнения, соответствующих определенным пределам урожая картофеля, произведен по станции Николаевское за 69 лет (табл. 23).

Таблица 23

**Повторяемость различных пределов атмосферного увлажнения почвы**  
Станция Николаевское

Повторяемость	Избыток влаги (мм)		Недостаток влаги (мм)		Норма увлажнения ( $\pm 50$ мм)	Общая сумма
	51—100	100	51—100	> 100		
Число случаев	10	—	11	11	37	69
Проценты	14	—	16	16	54	100

В качестве расчетного использован интервал времени половина июля—август, что для станции Николаевское примерно соответствует межфазному периоду картофеля бутонизация—увядание ботвы.

Как показывает анализ расчетов, естественный режим увлажнения на Северо-Западе при прочих факторах, находящихся в оптимуме, создает благоприятные условия для получения высоких урожаев картофеля не более чем в 50—55% лет. Каждый пятый-шестой год из-за резких изменений условий атмосферного увлажнения малоурожаен.

Данные выводы получены на основании допущения, что режим увлажнения картофеля в летнее время был равномерным, что в реальных условиях наблюдается далеко не всегда. В табл. 24 приведена повторяемость различных градаций увлажнения, рассчитанная по месяцам. Отклонения от нормы увлажнения в данном случае взяты меньшие, ибо картофель по сравнению с травами более резко реагирует на изменения водного режима.

Таблица 24

Повторяемость числа лет с различной влагообеспеченностью картофеля  
Станция Николаевское

Повторяемость	Месяц	Норма (±20 мм)	Избыток влаги (мм)					Недостаток влаги (мм)					Общая сумма
			21—50	51—75	76—100	^ 100	сумма	21—50	51—75	76—100	^ 100	сумма	
Число лет	Июль	16	7	2	—	1	10	19	5	10	9	43	69
Проценты		23	10	3	—	1	14	28	7	15	13	63	100
Число лет	Август	21	11	8	4	1	24	9	7	4	4	24	69
Проценты		30	16	12	6	2	36	13	10	6	5	34	100
Число лет	Сентябрь	45	7	2	—	—	9	—	—	—	—	—	54
Проценты		83	13	4	—	—	17	—	—	—	—	—	100

Из табл. 24 следует, что июль каждого второго года характеризуется недостатком влаги (обеспеченность недостатка влаги более 20 мм составляет 63%). Опасность избытка влаги в июле незначительна. Иное положение складывается в августе. В это время повторяемость недостатка и избытка влаги примерно одинакова (34—36%). Это означает, что август каждого третьего года в равной степени может быть засушливым или избыточно увлажненным. Недостаток влаги для картофеля в это время особо ощутим, ибо на этот период приходится наиболее ответственный этап развития картофеля—клубнеобразование. Избыток влаги также опасен для растущих клубней, ибо им в это время необходимо усиленное дыхание. Удушение растущих клубней и связанное с ним резкое уменьшение урожая наступает, как правило, через 1—2 дня после переувлажнения почвы. В сентябре водный режим становится более простым—нормальное увлажнение или некоторый излишек влаги. Последнее обстоятельство часто сказывается на условиях уборки картофеля, качестве его хранения.

Таким образом, для культуры картофеля в условиях Северо-Запада создается чрезвычайно сложная и динамичная картина водного режима. Она проявляется как в особенностях увлажнения отдельных периодов вегетации, так и в резких вариациях

режима увлажнения периода в целом. Необходимость регулирования водного режима почвы для картофеля в течение любого отрезка времени вегетации наглядно иллюстрируется экспериментом, проведенным в опытном хозяйстве СевНИИГиМа в засушливом 1964 г. В четырех вариантах опыта влажность почвы регулировалась следующим образом: 1-й вариант — полив по необходимости, срок очередного полива определялся по методике института; 2-й вариант — пропущен один полив; 3-й вариант — пропущено два полива; 4-й вариант — пропущено три полива. На контрольном поле картофель не поливался (табл. 25).

Таблица 25

Эффективность орошения картофеля в условиях засушливого 1964 г.

Вариант опыта	Срок полива						Урожай (ц/га)
	1 VII	7 VII	18 VII	28 VII	11 VIII	28 VIII	
1	+	+	+	+	+	+	350
2		+	+	+	+	+	340
3			+	+	+	+	323
4				+	+	+	309
5				Контроль			200

Результаты исследования указывают на необходимость орошения картофеля не только в критические периоды, но и в течение всей вегетации. Экономические показатели этого эксперимента характеризуются следующими данными.

В 1964 г. полив на полях института проводили короткоструйной дождевальной установкой КДУ-55, действующей от системы стационарных трубопроводов при норме полива 300 м<sup>3</sup>/га. Капитальные затраты на оросительную систему составили 400 руб/га; система была рассчитана на высокие значения гидромодуля (до 0,8 л/с·га). Амортизация и текущий ремонт оросительной системы составили 28 руб/га, стоимость каждого полива — 15,7 руб. С учетом этих показателей рассчитана эффективность орошения картофеля в 1964 г. по вариантам опыта; она приведена в табл. 26.

Из расчета следует, что орошение среднепозднего картофеля в засушливый год, подобный 1964, настолько эффективно, что система орошения окупается уже за одну вегетацию. Чистый доход в этот год в зависимости от числа поливов (урожая) составил 720—980 руб/га. Интересно, что повторяемость таких лет, рассчитанная по кривой обеспеченности дефицита влаги (см. главу 4, параграф 2), равна примерно 18—20%. По данным Н. В. Карповой [24 и др.], годовой чистый доход, получен-

## Эффективность орошения картофеля сорта Берлихинген

Опытное хозяйство СевНИИГиМа, 1964 г.

Вариант	Число поливов	Оросительная норма (м <sup>3</sup> /га)	Урожай (ц/га)	Прибавка урожая по отношению к контролю (ц/га)	Стоимость прибавки урожая (руб/га)	Дополнительные затраты (руб/га)		Чистый доход (руб/га)	Срок окупаемости капитальных затрат
						на уборку дополнительного урожая	на орошение		
1	6	1800	350	150	1200	97	122	985	до одного года
2	5	1500	340	140	1120	96	106	928	
3	4	1200	323	123	980	80	90	810	
4	3	900	309	109	870	71	75	724	

ный в среднем за 17 лет эксплуатации оросительных закрытых систем в Ленинградской области, составляет: для картофеля раннего 810 руб/га, для картофеля позднего 360 руб/га. Расчет произведен для средних удельных капитальных вложений 500 руб/га.

Особо следует отметить, что затраты труда на получение 1 ц/га картофеля и овощей, выращенных в Ленинградской области при орошении, в 8—20 раз менее аналогичных показателей, характерных для передовых хозяйств этой же области при отсутствии орошения. Последнее особо важно, если учесть напряженное положение с рабочей силой, складывающееся в летний период на Северо-Западе [64]. Таким образом, орошение картофеля на Северо-Западе обеспечивает не только повышение урожая, но и увеличивает выход единицы дополнительной продукции с минимальными затратами труда.

#### 4. Влагообеспеченность овса и урожай

Для выявления закономерности между этими величинами использованы данные урожая овса госсортоучастков Валдай, Пестово, Бокситогорск; исследуемые сорта: Золотой дождь, Орел, Льговский 1026, Хадмерслебнер А. Г. Влагообеспеченность рассчитана как разность между осадками и потребностью овса во влаге за период всходы—восковая спелость. Потребность культуры во влаге определялась по биологической кривой испарения. Чтобы связь между урожаем овса и влагообеспеченностью сделать по возможности однозначной, из материалов обработки исключались случаи (годы), когда на величину урожая влияли другие причины: изреженные всходы, градобитие, неравномерная заделка семян, поздний сев в переувлажненную

почву, заболевания и т. д. Результаты расчетов показаны на рис. 6. Анализ этого построения показывает, что между влагообеспеченностью овса и его урожаем в условиях Северо-Запада наблюдается параболическая связь. Некоторый разброс точек на графике следует объяснить влиянием ряда неучтенных факторов: температуры среды, характером выпадения осадков, особенностями микроклимата и пр. Статистическая обработка исходных данных (методом наименьших квадратов) дала возможность получить уравнение связи

$$y = -0,00043x^2 + 0,006x + 37,3, \quad (19)$$

где  $y$  — урожай овса (ц/га),  $x$  — разность осадков и суммарного оптимального испарения овса за период всходы — восковая спелость.

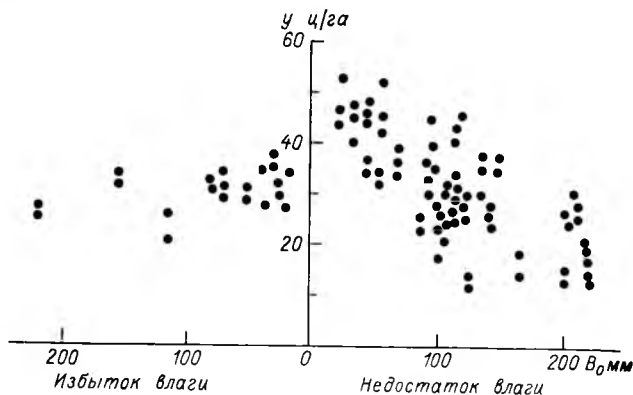


Рис. 6. Зависимость урожая овса  $y$  от влагообеспеченности  $B_0$  за период всходы—восковая спелость.

Объем выборки равен 90. Корреляционное отношение между указанными величинами равно  $0,76 \pm 0,06$ . Ошибка уравнения регрессии составляет 6,2 ц/га. Уравнение действительно в пределах разницы осадков и испарения 0—130 мм за период вегетации овса всходы—восковая спелость.

Проведенные расчеты позволяют выявить следующие основные закономерности. Высокое значение корреляционного отношения (0,76) с учетом его нижнего предела (0,70) указывает на наличие достаточно тесной связи между урожаем овса и влагообеспеченностью в условиях Северо-Запада. Максимальные урожай овса сортов Золотой дождь, Орел, Львовский 1026 и некоторых других при хорошей агротехнике, оптимальном количестве удобрений и влаги достигают в этой зоне 40—50 ц/га. В годы с минимальным увлажнением урожай овса на Северо-Западе понижается по сравнению с максимальным в 1,5—2,0 раза. Значительные величины недостатка и избытка влаги

примерно в одинаковой мере снижают урожай, однако в климатическом аспекте недостаток влаги для овса за период всходы—восковая спелость формируется чаще. В целом для получения высоких и гарантированных урожаев овса в этой зоне необходимо двустороннее регулирование водного режима почвы.

Аналогичные результаты получены в последнее время в производственных условиях и для других зерновых культур. Так, К. М. Пыйклик [48] на агрометеорологической станции Йыгева (Эстония) проводил в 1965—1966 гг. опыты с поливом ячменя. Результаты двухлетних исследований позволили ему сделать следующий вывод: «Опыт показывает, что влажность почвы в период кущение—колошение ячменя имеет большое значение для урожая. Недостаток ее является основной причиной значительного снижения урожая. Приrost его за счет полива в этот период обоих лет был значительным — свыше 20 ц/га».

А. Н. Полевой и Т. И. Мызина [45] для анализа влияния агрометеорологических факторов на формирование урожая овса применили компонентный анализ. Расчеты, произведенные ими, показали, что влажность почвы на фазу выметывание следует рассматривать как главный фактор, который определяет будущие условия формирования урожая.

В заключение остановимся на рентабельности орошения зерновых культур. Достаточная экономическая эффективность орошения зерновых культур в условиях юга ЕТС показана во многих работах. Однако дополнительный чистый доход от полива зерновых культур, как правило, меньше аналогичного дохода от полива технических культур, особенно овощных. При этом абсолютная величина дохода уменьшается с продвижением поливных зерновых культур к северу. На основании этого некоторые исследователи делают вывод, что зерновые культуры на поливе в условиях Северо-Запада возделывать нецелесообразно. Нам такой вывод кажется преждевременным и, что особо важно, неперспективным в силу следующих обстоятельств.

Значительный урожай зерновых культур в нашей стране надо выращивать ежегодно по той простой причине, что хлеб и фураж не могут быть заменены ничем другим (овощами, картофелем и пр.). По перспективным планам развития сельского хозяйства перед нечерноземной зоной уже на ближайшие годы поставлена задача существенного роста производства зерна [38]. Эту задачу в условиях Северо-Запада можно решить на основе двустороннего регулирования водного режима почвы. Важно, что в будущем экономическую эффективность поливных зерновых культур на Северо-Западе можно повысить за счет введения малополегаемых сортов, технического совершенствования мелноративных систем, повышения уровня агротехники. Выбор системы регулирования водного режима почвы, естественно, должен определяться экономическими расчетами.

## Выводы

1. Между урожаем и влагообеспеченностью сельскохозяйственных культур (картофеля, клевера, овса) в условиях Северо-Запада имеется тесная связь. В количественном отношении связь существенна: в резко контрастные по увлажнению годы при прочих факторах, находящихся в оптимальном диапазоне, урожай указанных культур понижается в 2,0—3,0 раза.

2. Урожай одноукосного клевера (трав) в основном определяется недостатком влаги за вегетацию (до первого укоса). Возможность значительного понижения урожая трав из-за избытка влаги в этот период мала (5%). Обеспеченность средних и низких урожаев клевера, обусловленных недостатком влаги за этот же период, велика (60%). В связи с этим на Северо-Западе (при условии глубокого залегания грунтовых вод) основной мерой для получения высоких и гарантированных урожаев трав должно стать орошение. Последнее в условиях Северо-Запада экономически рентабельно.

3. Для культуры картофеля благоприятный в целом режим увлажнения в период бутонизация—увядание ботвы создается не более чем в 50—55% лет. Резкое понижение урожая картофеля вызывается как избытком, так и недостатком влаги. Каждый четвертый (пятый) год из-за значительных изменений в условиях увлажнения является малоурожайным. Условия формирования высокого урожая осложняются чрезвычайно изменчивой и сложной картиной внутри вегетационного режима увлажнения. Высокие и гарантированные урожаи картофеля на Северо-Западе могут быть получены лишь при условии двустороннего регулирования водного режима почвы. Такие системы в этой зоне применительно к картофелю рентабельны.

4. Резко контрастные по увлажнению условия погоды на Северо-Западе снижают урожай овса по сравнению с максимальным в 1,5—2,0 раза. Сложный вопрос о практической возможности строительства систем регулирования водного режима почвы применительно к зерновым (яровым) культурам на Северо-Западе нуждается в дополнительном всестороннем и тщательном изучении. Необходимость последнего в значительной мере усиливается тем, что перспективным планом развития сельского хозяйства перед нечерноземной зоной РСФСР поставлена задача резкого увеличения производства зерна уже в ближайшее время.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОКЛИМАТИЧЕСКОГО МЕТОДА В МЕЛИОРАТИВНЫХ РАСЧЕТАХ

### 1. Определение критического периода вегетации

В настоящее время при составлении проектов оросительных систем проектировщики используют различные разработки. Несмотря на разные принципы, цель всех разработок одна: получить расчетную ординату гидромодуля, определяющую основные параметры оросительной системы. Эту величину целесообразно определять на основе динамики водопотребления сельскохозяйственных культур. Методику такого расчета на основе биологических кривых можно представить следующим образом.

Имея данные о севообороте на орошаемых землях, надо прежде всего рассчитать декадное водопотребление каждой орошаемой культуры для средних многолетних условий погоды. Затем для всех орошаемых культур (с учетом их долевого участия в севообороте) следует определить суммарный дефицит влаги в почве за каждую декаду. Критический (расчетный) период для определения максимальной ординаты гидромодуля нужно ограничить числом декад, в которые наблюдаются наибольшие декадные дефициты влаги.

В качестве примера определим критический период вегетации для полевого семипольного севооборота хозяйства, имеющего молочно-животноводческое направление развития с одновременным производством товарного картофеля. В условиях Северо-Запада один из севооборотов такого направления можно представить следующей схемой: 1 — пар, занят картофелем, горохом или вико-овсяной смесью на зеленый корм и силос; 2 — озимые + клевер с тимофеевкой; 3—4 — клевер с тимофеевкой; 5 — озимые; 6 — картофель; 7 — яровые зерновые. В данном севообороте культуры, идущие на зеленый корм и силос, а также озимые не нуждаются в орошении. Необходимость орошения остальных культур (картофеля, клевера, овса) показана выше. В табл. 27 представлен конечный расчет средних многолетних декадных величин дефицита влаги в почве для орошаемых культур указанного севооборота, произведенный с помощью биологических кривых.

Анализ табл. 27 показывает, что за расчетный интервал времени следует принять две декады — третью декаду июня и первую декаду июля, так как они характеризуются наибольшим и резко выделяющимся по сравнению с другими декадами дефицитом влаги в почве. Эта закономерность объясняется тем, что в указанный период (при относительно равномерном в мно-

Динамика средних многолетних декадных величин дефицита влаги почвы  
Станция Николаевское

Орошаемые культуры севооборота	Доля в сево- обороте	Дефицит влаги в почве (м <sup>3</sup> /га)								
		май			июнь			июль		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Клевер + тимофе- свка . . . . .	0,50	15	30	40	40	40	60	55	0	—
Картофель средне- поздний . . . . .	0,25	—	—	—	—	—	12	20	23	25
Овес . . . . .	0,25	—	—	23	23	25	35	40	27	20
Итого . . . . .	1,00	15	30	63	63	65	107	115	50	45

голетнем разрезе выпадении осадков) напряжение метеорологических элементов, определяющих испарение, наиболее велико. Кроме того, сельскохозяйственные культуры, составляющие орошаемую часть севооборота (клевер, овес), в это время достигают максимального развития, что предопределяет максимальную величину транспирации.

Аналогичные расчеты, проведенные по другим станциям (Белогорка Ленинградской области), выявили тот же критический период.

## 2. Расчет гидромодуля оросительной системы

Довольно долго в оросительных мелiorациях выбор расчетного года производился по 75%-ной обеспеченности осадками. Как показала практика орошения, выбор такого расчетного года не удовлетворяет условиям выращивания высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур. В связи с этим Научно-технический Совет Министерства мелiorации и водного хозяйства СССР в 1965 г. принял решение пересмотреть проектные поливные нормы по ЕТС в направлении их приближения к действительной потребности растений в воде, для чего в качестве расчетного было рекомендовано принимать год 95%-ной обеспеченности осадками.

Однако, как считает С. М. Алпатьев, «...одни осадки без учета условий испаряемости не могут служить основой для расчета режимов орошения сельскохозяйственных культур, поскольку, по существу своему, орошение связано с обеспеченностью водопотребления, которое в условиях достаточного увлажнения не коррелирует с осадками и обуславливается факторами испарения» [6]. Аналогичного мнения придерживаются и многие другие исследователи.

Поэтому, имея в виду сущность режима орошения, заключающуюся в ликвидации дефицита влаги в почве, необходимо

рассчитывать параметры оросительных систем исходя из обеспеченности этого показателя. В принципе такая методика была ранее использована С. И. Харченко и некоторыми другими исследователями. Для расчета недостатков влаги в почве и определения гидромодулей оросительных систем С. И. Харченко разработал метод, названный гидрометеорологическим. Свою методику он применил для расчета режима орошения юга Европейской части СССР [61].

Расчет гидромодуля оросительных систем можно произвести и на основе биоклиматического метода, что имеет свои преимущества. Приведем пример такого расчета по данным станции Белогорка, используя для этого ряд наблюдений за период 1937—1973 гг. (за исключением 1942—1943 гг.). Приняв структуру орошаемых площадей в соответствии с указанным в параграфе 1 севооборотом, определим по каждому году отдельно дефицит влаги за период третья декада июня—первая декада июля. Для расчета используем уравнение

$$M_6 = \sum d(k_1 a_1 + k_2 a_2 + k_3 a_3) - \sum P, \quad (20)$$

где  $M_6$  — дефицит влаги в почве в данном году за указанные две декады;  $\sum d$  — сумма средних суточных дефицитов упругости водяного пара (мб) за две декады;  $a_1, a_2, a_3$  — доля сельскохозяйственных культур (клевера, картофеля, овса) в севообороте;  $k_1, k_2, k_3$  — средние за две декады биологические коэффициенты испарения указанных культур;  $\sum P$  — сумма осадков за две декады.

Глубокое залегание грунтовых вод в районе Белогорки (более 4 м) позволило не учитывать подпитывание корнеобитаемого слоя за счет этого источника влаги. Годы, когда за указанный период наблюдался избыток влаги, из обработки исключались.

В итоге нами использован ряд наблюдений длиной в 26 лет. Определенные по формуле (20) данные дефицита влаги  $M_6$  за каждый год в убывающем порядке помещены в табл. 28.

Значения кривой обеспеченности дефицита влаги в почве вычислены по формуле

$$P = \frac{m - 0,25}{n + 0,50}, \quad (21)$$

где  $m$  — порядковый номер члена ряда,  $n$  — число лет,  $P$  — обеспеченность (%).

По полученным данным для Белогорки построена кривая обеспеченности дефицита влаги в почве (рис. 7).

При проектировании оросительной системы выбор той или иной расчетной обеспеченности дефицита влаги в почве производят на основе взаимного учета производственных требований, экономической целесообразности, уровня водообеспеченности, величины урожая и особенностей оросительной системы.

Расчет кривой обеспеченности дефицита влаги в почве  
Белогорка

Год	$M_6$	$m-0,25$	Обеспеченность (%)	Год	$M_6$	$m-0,25$	Обеспеченность (%)
1973	91	0,75	97	1965	33	13,75	48
1940	89	1,75	93	1963	33	14,75	44
1941	78	2,75	89	1939	32	15,75	40
1955	76	3,75	86	1953	31	16,75	37
1964	71	4,75	82	1958	23	17,75	33
1944	70	5,75	78	1969	20	18,75	29
1946	65	6,75	74	1967	17	19,75	24
1971	59	7,75	71	1949	16	20,75	22
1956	57	8,75	67	1957	15	21,75	18
1947	56	9,75	63	1948	14	22,75	14
1952	45	10,75	59	1970	13	23,75	10
1972	41	11,75	54	1966	7	24,74	6
1954	40	12,75	52	1959	5	25,75	3

В качестве примера по предложенной кривой ниже вычислены гидромодули оросительных систем для разных обеспеченностей дефицита влаги в почве. Поскольку за критический период взят интервал в две декады, расчетная ордината гидромодуля определена по формуле

$$q_p = \frac{M_p}{t \cdot 86,4},$$

где  $M_p$  — дефицит влаги данной обеспеченности, рассчитанный за две декады;  $t$  — интервал времени, равный 20 суткам.

1. Гидромодуль в случае 75%-ной обеспеченности дефицита влаги в почве:

$$q = \frac{610}{20 \cdot 86,4} = 0,35 \text{ л/с} \cdot \text{га.}$$

2. Гидромодуль в случае 90%-ной обеспеченности дефицита влаги в почве:

$$q = \frac{800}{20 \cdot 86,4} = 0,46 \text{ л/с} \cdot \text{га.}$$

3. Гидромодуль в случае 95%-ной обеспеченности влаги в почве:

$$q = \frac{900}{20 \cdot 86,4} = 0,52 \text{ л/с} \cdot \text{га.}$$

Если учесть уменьшение биологических коэффициентов испарения в резко засушливые годы (примерно на 25%, глава 2,

параграф 4), то гидромодуль в последнем случае составит 0,39 л/с·га.

Таким образом, при высокой обеспеченности дефицита водного баланса (95% и более) расчетный гидромодуль проектируемой оросительной системы в условиях Ленинградской области должен быть не менее 0,4 л/с·га. Это вычислено для условий круглосуточной работы оросительной системы. Если расчет производить исходя из обычной работы поливальщиков в одну продленную или две обычные смены (10 или 14 часов в сутки), то гидромодуль оросительных систем надо повысить до 0,7—0,9 л/с·га.

Правильный расчет гидромодуля оросительной системы принципиально важен, ибо им определяется как режим орошения, так и технические особенности оросительной системы (количество и мощность насосного и дождевального оборудования, диаметр трубопроводов и пр.).

В подтверждение сказанного приведем данные других исследователей. В СевНИИГиМе Д. Б. Циприсом и Н. В. Карповой сопоставлены экономические эффективности стационарных оросительных систем с различными гидромодулями (0,2; 0,4; 0,8 л/с·га). Расчеты показали, что наиболее благоприятный режим увлажнения почвы, соответствующий наибольшему урожаю овощных и картофеля, получается на оросительных системах с гидромодулем порядка 0,8 л/с·га [64]. Даже с учетом неполного использования

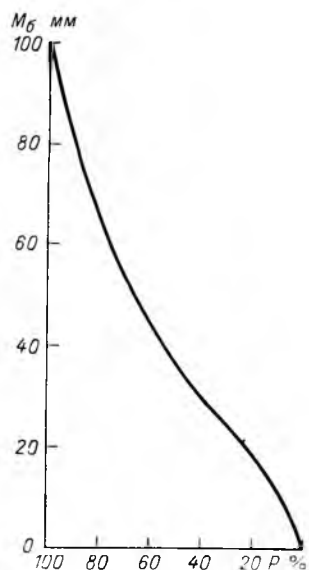


Рис. 7. Обеспеченность  $P$ % дефицита влаги в почве  $M_6$ .

оборудования (по организационным и прочим причинам) прибавка от урожая картофеля в овощных столь велика, что системы с гидромодулем 0,8 л/с·га окупаются за срок в пределах 3 лет. Чистый доход с учетом нормативной эффективности капиталовложений при гидромодуле 0,4 л/с·га значительно ниже, чем при гидромодуле 0,8 л/с·га (примерно на 300 руб/га).

Уместно напомнить, что, согласно «Указаниям по методике определения эффективности капиталовложений и новой техники в мелиорации» (Москва, ВНИИГиМ, 1961 г.), при оценке целесообразности капиталовложений достаточно сопоставить величину расчетных сроков окупаемости дополнительных капиталовложений с их нормативным значением. Последний показатель при орошении картофеля (и овощных) должен быть не более 4 лет.

Опыт проектирования оросительных систем в зарубежных странах подтверждает приведенные данные. Так, в Федератив-

ной Республике Германии при орошении дождеванием насосное оборудование рассчитывается на гидромодули:

- 1) для пастбищ 0,4—0,8 л/с·га;
- 2) для пропашных культур на легких почвах 0,4—0,6 л/с·га;
- 3) для овощных и технических культур 1,1—2,2 л/с·га.

В Польской Народной Республике при орошении пастбищ рекомендованные гидромодули оросительных систем составляют 0,6—1,2 л/с·га.

Приведенные выше расчеты дают возможность сделать следующий вывод: при высокой обеспеченности дефицита влаги в почве (95% и более), что соответствует высоким и устойчивым урожаям, расчетный гидромодуль проектируемых оросительных систем в пригородных хозяйствах Ленинграда должен быть не менее 0,7 л/с·га. Данная величина гидромодуля обусловлена физиологическими потребностями растений в воде в условиях Северо-Запада и экономически вполне оправдана.

### **3. Использование биологических кривых при определении сроков полива**

В главе 2 было указано, что различные исследователи (П. Тузов, Д. Штойко, М. Пиха) показали принципиальную возможность использования биоклиматического метода для определения сроков полива сельскохозяйственных культур. Точное определение оптимального суточного суммарного испарения посредством почвенных гидравлических испарителей открывает перспективы более объективного подхода к этой важной проблеме.

В табл. 29 сопоставляются расчеты сроков полива картофеля по двум методам: биоклиматическому и методу, разработанному в СевНИИГиМе [63, 64].

Очередность срока полива определялась по каждому из методов временем испарения поливной нормы (20 мм) с учетом выпавших осадков. Суммарное ежесуточное испарение по биоклиматическому методу рассчитывалось по графику зависимости ежесуточного суммарного испарения картофеля от дефицита упругости пара (рис. 8). При построении графика использовались сопряженные данные влажного 1957 г., охватывающие период вегетации всходы—увядание ботвы (3 июня—20 августа). На Валдае в 1957 г. за период май—август выпало 374 мм осадков при норме 295 мм. Так как осадки в этот период выпадали относительно равномерно, можно считать, что абсолютное большинство измерений суммарного испарения по гидравлическому испарителю большой модели было произведено в условиях оптимального увлажнения почвы. Поэтому из всей серии наблюдений нами исключено лишь семь наблюдений, произведенных в засушливые периоды. Удовлетворительная связь между средними суточными значениями дефицита упругости пара и

## Сопоставление сроков полива, рассчитанных по биоклиматическому методу и методу СевНИИГиМа

Станция Белогорка Ленинградской области

Год	Метод расчета	Даты полива			Общее число поливов
		июнь	июль	август	
1956	Биоклиматический	7, 12, 17, 21, 27	4, 13, 17, 31	—	9
	СевНИИГиМа	6, 11, 15, 20, 26	3, 7, 16, 21	2	10
1957	Биоклиматический	18, 28	13, 17	—	4
	СевНИИГиМа	14, 28	13, 18	—	4
1958	Биоклиматический	16, 21	6, 15	—	4
	СевНИИГиМа	18, 27	2, 7, 13	—	5
1963	Биоклиматический	8, 18, 23, 29	6, 19, 24, 27, 31	3, 8	11
	СевНИИГиМа	7, 12, 20, 26	6, 17, 20, 25, 28	1, 4, 9	12
1964	Биоклиматический	12, 17, 22, 26, 30	5, 13, 17, 21, 25	14, 20	12
	СевНИИГиМа	13, 17, 24, 28	2, 12, 16, 19, 23, 27	16, 21	12
1965	Биоклиматический	2, 8, 16, 24	7, 16, 20	24, 28	6
	СевНИИГиМа	5, 9, 16, 25	11, 17, 21	16, 23, 27	7

суточными величинами испарения подтверждается довольно высоким коэффициентом корреляции (0,74). В математической форме связь между указанными величинами выражается равенством

$$y = 1,12x^{0,70}, \quad (22)$$

где  $y$  — суммарное оптимальное испарение за сутки,  $x$  — среднее суточное значение дефицита упругости пара.

В основу расчетной методики СевНИИГиМа по определению сроков полива положена формула

$$T = t' + 0,2\Delta h - 0,2\Delta t, \quad (23)$$

где  $T$  — межполивной интервал (сутки),  $t'$  — основной межполивной интервал (6 дней);  $\Delta h$  и  $\Delta t$  — превышение осадков над слоем 20 мм в сутки и температуры воздуха над средней суточной величиной  $17,5^\circ\text{C}$ .

Методика СевНИИГиМа проверена экспериментальным путем в Ленинградской области, Латвии и некоторых других рай-

онах. Положительные результаты проверки дали возможность ее автору Д. Б. Ципрису рекомендовать методику как для оперативного назначения сроков поливов, так и для гидротехнического проектирования.

В табл. 29 расчет сроков полива по методике СевНИИГиМ произведен специалистами этого института с помощью ЭВМ «Наирн». Анализ таблицы показывает, что примерно в 85% расчетные сроки поливов, определенные обоими методами, не отличаются более чем на 3 дня, что допустимо для практики. В четырех годах из шести метод СевНИИГиМа дает на 1 полив больше независимо от общей увлажненности года (последняя

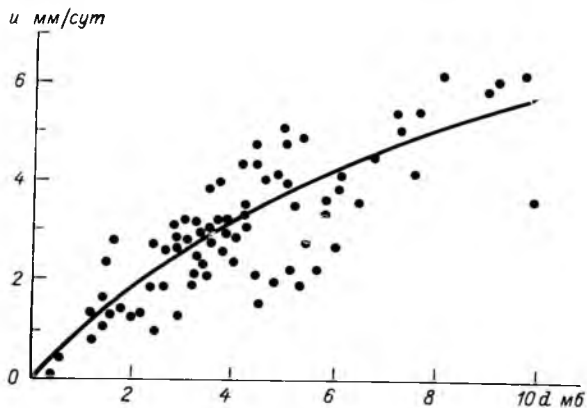


Рис. 8. Связь суммарного испарения картофеля  $u$  за сутки со средним суточным дефицитом упругости водяного пара  $d$ .

графа таблицы). Причины этого расхождения требуют детального анализа водного баланса поля по компонентам, однако вне зависимости от него общий удовлетворительный результат сравнения очевиден. В будущем необходимо построение подобного рода биологических кривых для разных культур, их детальная проверка и уточнение в определении сроков полива непосредственно на практике.

## Выводы

1. За расчетный (критический) период вегетации при проектировании оросительных систем на Северо-Западе следует принимать две декады — третью декаду июня и первую декаду июля, так как они характеризуются наибольшими и резко выделяющимися (по сравнению с другими) дефицитами влаги в почве.

2. При высокой обеспеченности дефицита влаги в почве (95% и более) расчетный гидромодуль проектируемых

оросительных систем в пригородных хозяйствах Ленинграда и Ленинградской области должен быть не менее  $0,7 \text{ л/с} \cdot \text{га}$ .

3. Связи суточных величин испарения сельскохозяйственных культур со средними суточными значениями дефицита упругости пара, определенными по точным гидравлическим испарителям, являются своеобразными модификациями биологических кривых, предложенных ранее А. М. Алпатьевым. В перспективе они могут быть использованы как основа новой методики расчета сроков полива сельскохозяйственных культур.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксомайтис П. К. Исследование вопросов дождевания на осушенных минеральных почвах Литовской ССР.— Автореф. канд. дисс. Каунас, 1967. 22 с.
2. Александров Н. П. Предложения о направлениях развития сельского хозяйства по природно-экономическим зонам страны на ближайшие 10—15 лет.— «Вест. с.-х. науки», 1969, № 5, с. 18—26.
3. Алпатыев А. М. Влагооборот культурных растений. Л., Гидрометеониздат, 1954. 248 с.
4. Алпатыев А. М. О биоклиматической классификации растений по требованию к воде.— «Метеорология и гидрология», 1967, № 2, с. 51—56.
5. Алпатыев А. М. Влагообороты в природе и их преобразования. Л., Гидрометеониздат, 1969. 323 с.
6. Алпатыев С. М. Поливной режим сельскохозяйственных культур в южной части Украины.— Автореф. докт. дисс. Киев, 1965. 88 с.
7. Алпатыев С. М. Режим орошения сельскохозяйственных культур для юга Европейской территории Союза. Киев, 1966. 109 с.
8. Алпатыев С. М. К вопросу о расчетной обеспеченности дефицита водного баланса при проектировании орошения.— «Водное хозяйство», 1965, вып. 2, с. 3—17.
9. Атлас теплового баланса земной поверхности. Под ред. М. И. Будыко. Л., Гидрометеониздат, 1963.
10. Белобородова Г. Г. Водопотребление и агрометеорологическое обоснование поливных режимов сельскохозяйственных культур на юго-востоке Казахстана.— «Метеорология и гидрология», 1961, № 12, с. 31—33.
11. Брукс К., Карузерс Н. Применение статистических методов в метеорологии. Л., Гидрометеониздат, 1963. 416 с.
12. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Л., Гидрометеониздат, 1956. 255 с.
13. Будыко М. И. Антропогенные влияния на климат и пути его преобразования.— В кн.: Природа и общество. М., «Наука», 1968, с. 254—258.
14. Будыко М. И. Климат и жизнь. Л., Гидрометеониздат, 1971. 472 с.
15. Герасимов И. П. Дальнейшие задачи географии в системе наук о Земле и ближайшие перспективы развития новых научных направлений.— В кн.: Развитие наук о Земле в СССР. М., «Наука», 1967, с. 441—454.
16. Герасимов И. П. Вступительное слово.— В кн.: Природа и общество. М., «Наука», 1968, с. 7—10.
17. Давитая Ф. Ф., Мельник Ю. С. Проблема прогноза испаряемости и оросительных норм. Л., Гидрометеониздат, 1970. 72 с.
18. Данильченко Н. В. Методы определения суммарного водопотребления и расчет поливных режимов сельскохозяйственных культур.— Автореф. канд. дисс. М., 1965. 29 с.
19. Дзердзеевский Б. Л. О преобразовании климата.— В кн.: Природа и общество. М., «Наука», 1968, с. 235—254.
20. Доскач А. Г. К вопросу о роли географической науки в разработке проблемы взаимодействия природы и общества.— В кн.: Природа и общество. М., «Наука», 1968, с. 58—69.

21. Зубенок Л. И. Характеристика увлажнения территории Советского Союза.— «Труды ГГО», 1965, вып. 179, с. 161—171.
22. Зубенок Л. И. Мировые карты испаряемости.— «Труды ГГО», 1965, вып. 179, с. 144—160.
23. Карандеев Ю. Т. Об определении потребности в воде культурных фитоценозов на Русской равнине.— «Изв. Географического общества СССР», 1971, т. 103, с. 69—72.
24. Карпова Н. В. Эффективность орошения в северо-западной зоне РСФСР.— «Труды СевНИИГиМ», 1966, вып. 25, с. 200—213.
25. Клещенко А. Д. Зависимость суммарного испарения пропашных культур от агрометеорологических условий.— «Труды ГМЦ», 1969, вып. 52, с. 80—96.
26. Конторщикова О. М. Агрометеорологические показатели условий формирования урожая сахарной свеклы в нечерноземной полосе Европейской территории СССР.— «Труды ЦИП», 1965, вып. 145, с. 147—157.
27. Коноплев В. П. Орошение сенокосов и пастбищ в Англии.— «Сельское хозяйство за рубежом», 1965, № 8, с. 30—37.
28. Козлов Н. Н. Сельскохозяйственный вуз и производство.— «Вест. с.-х. науки», 1969, № 9, с. 115—117.
29. Константинов А. Р. Испарение в природе. Л., Гидрометеониздат, 1963. 590 с.
30. Константинов А. Р., Сакали Л. И. и др. Тепловой и водный режим Украины. Л., Гидрометеониздат, 1966. 592 с.
31. Константинов А. Р. Методы расчета испарения по гидрометеорологическим данным.— «Труды УкрНИГМИ», 1967, вып. 68, с. 87—119.
32. Константинов А. Р., Филиппенко Л. А. Некоторые вопросы методики расчета норм и сроков полива по метеорологическим данным.— «Труды УкрНИГМИ», 1967, вып. 71, с. 12—28.
33. Константинов А. Р., Астахова Н. И., Левенко А. А. Методы расчета испарения с сельскохозяйственных полей. Л., Гидрометеониздат, 1971. 126 с.
34. Кузьмин П. П. Теоретическая схема оценки ошибок расчета испарения с поверхности суши.— В кн.: Материалы Междуведомственного совещания по проблеме изучения и обоснования методом расчета испарения с водной поверхности и суши. Валдай, 1966, с. 271—283.
35. Кулик М. С. Погода и минеральные удобрения. Л., Гидрометеониздат, 1966. 139 с.
36. Ларин И. В. Луговое хозяйство и пастбищное хозяйство. Л., «Колос», 1969. 549 с.
37. Леонов Е. А., Леонова Н. Е. Испытание гидрометеорологического метода определения поливного режима пропашных культур.— «Труды ГГО», 1971, вып. 170, с. 3—50.
38. Лобанов П. П. Решения Октябрьского Пленума ЦК КПСС и задачи сельскохозяйственной науки.— «Вест. с.-х. науки», 1969, № 5, с. 2—17.
39. Мезенцев В. С. Метод гидроклиматических расчетов и опыт его применения для районирования Западно-Сибирской равнины по признакам увлажнения и теплообеспеченности.— «Труды Омского с.-х. ин-та», 1957, т. 27.
40. Мельник Ю. С. Оценка условий влагообеспеченности и формирования урожая семян подсолнечника на Северном Кавказе.— «Труды ЦИП», 1965, вып. 145, с. 139—146.

41. Мельник Ю. С. и др. Расчет испарения по методу теплового баланса на ЭВМ «Напри».— В кн.: Применение математических методов и вычислительных машин в гидротехнике и мелиорации. М., 1967, с. 44—51.
42. Мельник Ю. С. и др. О пространственной изменчивости средних за декаду значений дефицита влажности воздуха.— «Труды ГМЦ», 1969, вып. 52, с. 62—70.
43. Милторп Ф. Поступление и расход воды в сухих и засушливых зонах.— В кн.: Растение и вода. Л., Гидрометеиздат, 1967, с. 5—63.
44. Миняева Е. Н. Роль непродуктивного испарения в водном балансе долины реки Мургаб. Автореф. канд. дисс. М., 1966. 18 с.
45. Полевой А. П., Мызина Т. И. Методическое пособие по составлению агрометеопрогноза урожайности овса в нечерноземной зоне ЕТС. 1974.
- 45а. Положай В. С. Некоторые вопросы орошения земель в США.— В кн.: Мелиорация и водное хозяйство. Киев, «Урожай», 1968.
- 45б. Поляков Б. В. Гидрологический анализ и расчеты. Л., Гидрометеиздат, 1946. 480 с.
46. Пономарев Б. П. Методика расчета влагообеспеченности картофеля в основных районах его возделывания на ЕТС.— «Труды ЦИП», 1956, вып. 47, с. 59—64.
47. Пушкарев В. Ф. Экспериментальные исследования с полей, занятых картофелем.— «Труды ГГИ», 1961, вып. 91, с. 110—131.
48. Пыиклик К. М. О влиянии засушливых периодов на урожай ячменя.— «Метеорология и гидрология», 1968, № 4, с. 94—95.
49. Разумова Л. А. Пространственная изменчивость и способы учета влажности почвы на орошаемых землях.— «Труды ЦИП», 1965, вып. 145, с. 3—29.
50. Сергеев П. А., Шаин С. С. и др. Клевер. М., Сельхозгиз, 1963. 423 с.
51. Серякова Л. П. Определение испаряемости и расчеты норм орошения.— «Изв. АН СССР, серия геогр.», 1957, № 6, с. 112—117.
52. Сиротенко О. Д. Использование данных об осадках в статистических схемах для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур.— «Метеорология и гидрология», 1967, № 9, с. 77—84.
53. Сиротенко О. Д., Хваленский Ю. А. Статистические методы в агрометеорологии.— «Труды ИЭМ», 1973, вып. 3 (40), с. 3—17.
54. Струнников Э. А. Водопотребление и водообеспеченность трав в условиях Северо-Западной зоны.— «Лука и пастбища», 1968, № 5, с. 22—23.
55. Струнников Э. А. О водопотреблении картофеля в Северо-Западной зоне Европейской территории Союза.— «Вест. с.-х. науки», 1969, № 7, с. 56—61.
56. Струнников Э. А. О расчете водопотребления и агроклиматических справочников.— «Гидротехника и мелиорация», 1969, № 4, с. 84—89.
57. Струзер Л. Р., Нечаев Н. Н., Богданова Э. Р. Систематические погрешности измерения атмосферных осадков.— «Метеорология и гидрология», 1965, № 10, с. 50—54.
58. Трусов Ю. П. Понятие о ноосфере.— В кн.: Природа и общество. М., «Наука», 1968, с. 28—47.
59. Уланова Е. С., Сиротенко О. Д. Методы статистического анализа в агрометеорологии. Л., Гидрометеиздат, 1968. 198 с.

60. Филиппова А. К. Оценка увлажненности водосборов по запасам влаги в почве.— «Труды ГГИ», 1958, вып. 68, с. 44—62.
61. Харченко С. И. Гидрология орошаемых земель. Л., Гидрометеоиздат, 1968. 246 с.
62. Хильми Г. Ф. Философские проблемы преобразования природы.— В кн.: Взаимодействие наук при изучении Земли. М., «Наука», 1963, с. 55—64.
63. Циприс Д. Б. Метод расчета режима орошения дождеванием для Северо-Западной зоны РСФСР по единичным засушливым периодам.— «Труды СевНИИГиМ», 1966, вып. 25, с. 9—17.
64. Циприс Д. Б. Орошение в пещерноземной зоне. Л., «Колос», 1973. 191 с.
65. Чхенкели И. А., Сичинава П. С., Губеладзе Д. И. Метод установления сроков полива сельскохозяйственных культур в условиях Восточной Грузии.— «Труды Груз. СХИ», 1964, вып. 11—12.
66. Шиманович С. Ю. Семеноводство клевера. Лениздат, 1966. 70 с.
67. Штойко Д. А. Нормативы проектирования орошения сельскохозяйственных культур и гидро модуля в условиях интенсивного использования орошаемых земель.— В кн.: Орошаемое земледелие в Европейской части СССР. М., 1965, с. 171—185.
68. Штойко Д. А. Водопотребление и режим орошения сельскохозяйственных культур.— В кн.: Орошаемое земледелие на Украине. Киев, 1968, с. 147—169.
69. Велев Д., Марков Г. Водопотребление и напонтельни норми през средно и средновлажни години. София, Българска Академия на науките, 1962.
70. Велев Д., Марков Г., Колчева Р. Н. Мелиоративно районирание на НР България, ч. 1. София, Българска Академия на науките. 1967. 146 с.
71. Penman H. L. Evaporation an introductory syrvey.— „Met. J. Agr. Sci.“, 1956, v. 4, p. 9—29.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
<b>Глава 1. Краткая характеристика основных методов определения испаряемости с поверхности суши . . . . .</b>	<b>6</b>
1. Метод теплового баланса . . . . .	7
2. Метод водного баланса . . . . .	9
3. Комплексные методы расчета испаряемости . . . . .	12
4. Метод турбулентной диффузии . . . . .	15
<b>Глава 2. Биоклиматический метод расчета оптимального испарения . . . . .</b>	<b>17</b>
1. Общие положения . . . . .	17
2. Биологические коэффициенты испарения для климатических условий Северо-Запада . . . . .	28
3. Зональность биологических кривых . . . . .	35
4. Потребность культур во влаге и влагообеспеченность в условиях Северо-Запада . . . . .	42
<b>Глава 3. Влагообеспеченность и урожай сельскохозяйственных культур в условиях Северо-Запада . . . . .</b>	<b>52</b>
1. Влагообеспеченность клевера и урожай . . . . .	53
2. Сравнительная оценка целесообразности выращивания различных типов клевера в условиях Северо-Запада . . . . .	60
3. Влагообеспеченность картофеля и урожай . . . . .	61
4. Влагообеспеченность овса и урожай . . . . .	66
<b>Глава 4. Использование биоклиматического метода в мелиоративных расчетах . . . . .</b>	<b>70</b>
1. Определение критического периода вегетации . . . . .	70
2. Расчет гидромодуля оросительной системы . . . . .	71
3. Использование биологических кривых при определении сроков полива . . . . .	75
Список литературы . . . . .	79

Эдмунд Александрович Струнников

**ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ВЛАГОЙ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ  
КУЛЬТУР  
НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ СССР**

Редактор А. Б. Котиковская  
Художник В. В. Беляков  
Худ. редактор Б. А. Денисовский  
Техн. редактор Н. Ф. Грачева  
Корректор З. Т. Тимченко

Сдано в набор 11/IX 1975 г. Подписано к печати 8/XII 1975 г. М 17439. Формат 60×90/16.  
Бумага тип. № 1. Печ. л. 5,25. Уч. изд. л. 5,45. Тираж 1300 экз. Индекс АЛ 36  
Заказ № 469. Цена 45 коп. Гидрометеиздат, 199053, Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Ленинградская типография № 8 Союзполиграфпрома при Государственном комитете  
Совета Министров СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли,  
190000, Ленинград. Прачевый пер., 6

45 коп.



ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1976