

Предисловие

Эта публикация представляет современную процедуру расчета эталонной эвапотранспирации и эвапотранспирации сельхозкультур по метеоданным и коэффициенту культуры. Эта процедура, впервые представленная в публикации ФАО № 24 "Требования растений на воду", обозначается как метод " K_c - E_{T_0} ", где влияние климата на требования растений на воду представлено эталонной эвапотранспирацией E_{T_0} , а влияние растения - коэффициентом культуры K_c . Другие процедуры, представленные в публикации ФАО № 24, такие, как определение зависящего и эффективного дождя, расчет ирригационных требований и графиков поливов в данной публикации не представлены, но будут предметом рассмотрения в последующих выпусках.

Начиная с публикации № 24 в 1977 г., успехи в исследованиях и более точной оценке использования воды растениями вскрыли необходимость совершенствования методики ФАО для расчетов E_{T_0} . Было установлено, что метод Пенмана (Penman) часто завышает величину E_{T_0} , в то время, как другие рекомендуемые ФАО уравнения, например, уравнения радиации, Блани-Криддла (Blaney-Criddle) и испарителя, показывают близость к эталонной эвапотранспирации травяной поверхности.

В мае 1990 г. ФАО организовала консультацию экспертов и ученых в сотрудничестве с МКИД и ВМО с целью обзора методики ФАО по требованиям растений на воду, обмена мнениями и усовершенствования процедур.

Совещание экспертов рекомендовало принять комбинированный метод Пенмана-Монтейта (Penman-Monteith) за новый стандарт для эталонной эвапотранспирации и посоветовало принять процедуры по определению различных параметров. Метод Пенмана-Монтейта был развит путем определения эталонной культуры как гипотетической культуры с предполагаемой высотой 0,12 м, сопротивлением поверхности 70 с/м, альбедо 0,23 и испарением с травяной поверхности одной высоты, активно растущей и, соответственно, увлажненной. Этот метод устраняет недостатки метода Пенмана и обеспечивает величины, которые имеют хорошую сходимость с фактическим использованием воды растениями по всему миру. Более того, были выработаны рекомендации по использованию метода Пенмана-Монтейта при ограниченных климатических данных, таким образом, исключая необходимость других методов определения эталонной эвапотранспирации и создавая здоровую основу для глобально пригодного стандарта в расчетах требований растений на воду.

Метод Пенмана-Монтейта использует стандартные климатические данные, которые могут быть легко измерены или получены из обычно измеряемых величин. Все процедуры расчета стандартизированы в соответствии с имеющимися метеоданными и временным масштабом расчетов. Методы расчета, также как и процедуры определения отсутствующих климатических данных, представлены в данной публикации.

При расчете по методу " K_c - E_{T_0} " в коэффициенте культуры учитываются различия в кроне растений и аэродинамическом сопротивлении относительно эталонной культуры. Коэффициент K_c служит в качестве совокупности физических и физиологических различий между культурами. Представлены два метода расчета эвапотранспирации культуры на основе E_{T_0} . Первый из них объединяет зависимость между эвапотранспирацией культуры и эталонной поверхностью в единый коэффициент K_c . Второй метод предусматривает разбивку K_c на два фактора, которые отдельно описывают испарение (K_e) и транспирацию (K_{cb}). Выбор подхода зависит от цели расчетов и временного шага.

Последние главы знакомят с процедурами, которые могут быть использованы для корректировки коэффициентов культуры с учетом отклонения от стандартных условий, например, водным и солевым стрессом, низкой плотностью растений, экологическими факторами и практикой управления.

Примеры демонстрируют различные процедуры расчетов. Большинство расчетов по-

священо эталонной эвапотранспирации и коэффициенту единичной культуры и могут быть выполнены на карманном калькуляторе, расчетных листах и многочисленных таблицах, приведенных в публикации. Пользователь может также составить компьютерную программу, используя любой язык программирования.

Эти рекомендации предназначены для менеджеров проекта, консультантов, ирригаторов, гидрологов, агрономов, метеорологов и студентов для расчета эталонной эвапотранспирации и эвапотранспирации культуры. Они могут быть использованы для расчета требований растений на воду как для орошаемого, так и для богарного земледелия, а также для расчета водопотребления естественной растительностью и сельхозкультурами.

Выражение признательности

Данные рекомендации представляют собой плод восьмилетних усилий, дискуссий и консультаций авторов, которые составляли рабочую группу по выполнению рекомендаций консультации экспертов ФАО в мае 1990 г. в Риме. Консультация была организована с целью обзора существующих руководств ФАО по определению требований растений на воду, опубликованных в 1977 г. в публикации ФАО № 24 "Ирригация и дренаж", авторами которых являлись Дж. Дуренбос (J. Doorenbos) и В. Прут (W. Pruit). Концептуальные рамки пересмотренной методологии, представленной в данной публикации, исходили из рекомендаций группы известных экспертов, внесших значительный вклад в доработку этой методологии. Членами экспертной группы были: д-р П. Флеминг (P. Fleming) из Австралии, д-р А. Перрье (A. Perrier) из Франции, д-р Л. Кавацца (L. Cavazza) и д-р Л. Томбеси (L. Tombesi) из Италии, д-р Р. Феддерс (R. Fedders) и д-р Дж. Дуренбос из Голландии, д-р Л. Перейра (L.S. Pereira) из Португалии, д-р Дж. Монтейт (J.L. Monteith) и д-р Х. Ганстон (H. Gunston) из Великобритании, д-р Р. Аллен (R. Allen), д-р М. Дженсен (M. Jensen) и д-р В. Прут из США, д-р Д. Рийкс (D. Rijks) из ВМО и персонал ФАО.

Многие эксперты из различных организаций и институтов давали ценные советы и консультации. Признательность следует выразить проф. В. Пруту из Калифорнийского Университета, Дж. Дуренбосу из ФАО, установившим стандарт и особенно проф. Дж. Монтейту, чья уникальная работа заложила основы научного определения ЕТ₀. Проф. Прут постоянно консультировал и давал ценные советы по критическим вопросам. Д-р Дж. Райт (J. Wright) из Кимберли, шт. Айдахо, предоставил точные данные по лизиметру для нескольких культур. Важный вклад в публикацию был сделан д-ром М. Дженсеном, д-ром Г. Харгривсом (G. Hargreaves) и д-ром С. Стоклом (C. Stockle) из США, д-ром Б. Итье (B. Itier) из Франции и другими членами технических рабочих групп МКИД и Американского общества гражданских и сельскохозяйственных инженеров.

Авторы благодарят Университет штата Юта, Аграрный Университет Лиссабона, Католический Университет в Левене и ФАО за щедрую поддержку во время подготовки публикации.

Авторы также выражают благодарность г-ну Х. Вольтеру (H. Wolter), директору Департамента развития водных и земельных ресурсов за его помощь, а также коллегам из ФАО и всем, кто смотрел документ и сделал ценные замечания.

Особую благодарность авторы выражают г-же К. Редферн (C. Redfern) за ее терпение и ценную помощь в подготовке и форматировании текста. Г-н Дж. Пламмер (J. Plummer) редактировал окончательную версию документа.

Содержание

Глава 1 Введение в эвапотранспирацию	1
ПРОЦЕСС ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ	1
Испарение	1
Транспирация	3
Эвапотранспирация (ЕТ)	3
ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ	3
ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭВАПОТРАНСПИРАЦИЮ	5
Погодные параметры	5
Факторы растительности	5
Управление и экологические условия	5
КОНЦЕПЦИЯ ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ	7
Эталонная эвапотранспирация (ЕТ ₀)	7
Эвапотранспирация культур в стандартных условиях (ЕТ _c)	7
Эвапотранспирация растениями в нестандартных условиях (ЕТ _{c adj})	9
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ	9
Измерение ЕТ	9
Расчет ЕТ по климатическим данным	12
Определение ЕТ в эвапориметре	12
Часть А Эталонная эвапотранспирация (ЕТ ₀)	13
Глава 2 Уравнение Пенмана-Монтейта	15
НЕОБХОДИМОСТЬ СТАНДАРТНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕТ ₀	15
ФОРМУЛИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ ПЕНМАНА-МОНТЕЙТА	16
Уравнение Пенмана-Монтейта	16
Аэродинамическое сопротивление (r _a)	17
(Совокупное) сопротивление поверхности (r _s)	18
ЭТАЛОННАЯ ПОВЕРХНОСТЬ	20
УРАВНЕНИЕ ПЕНМАНА-МОНТЕЙТА (ФАО)	21
Уравнение	21
Данные	22
Отсутствующие климатические данные	24
Глава 3 Метеорологические данные	27
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЕТ	27
Солнечная радиация	27
Температура воздуха	27
Влажность воздуха	28
Скорость ветра	28
АТМОСФЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ	29
Атмосферное давление (Р)	29
Скрытая теплота парообразования (λ)	29
Психрометрическая постоянная (γ)	29
ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА	30
ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА	31
Концепции	31
Измерения	33
Процедуры расчетов	34
РАДИАЦИЯ	39
Концепция	39
Единицы	41
Измерения	43
Процедуры расчета	43

СКОРОСТЬ ВЕТРА	53
Измерения	53
Зависимость ветрового профиля	53
СБОР КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ	54
Метеостанции	54
Агроклиматические месячные базы данных	55
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ	56
Определение отсутствующих данных по влажности	56
Определение отсутствующих данных по радиации	56
Отсутствующие данные по скорости ветра	60
Минимальные требования к данным	61
Альтернативное уравнение для ET_0 , когда отсутствуют метеоданные	61
Глава 4 Определение ET_0	63
УРАВНЕНИЕ ПЕНМАНА-МОНТЕЙТА	63
Процедура расчета	64
Расчет ET_0 для различных временных интервалов	64
ПРОЦЕДУРЫ РАСЧЕТА С НЕДОСТАЮЩИМИ ДАННЫМИ	73
МЕТОД ЭВАПОРИМЕТРА	74
Испарение из емкости	74
Коэффициент эвапориметра (K_p)	75
Часть В Эвапотранспирация растений в стандартных условиях	83
Глава 5 Введение в эвапотранспирацию культур (ET_c)	85
ПРОЦЕДУРЫ РАСЧЕТА	85
Прямой расчет	85
Метод коэффициента культуры	86
ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ КОЭФФИЦИЕНТ КУЛЬТУРЫ	87
Тип культуры	87
Климат	87
Испарение с почвы	89
Стадии роста культуры	91
ЭВАПОТРАНСПИРАЦИЯ КУЛЬТУРЫ (ET_c)	93
Метод единого и двойного коэффициента культуры	94
Кривая коэффициента культуры	95
СХЕМА РАСЧЕТОВ	97
Глава 6 ET_c – единый коэффициент культуры (K_c)	99
ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ СТАДИЙ РОСТА	99
КОЭФФИЦИЕНТЫ КУЛЬТУР	105
Табличные значения K_c	105
Коэффициент культур для начальной стадии ($K_{c\text{ ini}}$)	112
Коэффициент культур стадии середины сезона ($K_{c\text{ mid}}$)	119
Коэффициент культур для конца стадии позднего сезона ($K_{c\text{ end}}$)	123
ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ K_c	125
Однолетние культуры	125
Кривые K_c для фуражных культур	125
Фруктовые деревья	126
РАСЧЕТ ET_c	127
Графическое определение K_c	127
Численное определение K_c	129
КОЭФФИЦИЕНТЫ КУЛЬТУРЫ ЛЮЦЕРНЫ	130
ВОЗМОЖНОСТЬ ПЕРЕНЕСЕНИЯ ПРЕДЫДУЩИХ ЗНАЧЕНИЙ K_c	131
Глава 7 ET_c - Двойной коэффициент культуры ($K_c = K_{cb} + K_e$)	133
КОМПОНЕНТ ТРАНСПИРАЦИИ ($K_{cb} ET_0$)	133
Базовый коэффициент культуры (K_{cb})	133
Определение суточных значений K_{cb}	139

КОМПОНЕНТ ИСПАРЕНИЯ ($K_e ET_0$)	140
Процедура расчета	140
Верхний предел $K_{c \max}$	141
Коэффициент сокращения испарения с почвы (K_r)	142
Обнаженный и увлажненный участок почвы (f_{ew})	145
Суточный расчет K_e	149
РАСЧЕТ ET_c	154
Часть С Эватранспирация культурами в нестандартных условиях	157
Глава 8 ET_c в условиях водного стресса	159
ВОДОУДАЧА ПОЧВЫ	159
Общее количество воды (TAW)	159
Легко доступная вода (RAW)	160
КОЭФФИЦИЕНТ ВОДНОГО СТРЕССА (K_s)	165
БАЛАНС ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ	167
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛИВОВ	169
ДЕЙСТВИЕ ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВ	172
ЗАВИСИМОСТЬ УРОЖАЙНОСТЬ-ЗАСОЛЕНИЕ	173
ЗАВИСИМОСТЬ УРОЖАЙНОСТЬ-ВОДНЫЙ СТРЕСС	174
КОМБИНИРОВАННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЗАСОЛЕНИЕ-УМЕНЬШЕНИЕ ET	174
Отсутствие водного стресса ($D_r < RAW$)	174
Наличие водного стресса ($D_r > RAW$)	175
Ограничения	175
Применение	178
Глава 9 ET_c для естественной, нетипичной растительности и растительности, отличной от первоначальной	181
МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ	181
Начальная стадия роста	181
Середина и конец сезона	181
Условия водного стресса	182
СЕРЕДИНА СЕЗОНА - КОРРЕКТИРОВКА ДЛЯ РЕДКОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ	182
Корректировка по результатам простых полевых наблюдений	182
Оценка $K_{cb \text{ mid}}$ из индекса площади листа (LAI)	184
Оценка $K_{cb \text{ mid}}$ из эффективного покрытия земли растительным покровом ($f_{c \text{ eff}}$)	184
Оценка $K_{cb \text{ full}}$	187
Заключение	188
СЕРЕДИНА СЕЗОНА - КОРРЕКТИРОВКА ПО УСТЬИЧНОМУ КОНТРОЛЮ	190
КОНЕЦ СЕЗОНА	192
ОЦЕНКА $ET_{c \text{ adj}}$ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРОЖАЙНОСТИ КУЛЬТУР	192
Глава 10 ET_c при различном управлении	195
ДЕЙСТВИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ МУЛЬЧИ	195
Пластиковая мульча	195
Органическая мульча	196
СОВМЕЩЕНИЕ КУЛЬТУР	198
Непрерывная растительность	199
Перекрывающаяся растительность	199
Бордюрные культуры	200
МАЛЫЕ ПЛОЩАДИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ	200
Эффекты "бельевой веревки" и оазиса	202
ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ СТРЕСС, ВЫЗВАННЫЙ УПРАВЛЕНИЕМ	203
Семена люцерны	204
Хлопок	204
Сахарная свекла	204
Кофе	204
Чай	205

Оливы	205
Глава 11 ET_c в невегетационные периоды	207
Типы УСЛОВИЙ ПОВЕРХНОСТИ	207
Голая почва	207
Поверхность, покрытая сухостоем	208
Поверхность, покрытая живой растительностью	208
Мерзлая или заснеженная поверхность	209
Приложение 1 Единицы и символы	211
Приложение 2 Метеорологические таблицы	213
Приложение 3 Исходные данные по физическим параметрам, которые используются при расчетах эвапотранспирации	223
Приложение 4 Статистический анализ выборки климатических данных	229
Приложение 5 Измерение и оценка единства метеоданных	243
Приложение 6 Корректировка метеоданных, полученных на не-эталонных метеостанциях, для расчета ET_o	253
Приложение 7 База и расчеты K_c для начальной стадии однолетних культур	259
Приложение 8 Пример расчета для применения процедуры двойного K_c в планировании орошения	265
Библиография	277

Список иллюстраций

	стр.
1. Схематическое представление разреза листа	2
2. Разделение эвапотранспирации на испарение и транспирацию в течение вегетации для однолетней полевой культуры	2
3. Факторы, влияющие на эвапотранспирацию, с учетом концепции ET	4
4. Эталонная эвапотранспирация при стандартных (ET_c) и нестандартных ($ET_{c\ adj}$) условиях	6
5. Схематическое изображение суточных изменений компонентов энергетического баланса над хорошо увлажненной транспирирующей поверхностью в безоблачный день	10
6. Водный баланс почвы корнеобитаемой зоны	11
7. Упрощенное представление (совокупного) сопротивления поверхности и аэродинамического сопротивления потоку водных паров	17
8. Типовое представление изменений индекса площади листьев за вегетационный период для кукурузы	19
9. Характеристики гипотетической эталонной культуры	21
10. Иллюстрация влияния скорости ветра на эвапотранспирацию в условиях жаркой-сухой и теплой-влажной погоды	28
11. Давление насыщенного пара как функция температуры: кривая $e^o(T)$	32
12. Изменение относительной влажности в течение 24 часов при постоянном действующем давлении пара 2,4 кПа	32
13. Годовая изменчивость внеземной радиации (R_a) на экваторе, 20° и 40° северной и южной широты	39
14. Годовая изменчивость продолжительности дневного света (N) на экваторе, 20° и 40° северной и южной широты	40
15. Различные компоненты радиации	42
16. Коэффициент преобразования скорости ветра, измеренной на определенной высоте, в скорость ветра на стандартной высоте (2 м) над поверхностью Земли	54
17. Взаимозависимость между частью внеземной радиации, достигающей поверхности Земли R_s/R_a и разницей температуры воздуха $T_{max} - T_{min}$ для внутренних ($k_{R_s} = 0,16$) и прибрежных ($k_{R_s} = 0,19$) регионов	58
18. Значения ET_o , рассчитанные по методике CROPWAT	66
19. Два случая установки эвапориметров и их окружения	75
20. Типовой K_c для различных типов полностью выросших культур	88
21. Крайние значения K_c для полностью развитых культур при изменениях климата и погоды	88
22. Влияние испарения на K_c . Горизонтальная линия представляет K_c при постоянно увлажненной поверхности. Кривая соответствует K_c , когда поверхность сухая, но культура получает достаточно воды для поддержания полной транспирации	90

23. Стадии роста растения для различных типов культур	90
24. Типовые значения K_c для четырех стадий роста растений	93
25. Обобщенная кривая коэффициента культуры для метода коэффициента единичной культуры	96
26. Кривые коэффициента культуры, показывающие базовое значение K_{cb} (толстая линия), испарение с почвы K_e (тонкая линия) и кривая $K_c = K_{cb} + K_e$ (пунктирная линия)	96
27. Основная процедура расчета ET_c	98
28. Изменения продолжительности периода вегетации риса (сорт: Джайя), засеянного в разные месяцы года в различных местностях по р. Сенегал (Африка)	105
29. Зависимость среднего $K_{c\ ini}$ от уровня ET_o и интервала между поливами и/или значительными дождями в течение начальной стадии для всех типов почв при слабом и среднем увлажнении (10 мм на событие)	114
30. Зависимость среднего $K_{c\ ini}$ от уровня ET_o и интервала между поливами, больше или равным 40 мм, во время начальной стадии роста для: а) почв грубой текстуры; б) почв средней и мелкой текстуры	115
31. Частичное увлажнение орошением	117
32. Выверка (дополнительно) значений $K_{c\ mid}$ из табл. 12 для культур различной высоты и среднесуточной скорости ветра (u_2) для различных условий влажности	120
33. Ожидаемые значения $K_{c\ end}$	124
34. Кривая коэффициента культуры	124
35. Кривая K_c , построенная для люцерны в Южном Айдахо, Соединенные Штаты, с использованием значений из табл. 11 и 12 и выверенная с помощью уравнений 62 и 65	126
36. Кривая K_c и десятидневные значения K_c и ET_c , полученные графическим способом на примере культуры зрелой фасоли (бокс 15)	129
37. Построение кривой базового коэффициента культуры (K_{cb}) зрелой фасоли, используя продолжительность роста 25, 25, 30 и 20 дней	140
38. Коэффициент сокращения испарения с почвы K_r	143
39. Определение переменной f_{ew} в виде функции участка с покрытой поверхностью (f_c) и участка с увлажненной поверхностью (f_w)	146
40. Водный баланс верхнего слоя почвы	150
41. Фактор истощения для различных уровней эвапотранспирации сельхозкультур	164
42. Коэффициент водного стресса K_s	165
43. Водный баланс корневой зоны	167
44. Влияние засоления почвы на коэффициент водного стресса K_s	179
45. Различные случаи совмещения культур	198
46. Кривые K_c для малых площадей растительности при эффекте оазиса как функции ширины пространства растительности для условий, где $RH_{min} = 30\%$, $u_2 = 2$ м/с, высота растительности (h) = 2 м и $LAI = 3$	203
47. Средняя эвапотранспирация, измеренная Райтом в невегетационные зимние периоды в Кимберли, штат Айдахо, США (1993)	210

Список таблиц

	стр.
1. Конвертирующие факторы эвапотранспирации	4
2. Средняя ET_0 для различных агроклиматических регионов, мм/сут	7
3. Конвертирующие факторы радиации	41
4. Общие классы ежемесячной скорости ветра	58
5. Коэффициенты эвапориметра (K_p) класса А для различных случаев установки прибора и окружающей среды, а также различных уровней средней относительной влажности и скорости ветра (публикация ФАО № 24)	77
6. Коэффициенты эвапориметра (K_p) для утепленных приборов Колорадо для различных случаев установки и окружающей среды, а также различных уровней средней относительной влажности и скорости ветра (публикация ФАО № 24)	77
7. Коэффициент эвапориметра (K_p): уравнения регрессии, выведенные из таблиц 5 и 6	78
8. Соотношения между испарением из утепленного прибора и прибора Колорадо для различных климатических условий и окружающей среды (публикация ФАО № 24)	79
9. Приближенные значения $K_{c\ ini}$ для случаев средней степени увлажнения	91
10. Общие критерии выбора методов расчета единого и двойного коэффициента культуры	94
11. Продолжительность стадий развития культур для различных периодов посадки и климатических регионов (в днях)	100
12. Единые (усредненные по времени) коэффициенты культуры K_c и средняя максимальная высота растений для не подверженных водному стрессу, хорошо увлажняемых культур в суб-влажном климате ($RH_{\min} \approx 45\%$, $u_2 \approx 2$ м/с) с использованием уравнения Пенмана-Монтейта ET_0	106
13. Классификация глубины выпадения дождя	113
14. $K_{c\ ini}$ риса при различных климатических условиях	119
15. Эмпирические расчеты ежемесячных данных скорости ветра	122
16. Типичные значения RH_{\min} в сравнении с RH_{mean} для основных климатических классификаций	122
17. Базовый коэффициент культуры K_{cb} для не угнетенных, ухоженных культур в суб-влажном климате ($RH_{\min} \approx 45\%$, $u_2 \approx 2$ м/с) для использования с ET_0 по Пенману-Монтейту	135
18. Общие руководства по получению K_{cb} из значений K_c , указанных в таблице 12	139
19. Типовые характеристики влажности для различных типов почв	142
20. Общие величины f_w участка поверхности почвы, увлажненного орошением или осадками	147
21. Общие величины участков, покрытых растительностью (f_c) и открытых солнечным лучам ($1 - f_c$)	147
22. Пределы максимальной эффективной глубины корней (Z_r) и доля извлечения воды без стресса (p), для общих культур	161
23. Солеустойчивость сельхозкультур, выраженная через электрическую проводимость насыщенной вытяжки на пороге, когда урожайность падает ниже полного потенциала урожайности ($EC_{e, \text{threshold}}$) и через уклон (b) уменьшения урожайности при увеличении засоления выше $EC_{e, \text{threshold}}$	176

- | | |
|--|-----|
| 24. Функции сезонной зависимости урожайности (сборник ФАО № 33) | 179 |
| 25. Приблизительное уменьшение K_c и поверхностного испарения и увеличение транспирации для различных садовых культур при использовании пластиковой мульчи, в сравнении с практикой без использования мульчи при струйном орошении | 196 |

Список боксов

	стр.
1. Главы, рассматривающие расчет эталонной эвапотранспирации (ET_o)	8
2. Главы, рассматривающие расчет эвапотранспирации растений в стандартных условиях (ET_c)	8
3. Главы, рассматривающие расчет эвапотранспирации растений в нестандартных условиях ($ET_{c\ adj}$)	9
4. Аэродинамическое сопротивление эталонной травяной поверхности	18
5. Суммарное сопротивление эталонной травяной поверхности	20
6. Вывод уравнения Пенмана-Монтейта (ФАО) для гипотетической эталонной травяной культуры	23
7. Расчет дефицита давления пара ($e_s - e_a$)	38
8. Преобразование энергии в эквивалентное испарение	42
9. Расчет внеземной радиации (R_a) и часов дневного света (N)	47
10. Расчет чистой радиации (R_n)	51
11. Расчетная таблица ET_o (метод Пенмана-Монтейта) с использованием метеорологических таблиц приложения 2	65
12. Описание прибора класса А	80
13. Описание утопленного прибора Колорадо	81
14. Демонстрация влияния климата на $K_{c\ mid}$ для зерновых культур в полевых условиях	121
15. Конкретное исследование культуры зрелой фасоли в Кимберли, штат Айдахо, США (единый коэффициент культуры)	127
16. Пример изучения культуры зрелой фасоли в Кимберли, Айдахо, США (двойной коэффициент культуры)	156
17. Измерение и оценка LAI	185
18. Измерение и оценка $f_{c\ eff}$	186

Список примеров

	стр.
1. Преобразование испарения из одних единиц в другие	4
2. Определение атмосферных параметров	30
3. Определение среднего давления пара насыщения	34
4. Определение фактического давления пара по замерам психрометра	36
5. Определение фактического давления пара по относительной влажности	37
6. Определение дефицита давления пара	37
7. Преобразование градусов и минут широты в радианы	44
8. Определение внеземной радиации	45
9. Определение часов дневного света	46
10. Определение солнечной радиации по измеренной продолжительности солнечного сияния	48
11. Определение чистой длинноволновой радиации	50
12. Определение чистой радиации	50
13. Определение почвенного теплового потока для месячных периодов	53
14. Приведение скорости ветра к стандартной высоте	54
15. Определение солнечной радиации из температурных данных	59
16. Определение чистой радиации в отсутствие данных о ней	59
17. Определение ET_0 по среднемесячным данным	67
18. Определение ET_0 по суточным данным	69
19. Определение ET_0 по часовым данным	72
20. Определение ET_0 при пропущенных данных	73
21. Определение ET_0 по испарению из прибора с использованием таблиц	79
22. Определение ET_0 из эвапориметров с использованием уравнений	82
23. Расчет интервала между увлажнениями	113
24. Графическое определение $K_{c\ ini}$	114
25. Интерполяция между легким и обильным увлажнениями	116
26. Определение $K_{c\ ini}$ частичного увлажнения поверхности почвы	118
27. Определение $K_{c\ mid}$	123
28. Численное определение K_c	130
29. Отбор и уточнение базового коэффициента культур K_{cb}	134
30. Определение суточных значений K_{cb}	139
31. Определение эвапотранспирации с обнаженной почвы	144
32. Расчет коэффициента культуры ($K_{cb} + K_e$) при дождевании	148
33. Расчет коэффициента культуры ($K_{cb} + K_e$) при бороздковом поливе	149
34. Расчет коэффициента культуры ($K_{cb} + K_e$) при капельном поливе	149
35. Оценка эвапотранспирации культур с применением метода двойного коэффициента культур	152
36. Определение легко доступной почвенной влаги для различных культур и типов почв	164
37. Действие водного стресса на эвапотранспирацию культур	166
38. Планирование орошения во избежание водного стресса	170
39. Действие засоления почвы на эвапотранспирацию сельхозкультуры	180
40. Первое приближение коэффициента сельхозкультуры в середине сезона для редкой растительности	183
41. Оценка коэффициента сельхозкультуры для середины сезона	189
42. Оценка коэффициента сельхозкультуры в середине сезона для сниженного покрытия земли растительным покровом	189

43. Оценка $K_{c\ mid}$ при покрытии земли растительным покровом с уменьшением усть- ичного контроля	191
44. Приблизительная оценка K_s из урожайности культуры	193
45. Действие поверхностной мульчи	197
46. Совмещение кукурузы и бобов	200
47. Перекрывающаяся растительность	201

Список уравнений

	стр.
1. Уравнение энергетического баланса	10
2. Водный баланс почвы	11
3. Комбинированные уравнения по форме Пенмана-Монтейта	17
4. Аэродинамическое сопротивление (r_a)	17
5. Общее сопротивление поверхности (r_s)	19
6. Уравнение Пенмана-Монтейта для суточных, декадных и месячных временных шагов	22
7. Атмосферное давление (P)	29
8. Психрометрическая постоянная (γ)	30
9. Средняя температура воздуха (T_{mean})	31
10. Относительная влажность (RH)	33
11. Давление пара насыщения как функция от температуры ($e^o(T)$)	34
12. Давление пара насыщения (e_s)	34
13. Кривая (Δ) уклона $e^o(T)$	35
14. Фактическое давление пара, выведенное из температуры точки росы (e_a)	35
15. Фактическое давление пара, выведенное из психрометрических данных (e_a)	35
16. Психрометрическая постоянная инструмента (психрометрического) (γ_{psy})	35
17. Фактическое давление пара, выведенное из RH_{max} и RH_{min} (e_a)	36
18. Фактическое давление пара, выведенное из RH_{max} (e_a)	36
19. Фактическое давление пара, выведенное из RH_{mean} (e_a)	36
20. Трансформация энергии в эквивалентное испарение	42
21. Внеземная радиация для ежедневных периодов (R_a)	43
22. Преобразование десятичных градусов в радианы	44
23. Инверсионное относительное расстояние Земля-Солнце (d_r)	44
24. Солнечное наклонение (δ)	44
25. Угол часа заката - функция $\arccos(\omega_s)$	44
26. Угол часа заката - функция $\arctg(\omega_s)$	44
27. Параметр X уравнения 26	44
28. Внеземная радиация часового или более короткого периода (R_a)	45
29. Угол солнечного времени в начале периода (ω_1)	45
30. Угол солнечного времени в конце периода (ω_2)	45
31. Угол солнечного времени в середине периода (ω)	46
32. Сезонная коррекция солнечного времени (S_c)	46
33. Параметр b уравнения 32	46
34. Дневные часы (N)	46
35. Солнечная радиация (R_s)	47
36. Радиация при чистом небе вблизи уровня моря (R_{so})	48
37. Радиация при чистом небе на более высоких отметках (R_{so})	48
38. Чистая солнечная или чистая коротковолновая радиация (R_{ns})	48
39. Чистая длинноволновая радиация (R_{nl})	49
40. Чистая радиация (R_n)	50
41. Тепловой поток почвы (G)	51
42. Тепловой поток почвы для дневных и 10-дневных периодов (G_{day})	51
43. Тепловой поток почвы для месячного периода (G_{month})	52
44. Тепловой поток почвы для месячного периода, если $T_{\text{month}, I+1}$ неизвестно (G_{month})	52
45. Тепловой поток почвы для часового и более короткого периода в течение дневного времени (G_{hr})	52

46. Тепловой поток почвы для часового и более короткого периода в течение ночного времени (G_{hr})	52
47. Приведение скорости ветра к стандартной высоте (u_2)	53
48. Определение фактического давления пара из T_{min} (e_a)	56
49. Использование данных о солнечной радиации с ближайшей метеостанции (R_s)	57
50. Определение солнечной радиации из разницы температур (формула Харгрейва)	58
51. Определение солнечной радиации для островов (R_s)	60
52. Уравнение Харгрейва (1985) для эталонной эвапотранспирации	61
53. Уравнение Пенмана-Монтейта (ФАО) для часового временного шага	70
54. Фактическое давление пара для часового временного шага	71
55. Вывод значения ET_0 из замеров по испарителю	75
56. Эвапотранспирация растениями (ET_c)	86
57. Двойной коэффициент культуры	90
58. Эвапотранспирация растениями - единичный коэффициент культуры (ET_c)	95
59. Интерполяция глубины инфильтрации между 10 и 40 мм	116
60. Приведение $K_{c\ ini}$ для частичного увлажнения при орошении	116
61. Глубина полива для части увлажненной поверхности (I_w)	117
62. Климатическое приведение $K_{c\ mid}$	119
63. Минимальная относительная влажность, определенная из $e^0(T_{dew})$	121
64. Минимальная относительная влажность, определенная из $e^0(T_{min})$	121
65. Климатическое приведение $K_{c\ end}$	123
66. Интерполяция K_c для стадии развития растения и конца сезона	130
67. Зависимость между коэффициентами культуры, основанными на траве и на люцерне	131
68. Соотношение между K_c , основанном на траве и K_c , основанном на люцерне, для Кимберли, Айдахо, США	131
69. Эвапотранспирация растений - двойной коэффициент культуры (ET_c)	133
70. Климатическое приведение K_{cb}	134
71. Коэффициент испарения с почвы (K_e)	140
72. Верхний предел испарения и транспирации с любой засеянной поверхностью ($K_{c\ max}$)	141
73. Максимальный слой воды, который может испариться из верхнего слоя почвы (TEW)	142
74. Коэффициент понижения испарения (K_r)	144
75. Обнаженная и увлажненная части почвы (f_{cw})	145
76. Эффективная часть поверхности почвы, покрытая растительностью (f_c)	147
77. Суточный водный баланс почвы для обнаженной и увлажненной частей поверхности	150
78. Предел истощения почвенной влаги посредством испарения (D_e)	151
79. Осушение верхнего слоя почвы (DP_e)	154
80. Эвапотранспирация растениями, приведенная к водному стрессу - двойной коэффициент культуры	159
81. Эвапотранспирация растениями, приведенная к водному стрессу - единичный коэффициент культуры	159
82. Суммарная влагоемкость почвы в корнеобитаемой зоне (TAW)	160
83. Водоотдача почвы в корнеобитаемой зоне (RAW)	160
84. Коэффициент водного стресса (K_s)	167
85. Водный баланс корнеобитаемой зоны	168
86. Пределы истощения влаги в корнеобитаемой зоне посредством эвапотранспирации (D_r)	168
87. Первоначальное истощение ($D_{r,i-1}$)	168
88. Глубокая фильтрация (DP)	169
89. Относительная урожайность культуры (Y_a/Y_m), определенная из засоленности почвы (EC_e) и предела солёности для культуры	173

90. Соотношение урожая и водной функции (Публикация ФАО "Ирригация и дренаж" № 33)	174
91. Коэффициент водного стресса (K_s) в условиях засоленности	174
92. Коэффициент водного стресса (K_s) в условиях водного стресса и засоленности	175
93. Засоленность почвы (EC_e), предсказанная на основе качества ирригационной (LF) и промывной (EC_{iw183}) воды	178
94. $K_{c\ adj}$ для разрешенного растительного покрова	182
95. Коэффициент приведения (из LAI)	183
96. Коэффициент приведения (из f_c)	183
97. $K_{(cb\ mid)\ adj}$ из индекса олиственной площади	184
98. $K_{(cb\ mid)\ adj}$ из эффективного покрытия почвы	184
99. $K_{cb\ full}$ для сельхозкультур	187
100. $K_{cb\ full}$ для естественной растительности	188
101. $K_{cb\ h}$ для полного растительного покрова	188
102. Приведение к контролю листовного покрова (F_r)	190
103. Коэффициент водного стресса (K_s), определенный из соотношения урожая и водной функции	193
104. Определение коэффициента культуры для поля с посевом в междурядьях ($K_{c\ field}$)	199
105. Определение коэффициента культуры для порывов ветра (K_c)	202

Список основных обозначений и сокращений

a_{psy}	коэффициент психрометра [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]
a_s	часть внеземной радиации, достигающая земли в пасмурный день [-]
$a_s + b_s$	часть внеземной радиации, достигающая земли в ясный день [-]
c_p	удельная теплота [$\text{МДж кг}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]
c_s	теплоемкость почвы [$\text{МДж кг}^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]
CR	капиллярное поднятие [мм/сут]
D_e	кумулятивная глубина испарения (истощения) от поверхностного слоя почвы [мм]
D_r	кумулятивная глубина эвапотранспирации (истощения) от корневой зоны [мм]
d	высота смещения нулевой плоскости [м]
d_r	обратное относительное расстояние Земля-Солнце[-]
DP	глубинная фильтрация [мм]
DP_e	глубинная фильтрация от слоя испарения [мм]
E	испарение [мм/сут]
E_{pan}	испарение из эвапориметра [мм/сут]
$e^{\circ}(T)$	давление пара насыщения при температуре воздуха T [кПа]
e_s	давление насыщенного пара для данного периода времени [кПа]
e_a	фактическое давление пара [кПа]
$e_s - e_a$	дефицит давления пара насыщения
EC_e	электрическая проводимость водной вытяжки [дСм/м]
$EC_{e, threshold}$	электрическая проводимость водной вытяжки, после которой урожай начинает снижаться [дСм/м]
ET	эвапотранспирация [мм/сут]
ET_o	эталонная эвапотранспирация [мм/сут]
ET_c	эвапотранспирация культуры в стандартных условиях [мм/сут]
$ET_{c adj}$	эвапотранспирация культуры в нестандартных условиях [мм/сут]
$\exp[x]$	2,7183 (основа натурального логарифма) в степени x
F_r	корректирующий фактор сопротивления [-]
f_c	часть почвы, покрытая растительностью (наблюденная сверху) [-]
$f_{c eff}$	эффективная часть почвы, покрытая растительностью [-]
$1 - f_c$	обнаженная поверхность почвы [-]
f_w	часть поверхности почвы, увлажненная дождем или орошением [-]
f_{ew}	часть почвы, обнаженная и увлажненная одновременно, с которой в основном происходит испарение [-]
G	поток почвенного тепла [$\text{МДж м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$]
G_{day}	поток почвенного тепла для дневного и 10-дневного периода [$\text{МДж м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$]
G_{hr}	поток почвенного тепла для часового или более короткого периода [$\text{МДж м}^{-2} \text{ час}^{-1}$]
G_{month}	поток почвенного тепла для месячного периода [$\text{МДж м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$]
G_{sc}	солнечная постоянная [$0,0820 \text{ МДж м}^{-2} \text{ мин}^{-1}$]
H	чувствительное тепло [$\text{МДж м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$]
HWR	отношение высоты к ширине
h	высота растения [м]
I	глубина слоя при поливе [мм]
I_w	глубина слоя при увлажненной поверхности [мм]

J	номер дня в году [-]
K_c	коэффициент культуры [-]
$K_{c\text{ ini}}$	коэффициент культуры в начальной стадии роста [-]
$K_{c\text{ mid}}$	коэффициент культуры для середины сезона [-]
$K_{c\text{ end}}$	коэффициент культуры к концу сезона роста [-]
$K_{c\text{ max}}$	максимальное значение коэффициента культуры (после дождя или полива) [-]
$K_{c\text{ min}}$	минимальное значение коэффициента культуры (сухая почва без растительного покрова) [-]
K_{cb}	базовый коэффициент культуры [-]
$K_{cb\text{ full}}$	базовый коэффициент культуры в середине сезона (при пиковом размере или высоте растения) для полного покрытия растительностью $LAI > 3$ [-]
$K_{cb\text{ ini}}$	базовый коэффициент культуры на начальной стадии роста [-]
$K_{cb\text{ mid}}$	базовый коэффициент культуры на середину сезона [-]
$K_{cb\text{ end}}$	базовый коэффициент культуры на конец сезона [-]
K_e	коэффициент испарения почвы [-]
K_p	коэффициент эвапориметра [-]
K_r	коэффициент снижения испарения почвы [-]
K_s	коэффициент водного стресса [-]
K_y	фактор реакции урожая [-]
k	константа фон Кармана [0,41] [-]
k_{Rs}	коэффициент приведения для формулы радиации Харгрейва [$^{\circ}C^{-0.5}$]
L_{ini}	продолжительность начальной стадии роста [сут]
L_{dev}	продолжительность стадии развития растений [сут]
L_{mid}	продолжительность срединной стадии роста растения [сут]
L_{late}	продолжительность конечной стадии роста растений [сут]
L_z	долгота центра зоны местного времени [градусы к западу от Гринвича]
L_m	долгота [градусы к западу от Гринвича]
LAI	индекс поверхности листвы [m^2 (олиственная площадь) m^{-2} (поверхность почвы)]
LAI_{active}	активный (освещенный солнцем) индекс поверхности листвы [-]
N	максимум солнечного сияния в день, дневные часы [час]
n	практическая продолжительность солнечного сияния в день [час]
n/N	относительная продолжительность солнечного сияния [-]
P	осадки [мм], атмосферное давление [кПа]
p	фактор истощения эвапотранспирации [-]
R	удельная газовая постоянная [0,287 кДж $kg^{-1} K^{-1}$]
R_a	внешняя радиация [МДж $m^{-2} сут^{-1}$]
R_l	длинноволновая радиация [МДж $m^{-2} сут^{-1}$]
R_n	чистая радиация [МДж $m^{-2} сут^{-1}$]
R_{nl}	чистая длинноволновая радиация [МДж $m^{-2} сут^{-1}$]
R_{ns}	чистая солнечная или коротковолновая радиация [МДж $m^{-2} сут^{-1}$]
R_s	солнечная или коротковолновая радиация [МДж $m^{-2} сут^{-1}$]
R_{so}	солнечная или коротковолновая радиация при чистом небе [МДж $m^{-2} сут^{-1}$]
r_a	аэродинамическое сопротивление [с/м]
r_l	суммарное сопротивление хорошо освещенного листа [с/м]
r_s	сопротивление суммарной поверхности или кроны растений [с/м]
R_s/R_{so}	относительная солнечная или коротковолновая радиация [-]
RAW	водоотдача почвы корнеобитаемой зоны [мм]
REW	доступная испарению вода (т. е. максимальный слой воды, который может испариться с поверхностного слоя почвы без ограничений в течение стадии 1) [мм]
RH	относительная влажность [%]
RH_{hr}	среднечасовая относительная влажность [%]
RH_{max}	максимальная дневная относительная влажность [%]
RH_{mean}	средняя дневная относительная влажность [%]

RH_{\min}	минимальная дневная относительная влажность [%]
RO	поверхностный сток [мм]
S_c	сезонный корректирующий фактор для солнечного времени [час]
SF	подземный сток [мм]
T	температура воздуха [$^{\circ}\text{C}$]
T_K	температура воздуха [$^{\circ}\text{K}$]
T_{Kv}	виртуальная температура воздуха [$^{\circ}\text{K}$]
T_{dew}	температура точки росы [$^{\circ}\text{C}$]
T_{dry}	температура сухого пузырька [$^{\circ}\text{C}$]
T_{max}	максимальная дневная температура воздуха [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{\text{max,K}}$	максимальная дневная температура воздуха [$^{\circ}\text{K}$]
T_{mean}	средняя дневная температура воздуха [$^{\circ}\text{C}$]
T_{min}	минимальная дневная температура воздуха [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{\text{min,K}}$	минимальная дневная температура воздуха [$^{\circ}\text{K}$]
T_{wet}	температура влажного пузырька [$^{\circ}\text{C}$]
TAW	суммарная влагоемкость корнеобитаемой зоны [мм]
TEW	общая испаряемая вода (т. е. максимальный слой воды, который может испариться с поверхностного слоя почвы) [мм]
t	время [час]
u_2	скорость ветра на высоте 2 м над поверхностью земли [м/с]
u_z	скорость ветра на высоте z м над поверхностью земли [м/с]
W	содержание влаги в почве [мм]
Y_a	фактический урожай сельхозкультуры [кг га^{-1}]
Y_m	максимальный (ожидаемый) урожай в отсутствие экологического или водного стресса [кг га^{-1}]
Z_e	глубина почвенного слоя, подвергаемого высушиванию посредством испарения [м]
Z_r	глубина корневой зоны [м]
z	превышение над уровнем моря [м]
z_h	высота замеров влажности [м]
z_m	высота замеров ветра [м]
Z_{om}	длина шероховатости, управляющая передачей момента [м]
Z_{oh}	длина шероховатости, управляющая передачей тепла и пара [м]
α	альбедо [-]
γ	психрометрическая постоянная [$\text{кПа } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]
γ_{psy}	психрометрическая постоянная инструмента [$\text{кПа } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]
Δ	градиент кривой давления пара насыщения [$\text{кПа } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]
ΔSW	изменения содержания влаги в почве [мм]
Δt	длина временного интервала [сут]
Δz	эффективная глубина почвы [м]
δ	солнечное склонение [рад]
ε	соотношение молекулярного веса водяного пара и сухого воздуха (= 0,622)
η	средний угол стояния солнца над горизонтом
θ	влажность почвы [м^3 (вода) м^{-3} (почва)]
θ_{FC}	полевая влагоемкость [м^3 (вода) м^{-3} (почва)]
θ_t	пороговая влажность почвы, ниже которой транспирация снижается ввиду водного стресса [м^3 (вода) м^{-3} (почва)]
θ_{WP}	влажность почвы в точке увядания [м^3 (вода) м^{-3} (почва)]
λ	латентное тепло парообразования [МДж кг^{-1}]
λET	латентный тепловой поток [МДж м^{-2} сут^{-1}]
ρ_a	средняя плотность воздуха [$\text{кг}/\text{м}^3$]
ρ_w	плотность воды [$\text{кг}/\text{м}^3$]
σ	постоянная Стефана-Больцмана [$4,903 \cdot 10^{-9}$ МДж K^{-4} м^{-2} сут^{-1}]
φ	широта [рад]

ω	угол солнечного времени в средней точке часового или более короткого периода [рад]
ω_1	угол солнечного времени в начале часового или более короткого периода [рад]
ω_2	угол солнечного времени в конце часового или более короткого периода [рад]
ω_s	угол часа заката [рад]

Глава 1

Введение в эвапотранспирацию

Эта глава объясняет концепции и разницу между эталонной эвапотранспирацией (ET_0) и эвапотранспирацией культуры в стандартных условиях (ET_c), а также в различных экологических условиях и условиях управления ($ET_{c\ adj}$). Также рассматриваются факторы, влияющие на эвапотранспирацию, единицы, в которых она выражается и способы ее определения.

ПРОЦЕСС ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ

Сочетание двух отдельных процессов, при которых почва теряет воду через испарение, а растения - через транспирацию, называется эвапотранспирацией (ET).

Испарение

Испарение характеризуется процессом преобразования воды в пар (парообразование) и удалением с испаряющей поверхности (удаление пара). Вода испаряется с множества поверхностей, как, например, озера, реки, покрытия, почвы и влажная растительность.

Для преобразования молекул воды в молекулы пара требуется энергия. Эта энергия обеспечивается прямой солнечной радиацией и, в меньшей степени, температурой воздуха. Движущей силой, отрывающей пар от поверхности испарения, является разница между давлением паров воды на испаряющей поверхности и в атмосфере. По мере испарения окружающий воздух насыщается паром, процесс испарения замедляется и может прекратиться, если влажный воздух не будет перемещен в атмосферу. Замена насыщенного влагой воздуха более сухим зависит в основном от скорости ветра. Следовательно, при рассмотрении процесса испарения основными факторами являются: солнечная радиация, температура воздуха, влажность воздуха и скорость ветра.

Если вода испаряется с поверхности почвы, на испарение воздействуют: степень затененности кроны растений и количество воды на испаряющей поверхности, а также другие факторы. Частые дожди, орошение, а также поступление воды из близко залегающих грунтовых вод увлажняют поверхность почвы. Там, где почва поставляет достаточно воды для испарения, испарение определяется лишь метеорологическими условиями. Однако, если интервал между дождями или орошением становится достаточно большим и почва не успевает посылать воду для испарения, влажность ее снижается, а ее поверхность высыхает. В этих условиях наличие воды контролирует испарение с почвы. В условиях отсутствия поступления воды к поверхности почвы испарение быстро уменьшается и может прекратиться в течение нескольких дней.

Транспирация

Транспирация состоит из превращения воды, содержащейся в тканях растений, в пар и его перемещения в атмосферу. В основном, растения испаряют воду через листву. В листьях растений имеются мелкие отверстия, через которые проходят газы и вода (рис. 1). Образование пара происходит внутри листа, а именно в межклеточном пространстве и его обмен с атмосферой контролируется этими отверстиями. Почти вся вода, взятая корнями из почвы, расходуется на транспирацию и лишь незначительная ее часть используется внутри растения.

Транспирация, подобно прямому испарению, зависит от поступления энергии, градиента давления пара и скорости ветра. Следовательно, при оценке транспирации необходимо рассматривать такие факторы, как радиация, температура воздуха, влажность воздуха и параметры ветра. Влажность почвы и ее способность поставлять воду корням определяют скорость транспирации, так же, как и подтопление земель и их засоленность. На скорость транспирации влияют также характеристики растений, экологические аспекты и практика земледелия. Различные виды растений могут иметь различную скорость транспирации. При оценке транспирации следует учитывать не только тип растения, но его развитие, окружение и управление.

Эвапотранспирация (ЕТ)

Испарение и транспирация происходят одновременно и нелегко отличить эти два процесса. Кроме наличия влаги в почве, для почв, покрытых растительностью, важна часть солнечной радиации, достигающая поверхности. Эта часть уменьшается в вегетационный период, когда кроны растений затевают все большую площадь. Пока растение маленькое, вода расходуется в основном на испарение с почвы, но по мере развития растение покрывает почти всю площадь и транспирация начинает преобладать. На рис. 2 показано соотношение испарения и транспирации в зависимости от площади, покрытой листвой. Если при посеве почти 100 % ЕТ идет через испарение, при полном развитии растений почти 100 % ЕТ идет через транспирацию.

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Скорость эвапотранспирации обычно выражается в миллиметрах в единицу времени. Скорость выражает количество воды, потерянной с культивируемой площади в единицах толщины слоя воды (глубины). Единицей времени может быть час, день, декада, месяц или даже целиком вегетационный период.

Поскольку $1 \text{ га} = 10000 \text{ м}^2$, а $1 \text{ мм} = 0,001 \text{ м}$, потеря 1мм означает потерю 10 м^3 воды с гектара. Другими словами, 1 мм/сутки эквивалентен $10 \text{ м}^3/\text{га/сутки}$.

Глубина столба воды может быть выражена в единицах энергии, полученной на единицу площади. Эта энергия выражается в энергии, необходимой для превращения в пар свободной воды. Эта энергия, известная как скрытое тепло парообразования (λ), является функцией от температуры воды. Например, при 20°C $\lambda = 2,45 \text{ МДж/кг}$. Другими словами, $2,45 \text{ МДж}$ необходимы для превращения в пар 1 кг или $0,001 \text{ м}^3$ воды. Таким образом, приток энергии в $2,45 \text{ МДж}$ способен превратить в пар $0,001 \text{ м}$ или 1 мм воды и, следовательно, 1 мм воды эквивалентен $2,45 \text{ МДж м}^{-2}$. Эвапотранспирация, выраженная в $\text{МДж м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$, представляет $\lambda\text{ЕТ}$, или скрытый тепловой поток.

Таблица 1 объединяет единицы, используемые для выражения скорости эвапотранспирации и преобразующих факторов.

ТАБЛИЦА 1
Конвертирующие факторы эвапотранспирации

	глубина	объем на единицу площади		энергия на единицу площади*
	мм сут ⁻¹	м ³ га ⁻¹ сут ⁻¹	л с ⁻¹ га ⁻¹	МДж м ⁻² сут ⁻¹
1 мм сут ⁻¹	1	10	0,116	2,45
1 м ³ га ⁻¹ сут ⁻¹	0,1	1	0,012	0,245
1 л с ⁻¹ га ⁻¹	8,640	86,40	1	21,17
1 МДж м ⁻² сут ⁻¹	0,408	4,082	0,047	1

* Для воды с плотностью 1000 кг/м³ и температурой 20°C.

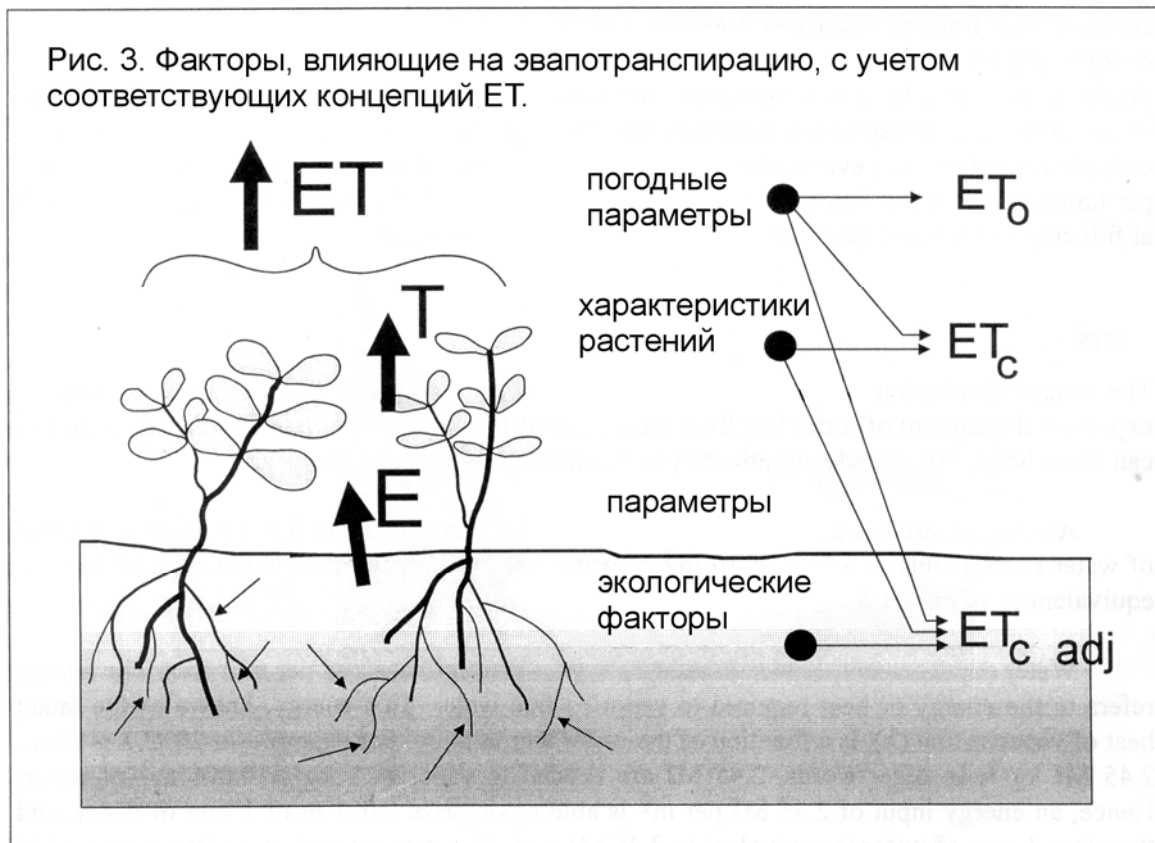
ПРИМЕР 1

Преобразование испарения из одних единиц в другие

В летний день чистая солнечная энергия, полученная озером, достигает 15 МДж на 1 м². Если 80 % этой энергии будет истрчено на парообразование, какова будет глубина испарения?

Из табл. 1:	1 МДж м ⁻² сут ⁻¹ =	0,408	мм сут ⁻¹
Следовательно:	0,8 x 15 МДж м ⁻² сут ⁻¹ = 0,8 x 15 x 0,408 мм сут ⁻¹ =	4,9	мм сут ⁻¹

Скорость испарения может составить 4,9 мм сут⁻¹



ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭВАПОТРАНСПИРАЦИЮ

Метеопараметры, характеристики сельхозкультур, аспекты управления и экологии - все эти факторы оказывают влияние на испарение и транспирацию. Соответствующие концепции ET представлены на рис. 3 и обсуждены в разделе о концепциях эвапотранспирации

Погодные параметры

Основными метеопараметрами, влияющими на эвапотранспирацию, являются: радиация, температура воздуха, влажность и скорость ветра. Для оценки интенсивности испарения по этим параметрам разработаны некоторые процедуры. Испаряющая сила атмосферы выражается эталонной эвапотранспирацией (ET_0). ET_0 представляет собой эвапотранспирацию со стандартной растительной поверхности. ET_0 описывается детально в этой, а также главах 2 и 4.

Факторы растительности

При оценке эвапотранспирации с культивируемых полей рассматриваются: тип растения, изменчивость и стадии развития. Различия в сопротивлении транспирации, высота растений, их неоднородность, отражательная способность, покрытие площади и характеристика корневой системы растений выражаются в различном уровне ET при различных типах культур при одинаковых экологических условиях. Эвапотранспирация растений при стандартных условиях (ET_c) соотносится с испарением растениями, растущими на больших полях при оптимальной влажности почвы, отличном управлении и экологических условиях и достигающими полной производительности при данных климатических условиях.

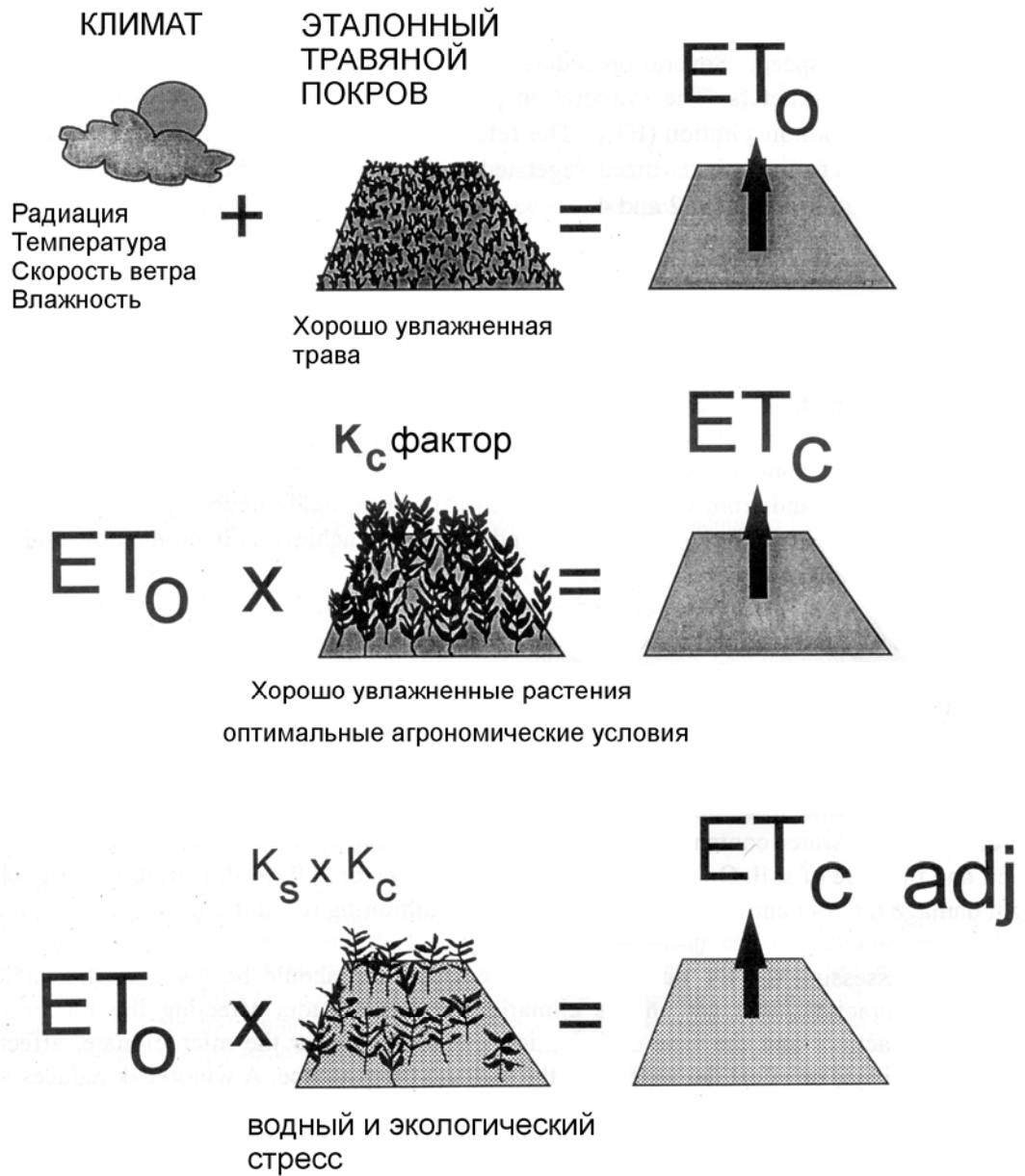
Управление и экологические условия

Такие факторы, как засоленность почв, низкое плодородие почв, ограниченное применение удобрений, наличие тяжелых или непроницаемых горизонтов, отсутствие контроля за болезнями растений и вредителями, а также плохая обработка земли, ограничивают развитие растений и снижают эвапотранспирацию. Другими факторами, подлежащими рассмотрению, являются: покрытие поверхности, густота растительности и влажность почвы. Влияние влажности на ET обусловлено размером водного дефицита и типом почвы. С другой стороны, слишком большое количество воды вызывает подтопление земель, может повредить корням растений, препятствуя доступу кислороду.

Оценивая ET, необходимо также учитывать практику управления, которая совместно с климатическими и другими факторами воздействует на процесс ET. Методы обработки почвы и орошения могут изменить микроклимат, повлиять на характеристики растений или поверхность. Лесозащитные полосы снижают скорость ветра и ET на поле сразу же за барьером. Эффект может быть значительным, особенно в ветреный, сухой и теплый день, хотя эвапотранспирация с деревьев может компенсировать ее снижение на поле. Испарение с почвы в молодом саду, где деревья растут редко, может быть снижено применением капельного или струйного способа орошения. Капельницы подают воду прямо к деревьям, оставляя основную площадь поверхности сухой и ограничивая потери на испарение. Использование мульчи, особенно при малых растениях, - еще один способ снизить испарение. Антитранспиранты, такие, как пленкообразующий или отражающий материал, могут также снизить транспирацию.

Если полевые условия отличаются от стандартных, необходимы корректирующие факторы для приведения ET_c . Приведение отражает влияние на эвапотранспирацию растений управленческих и экологических условий непосредственно в поле.

Рис. 4. Эталонная эвапотранспирация при стандартных (ET_c) и нестандартных ($ET_{c\text{adj}}$) условиях.



КОНЦЕПЦИЯ ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ

На рис. 4 приведены различия между эталонной эвапотранспирацией (ET_0), эвапотранспирацией растений в стандартных (ET_c) и нестандартных ($ET_{c\ adj}$) условиях. ET_0 является климатическим параметром, выражающим силу испарения атмосферы. ET_c означает эвапотранспирацию с идеального управляемого, большого, хорошо увлажненного поля, которое достигает полной производительности при данных климатических условиях. Ввиду неэффективного управления и экологических ограничений, которые влияют на рост растений и ограничивают эвапотранспирацию, ET_c в нестандартных условиях обычно требует корректировку.

Эталонная эвапотранспирация (ET_0)

Скорость эвапотранспирации с эталонной поверхности без дефицита воды называется эталонной эвапотранспирацией и обозначается как ET_0 . За эталонную поверхность принимается гипотетический травяной покров со специфическими характеристиками. Использование других определений, например, потенциальная ET , не рекомендуется ввиду возможной путаницы.

Концепция (понятие) эталонной эвапотранспирации была введена для изучения испарительной потребности атмосферы независимо от вида культур, а также практики их выращивания. Поскольку на эталонной поверхности вода имеется в избытке, почвенные факторы не влияют на ET . Привязка ET к конкретной поверхности обеспечивает эталон, к которому можно привязать эвапотранспирацию с другой поверхности. Значения ET_0 , измеренные и подсчитанные для различных мест или разных сезонов, являются сравнимыми. Поскольку они привязываются к ET для одной и той же эталонной поверхности.

Единственными факторами, влияющими на ET_0 , являются климатические параметры. Следовательно, ET_0 является климатическим параметром и может быть подсчитана, исходя из метеоданных. ET_0 выражает испаренную силу атмосферы в конкретной местности и для конкретного времени года и не зависит от сельскохозяйственных культур или типа почвы. Метод Пенмана-Монтейта рекомендован как единственный метод определения ET_0 . Он был избран, поскольку он хорошо аппроксимирует ET_0 для травы для исследуемой местности к физически обоснованным и физиологическим и аэродинамическим параметрам.

Типичные значения ET_0 для различных агроклиматических регионов даны в таблице 2. Эти величины должны познакомить неопытных пользователей с типовыми значениями и не годятся для прямого применения. Расчет эталонной эвапотранспирации приводится в части 1 этой книги (бокс 1).

Эвапотранспирация культур в стандартных условиях (ET_c)

ET_c является эвапотранспирацией с хорошо удобренных, здоровых культур, выращенных на большом поле в оптимальных условиях увлажнения почвы и достигшие полной продуктивности в данных климатических условиях.

ТАБЛИЦА 2
Средняя ET_0 для различных агроклиматических регионов, мм/сут

Регион	Средняя дневная температура (°C)		
	Прохладная ≈ 10°C	Умеренная ≈ 20°C	Теплая > 30°C
Тропики и субтропики			
- гумидный и полу-гумидный	2 - 3	3 - 5	5 - 7
- аридные и полу-аридные	2 - 4	4 - 6	6 - 8
Умеренный регион			
- гумидный и полу-гумидный	1 - 2	2 - 4	4 - 7
- аридные и полу-аридные	1 - 3	4 - 7	6 - 9

Бокс 1**Главы, рассматривающие расчет эталонной эвапотранспирации (ET_0)****Часть А ----****Глава 2 - Уравнение Пенмана-Монтейта (ФАО):**

Эта глава знакомит пользователя с необходимостью стандартизации метода расчета ET_0 по метеоданным. Этот метод рекомендован для определения ET_0 . Описаны метод и соответствующее определение эталонной поверхности.

Глава 3 - Метеоданные:

Метод Пенмана-Монтейта требует таких данных, как радиация, температура воздуха, влажность воздуха и скорость ветра. Представлены процедуры получения климатических параметров из метеоданных. Описаны процедуры определения отсутствующих метеоданных, необходимых для расчета ET_0 . Это позволит определить ET_0 по методу Пенмана-Монтейта даже при отсутствии метеоданных.

Глава 4 - Определение ET_0 :

Описан расчет ET_0 с помощью уравнения Пенмана-Монтейта для различных интервалов времени из главных климатических параметров при отсутствии метеоданных. Также имеет место определение ET_0 по данным замеров в эвапориметре.

Бокс 2**Главы, рассматривающие расчет эвапотранспирации растений в стандартных условиях (ET_c)****Часть В ----****Глава 5 - Введение в эвапотранспирацию:**

Глава знакомит читателя с методом " $K_c ET_0$ " для расчета эвапотранспирации растений. Различия в характеристиках между полевыми культурами и эталонным травяным покровом интегрированы в коэффициенте K_c . В зависимости от цели расчета, требуемой точности, наличия метеоданных и временного интервала расчетов, показана разница между методами расчета.

Глава 6 - ET_c - Коэффициент единичной культуры (K_c):

В этой главе представлен первый метод расчета, где разница между культурой и эталонной травой объединяется в едином коэффициенте культуры (K_c).

Глава 7 - ET_c - Двойной коэффициент культуры ($K_c = K_{cb} + K_e$):

Эта глава описывает другой метод расчета, где K_c разбит на два отдельных коэффициента: один - для транспирации культуры (т. е. базовый коэффициент K_{cb}) и второй - для испарения с почвы (K_e).

Количество воды, необходимое для компенсации эвапотранспирации с поля, определяется как требование растения на воду. Несмотря на то, что значения эвапотранспирации и требования на воду являются идентичными, требование на воду определяется количеством воды, которая должна быть подана, тогда как эвапотранспирация определяется количеством воды, потерянным через эвапотранспирацию. Требование на оросительную воду представляет собой разницу между требованием растения на воду и эффективными осадками. Требование на оросительную воду включает также дополнительные объемы воды для промывки солей и компенсации неравномерности полива. Расчет требований на оросительную воду в данной публикации не приводится, но будет рассмотрен в следующем выпуске.

Эвапотранспирация растения может быть рассчитана по климатическим данным, объединяя сопротивление растения, альбедо и сопротивление воздуха в уравнении Пенмана-Монтейта. Поскольку существует значительный пробел в информации по различным культурам, метод Пенмана-Монтейта используется для определения стандартной эталонной культуры с целью определения скорости эвапотранспирации этой культуры, т. е. ET_0 . Экспериментально определенное соотношение ET_c/ET_0 называется коэффициентом культуры (K_c) и используется для выяснения отношения ET_c к ET_0 или $ET_c = K_c ET_0$.

Различия в анатомии листа, физиологических характеристиках, аэродинамических

свойствах и даже альбедо определяют отличие эвапотранспирации растения от эталонной эвапотранспирации при тех же климатических условиях. Ввиду изменчивости характеристик культуры в течение вегетационного периода, K_c для данной культуры изменяется от сева до урожая. Определение эвапотранспирации растением в стандартных условиях (ET_c) рассматривается в части В (бокс 2).

Эвапотранспирация растениями в нестандартных условиях ($ET_{c\ adj}$)

Эвапотранспирация растениями в нестандартных условиях ($ET_{c\ adj}$) - это эвапотранспирация в условиях, отличающихся от стандартных. При выращивании культур в поле реальная эвапотранспирация может отличаться от эталонной ввиду неоптимальных условий, например, наличия вредителей и болезней, засоленности почвы, низкого плодородия почв, дефицита воды или подтопления земель. Это может выразиться в замедленном росте растений, низкой плотности и может вызвать снижение эвапотранспирации ниже ET_o .

Эвапотранспирация в нестандартных условиях рассчитывается с использованием коэффициента водного стресса K_s , подгонкой K_c ко всем другим типам стрессов и экологических ограничений по эвапотранспирации культуры; это обсуждается в части С (бокс 3).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ

Измерение ET

Эвапотранспирацию трудно измерить. Для ее определения необходимы специальные приборы и точные измерения различных физических параметров или водного баланса почвы в лизиметре. Методы определения зачастую дорогостоящи, сложные по точности измерений и могут проводиться лишь хорошо обученным персоналом. Хотя методы неприемлемы для повседневных измерений, они остаются важными для оценки ET, полученной непрямими методами.

Бокс 3

Главы, рассматривающие расчет эвапотранспирации растений в нестандартных условиях ($ET_{c\ adj}$)

Часть С ----

Глава 8 - ET_c в условиях водного стресса:

В главе рассматривается снижение транспирации, вызванное водным стрессом почвы или ее засоленностью. Результирующая эвапотранспирация будет отличаться от таковой для стандартных условий. Она рассчитывается через коэффициент стресса K_s , описывающий влияние стресса на транспирацию растений.

Глава 9 - ET_o для естественной, нетипичной и нарушенной растительности:

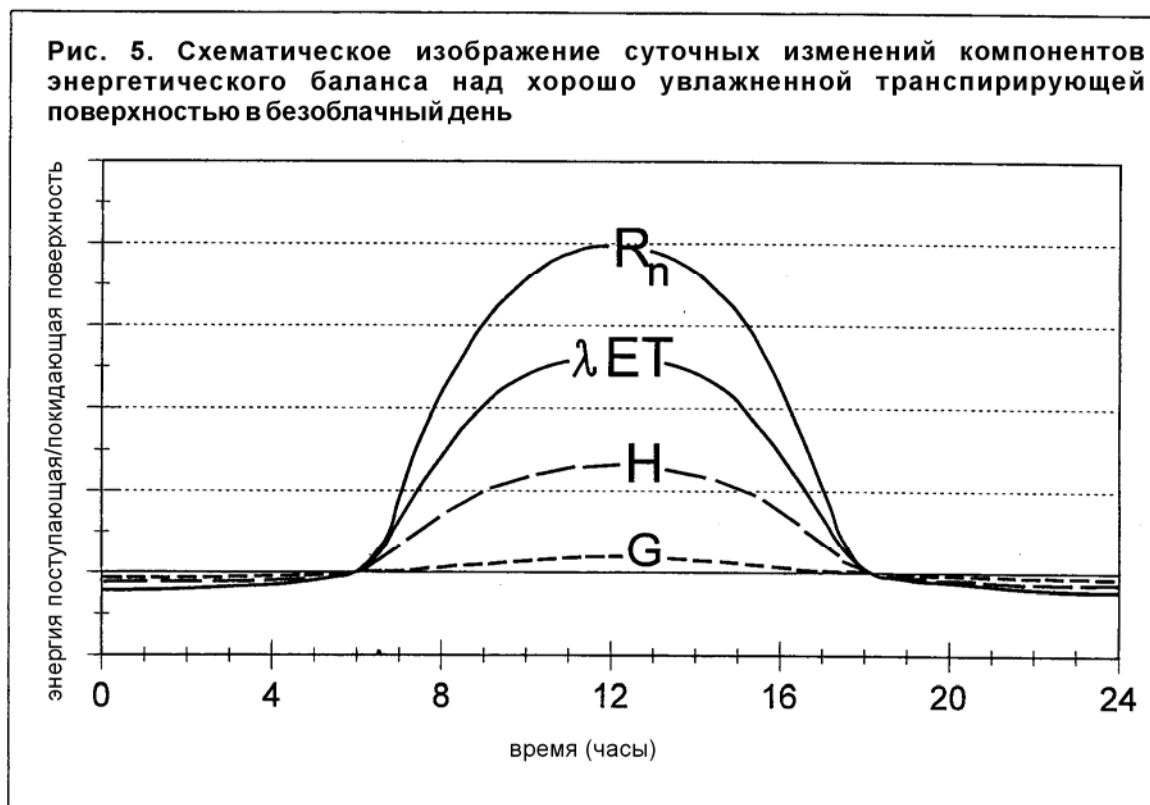
Обсуждаются процедуры подгонки K_c с тем, чтобы учесть несовершенные условия произрастания. Процедуры могут использоваться для определения K_c для сельхозкультур, не перечисленных в таблицах части В.

Глава 10 - ET_c при различной практике управления:

В главе обсуждаются различные типы практики управления, которые могут вызвать отклонение значений K_c и ET_c от стандартных условий, описанных в части В. Описан процесс адаптации K_c с учетом поверхностной мульчи, посева в междурядьях, малых площадях посева и вызванных стрессами.

Глава 11 - ET_c в течение невегетационных периодов:

Глава описывает процедуры прогнозирования ET_c в невегетационный период при различных условиях поверхности.



Энергетический баланс и микроклиматические методы

Испарение воды требует сравнительно значительного количества энергии в виде ощутимого тепла или радиации. Следовательно, процесс эвапотранспирации управляется обменом энергии на поверхности растения и ограничивается объемом наличной энергии. Ввиду этого ограничения эвапотранспирации можно предсказать, используя принцип сохранения энергии. Энергия, прибывающая на поверхность, должна быть равна энергии, излучаемой поверхностью за тот же период времени.

При выводе уравнения энергетического баланса должны быть учтены все потоки энергии. Уравнение для испаряющей поверхности может быть записано как

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0 \quad (1)$$

где R_n - чистая радиация; H - ощутимое тепло; G - тепловой поток в почве; λET - скрытый тепловой поток. Различные величины могут быть положительными или отрицательными. Положительная R_n поставляет энергию на поверхность, а положительные G , λET и H удаляют ее с поверхности (рис. 5).

В уравнении 1 рассматриваются лишь вертикальные потоки и чистая скорость, при которой энергия передается горизонтально, путем адвекции, игнорируется. Следовательно, уравнение ограничено четырьмя компонентами: R_n , λET , H и G . Другие виды энергии, такие, как тепло, накопленное или испускаемое растением, или энергия, используемая в метаболической деятельности, не учитываются. Эти компоненты составляют лишь незначительную часть чистой дневной радиации и могут считаться незначительными в сравнении с другими компонентами.

Скрытый тепловой поток (λET), представляющий эвапотранспирацию, может быть выведен из уравнения энергетического баланса, если все другие компоненты известны. Чистая радиация (R_n) и поток тепла в почве (G) могут быть измерены или определены из климатических параметров. Измерения ощутимого тепла (H) являются сложными и не могут быть получены легко. H требует точных замеров температурных градиентов над поверхностью.

Другим методом определения эвапотранспирации является метод массопереноса. Этот

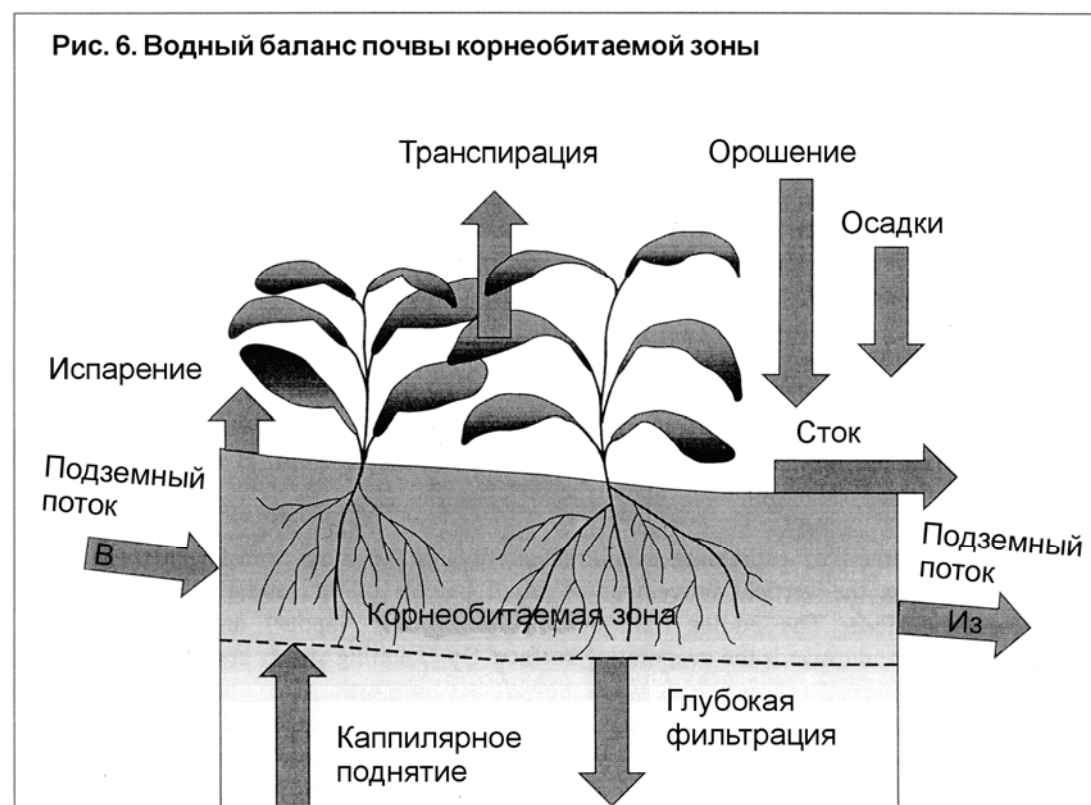
подход рассматривает вертикальное движение мелких пузырьков воздуха над большой равномерной поверхностью. Пузырьки транспирируют материал (водный пар) и энергию (тепло, момент силы) к испаряющей поверхности и от нее. Предполагая стабильность состояния и то, что коэффициент переноса пузырьков пропорционален переносу тепла и момента силы, скорость (интенсивность) эвапотранспирации может быть рассчитана по вертикальным градиентам температуры воздуха и водяного пара через зависимость Боуена (Bowen). Другие методы прямого измерения используют градиенты скорости ветра и водяного пара. Эти и другие методы, такие, как метод пузырьков, требуют точных измерений давлений пара, температуры воздуха или скорости ветра на различной высоте от поверхности. Следовательно, их применение ограничено первоначальной стадией исследований.

Водный баланс почвы

Эвапотранспирация может быть определена также измерением различных компонентов водного баланса почвы. Метод состоит в оценке приходящего и уходящего теплового потока в корнеобитаемой зоне в один и тот же период времени (рис. 6). Орошение (I) и осадки (P) добавляют воду в корневую зону. Часть I и P может быть потеряна через поверхностный сток (RO) и на глубинную фильтрацию (DP) и будет пополнять грунтовые воды. Вода может также транспортироваться вверх за счет капиллярного поднятия (CR) с близкого уровня грунтовых вод в направлении корневой зоны или перемещаться горизонтально подземным притоком (SF_{in}) или оттоком (SF_{out}) из корневой зоны. Тем не менее, во многих случаях, исключая крутые склоны, SF_{in} и SF_{out} являются незначительными и ими можно пренебречь. Испарение с почвы и транспирация растениями истощают влагу в корневой зоне. Если учесть все потоки, за исключением эвапотранспирации (ET), последняя может быть выведена из изменения влажности почвы (ΔSW) за период времени

$$ET = I + P - RO - DP + CR \pm \Delta SF \pm \Delta SW \quad (2)$$

Некоторые потоки, такие, как подземный поток, глубинная фильтрация и капиллярное поднятие с уровня грунтовых вод, определить трудно, причем короткие промежутки времени не могут быть рассмотрены. Метод водного баланса почвы может дать значения ET лишь для продолжительного периода времени, порядка недели или декады.



Лизиметры

Изолируя корневую зону от окружающей среды и контролируя процессы, которые трудно измерить, различные составляющие водного баланса могут быть определены с большей степенью точности. Это может быть сделано в лизиметрах, где растение развивается в изолированном сосуде, наполненном почвой нарушенной или ненарушенной структуры. В точных весовых лизиметрах, где потери воды измеряются напрямую по изменению массы, эвапотранспирация может быть получена с точностью до нескольких сотых долей миллиметра и могут быть рассмотрены такие короткие периоды времени, как час. В невесовых лизиметрах эвапотранспирация для конкретного отрезка времени определяется вычитанием дренажной воды, собранной на дне лизиметра, из общего притока воды.

Требованием для лизиметра является полная идентичность растительности как в лизиметрах, так и на смежных с ними площадках (такая же высота и индекс лиственности). Это требование, как правило, не соблюдалось, что выразилось в ошибочных величинах ET_c и K_c .

Поскольку лизиметры трудны и дорогостоящи в изготовлении и требуют специального ухода, их использование ограничивается специальными исследовательскими целями.

Расчет ET по климатическим данным

Ввиду сложности точных полевых измерений ET обычно рассчитывается по метеоданным. Для оценки эталонной эвапотранспирации по метеоданным выведено множество эмпирических и полуэмпирических уравнений. Некоторые из них действительны лишь в конкретных климатических и агрономических условиях и не могут быть использованы в условиях, отличных от тех, для которых они были первоначально разработаны.

Многочисленные исследователи анализировали различные методы расчета в различных регионах. В результате экспертной консультации, состоявшейся в мае 1990 г., метод Пенмана-Монтейта был рекомендован в качестве стандартного метода для определения ET_0 . ET с поверхности растений в нестандартных условиях приводится с помощью коэффициента стресса (K_s) или путем модификации коэффициента культуры.

Определение ET в эвапориметре

Испарение с открытой водной поверхности обеспечивает индекс интегрального влияния радиации, температуры и влажности воздуха и ветра на эвапотранспирацию. Тем не менее, различия между водной поверхностью и поверхностью, покрытой сельхозкультурами, определяют большую разницу в потере воды с этих поверхностей. Эвапориметр доказал свою практическую ценность и был успешно использован для определения эталонной эвапотранспирации путем наблюдения за потерями на испарение с водной поверхности и применения эмпирических коэффициентов для вывода зависимости между испарением в эвапориметре и ET_0 . Процедура описана в главе 3.

Часть А

Эталонная эвапотранспирация (E_{T_0})

Часть А описывает эвапотранспирацию с эталонной поверхности, так называемую эталонную эвапотранспирацию E_{T_0} . За эталонную поверхность принимается гипотетическая травянистая поверхность с высотой травы 0,12 м, сопротивлением поверхности 70 с м^{-1} и альбедо 0,23. Эталонная поверхность близка к поверхности, покрытой зеленой, хорошо увлажненной травой одинаковой высоты, активно растущей и полностью затеняющей землю. Фиксированное сопротивление поверхности 70 с м^{-1} предполагает умеренно сухую поверхность почвы вследствие редких поливов.

E_{T_0} может быть рассчитана по метеоданным. В результате экспертной консультации 1990 г. метод Пенмана-Монтейта был рекомендован как единственный для определения и расчета E_{T_0} . Этот метод требует наличия данных по радиации, температуре и влажности воздуха и скорости ветра. Процедуры расчета климатических параметров по метеорологическим данным и оценки отсутствующих метеорологических переменных, требуемых для расчета E_{T_0} , представлены в этой части (глава 3). Процедуры расчета, изложенные в данной публикации, позволяют определять E_{T_0} с помощью формулы Пенмана-Монтейта даже при условии отсутствия некоторых метеоданных.

E_{T_0} можно определить также по данным замеров в эвапориметре. Эвапориметры доказали свою практическую ценность и используются в основном для определения E_{T_0} путем наблюдения за потерей воды из эвапориметра и использования эмпирических коэффициентов для выявления взаимосвязи испарения и E_{T_0} . Тем не менее, должны быть приняты специальные меры предосторожности.

Глава 2

Уравнение Пенмана-Монтейта

Эта глава вводит пользователя в процедуру стандартизации одного метода для расчета ET_0 по метеоданным. Метод Пенмана-Монтейта рекомендован в качестве единственного метода определения эталонной эвапотранспирации. В главе описывается метод, его производные, требуемые метеоданные и соответствующее определение эталонной поверхности.

НЕОБХОДИМОСТЬ СТАНДАРТНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ET_0

За последние 50 лет различными учеными и специалистами было разработано множество более или менее эмпирических методов определения эвапотранспирации на базе различных климатических переменных. Зависимости подвергались местной калибровке и выяснялась их ограниченность для широкого применения. Проверка методов на точность в новых условиях является трудоемкой, длительной и дорогостоящей и, тем не менее, данные по эвапотранспирации нужны для проектного планирования и расчета графиков орошения. Для этих целей были разработаны руководства, которые обнародованы в публикации ФАО № 24 "Требования растений на воду". Для того, чтобы адаптировать к наличию различных данных, были предложены четыре метода определения эталонной эвапотранспирации: метод Блани-Криддла, метод радиации, метод Пенмана и метод эвапориметра. Модифицированный метод Пенмана был признан наилучшим как имеющий минимальную ошибку в отношении эталонного травяного покрова. Предполагалось, что эвапориметр даст приемлемые результаты в зависимости от его расположения. Метод радиации был предложен для площадей, где метеоданные содержат измеренные значения температуры воздуха и солнечного сияния, облачности и радиации, но без замеров скорости ветра и влажности воздуха. И, наконец, предлагается метод Блани-Криддла для площадей, где есть данные только по температуре воздуха.

Все эти климатические методы были калиброваны для расчетов на декаду или на месяц, но не для одного дня или нескольких часов. Метод Блани-Криддла рекомендован для периодов в 1 месяц и больше. Пользователи соблюдают эти условия не всегда и иногда расчеты производятся на ежедневной основе.

Прогресс в исследованиях и более точная оценка использования воды растением выявили слабость методических подходов. Многие ученые изучали работу этих четырех методов в различных регионах. Хотя на результаты исследований могли повлиять условия измерений или пропуск некоторых метеоданных, очевидно, что предложенные методы не дают сходных результатов в различных регионах. Расхождение расчетных и измеренных данных часто превышает допустимые ФАО пределы. Модифицированный метод Пенмана часто давал завышенные значения ET_0 , до 20 % - в случае низкого испарения. Другие рекомендованные ФАО уравнения показали различную степень сходимости с эталонной эвапотранспирацией стандартной травы.

Чтобы оценить те или другие процедуры определения при различных климатических условиях, под эгидой Комитета по ирригации и Американского общества гражданских инженеров (ASCE) были предприняты исследования. ASCE проанализировало 20 различных методов, используя детальные процедуры для оценки их работоспособности, сопоставляя их результаты

с тщательными лизиметрическими наблюдениями в 11 регионах с различными климатическими условиями. Анализ показал большой разброс результатов для различных климатических условий. Параллельно проводились исследования, инициированные Европейской Комиссией, консорциумом европейских институтов с целью оценки различных методов определения эвапотранспирации с использованием данных лизиметрических наблюдений в Европе.

Исследования подтвердили завышение значений при оценке модифицированным методом Пенмана, изложенным в публикации ФАО (выпуск 24) и различную эффективность других методов, которая зависела от степени адаптации метода к местным условиям. Сравнительные условия могут быть суммированы следующим образом:

- Методы Пенмана требуют местной калибровки функции ветра, чтобы достичь удовлетворительных результатов.
- Методы радиации дают хорошие результаты во влажном климате, где аэродинамическая составляющая сравнительно мала, но в аридных условиях результаты ошибочны и значение эвапотранспирации недооценивается.
- Температурные методы остаются эмпирическими и для достижения удовлетворительных результатов требуют местной калибровки. Возможное исключение - метод Харгрейва 1985 г., который показал нормальные значения ET_0 в глобальном масштабе.
- Методы эвапориметра ясно отразили недостатки прогноза эвапотранспирации по испарению со свободной водной поверхности. Методы чувствительны к микроклиматическим условиям и условиям содержания станции. Их результаты также ошибочны.
- Оба исследования отметили относительно точные и сопоставимые результаты метода Пенмана-Монтейта как для аридных, так и для гумидных условий.

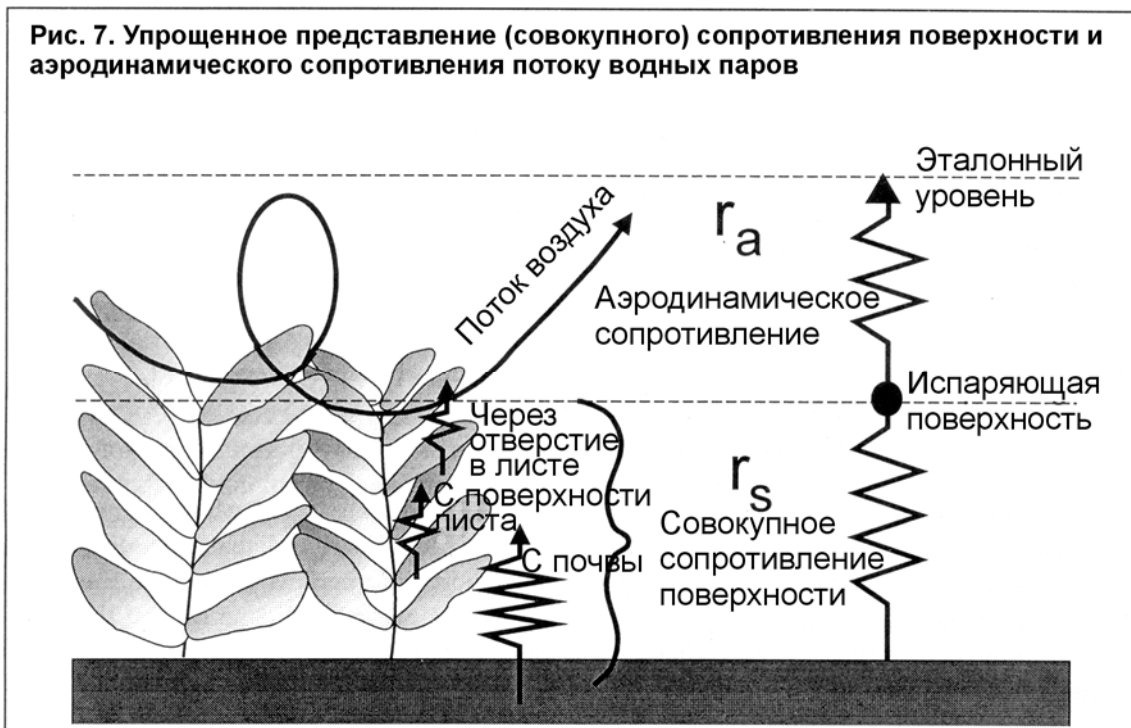
Анализ различных методов выявил необходимость формулирования стандартного метода расчета ET_0 . Метод Пенмана-Монтейта рекомендован как единственный стандартный метод. Это метод, с высокой степенью точности предсказывающий значение ET_0 в различных климатических условиях, имеет специальные приемы расчета при недостающих климатических данных. Использование старых методов ФАО или других методов не рекомендуется.

ФОРМУЛИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ ПЕНМАНА-МОНТЕЙТА

Уравнение Пенмана-Монтейта

В 1948 г. Пенман объединил методы энергетического баланса и массопереноса и вывел уравнение для расчета испарения с открытой водной поверхностью по стандартным климатическим замерам солнечного сияния, температуры, влажности и скорости ветра. Этот так называемый комбинированный метод был в дальнейшем развит многими исследователями и распространен на сельскохозяйственные земли путем ввода факторов сопротивления.

В номенклатуре сопротивления различаются факторы аэродинамического сопротивления и сопротивления поверхности (рис. 7). Параметры сопротивления поверхности часто объединяются в один "совокупный" параметр сопротивления, который работает в сериях с аэродинамическим сопротивлением. Сопротивление поверхности описывает сопротивление потоку пара через отверстия в листе, сопротивление всей поверхности листа и поверхности почвы. Аэродинамическое сопротивление r_s описывает сопротивление вверх от растительности и включает трение потока воздуха над растительностью. Хотя процесс обмена в растительном слое является слишком сложным для описания его с помощью двух факторов сопротивления, тем не менее можно получить хорошую корреляционную связь между измеренной и рассчитанной эвапотранспирацией, особенно для равномерной эталонной травяной поверхности.



Комбинированное уравнение Пенмана-Монтейта имеет следующий вид:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left[1 + \frac{r_s}{r_a} \right]} \quad (3)$$

где R_n - чистая радиация; G - тепловой поток почвы; $(e_s - e_a)$ представляет дефицит давления паров в воздухе; ρ_a - средняя плотность воздуха при постоянном давлении; c_p - удельная теплота воздуха; Δ - зависимость давления насыщенного пара от температуры; γ - психрометрическая постоянная; r_s и r_a - совокупное поверхностное и аэродинамическое сопротивления. Параметры уравнения детализируются в главе 3.

Метод Пенмана-Монтейта включает все параметры, управляющие обменом энергии и соответствующий скрытый поток тепла (эвапотранспирация) с однородного растительного покрова. Большинство параметров могут быть измерены или рассчитаны из метеоданных. Уравнение может быть использовано для прямого расчета эвапотранспирации любой культуры при специфическом поверхностном и аэродинамическом сопротивлении.

Аэродинамическое сопротивление (r_a)

Перенос тепла и паров воды с испаряющей поверхности в воздух поверх крон определяется аэродинамическим сопротивлением:

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{om}} \right] \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 u_z} \quad (4)$$

где

r_a аэродинамическое сопротивление [с м^{-1}],
 z_m высота измерения ветра [м],

z_h	высота измерения влажности [м],
d	высота смещения нулевой плоскости [м],
z_{om}	длина шероховатости, определяющая передачу момента [м],
z_{oh}	длина шероховатости, управляющая переносом тепла и пара [м],
k	постоянная фон Кармана, 0,41 [-],
u_z	высота ветра на высоте z [м с^{-1}].

Уравнение ограничено для условий нейтральной стабильности, когда распределение температуры, атмосферного давления и скорости ветра следует почти адиабатическим условиям (без теплового обмена). Применение уравнения для кратких периодов времени (часовых или менее) может потребовать включения корректировки для стабильности. Тем не менее, прогнозируя ET_o для хорошо увлажненной эталонной поверхности, при небольшом теплообмене, корректировки могут не понадобиться.

Многие исследования были посвящены изучению ветрового режима в кронах растений. Нулевое смещение высоты и длины шероховатости должно приниматься во внимание, если поверхность покрыта растительностью. Факторы зависят от высоты и конфигурации растительности. Для определения d , z_{om} и z_{oh} выведено несколько эмпирических уравнений. Вывод аэродинамического уравнения для эталонной травянистой поверхности представлен в боксе 4.

(Совокупное) сопротивление поверхности (r_s)

"Совокупное" сопротивление поверхности описывает сопротивление потоку пара через транспирирующие растения и испаряющую поверхность почвы. Там, где растительность не покрывает почву полностью, фактор сопротивления должен включать эффекты испарения с поверхности почвы. Если растение не транспирирует с потенциальной скоростью, сопротивление зависит также от водного состояния растительности. Приемлемое приближение к более сложному отношению между сопротивлением поверхности и плотным растительным покровом может быть выражено следующим образом:

Бокс 4

Аэродинамическое сопротивление эталонной травянистой поверхности

Для широкого спектра культур высота смещения нулевой плоскости d [м] и длины шероховатости, управляющей передачей момента z_{om} [м], могут быть определены через высоту растений h [м] с помощью следующего уравнения:

$$d = 2/3 h$$

$$z_{om} = 0,123 h$$

Длина шероховатости, управляющей передачей тепла и пара z_{oh} [м] может быть аппроксимирована:

$$z_{oh} = 0,1 z_{om}$$

Принимая высоту растений постоянной, равной 0,12 м и стандартную высоту измерения скорости ветра, температуры и влажности воздуха 2 м ($z_m = z_h = 2$ м), аэродинамическое сопротивление r_a [с м^{-1}] для эталонной травянистой поверхности становится равным

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{2 - 2/3(0,12)}{0,123(0,12)} \right] \ln \left[\frac{2 - 2/3(0,12)}{(0,1)0,123(0,12)} \right]}{0,41^2 u_2} = \frac{208}{u_2}$$

где u_2 - скорость ветра [м с^{-1}] на высоте 2 м.

$$r_s = \frac{r_1}{LAI_{active}} \quad (5)$$

где

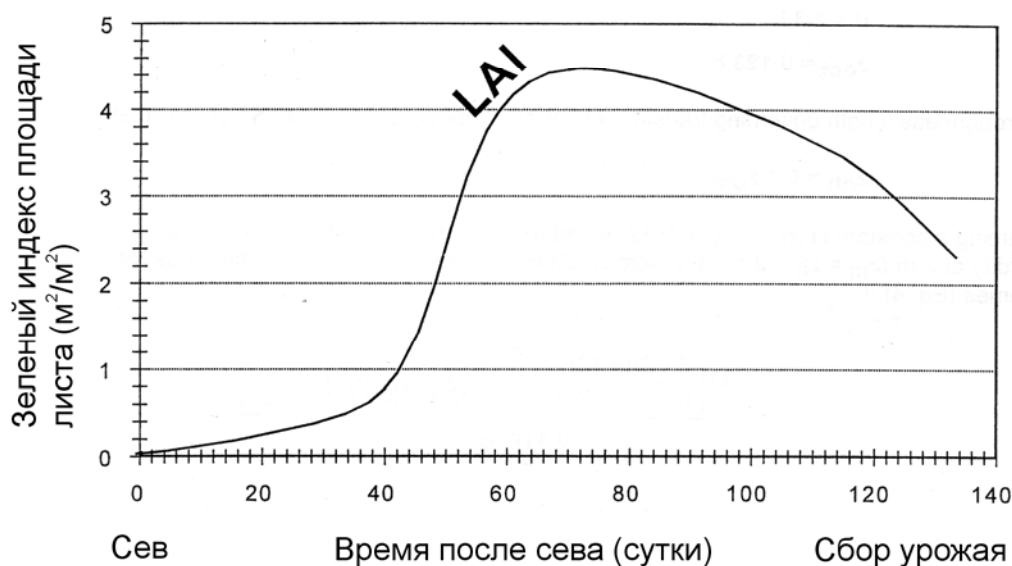
r_s (совокупное) сопротивление поверхности [m^{-1}],
 r_1 общее сопротивление хорошо освещенного листа [m^{-1}],
 LAI_{active} индекс активной (освещенной) части листа
 $[m^2 \text{ (поверхность листа)} m^{-2} \text{ (поверхность почвы)}]$.

Индекс площади листа (LAI) - безразмерная величина - это площадь листа (только верхней стороны), отнесенная к единице площади под ним. Он выражается в квадратных метрах лиственного покрова на квадратный метр поверхности почвы. Активный LAI - это индекс лиственной поверхности, которая активно участвует в переносе тепла и пара. Это обычно верхняя, освещенная часть густой кроны. LAI варьирует для различных культур, но 3-5 - наиболее распространенные значения для многих зрелых растений. Зеленый LAI для данной культуры изменяется в течение сезона и достигает максимума перед цветением (рис. 8). LAI также зависит от густоты растений и разнообразия культур.

Суммарное сопротивление листа r_1 - есть среднее сопротивление отдельного листа. Это сопротивление является специфическим для культуры и изменяется в зависимости от типа культур и управления ими. С ростом и созреванием растения оно увеличивается, тем не менее, в отношении изменений r_1 во времени и для различных культур имеется нехватка консолидированной информации. Информация по проводимости и сопротивлению листа, имеющаяся в литературе, чаще ориентирована на физиологические и экофизиологические исследования.

Сопротивление r_1 подчиняется воздействию климата и водности. Тем не менее, это воздействие отличается для различных культур и может проявляться по-разному. Оно возрастает при водном стрессе культуры и при ограничении эвапотранспирации наличием влаги. Некоторые исследования показывают, что на сопротивление оказывают влияние интенсивность радиации, температура и дефицит давления пара. Вывод сопротивления для эталонной травяной поверхности представлен в боксе 5.

Рис. 8. Типовое представление изменений индекса площади листьев в течение вегетационного периода для кукурузы



Бокс 5**Суммарное сопротивление эталонной травяной поверхности**

Общее уравнение для LAI_{active} имеет вид:

$$LAI_{active} = 0,5 LAI$$

и принимает во внимание факт, что только верхняя половина густой подстриженной травы принимает активное участие в передаче поверхностью тепла и пара. Для подстриженной травы общее уравнение LAI есть

$$LAI = 24 h$$

где h - высота травы [м].

Сопротивление одного листа r_1 имеет значение около 100 с м^{-1} в условиях хорошего увлажнения. Принимая высоту культуры $0,12 \text{ м}$, сопротивление поверхности для эталонной травяной поверхности становится равным (уравнение 5):

$$r_1 = \frac{100}{0,5(24)(0,12)} \approx 70 \text{ с м}^{-1}$$

ЭТАЛОННАЯ ПОВЕРХНОСТЬ

Чтобы избежать необходимости определения параметров испарения для каждой культуры и стадии ее роста, было введено понятие эталонной поверхности. Эвапотранспирация отдельных культур соотносится с эталонной эвапотранспирацией через коэффициент культуры. В прошлом за эталонную поверхность принимали открытую водную поверхность. Однако, определение ET в зависимости от испарения со свободной водной поверхности затруднялось различиями аэродинамических, радиационных характеристик и контроля роста. Отнесение ET_0 к конкретной культуре имеет преимущество в сочетании биологических и физических процессов, вовлеченных в ET_0 с засеянной поверхностью.

Трава, вместе с люцерной, является хорошо изученной культурой в отношении ее аэродинамических и поверхностных характеристик и принята повсеместно в качестве эталонной поверхности. Поскольку сопротивление рассеивания пара сильно зависит от высоты растения, покрытия, LAI и условий увлажнения почвы, характеристики эталонной культуры должны быть хорошо определены и зафиксированы. Изменения высоты культуры отражаются в шероховатости и LAI. Следовательно, крона растений и аэродинамические характеристики будут изменяться во времени. Более того, водный стресс и степень покрытия поверхности растительностью влияют на сопротивление и альбедо.

Чтобы избежать проблем с калибровкой к местным условиям, которая требует дорогостоящих исследований, выбрана гипотетическая травяная поверхность. Трудности с выбором травяной поверхности состоят в том, что различия в сорте травы и ее морфологии могут значительно влиять на скорость эвапотранспирации, особенно во время пикового использования воды. Большие расхождения могут иметь место между типами травы в теплый и прохладный сезоны. Трава прохладного сезона имеет более низкий уровень контроля stomаты и, следовательно, более высокий уровень эвапотранспирации. Представляется затруднительным выращивать травы прохладного сезона в аридном тропическом климате.

Экспертная консультация ФАО приняла единое определение эталонной поверхности:

"Гипотетическая эталонная культура высотой 0,12 м, фиксированным сопротивлением поверхности 70 с м^{-1} и альбедо 0,23."

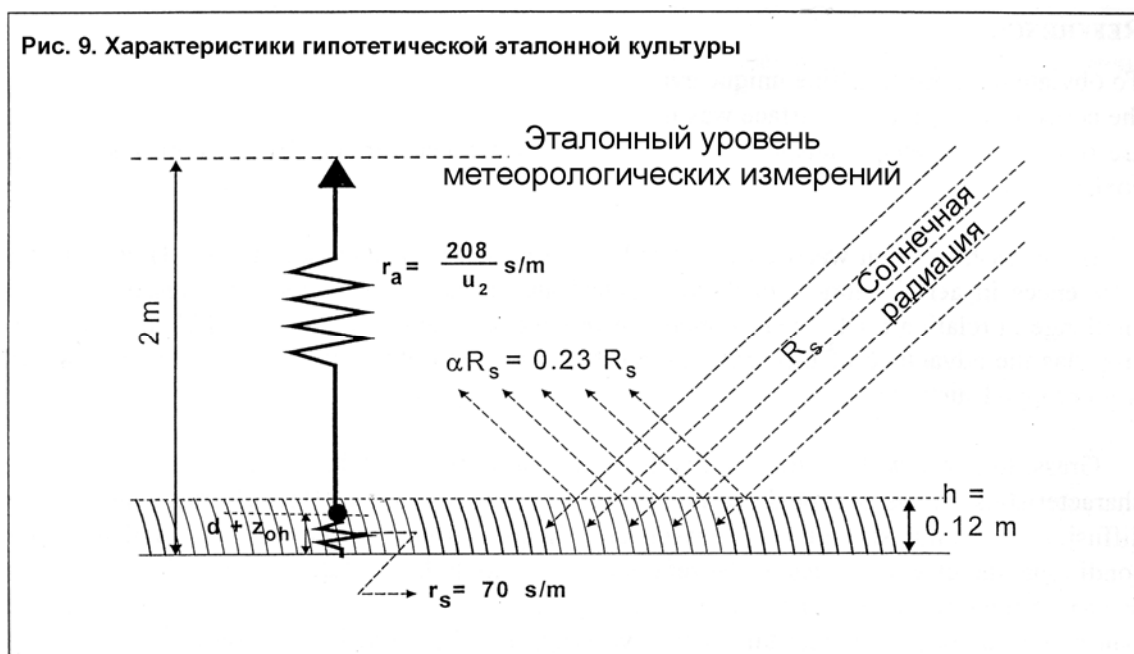
Эталонная поверхность очень близка к обширной площади зеленой травы одной высоты, активно растущей, полностью затеняющей поверхность почвы и хорошо увлажняемой. Требование к обширности и однообразию травяной поверхности проистекают из допущения, что все потоки являются одномерными и направлены вверх.

Метод Пенмана-Монтейта рекомендован в качестве метода, с помощью которого эвапотранспирация с эталонной поверхности может быть определена недвусмысленно и который обеспечивает сопоставимые значения E_T во всех регионах при любом климате.

УРАВНЕНИЕ ПЕНМАНА-МОНТЕЙТА (ФАО)

Уравнение

В мае 1990 г. ФАО совместно с МКИД и ВМО организовала консультацию экспертов и ученых для обзора методологии ФАО по требованиям растений на воду с целью ревизии и совершенствования процедур.



Совет экспертов рекомендовал утвердить комбинированный метод Пенмана-Монтейта в качестве нового стандарта для эталонной эвапотранспирации и процедуры расчета различных параметров. Определением эталонной эвапотранспирации как гипотетической культуры высотой 0,12 м, сопротивлением поверхности 70 с м^{-1} и альбедо 0,23, сходной с обширной площадью зеленой травы одной высоты, активно растущей и соответственно увлажненной, была заложена основа для разработки метода Пенмана-Монтейта. Метод преодолел недостатки метода Пенмана и обеспечивает значения, более сходные с реальными данными об использовании воды растениями во всем мире.

Уравнение Пенмана-Монтейта (ФАО) может быть выведено из первоначального уравнения (3) и уравнений аэродинамического (4) и поверхностного (5) сопротивлений.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (6)$$

где

ET_o - эталонная эвапотранспирация [мм сут⁻¹];

R_n - чистая радиация на поверхности растений [МДж м⁻² сут⁻¹];

G - плотность теплового потока почвы [МДж м⁻² сут⁻¹];

T - среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м [°C];

u_2 - скорость ветра на высоте 2 м [м с⁻¹];

e_s - давление пара насыщения [кПа];

e_a - фактическое давление [кПа];

$(e_s - e_a)$ - дефицит давления пара насыщения [кПа];

Δ - уклон кривой давления пара [кПа °C⁻¹];

γ - психрометрическая постоянная [кПа °C⁻¹].

Эталонная эвапотранспирация ET_o обеспечивает стандарт, с которым:

- можно сравнивать эвапотранспирацию в разные периоды года;
- можно соотнести эвапотранспирацию для других культур.

Уравнение использует стандартные климатические замеры солнечной радиации, температуры и влажности воздуха и скорости ветра. Для повышения совместимости данных, замеры должны производиться на высоте 2 м (или преобразованы для этой высоты) над обширной поверхностью зеленой травы, затеняющей поверхность и хорошо увлажненной.

Уравнение эвапотранспирации на базе климатических данных не может быть использовано для точного расчета эвапотранспирации в различных климатических условиях ввиду упрощения в формулировании и ошибок измерений. Возможно, точные замеры в идеальных экологических условиях могут показать значения, отличные от полученных с помощью формулы Пенмана-Монтейта. Тем не менее, консультация экспертов согласилась использовать гипотетическое эталонное определение уравнения Пенмана-Монтейта для ET_o травы при выведении коэффициентов культуры.

Сравнивая уравнение Пенмана-Монтейта с измеренным ET_o , важно учитывать что полное уравнение Пенмана-Монтейта (3) и связанные с ним уравнения для r_a и r_s (4) и (5) могут быть использованы для учета изменений ET ввиду изменений высоты травяного покрова. Разница в высоте может отразиться на индексе LAI, d и z_{om} , а также на прогнозируемой величине ET_o . Оценивая результаты, следует иметь в виду, что такие локальные факторы, как экологические и управленческие, например, частота увлажнения, также влияют на определение ET_o .

Уравнение Пенмана-Монтейта является простым представлением физических и физиологических факторов, управляющих процессами эвапотранспирации. Используя определение ET_o по Пенману-Монтейту, можно рассчитывать коэффициент культуры на изучаемых площадках, определив соотношение измеренной ET_c с расчетной ET_o , т. е. $K_c = ET_c/ET_o$. В методе определения коэффициента культуры учтены различия кроны и аэродинамического сопротивления растений относительно гипотетической эталонной культуры. Фактор K_c служит в качестве объединителя физических и физиологических различий между культурами и эталонного определения.

Данные

Не считая расположения площадки, уравнение Пенмана-Монтейта требует данных по температуре и влажности воздуха, солнечной радиации и скорости ветра для суточных, недельных и месячных расчетов. Перечень данных, необходимых для расчета эталонной эвапотранспирации приводится в главе 3. Важно уточнить размерность, в которой представлены данные.

Коэффициенты перевода из общей размерности в стандартную приведены в приложении 1.

Местоположение

Высота над уровнем моря (м) и широта расположения площадки (градусы с. ш. или ю. ш.) должны быть уточнены и указаны. Эти данные нужны для приведения метеоданных к местному среднему значению атмосферного давления (функции от высоты над уровнем моря) и расчета внеземной радиации (R_a), а в некоторых случаях - часы дневного света (N). В расчетах R и N широта выражена в радианах (т. е. десятичных временных градусах $\pi/180$).

Бокс 6

Вывод уравнения Пенмана-Монтейта для гипотетической эталонной травяной культуры

При стандартной высоте измерения скорости ветра, температуры и влажности 2 м ($z_m = z_h = 2$ м) и высоте растений 0,12 м аэродинамическое и поверхностное сопротивления равны (боксы 4 и 5):

$$r_a = 208/u_2 \text{ с м}^{-1} \text{ (при скорости ветра } u_2 \text{ на высоте 2 м),}$$

$$r_s = 70 \text{ с м}^{-1}$$

$$(1 + r_s/r_a) = (1 + 0,34 u_2)$$

R_n и G обычно приводятся к единице площади и выражаются в $\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$. Для преобразования единиц энергии радиации в эквивалентный слой воды (мм) со скрытым теплом парообразования, используется коэффициент λ (глава 1). Преобразование энергии в соответствующий слой воды или наоборот представлено уравнением (20):

$$\text{Радиация [мм сут}^{-1}] \approx \frac{\text{Радиация [МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}]}{2,45} = 0,408 \text{ Радиация [МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}]$$

Подставляя c_p с преобразованием уравнения 8:

$$c_p = \frac{\gamma \varepsilon \lambda}{P}$$

и рассматривая закон идеального газа для p_a :

$$p_a = \frac{P}{T_{kv} R}$$

где T_{kv} - виртуальная температура, может быть заменена на

$$T_{kv} = 1,01 (T + 273)$$

с получением

$$\frac{c_p \rho_a}{r_a} = \frac{\gamma \varepsilon \lambda}{1,01(T + 273)R(208)} u_2 \quad [\text{МДж м}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ с}^{-1}]$$

где

c_p - удельное тепло при постоянном давлении [$\text{МДж кг}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$];

ρ_a - средняя плотность воздуха при постоянном давлении [кг м^{-3}];

r_a - аэродинамическое сопротивление [с м^{-1}];

γ - психрометрическая постоянная [$\text{кПа } ^\circ\text{C}^{-1}$];

ε - отношение молекулярных весов водяного пара и сухого воздуха = 0,622;

λ - скрытое тепло парообразования [МДж кг^{-1}];

u_2 - скорость ветра на высоте 2 м [м с^{-1}];

R - удельная газовая постоянная = 0,287 $\text{кДж кг}^{-1} \text{ К}^{-1}$;

T - температура воздуха [$^\circ\text{C}$];

P - атмосферное давление [кПа].

$$= \frac{\gamma (0,622) \lambda}{1,01(T + 273)(0,287)(208)} u_2 \quad [\text{МДж м}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{сут}^{-1}]$$

или отнесенное к λ ($\lambda = 2,45$):

$$\approx \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 \quad [\text{мм } ^\circ\text{C}^{-1} \text{сут}^{-1}]$$

Положительное значение используется для северного полушария, отрицательное - для южного.

Температура

Необходима (средняя) дневная максимальная и минимальная температура воздуха в градусах Цельсия ($^\circ\text{C}$). Если имеются замеры только средней величины, расчеты могут быть произведены, но возможно значение ET_0 будет заниженным ввиду нелинейной зависимости между давлением пара насыщения и температурой (рис. 11). Использование средней температуры вместо минимальной и максимальной приводит к занижению давления насыщенного пара e_s и, следовательно, и разницы давления пара ($e_s - e_a$) и меньшей величине эталонной эвапотранспирации.

Влажность

Требуется (средне-) суточное фактическое давление пара e_a в килопаскалях (кПа). Если оно отсутствует, его можно вывести из максимальной и минимальной относительной влажности (%), психрометрических данных (температура сухого и влажного пузырька в $^\circ\text{C}$) или температуры точки росы ($^\circ\text{C}$) в соответствии с процедурами, изложенными в главе 3.

Радиация

Требуется (средне-) суточная чистая радиация, выраженная в мегаджоулях на квадратный метр в сутки ($\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$). Эти данные имеются не всегда, но могут быть выведены из (средней) коротковолновой радиации, измеренной пиррафотометром или из (средне-) суточного фактического солнечного сияния (часов в день), измеренного с помощью датчика солнечного сияния Кемпбелла-Стокса (Campbell-Stokes). Процедуры расчета описаны в главе 3.

Скорость ветра

Требуется (средне-) суточная скорость ветра в метрах в секунду (м с^{-1}), измеренная на высоте 2 м от поверхности земли. Важно проверить высоту измерения скорости ветра, т. к. скорость ветра, измеренная на разной высоте, отличается. Процедура приведения скорости ветра к высоте 2 м представлена в главе 3.

Отсутствующие климатические данные

Могут быть ситуации, когда некоторые метеоданные отсутствуют. В общем случае следует избегать процедуры расчета ET_0 , требующей ограниченного числа метеорологических параметров. Рекомендуется рассчитывать ET_0 с использованием стандартного метода Пенмана-Монтейта после решения специфических проблем недостающих данных. Процедуры восстановления недостающих данных описаны в главе 3. Использование полного или неполного набора данных для расчета ET_0 дает меньшее отличие в ее значении по сравнению с другими ме-

тодами расчета.

Даже если набор данных содержит минимальные и максимальные значения температуры воздуха, возможно получение приемлемых значений ET_0 для декады или месяца с помощью метода Пенмана-Монтейта. Как описано в главе 3, данные о радиации могут быть выведены из разницы температур или, вместе с данными о скорости ветра и влажности, могут быть взяты с близлежащей метеостанции. Данные по влажности могут быть также определены из минимальной суточной температуры. После оценки возможности использования данных с соседней метеостанции, могут быть рассчитаны декадные или месячные значения ET_0 .

Процедуры по определению недостающих данных должны быть оценены на региональном уровне. Это может быть сделано для метеостанций с полным набором данных, сравнивая с ET_0 , рассчитанной по полному и неполному набору данных. Соотношение должно быть близким к единице. Если соотношение сильно отличается от единицы, оно может быть использовано в качестве корректирующего фактора для определения, сделанного на основе неполного набора данных. Там, где стандартная ошибка определения превышает 20 % от значения ET_0 , необходим анализ чувствительности для определения причин (и пределов) использования метода с тем, чтобы дополнить недостающие данные. Оценка должна быть выполнена для каждого месяца и каждой переменной, как для суточных, так и для месячных определений.

Глава 3

Метеорологические данные

Методы расчета эвапотранспирации по метеоданным требуют различных климатических и физических параметров. Некоторые данные замеряются прямо на метеостанциях. Другие параметры зависят от измеряемых данных и могут быть выведены с помощью прямых или эмпирических зависимостей. В данной главе рассматриваются источники, измерение и расчет всех данных, требуемых для расчета эвапотранспирации по методу Пенмана-Монтейта. Различные примеры иллюстрируют различные процедуры расчета. Приводятся также соответствующие процедуры для определения отсутствующих данных.

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЕТ

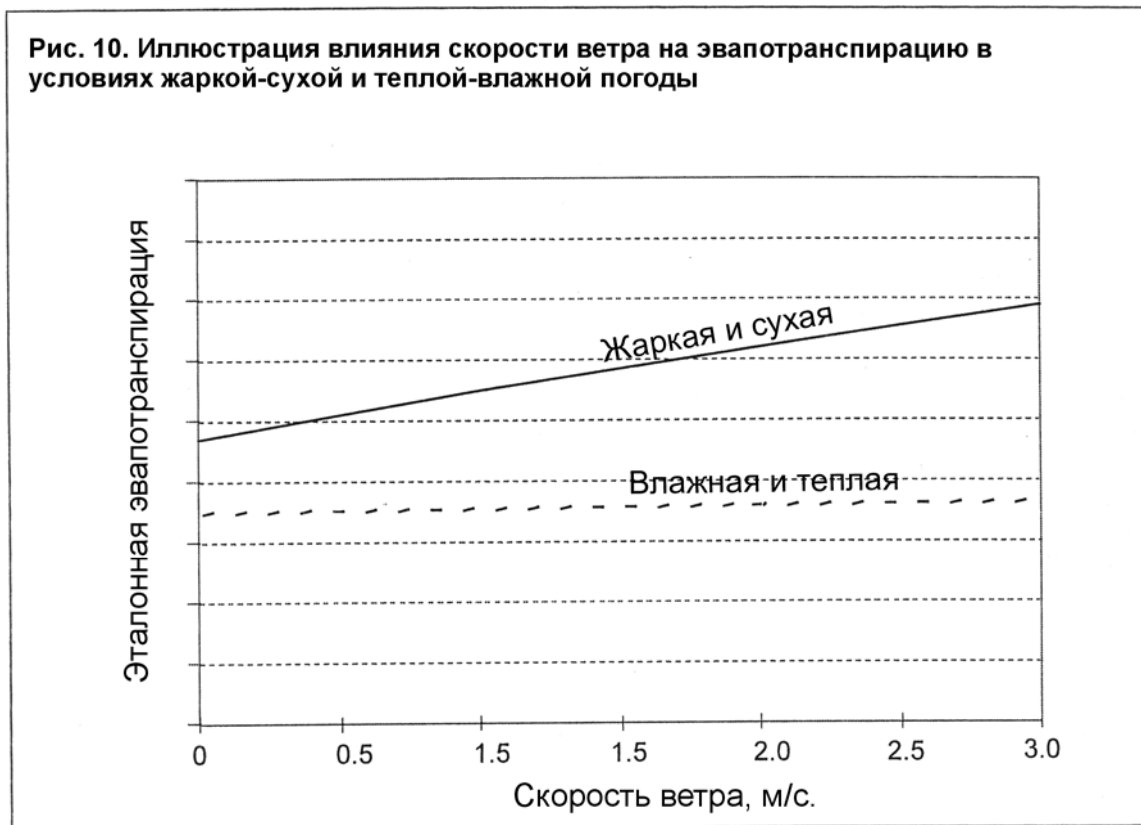
Метеорологические факторы, определяющие эвапотранспирацию - это метеорологические параметры, которые обеспечивают энергию парообразования и удаляют водяные пары с испаряющей поверхности. Основные метеорологические параметры приводятся ниже.

Солнечная радиация

Процесс эвапотранспирации определяется имеющейся для испарения воды количеством энергии. Солнечная радиация является основным источником энергии, способным превратить большие количества воды в пар. Потенциальное количество радиации, способное достичь испаряющей поверхности, определяется положением этой поверхности и временем года. В соответствии с положением Солнца потенциальная радиация отличается для различных широт и различных сезонов. Реальная солнечная радиация, достигающая испаряющей поверхности, зависит от запыленности атмосферы и наличия облачности, которые отражают и поглощают большую часть радиации. Оценивая влияние солнечной радиации на эвапотранспирацию, следует иметь в виду, что не вся имеющаяся энергия используется для испарения воды. Часть солнечной энергии используется для нагрева атмосферы и почвенного профиля.

Температура воздуха

Солнечная радиация, поглощенная атмосферой и тепло, излучаемое Землей, повышают температуру воздуха. Физическое тепло окружающего воздуха передает энергию растениям и контролирует скорость эвапотранспирации. При солнечной теплой погоде потери воды на эвапотранспирацию больше, чем в облачную и прохладную погоду.



Влажность воздуха

Поскольку энергия Солнца и окружающего воздуха является главной движущей силой испарения воды, разница между давлением водяного пара на испаряющей поверхности и в окружающем воздухе является определяющим фактором переноса пара. Хорошо увлажненные поля в сухих аридных регионах потребляют огромное количество воды благодаря избытку энергии и иссушающей силы атмосферы. Во влажных тропических регионах, несмотря на большое количество энергии, высокая влажность воздуха снижает потребность в эвапотранспирации. В такой среде воздух близок к насыщению парами, так что может быть накоплено меньшее количество дополнительной воды и, следовательно, эвапотранспирация ниже, чем в аридных регионах.

Скорость ветра

Процесс удаления пара в большой степени зависит от турбулентности ветра и воздуха, которая переносит большие массы воздуха над испаряющей поверхностью. Испаряя воду, воздух над испаряющей поверхностью постепенно насыщается водяными парами. Если этот воздух не замещается постоянно более сухим, движущая сила удаления водяного пара и эвапотранспирации ослабевает.

Совокупный эффект климатических факторов, воздействующих на эвапотранспирацию, проиллюстрирован на рис. 10 для двух различных климатических условий. Эвапотранспирация высока при жаркой и сухой погоде благодаря сухости воздуха и энергии прямой солнечной радиации и скрытого тепла. В этих обстоятельствах в воздухе аккумулируется много водяных паров, пока ветер позволит парам удалиться с поверхности. С другой стороны, в условиях

влажной погоды высокая влажность воздуха при наличии облачности снижает эвапотранспирацию. Влияние возрастающей скорости ветра на эвапотранспирацию для двух различных климатических условий показано на рис. 10. Чем суше воздух, тем больше влияние на ET и тем больше градиент кривой. Для влажных условий ветер может заместить насыщенный парами воздух менее насыщенным и снять тепловую энергию. Следовательно, скорость ветра влияет на эвапотранспирацию в меньшей степени, чем в аридных условиях, где небольшие изменения скорости ветра могут выразиться в сравнительно больших изменениях скорости эвапотранспирации.

АТМОСФЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Для выражения климатических параметров имеется несколько зависимостей. Влияние основных климатических параметров на эвапотранспирацию может быть оценено с помощью этих уравнений. Некоторые из зависимостей требуют параметров, которые выражают специфические характеристики атмосферы. Перед тем, как изучить четыре основных метеорологических параметра, следует обсудить некоторые атмосферные параметры.

Атмосферное давление (P)

Атмосферное давление вызвано весом земной атмосферы. Испарение на больших высотах усиливается благодаря низкому атмосферному давлению, выраженному психрометрической постоянной. Влияние его, тем не менее, мало и в процедурах расчета достаточно иметь среднее значение для местности. Упрощение закона идеального газа, принимая 20 °C за стандартную атмосферу, может быть использовано для расчета P:

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (7)$$

где

P - атмосферное давление [кПа];

z - высота над уровнем моря [м].

Значения атмосферного давления, как функции от абсолютной высоты, даны в приложении 2 (табл. 2.1).

Скрытая теплота парообразования (λ)

Скрытая теплота парообразования выражает энергию, требуемую для преобразования единицы массы воды в пар при постоянном давлении и температуре. Значение скрытой теплоты варьирует как функция от температуры. При высокой температуре требуется меньше энергии, чем при низкой. Поскольку λ изменяется незначительно, при нормальной температуре для уравнения Пенмана-Монтейта принята одна величина 2,45 МДж кг⁻¹. Это скрытая теплота для температуры воздуха выше 20 °C.

Психрометрическая постоянная (γ)

Психрометрическая постоянная определяется из формулы

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0,665 \times 10^{-3} P \quad (8)$$

где

γ - психрометрическая постоянная [кПа $^{\circ}\text{C}^{-1}$];

P - атмосферное давление [кПа];

λ - скрытая теплота парообразования, 2,45 [МДж кг^{-1}];

c_p - удельное тепло при постоянной температуре, $1,013 \cdot 10^{-3}$ [МДж $\text{кг}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$];

ε - отношение молекулярных весов водяного пара и сухого воздуха = 0,622.

Удельное тепло при постоянном давлении - это количество энергии, требуемое для повышения температуры единицы массы воздуха на один градус при постоянном давлении. Его величина зависит от состава воздуха, т. е. от его влажности. Для средних атмосферных условий может быть использовано значение $c_p = 1,013 \cdot 10^{-3}$ МДж $\text{кг}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$. Поскольку для каждой местности используется среднее атмосферное давление (уравнение 7), психрометрическая константа сохраняется постоянной для каждой местности. Значения психрометрической постоянной, как функции абсолютной высоты, приведены в приложении 2 (табл. 2.2).

ПРИМЕР 2

Определение атмосферных параметров

Определить атмосферное давление и психрометрическую постоянную на высоте 1800 м.

При:	$z =$	1800	м
Из ур-я 7:	$P = 101,3 [(293 - (0,0065) 1800)/293]^{5,26} =$	81,8	кПа
Из ур-я 8:	$\gamma = 0,665 \cdot 10^{-3} (81,8) =$	0,054	кПа $^{\circ}\text{C}^{-1}$

Среднее значение атмосферного давления 81,8 кПа.

Психрометрическая постоянная $\gamma = 0,054$ кПа/ $^{\circ}\text{C}$.

ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА

Агрометеорология имеет дело с температурой воздуха на высоте кроны растений. На традиционных и современных метеорологических станциях температура воздуха измеряется внутри укрытий (экраны Стивенсона или вентилируемые радиационные щиты), установленных в соответствии со стандартами ВМО на высоте 2 м от поверхности Земли. Укрытия предназначены для защиты инструмента от прямого попадания солнечного тепла. Конструкция позволяет воздуху свободно циркулировать вокруг инструмента. Температура воздуха измеряется термометрами, термисторами и термопарами, установленными в укрытии. Минимальные и максимальные термометры регистрируют минимальную и максимальную температуру в течение 24 часов. Термографы записывают мгновенную температуру в течение дня или недели. Электронные метеостанции часто измеряют температуру воздуха каждую минуту и передают среднечасовые значения в дополнение к максимальным и минимальным в течение 24 часов.

Ввиду нелинейности данных по влажности, требуемых для уравнения Пенмана-Монтейта, давление пара для определенного периода должно быть рассчитано как среднее между давлением пара при минимальной и максимальной температуре воздуха за 24-часовой период, начиная с полночи. T_{\max} и T_{\min} для более продолжительных периодов, таких, как неделя, декада или месяц, выводятся путем деления суммы соответствующих дневных значений на количество дней в периоде. Среднесуточная температура воздуха (T_{mean}) используется в формуле Пенмана-Монтейта лишь для расчета градиента кривых давления пара насыщения (Δ) и влияния средней плотности воздуха (P_a), так как влияние изменения температуры на величину климатического

параметра в этих случаях слишком мало. С целью стандартизации, T_{mean} для 24-часового периода определяется как среднее от суточной максимальной (T_{max}) и минимальной (T_{min}) температур, более чем среднее от часовых замеров температуры:

$$T_{mean} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (9)$$

Температура дается в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) или Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$). Таблица преобразования дана в приложении 1. В некоторых процедурах расчета температура требуется в градусах Кельвина ($^{\circ}\text{K}$), которую можно получить добавлением 273,16 к температуре Цельсия (практически $\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273,16$). Шкалы Цельсия и Кельвина имеют одинаковые интервалы.

ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА

Концепции

Содержание влаги в воздухе может быть выражено несколькими способами. В агрометеорологии давление пара, температура точки росы и относительная влажность являются обычными выражениями для влажности воздуха.

Давление пара

Водяной пар является газом и его давление является вкладом в атмосферное давление. Количество воды в воздухе напрямую относится к парциальному давлению, вызванному водяным паром в воздухе и, следовательно, является прямой мерой содержания влаги в воздухе.

В стандартных единицах СИ давление больше не выражается в сантиметрах воды, миллиметрах ртутного столба, барах, атмосферах и т. п., а только в паскалях (Па). Переводные коэффициенты между различными единицами и паскалями даны в приложении 1. Так как паскаль соотносится с относительно малой силой (1 ньютон), приложенной к относительно большой площади (1 м^2), обычно используется умножение на базовую единицу. Например, давление пара выражается в килопаскалях ($\text{кПа} = 1000 \text{ Па}$).

Когда воздух зажат над испаряющей поверхностью, достигается равновесие между молекулами воды, покидающими и возвращающимися в водный резервуар. Воздух является насыщенным, так как не содержит избыточных молекул воды. Соответствующее давление называется давлением пара насыщения ($e^0(T)$). Количество молекул воды, которые могут накапливаться в воздухе, зависит от температуры (T). Чем выше температура, тем выше накопительная способность и давление пара насыщения (рис. 11).

Как видно из рис. 11, кривая изменяется экспоненциально в зависимости от температуры. При низкой температуре градиент кривой мал и слабо изменяется с подъемом температуры. При высокой температуре градиент большой и небольшие изменения температуры выражаются в больших изменениях градиента. Градиент кривой давления пара насыщения является важным параметром в описании парообразования и необходим в уравнениях для расчета E_T по климатическим данным.

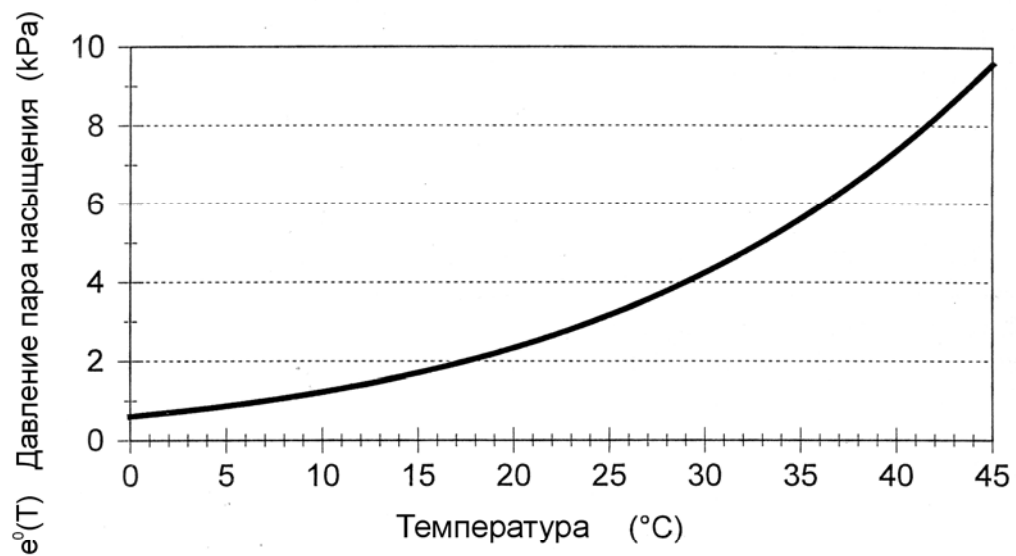
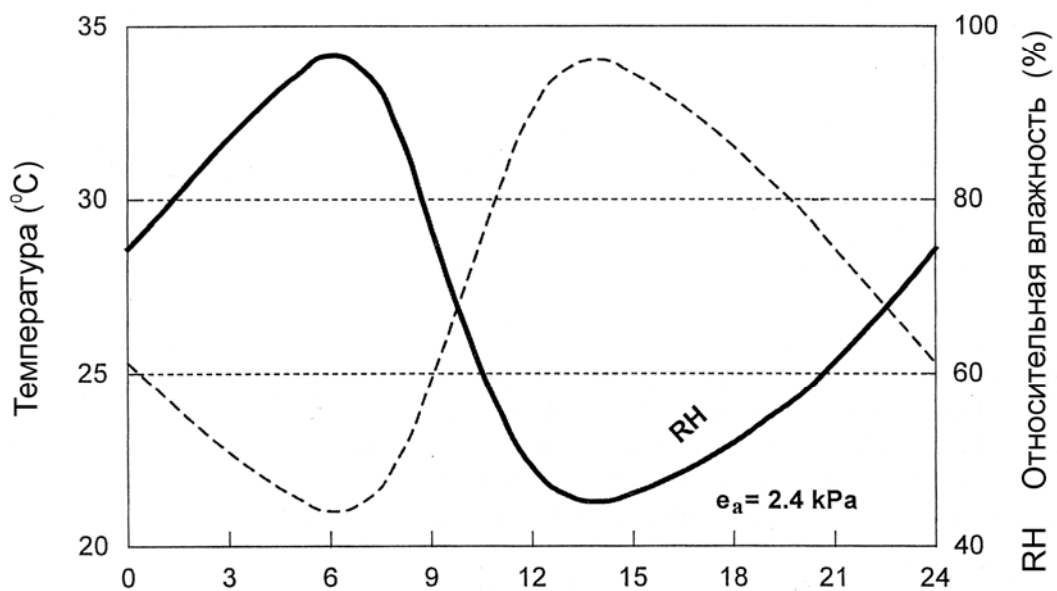
Рис. 11. Давление насыщенного пара как функция температуры: кривая $e^{\circ}(T)$ 

Рис. 12. Изменение относительной влажности в течение 24 часов при постоянном действующем давлении пара 2,4 кПа



Фактическое давление пара (e_a) - это давление пара, оказываемое водой в воздухе. Когда воздух не насыщен, фактическое давление пара будет ниже, чем давление пара насыщения. Разница между давлением насыщения и фактическим давлением пара называется дефицитом давления пара или дефицитом насыщения и является точным индикатором реальной испаряющей способности воздуха.

Температура точки росы

Температура точки росы - это температура, до которой должен быть охлажден воздух, чтобы стать насыщенным. Фактическое давление пара при температуре точки росы равно давлению пара насыщения. Чем суше воздух, тем больше разница между температурой воздуха и температурой точки росы.

Относительная влажность

Относительная влажность (RH) выражает степень насыщения воздуха как отношение фактического давления пара (e_a) к давлению пара насыщения ($e^0(T)$) при той же температуре (T):

$$RH = 100 \frac{e_a}{e^0(T)} \quad (10)$$

Относительная влажность - это отношение количества воды, удерживаемого окружающим воздухом, при той же температуре. Величина безразмерная и обычно выражается в процентах. Хотя фактическое давление пара может быть относительно постоянным в течение дня, относительная влажность колеблется между максимумом в момент рассвета и минимумом в полдень (рис. 12). Изменения относительной влажности есть результат того, что давление пара насыщения определяется температурой воздуха. Поскольку температура меняется в течение дня, относительная влажность также изменяется значительно.

Измерения

Прямое измерение фактического давления пара невозможно. Оно обычно выводится из относительной влажности или температуры точки росы.

Относительная влажность замеряется напрямую с помощью гигрометров. Измерение основано на природе такого материала, как волос, который изменяет свою длину в зависимости от влажности воздуха, или на использовании изменений электрической емкости в зависимости от влажности воздуха. Давление пара может быть измерено косвенно с помощью психрометров, измеряющих разницу температур двух термометров: с сухим и мокрым пузырьком. Термометр с сухим пузырьком измеряет температуру воздуха. Термометр с мокрым пузырьком постоянно покрыт влажной тканью. Испарение воды с ткани, требующее энергии, понижает температуру. Чем суше воздух, тем больше испарительное охлаждение и падение температуры. Разница между температурами, замеренными сухим и влажным пузырьками, называется депрессией влажного пузырька и является мерой влажности воздуха.

Температура точки росы измеряется специальными приборами. Основным принципом некоторых приборов является охлаждение окружающего воздуха до появления росы. Соответствующая температура и будет температурой точки росы.

Данные по относительной влажности и температуре точки росы значительно искажаются ошибками измерения. Ошибка измерения является общей для двух устаревших типов гигро-термографов и для более современных электронных инструментов. Эти приборы описаны в приложении 5. Особое внимание следует обратить на оценку точности и интегральность определения относительной влажности и температуры точки росы. Пользователь должен всегда сравнивать рассчитанную температуру точки росы с минимальной суточной температурой, как

описано в конце этой главы и приложениях 5 и 6. Часто лучше использовать температуру точки росы, которая прогнозируется из минимальной суточной температуры, чем использовать ненадежные измерения относительной влажности. Пользователь должен использовать четкую оценку в этой области.

Процедуры расчетов

Среднее давление пара насыщения (e_s)

Поскольку давление пара насыщения связано с температурой воздуха, оно может быть рассчитано с использованием температуры воздуха. Уравнение имеет вид:

$$e^0(T) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27 T}{T + 237,3} \right] \quad (11)$$

где

$e^0(T)$ - давление пара насыщения при температуре T [кПа];

T - температура воздуха [$^{\circ}\text{C}$];

$\exp [\dots]$ - 2,7183 (основание натурального логарифма в степени [...]).

Значения давления пара насыщения, как функция температуры воздуха, даны в приложении 2 (табл. 2.3). Ввиду нелинейности уравнения (11), среднее давление пара насыщения для суток, недели, декады или месяца должно рассчитываться как среднее между давлением пара насыщения и среднесуточной максимальной и минимальной температурой воздуха для данного периода:

$$e_s = \frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \quad (12)$$

Использование средней температуры воздуха вместо максимальной и минимальной температур приводит к занижению среднего давления насыщенного пара. Соответствующий дефицит давления пара (параметр, выражающий испаряющую силу атмосферы) будет также меньше и, как результат, эталонная эвапотранспирация культуры будет занижена. Следовательно, среднее давление пара насыщения должно быть рассчитано как среднее между давлением пара насыщения и максимальной и минимальной суточной температурой.

ПРИМЕР 3

Определение среднего давления пара насыщения

Суточная минимальная и максимальная температура равны, соответственно, 15 и 24,5 $^{\circ}\text{C}$. Определить давление пара насыщения на этот день.

Из ур-я 11:	$e^0(T_{\max}) = 0,6108 \exp[17,27 (24,5)/(24,5 + 237,3)]$	3,075	кПа
Из ур-я 11:	$e^0(T_{\min}) = 0,6108 \exp[17,27 (15)/(15 + 237,3)]$	1,705	кПа
Из ур-я 12:	$e_s = (3,075 + 1,705)/2$	2,39	кПа
	Отметим, что для температуры 19,75 $^{\circ}\text{C}$ (T_{mean}) $e^0(T) =$	2,30	кПа
Среднее давление пара насыщения 2,39 кПа.			

Градиент кривой давления пара насыщения (Δ)

Для расчета эвапотранспирации требуется знать градиент отношения между давлением пара насыщения и температурой Δ . Градиент кривой (рис. 11) при данной температуре равен:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{17,27T}{T + 237,3} \right) \right]}{(T + 237,3)^2} \quad (13)$$

где

Δ - градиент кривой давления пара насыщения при температуре воздуха

T [кПа °С⁻¹];

T - температура воздуха [°С];

\exp [...] - 2,7183 (основание натурального логарифма в степени [...]).

Значения градиента для различных температур воздуха приведены в приложении 2 (табл. 2.4). В уравнении Пенмана-Монтейта, где Δ находится и в числителе, и в знаменателе, он рассчитывается с использованием средней температуры воздуха (уравнение 9).

Фактическое давление пара (e_a), выведенное из температуры точки росы

Поскольку температура точки росы является температурой, до которой следует охладить воздух, чтобы он стал насыщенным, фактическое давление пара (e_a) является давлением пара насыщения при температуре точки росы (T_{dew}) [°С] или:

$$e_a = e^0(T_{dew}) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27T_{dew}}{T_{dew} + 237,3} \right] \quad (14)$$

Фактическое давление пара (e_a), выведенное из психрометрических данных

Фактическое давление пара может быть определено из разницы между температурой сухого и влажного пузырька, так называемой депрессии влажного пузырька. Отношение описывается следующим уравнением:

$$e_a = e^0(T_{wet}) - \gamma_{psy} (T_{dry} - T_{wet}) \quad (15)$$

где

e_a - фактическое давление пара [кПа];

$e^0(T_{wet})$ - давление пара насыщения при температуре влажного пузырька [кПа];

γ_{psy} - психрометрическая постоянная инструмента [кПа °С⁻¹];

$T_{dry} - T_{wet}$ - депрессия влажного пузырька при температуре T_{dry} сухого пузырька и T_{wet} влажного пузырька [°С].

Психрометрическая постоянная инструмента:

$$\gamma_{psy} = a_{psy} P \quad (16)$$

где a_{psy} - коэффициент, зависящий от типа вентиляции влажного пузырька [°С⁻¹] и P - атмосферное давление [кПа]. Коэффициент a_{psy} , в основном, зависит от конструкции психрометра и скорости вентиляции вокруг влажного пузырька. Используются следующие величины:

$a_{psy} = 0,000662$	для вентилируемых (типа Асмани) психрометров со скоростью движения воздуха 5 м/с;
$0,000800$	для естественно-вентилируемых психрометров (около 1 м/с);
$0,001200$	для невентилируемых психрометров, установленных внутри помещения.

ПРИМЕР 4**Определение фактического давления пара по замерам психрометра**

Определить давление пара по замерам психрометра на участке с абсолютной отметкой 1200 м. Температура, измеренная термометрами с сухим и влажным пузырьком, равна, соответственно, 25,6 и 19,5 °С.

Из ур-я 7 (табл. 2.1): затем: Из ур-я 11 (табл. 2.3): затем: вентилируемый психрометр	$z =$ $P =$ $T_{\text{wet}} =$ $e^0(T_{\text{wet}}) =$ $a_{\text{psy}} =$	1200 87,9 19,5 2,267 0,000662	м кПа °С кПа °С ⁻¹
Из ур-я 15:	$e_a = 2,267 - 0,000662 (87,9) (25,6 - 19,5) =$	1,91	кПа
Фактическое давление пара равно 1,91 кПа.			

Фактическое давление пара (e_a), выведенное из данных относительной влажности

Фактическое давление пара может быть также рассчитано по относительной влажности. В зависимости от наличия данных по влажности, могут быть использованы различные уравнения:

- для RH_{max} и RH_{min} :

$$e_a = \frac{e^0(T_{\text{min}}) \frac{RH_{\text{max}}}{100} + e^0(T_{\text{max}}) \frac{RH_{\text{min}}}{100}}{2} \quad (17)$$

где

e_a - фактическое давление пара [кПа];

$e^0(T_{\text{min}})$ - давление пара насыщения при минимальной суточной температуре [кПа];

$e^0(T_{\text{max}})$ - давление пара насыщения при максимальной суточной температуре [кПа];

RH_{max} - максимальная относительная влажность [%];

RH_{min} - минимальная относительная влажность [%].

Для периодов в неделю, декаду или месяц RH_{max} и RH_{min} получены путем деления суточных значений на количество дней периода.

- для RH_{max} :

При использовании приборов с большой ошибкой измерения RH_{min} или когда обработка данных по RH является сомнительной, следует использовать лишь RH_{max} :

$$e_a = e^0(T_{\text{min}}) \frac{RH_{\text{max}}}{100} \quad (18)$$

- для RH_{min} :

В отсутствие RH_{max} и RH_{min} для определения e_a может быть использовано другое уравнение:

$$e_a = \frac{RH_{\text{mean}}}{100} \left[\frac{e^0(T_{\text{max}}) + e^0(T_{\text{min}})}{2} \right] \quad (19)$$

где RH_{mean} - есть средняя относительная влажность, определяемая как среднее между RH_{max} и RH_{min} . Тем не менее, уравнение 19 менее желательно, чем уравнение 17 или 18.

ПРИМЕР 5

Определение фактического давления пара по относительной влажности

Имея следующие суточные минимальные и максимальные температуры и соответствующую относительную влажность,
 $T = 18^{\circ}C$ и $RH_{max} = 82\%$,
 $T = 25^{\circ}C$ и $RH_{min} = 54\%$,
 определить фактическое давление пара.

Из ур-я 11 (табл. 2.3): затем:	$T_{min} =$ $e^0(T_{min}) =$	18 2,064	$^{\circ}C$ кПа
Из ур-я 11 (табл. 2.3): затем:	$T_{max} =$ $e^0(T_{max}) =$	25 3,168	$^{\circ}C$ кПа
Из ур-я 17:	$e_a = [2,064 (82/100) + 3,168 (54/100)] =$	1,70	кПа
отметим, что используя ур-е 19:	$e_a =$	1,78	кПа

Дефицит давления пара ($e_s - e_a$)

Дефицит давления пара - это разница между давлением пара насыщения (e_s) и фактическим давлением пара (e_a) для данного периода времени. Для таких периодов, как неделя, декада, месяц, e_s рассчитывается с помощью уравнения 12 с использованием T_{max} и T_{min} , осредненных за период времени и, подобно этому, e_a рассчитывается с помощью уравнений 4-19, используя средние замеры за период. Как указывалось выше, использование в уравнении 12 средней температуры воздуха, а не T_{max} и T_{min} , выражается в заниженном значении e_s , следовательно, в более низких дефиците давления пара и ET_o (см. бокс 7). e_s и e_a могут быть также рассчитаны для длительных периодов времени, как средние от значений, рассчитанных для каждого дня этого периода.

ПРИМЕР 6

Определение дефицита давления пара

Определить давление пара по данным предыдущего примера.

Из примера 5:	$e^0(T_{min}) =$ $e^0(T_{max}) =$ $e_a =$ $e_s - e_a = (2,064 + 3,168)/2 - 1,70 =$	2,064 3,168 1,70 0,91	кПа кПа кПа кПа
Дефицит давления пара равен 0,91 кПа.			

БОКС 7					
Расчет дефицита давления пара ($e_s - e_a$)					
Давление пара насыщения: e_s				(ур-е 11 или табл. 2.3)	
T_{\max}		$^{\circ}\text{C}$	$e^0(T_{\max}) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27T_{\max}}{T_{\max} + 237,3} \right]$		кПа
T_{\min}		$^{\circ}\text{C}$	$e^0(T_{\min}) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27T_{\min}}{T_{\min} + 237,3} \right]$		кПа
давление пара насыщения $e_s = [e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})]/2$				ур-е 12	кПа
Фактическое давление пара: e_a					
1. e_a выведенное из температуры точки росы				(ур-е 14 или табл. 2.3)	
T_{dew}		$^{\circ}\text{C}$	$e_a = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27T_{\text{dew}}}{T_{\text{dew}} + 237,3} \right]$		кПа
или 2. e_a выведенное из максимальной и минимальной относительной влажности					
RH_{\max}		%	$e^0(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100}$		кПа
RH_{\min}		%	$e^0(T_{\max}) \frac{RH_{\min}}{100}$		кПа
$e_a = [e^0(T_{\min})RH_{\max}/100 + e^0(T_{\max})RH_{\min}/100]/2$				ур-е 17	кПа
или 3. e_a выведенное из максимальной относительной влажности (ошибки в RH_{\min})					
RH_{\max}		%	$e_a = e^0(T_{\min})RH_{\max}/100$	ур-е 18	кПа
или 4. e_a выведенное из средней относительной влажности (рекомендуется в меньшей степени)					
RH_{mean}		%	$e_a = e_s (RH_{\text{mean}})/100$	ур-е 19	кПа
Дефицит давления пара ($e_s - e_a$) равен:					кПа

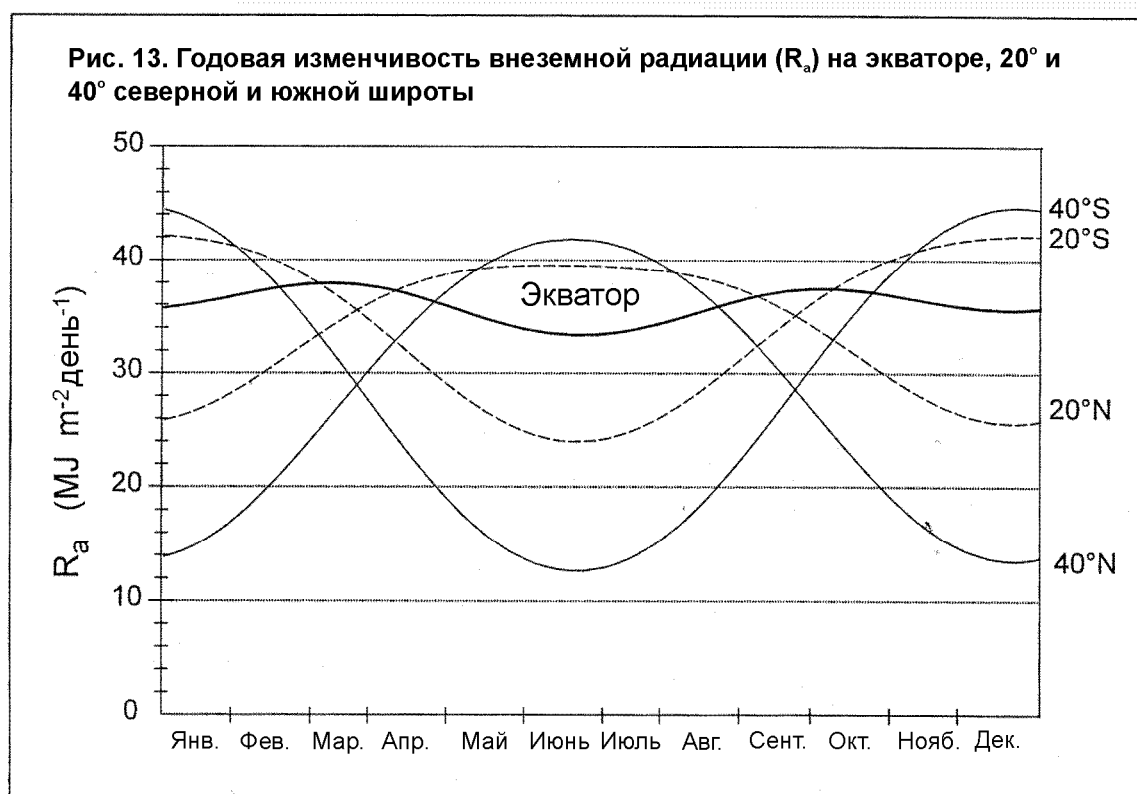
РАДИАЦИЯ

Концепция

Внеземная радиация (R_a)

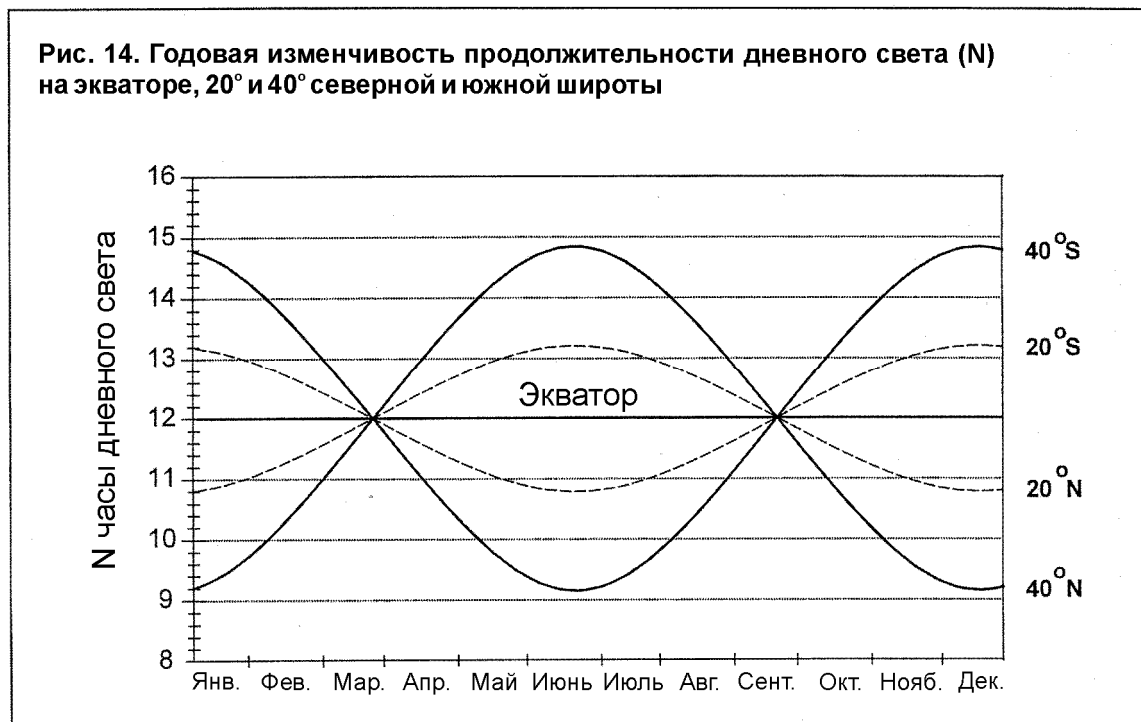
Радиация, перпендикулярная к поверхности земной атмосферы, называется солнечной постоянной и равна примерно $0,082 \text{ МДж м}^{-2} \text{ мин}^{-1}$. Местная интенсивность радиации, тем не менее, определяется углом между направлением солнечных лучей и перпендикуляром к поверхности атмосферы. Этот угол будет изменяться в течении дня и будет отличаться для разных широт и сезонов года. Солнечная радиация, полученная на поверхности атмосферы на горизонтальной плоскости, называется внеземной (солнечной) радиацией R_a .

Если Солнце стоит прямо над головой, угол падения равен нулю, а внеземная радиация - $0,082 \text{ МДж м}^{-2} \text{ мин}^{-1}$. При смене сезонов года положение Солнца, долгота дня и, следовательно, R_a также изменяются. Внеземная радиация является, таким образом, функцией широты, даты и времени суток. Суточные значения R_a в течение года для различных широт представлены на рис. 13.



Солнечная или коротковолновая радиация (R_s)

Поскольку радиация проникает сквозь атмосферу, часть ее уничтожается, отраженная или поглощенная атмосферными газами, водой и пылью. Количество радиации, достигающей горизонтальной плоскости, известно как солнечная радиация R_s . Поскольку Солнце излучает энергию в виде электромагнитных волн, характеризующихся как короткие волны, солнечная радиация также относится к коротковолновой.



Для безоблачного дня R_s равна примерно 75 % от внеземной радиации. В облачную погоду атмосфера поглощает радиацию, тем не менее, даже в самые облачные дни радиация составляет не менее 25 % в виде рассеянной радиации. Солнечная радиация также известна как глобальная радиация, подразумевая, что она равна сумме прямой коротковолновой радиации Солнца и диффузной радиации из всех верхних углов.

Относительная коротковолновая радиация (R_s/R_{s0})

Относительная коротковолновая радиация - это отношение солнечной радиации (R_s) к солнечной радиации в безоблачный день (R_{s0}). R_s - это солнечная радиация, которая достигает поверхности Земли за данный период, тогда как R_{s0} - это солнечная радиация, которая достигает поверхности Земли лишь в безоблачные дни.

Относительная коротковолновая радиация является средством выражения облачности атмосферы: чем плотнее облачность, тем меньше отношение, которое варьирует в пределах от 0,33 (плотная облачность) до 1 (ясно). В отсутствие прямых измерений R_n относительная коротковолновая радиация используется для расчетов длинноволновой радиации.

Относительная продолжительность солнечного сияния (n/N)

Относительная продолжительность солнечного сияния является еще одним отношением, отражающим облачность атмосферы. Это отношение реальной продолжительности солнечного сияния n к максимально возможной продолжительности солнечного сияния, или часов дневного света N . В отсутствие облачности реальная продолжительность солнечного сияния равна часам дневного света ($n = N$) и отношение равно 1, тогда как в облачные дни n и, следовательно, отношение, могут равняться нулю. В условиях прямых измерений R_s относительная продолжительность солнечного сияния n/N часто используется для получения солнечной радиации из внеземной радиации.

В случае внеземной радиации длина дня N зависит от положения Солнца и является функцией широты и даты. Дневные значения N в течение года для различных широт показаны на рис. 14.

Альbedo (α) и чистая солнечная радиация (R_{ns})

Значительное количество солнечной радиации, достигающей земной поверхности, отражается от нее. Часть α солнечной радиации, отраженная поверхностью, известна как альbedo. Альbedo сильно изменяется для различных поверхностей и угла падения или градиента земной поверхности. Оно может достигать 0,95 для свежеснежного покрова и быть малым (0,05) для влажной голой почвы. Земной растительный покров имеет альbedo 0,20-0,25. Для эталонной травяной поверхности значение альbedo принято равным 0,23.

Чистая солнечная радиация R_{ns} является частью солнечной радиации R_s , которая не отражается от поверхности. Ее значение равно $(1 - \alpha) R_s$.

Чистая длинноволновая радиация (R_{nl})

Солнечная радиация, поглощенная Землей, преобразуется в тепловую энергию. Через определенные процессы, включая излучение радиации, Земля теряет эту энергию. Земля, которая имеет значительно более низкую температуру, чем Солнце, излучает радиоактивную энергию посредством длинных волн дальше чем Солнце. Следовательно, земная радиация относится к длинноволновой радиации. Излученная длинноволновая радиация ($R_{nl, up}$) поглощается атмосферой или теряется в космосе. Длинноволновая радиация, полученная атмосферой ($R_{nl, down}$), повышает ее температуру и, как следствие, атмосфера излучает собственную энергию, как показано на рис. 15. Часть радиации находит путь обратно к поверхности Земли. Следовательно, земная поверхность как излучает, так и получает длинноволновую радиацию. Разница между исходящей и приходящей радиацией называется чистой длинноволновой радиацией R_{nl} . Так как уходящая длинноволновая радиация почти всегда больше приходящей, R_{nl} представляет собой потери энергии.

Чистая радиация (R_n)

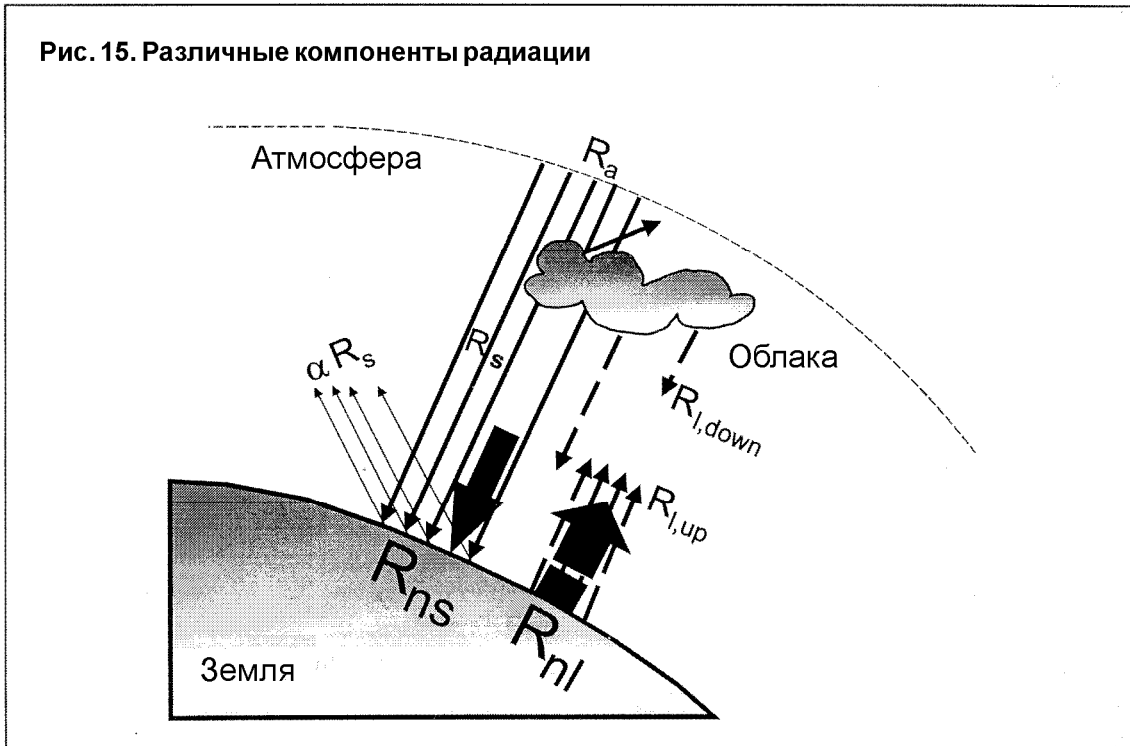
Чистая радиация R_n - это разница между поступающей и исходящей радиацией, как коротковолновой, так и длинноволновой. Существует баланс между поглощенной энергией, отраженной и выделяемой земной поверхностью или разница между поступающей чистой коротковолновой (R_{ns}) и чистой исходящей длинноволновой (R_{nl}) радиацией (рис. 15). R_n обычно положительна в течение дневного времени и отрицательна в ночное время. Суточное значение R_n за период в 24 часа почти всегда положительно, за исключением экстремальных условий на высоких широтах.

Поток почвенного тепла (G)

Определяя эвапотранспирацию, необходимо рассматривать все компоненты энергетического баланса (уравнение 1). Поток почвенного тепла (G) - это энергия, используемая в нагревании почвы. G положителен, когда почва разогревается и отрицателен, когда она охлаждается. Хотя поток почвенного тепла невелик по сравнению с R_n и может быть проигнорирован, количество энергии, получаемой и отдаваемой почвой в этом процессе, теоретически должно быть добавлено или вычтено из R_n при определении эвапотранспирации.

Единицы

Стандартной единицей, используемой в этой книге для выражения энергии, получаемой единицей поверхности в единицу времени, является мегаджоуль на квадратный метр в сутки ($\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$). В метеобюллетенях могут быть использованы другие единицы, радиация может быть выражена даже в единицах, не употребляемых сейчас в стандарте СИ, таких, как калория $\text{см}^{-2} \text{сут}^{-1}$.



В уравнении Пенмана-Монтейта (уравнение 6) радиация, выраженная в $\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$, преобразуется в эквивалентное испарение (бюкс 8) в мм сут^{-1} с использованием преобразующего фактора, равного величине, обратной скрытому теплу парообразования ($1/\lambda = 0,408$):

$$\text{Эквивалентное испарение} [\text{мм сут}^{-1}] = 0,408 \text{ радиация} [\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}] \quad (20)$$

Бюкс 8

Преобразование энергии в эквивалентное испарение

Преобразование энергии в столб воды или наоборот производится по формуле:

$$\text{Радиация} [\text{столб воды}] = \frac{\text{Радиация} [\text{энергия / поверхность}]}{\lambda \rho_w}$$

$$\text{Радиация} [\text{столб воды}] = \frac{\text{Радиация} [\text{энергия / поверхность}]}{\lambda \rho_w}$$

где λ - скрытая теплота парообразования [МДж кг^{-1}];

ρ_w - плотность воды, т. е. 1000 кг м^{-3} ;

[столб воды] выражается в м;

[энергия/поверхность] выражается в МДж м^{-2} .

Используя одну величину $2,45 \text{ МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$ для λ (см. раздел атмосферных параметров и приложение 3) и умножая на 1000, чтобы получить мм, имеем:

$$\text{Радиация} [\text{мм сут}^{-1}] \approx \frac{\text{Радиация} [\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}]}{2,45} = 0,408 \times \text{Радиация} [\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}]$$

Единицы, используемые для обозначения энергии, получаемой единицей поверхности в единицу времени, и преобразующие факторы приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3
Преобразующие факторы для радиации

	коэффициент перевода энергии, полученной единицей поверхности в единицу времени				эквивалентное испарение
	МДж м ⁻² сут ⁻¹	Дж см ⁻² сут ⁻¹	кал см ⁻² сут ⁻¹	Вт м ⁻²	мм сут ⁻¹
1 МДж м ⁻² сут ⁻¹	1	100	23,9	11,6	0,408
1 кал см ⁻² сут ⁻¹	4,1868 · 10 ⁻²	4,1868	1	0,485	0,0171
1 Вт м ⁻²	0,0864	8,64	2,06	1	0,035
1 мм сут ⁻¹	2,45	245	58,5	28,4	1

Измерения

Солнечная радиация может быть измерена пиранометрами, радиометрами или солари-метрами. Инструменты содержат сенсор, установленный на горизонтальной плоскости и измеряющий интенсивность суммарной солнечной радиации, т. е. как прямой, так и рассеянной, благодаря наличию облачности. Сенсор часто защищен и содержится в сухой атмосфере под специальным стеклянным колпаком, который должен постоянно протираться и содержаться в чистом виде.

Чистая коротковолновая и чистая длинноволновая радиация может быть измерена определением разницы в показаниях сенсоров, обращенных вверх и вниз. В чистом радиометре стеклянный колпак заменен полиэтиленовым, который имеет диапазон передачи, как для коротковолновой, так и для длинноволновой радиации.

Там, где нет пиранометров, радиация обычно определяется по продолжительности солнечного сияния. Фактическая продолжительность солнечного сияния *n* измеряется регистратором Кемпбелла-Стокса. Этот инструмент записывает периоды солнечного сияния с использованием стеклянного шара, который действует как линза. Солнечные лучи концентрируются в фокусе, прожигая отверстие в специально обработанной карточке, установленной концентрично со сферой. Движение Солнца меняет положение фокуса в течение дня и оставляет след на карточке. Если Солнце затенено, след прерывается. Часы яркого солнечного сияния фиксируются длиной сегментов.

Количество тепла, попадающее в почву, *G*, может быть измерено системой термопар или термисторов.

Процедуры расчета

Внеземная радиация для дневного периода (R_a)

Внеземная радиация *R_a* для каждого дня года и различных широт может быть определена из солнечной постоянной, солнечного наклона (угла падения лучей) и времени года:

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) + \cos(\varphi) \cos(\delta \cos(\omega_s))] \quad (21)$$

где

R_a - внеземная радиация [МДж м⁻² сут⁻¹];

G_{sc} - солнечная постоянная = 0,0820 МДж м⁻² мин⁻¹;

d_r - обратное относительное расстояние Земля-Солнце (уравнение 23);

ω_s - угол на закате [рад] (уравнение 25 или 26);
 φ - широта [рад] (уравнение 22);
 δ - солнечное склонение [рад] (уравнение 24).

R_a выражается в МДж м⁻² сут⁻¹. Соответствующее эквивалентное испарение в мм/сут получается перемножением R_a на 0,408 (уравнение 20). Широта φ выражается в радианах и является положительной для северного полушария и отрицательной - для южного (пример 7). Преобразование из десятичных градусов в радианы производится по формуле:

$$[\text{Радианы}] = \frac{\pi}{180} [\text{десятичные градусы}] \quad (22)$$

ПРИМЕР 7**Преобразование градусов и минут широты в радианы**

Выразить широту Бангкока (Таиланд), 13°44' с. ш., и Рио-де-Жанейро (Бразилия), 22°54' ю. ш. в радианах.

Широта	Бангкок (северное полушарие)	Рио-де-Жанейро (южное полушарие)
градусы и минуты	13°44' с. ш.	22°54' ю. ш.
десятичные градусы	13 + 44/60 = 13,73	(-22) + (-54/60) = -22,90
радианы	($\pi/180$) 13,73 = +0,240	($\pi/180$) (-22,90) = -0,400
Широта Бангкока и Рио-де-Жанейро равна, соответственно, +0,240 и -0,400 радиан.		

Обратное относительное расстояние Земля-Солнце d_r и солнечное склонение δ равны:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (23)$$

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (24)$$

где J - количество дней в году между 1 (1 января) и 365 или 366 (31 декабря), значения J для всех дней в году и уравнение для определения J даны в приложении 2 (табл. 2.5).

Угол на закате ω_s равен

$$\omega_s = \arccos[-\text{tg}(\varphi)\text{tg}(\delta)] \quad (25)$$

Поскольку функция \arccos присутствует не во всех компьютерных языках, угол заката может быть рассчитан с использованием функции \arctg :

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arctg\left[\frac{-\text{tg}(\varphi)\text{tg}(\delta)}{X^{0,5}}\right] \quad (26)$$

где

$$X = 1 - [\text{tg}(\varphi)]^2 [\text{tg}(\delta)]^2 \quad (27)$$

и $X = 0,00001$ если $X \leq 0$

Значения R_a для различных широт даны в приложении 2 (табл. 2.6). Эти значения пред-

ставляют R_a на 15-е число каждого месяца. Эти значения отличаются от среднесуточных величин каждого месяца менее, чем на 1 % для всех широт в течение безморозных периодов и включены для простоты расчетов. Эти величины незначительно отличаются от значений Смит-сопианской таблицы. Для зимних месяцев на широте более 55° (северной или южной) уравнения R_a имеют ограниченное применение. Возможные отклонения могут быть оценены из Смит-сопианской таблицы.

ПРИМЕР 8

Определение внеземной радиации

Определить внеземную радиацию (R_a) на 3 сентября на 20° ю. ш.

Из ур-я 22:	20° ю. ш. или $\varphi = (\pi/180) (-20) =$ (значение отрицательно для южного полушария)	- 0,35	рад
Из табл. 2.5:	номер дня в году $J =$	246	сут
Из ур-я 23:	$d_r = 1 + 0,033 \cos (2\pi (246)/365) =$	0,985	рад
Из ур-я 24:	$\delta = 0,409 \sin (2\pi (246)/365 - 1,39) =$	0,120	рад
Из ур-я 25:	$\omega_s = \arccos [-\text{tg}(-0,35) \text{tg}(0,120)] =$	1,527	рад
затем:	$\sin(\varphi)\sin(\delta) =$	-0,041	-
и	$\cos(\varphi)\cos(\delta) =$	0,933	-
Из ур-я 21:	$R_a = 24 (60)/ \pi (0,0820) (0,985) [1,527 (-0,041) +$ $+ 0,933 \sin(1,527)] =$	32,2	МДж м ⁻² сут ⁻¹
Из ур-я 20:	выражено в эквивалентном испарении = 0,408 (32,2)	13,1	мм/сут
Внеземная радиация равна 32,2 МДж м ⁻² сут ⁻¹ .			

Внеземная радиация для часовых или более коротких периодов (R_a)

Для часовых или более коротких периодов угол солнечного времени в начале и в конце периода должен учитываться при определении R_a :

$$R_a = \frac{12(60)}{\pi} G_{sc} d_r [(\omega_2 - \omega_1) \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1))] \quad (28)$$

где

R_a - внеземная радиация в течение часа (или более короткого) периода [МДж м⁻² сут⁻¹];

G_{sc} - солнечная постоянная = 0,0820 МДж м⁻² мин⁻¹;

d_r - обратное относительное расстояние Земля-Солнце (ур-е 23);

δ - солнечное наклонение [рад] (ур-е 24);

φ - широта [рад] (ур-е 22);

ω_1 - угол солнечного времени на начало периода [рад] (ур-е 29);

ω_2 - угол солнечного времени на конец периода [рад] (ур-е 30).

Углы солнечного времени на начало и конец периода равны, соответственно:

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi t_1}{24} \quad (29)$$

$$\omega_2 = \omega + \frac{\pi t_1}{24} \quad (30)$$

где

ω - угол солнечного времени в середине часового (или более короткого) периода [рад];

t_1 - продолжительность расчетного периода [час], т. е. 1 для 1 часа и 0,5 для 30 минут.

Угол солнечного времени на середину периода равен:

$$\omega = \frac{\pi}{12} [(t + 0,06667(L_z - L_m) + S_c) - 12] \quad (31)$$

где

t - стандартное время в середине периода [час]. Например, для периода между 14.00 и 15.00 $t = 14,5$;

L_z - долгота центра зоны местного времени [градусы к западу от Гринвича].
Например, $= 75, 90, 105$ и 120^0 для Восточной, Центральной, Роки Маунтин и Тихоокеанской временных зон (США) и $= 0^0$ для Гринвича, 330^0 для Каира (Египет) и 255^0 для Бангкока (Таиланд);

L_m - долгота площади измерения [градусы к западу от Гринвича];

S_c - сезонная коррекция солнечного времени [час].

Конечно, $\omega < -\omega_s$ или $\omega > \omega_s$ из уравнения (31) показывают, что Солнце находится за горизонтом и R_a равно 0.

Сезонная коррекция солнечного времени

$$S_c = 0,1645 \sin(2b) - 0,1255 \cos(b) - 0,025 \sin(b) \quad (32)$$

$$b = \frac{2\pi(J - 81)}{364} \quad (33)$$

где J - количество дней в году.

Часы дневного света (N)

Часы дневного света определяются как

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (34)$$

где ω_s - угол часа заката Солнца в радианах из уравнения 25 и 26. Средние значения N (15-й день каждого месяца) для различной долготы даны в приложении 2 (табл. 2.7).

ПРИМЕР 9

Определение часов дневного света

Определить часы дневного света (N) на 3 сентября на 20^0 ю. ш.

Из примера 8:	$\omega_s = \arccos [-\text{tg}(-0,35)\text{tg}(0,120)] =$	1,527	рад
Из ур-я 34:	$N = 24/\pi (1,527) =$	11,7	час
Количество часов дневного света = 11,7 часов.			

БОКС 9				
Расчет внеземной радиации (R_a) и часов дневного света (N)				
Широта		Градусы и минуты + положительные в северном полушарии - отрицательные в южном полушарии		
Градусы		0	----->	0
Минуты		'	-----/ 60 ----->	0
Десятичные градусы = сумма (градусы плюс минуты / 60)				0
$\varphi = \pi/180 * [\text{десятичные градусы}]$				рад
День года				
День				
Месяц		J	табл. 2.5 (приложение 2)	
$d_r = 1 + 0,033 \cos(2\pi J/365)$				рад
$\delta = 0,409 \sin(2\pi J/365 - 1,39)$				рад
$\sin(\varphi)\sin(\delta)$				
$\cos(\varphi)\cos(\delta)$				
$\omega_s = \arccos[-\text{tg}(\delta)\text{tg}(\varphi)]$				рад
$(24(60)/\pi) G_{sc}$				МДж м ⁻² сут ⁻¹
Внеземная радиация R_a				
$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\sin(\omega_s)]$				МДж м ⁻² сут ⁻¹
Часы дневного света N				
$N = \frac{24}{\pi} \omega_s$				час/сут

Солнечная радиация (R_s)

Если солнечную радиацию нельзя измерить, ее можно рассчитать по формуле Ангроста, которая связывает солнечную радиацию с внеземной радиацией и относительной продолжительностью солнечного сияния:

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \tag{35}$$

где

R_s - солнечная или коротковолновая радиация [МДж м⁻² сут⁻¹];

n - фактическая продолжительность солнечного сияния [час];

N - максимально возможная продолжительность солнечного сияния или часов дневного света [час];

n/N - относительная продолжительность солнечного сияния [-];

R_a - внеземная радиация [МДж м⁻² сут⁻¹];

a_s - постоянная регрессии, выражающая часть внеземной радиации, достигающую Земли в облачные дни ($n = 0$);

$a_s + b_s$ - часть внеземной радиации, достигающая Земли в ясные дни ($n = N$).

R_s выражается в МДж м⁻² сут⁻¹. Соответствующее эквивалентное испарение выражается в мм/сут и получается перемножением R_s на 0,408 (уравнение 20). В зависимости от атмосферных условий (влажность, запыленность) и солнечного наклона (широта и месяц), значения a_s и b_s будут изменяться. Там, где данные по фактической солнечной радиации отсутствуют и не может быть произведена калибровка для коэффициентов a_s и b_s , рекомендуется использовать

значения $a_s = 0,25$ и $b_s = 0,50$.

Внеземная радиация R_a и дневные часы или максимально возможная продолжительность солнечного сияния N даны в уравнениях 21 и 34. Значения R_a и N для различных широт также приведены в приложении 2 (табл. 2.6 и 2.7). Фактическая продолжительность солнечного сияния n регистрируется прибором Кемпбелла-Стокса.

ПРИМЕР 10

Определение солнечной радиации по измеренной продолжительности солнечного сияния

В Рио-де-Жанейро (Бразилия) на $20^{\circ}54'$ ю. ш. часы солнечного сияния зарегистрированы в мае. Определить солнечную радиацию.

Из ур-я 22:	широта = $20^{\circ}54'$ ю. ш. = $22,90^{\circ}$ ю. ш. или $\pi/180 (-22,90) =$	-0,40	рад
Из табл. 2.5:	для 15 мая день в году (J) =	135	
Из ур-я 21 или табл. 2.6:	$R_a =$	25,1	МДж м ⁻² сут ⁻¹
Из ур-я 34 или табл. 2.7:	$N =$ $n = 220$ часов /31 день =	10,9 7,1	час/сут час/сут
Из ур-я 35:	$R_s = [0,25 + 0,50 (7,1/10,9)] R_a =$ $= 0,58 R_a = 0,58 (25,1) =$	14,5	МДж м ⁻² сут ⁻¹
Из ур-я 20:	выражено в эквивалентном испарении $= 0,408 (14,5) =$	5,9	мм/сут
Определенная солнечная радиация равна 14,5 МДж м ⁻² сут ⁻¹ .			

Солнечная радиация в ясную погоду (R_{so})

Расчет R_{so} при $n = N$ необходим для определения чистой длинноволновой радиации.

- При высоте, близкой к уровню моря, или когда имеются калиброванные величины a_s и b_s :

$$R_{so} = (a_s + b_s) R_a \quad (36)$$

где

R_{so} - солнечная радиация в ясную погоду, [МДж м⁻² сут⁻¹];

$a_s + b_s$ - часть внеземной радиации, достигающая Земли в ясные дни ($n = N$).

- Когда калиброванные величины a_s и b_s отсутствуют:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z) R_a \quad (37)$$

где

z - высота над уровнем моря, [м].

Другие, более сложные определения R_{so} , включающие эффект водных паров и затененности, обсуждаются в приложении 3 (уравнения 3.14 и 20).

Чистая солнечная или чистая коротковолновая радиация (R_{ns})

Чистая коротковолновая радиация, получаемая из баланса между приходящей и отраженной солнечной радиацией, равна:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (38)$$

где

R_{ns} - чистая солнечная или коротковолновая радиация [$\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$];

α - альbedo или коэффициент отражения кроны, равный 0,23 для гипотетической эталонной травяной поверхности [-];

R_s - приходящая солнечная радиация [$\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$].

R_{ns} выражается в $\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$.

Чистая длинноволновая радиация (R_{nl})

Скорость эмиссии длинноволновой энергии пропорциональна абсолютной температуре поверхности в четвертой степени. Эта зависимость количественно выражена законом Стефана-Больцмана. Поток чистой энергии, покидающий земную поверхность, больше, по сравнению с испускаемым и определенным законом Стефана-Больцмана ввиду поглощения и радиации с неба, направленной вниз. Водяные пары, облака, двуокись азота и пыль являются поглотителями и эмиттерами длинноволновой радиации. Их концентрации необходимо знать при определении исходящего потока. Поскольку влажность и облачность играют важную роль, закон Стефана-Больцмана корректируется этими двумя факторами при определении чистого исходящего потока длинноволновой радиации. Предполагается, что концентрации других поглотителей постоянны:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right] \left(0,34 - 0,14\sqrt{e_a} \right) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (39)$$

где

R_{nl} - чистая исходящая длинноволновая радиация [$\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$];

σ - постоянная Стефана-Больцмана [$4,903 \cdot 10^{-9} \text{МДж К}^{-4} \text{м}^{-2} \text{сут}^{-1}$];

$T_{\max,K}$ - максимальная абсолютная температура в течение 24-часового периода [$\text{К} = ^\circ\text{С} + 273,16$];

$T_{\min,K}$ - минимальная абсолютная температура в течение 24-часового периода [$\text{К} = ^\circ\text{С} + 273,16$];

e_a - фактическое давление пара [кПа];

R_s/R_{so} - относительная коротковолновая радиация (ограничена значением $\leq 1,0$);

R_s - измеренная или расчетная (ур-е 35) солнечная радиация [$\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$];

R_{so} - расчетная (ур-е 36 или 37) радиация для ясного неба [$\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$].

Средняя максимальная температура воздуха в четвертой степени и минимальная температура в четвертой степени обычно используется в уравнении Стефана-Больцмана для 24-часовых временных шагов. Уравнение $(0,34 - 0,14\sqrt{e_a})$ выражает поправку к влажности воздуха и будет меньше при повышении влажности. Эффект облачности выражен в форме $(1,35R_s / R_{so} - 0,35)$. Выражение уменьшается при увеличении облачности и уменьшении R_s . Чем меньше корректирующие выражения, тем меньше чистый исходящий поток длинноволновой радиации. Заметьте, что R_s/R_{so} в уравнении 39 должно ограничиваться величиной $R_s/R_{so} \leq 1,0$.

Там, где имеются результаты наблюдений приходящей и исходящей коротковолновой и длинноволновой радиации в течение ярких солнечных и облачных часов, может быть приведена калибровка коэффициентов уравнения 39.

Перечень значений σT_K^4 для различных температур воздуха приводится в приложении 2 (табл. 2.8).

ПРИМЕР 11**Определение чистой длинноволновой радиации**

В Рио-де-Жанейро (Бразилия) на 20°54' ю. ш. (= -22,70°) 220 часов солнечного сияния, средне-месячные максимальная и минимальная суточные температуры воздуха 25,1 и 19,1 °С соответственно, давление пара 2,1 кПа были зарегистрированы в мае. Определить чистую длинноволновую радиацию.

Из примера 10: Из ур-я 36:	$R_s =$ $R_{so} =$	14,5 18,8	МДж м ⁻² сут ⁻¹ МДж м ⁻² сут ⁻¹
Из табл. 2.8:	$\sigma =$ $T_{\max} = 25,1 \text{ } ^\circ\text{C} =$ $\sigma T_{\max,K}^4 =$	4,903 10 ⁻⁹ 298,3 38,3	МДж К ⁻⁴ м ⁻² сут ⁻¹ К МДж м ⁻² сут ⁻¹
	$T_{\min} = 19,1 \text{ } ^\circ\text{C} =$ $\sigma T_{\min,K}^4 = 35,8 \text{ МДж м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$	292,3 35,8	К МДж м ⁻² сут ⁻¹
Из ур-я 34 или табл. 2.7:	$e_a =$ $0,34 - 0,14 \sqrt{e_a} =$ $R_s/R_{so} = (14,5)/(18,8)$ $1,35(0,77) - 0,35 =$	2,1 0,14 0,77 0,69	кПа - - -
Из ур-я 39:	$R_{nl} = [(38,7 + 35,7)/2] (0,14)(0,69) =$	3,5	МДж м ⁻² сут ⁻¹
Из ур-я 20:	выражено в эквивалентном испарении = 0,408 (3,5) =	1,4	мм/сут
Чистая длинноволновая радиация равна 3,5 МДж м ⁻² сут ⁻¹ .			

Чистая радиация (R_n)

Чистая радиация (R_n) - это разница между приходящей и исходящей чистой коротковолновой радиацией (R_{ns}) и исходящей чистой длинноволновой радиацией (R_{nl}):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (40)$$

ПРИМЕР 12**Определение чистой радиации**

Определить чистую радиацию в Рио-де-Жанейро в мае по данным из прошлого примера.

Из примера 10: Из ур-я 39: Из примера 11: Из ур-я 40:	$R_s =$ $R_{ns} = (1 - 0,23) R_s =$ $R_{nl} =$ $R_n = 11,1 - 3,5 =$	14,5 11,1 3,5 7,6	МДж м ⁻² сут ⁻¹ МДж м ⁻² сут ⁻¹ МДж м ⁻² сут ⁻¹ МДж м ⁻² сут ⁻¹
Из ур-я 20:	выражено в эквивалентном испарении = 0,408 (7,7) =	3,1	мм/сут
Чистая радиация равна 7,6 МДж м ⁻² сут ⁻¹ .			

БОКС 10					
Расчет чистой радиации (R_n)					
Широта		0			
День			R_a (бокс 9 или табл. 2.6)		МДж м ⁻² сут ⁻¹
Месяц			N (бокс 9 или табл. 2.7)		час
n		час	(в отсутствие R_s) n/N		
Чистая солнечная радиация R_{ns}					
В случае, если вместо R_s измерена н:					
			$R_s = (0,25 + 0,50 n/N) R_a$	ур-е 35	МДж м ⁻² сут ⁻¹
			$R_{so} = [0,75 + 2 (j/ 100 000)] R_a$	ур-е 37	МДж м ⁻² сут ⁻¹
			R_s/R_{so}	($\leq 1,0$)	
			$R_{ns} = 0,77 R_s$	ур-е 38	МДж м ⁻² сут ⁻¹
Чистая длинноволновая радиация R_{nl}					
при $\sigma = 4,903 \cdot 10^{-9}$ МДж К ⁻⁴ м ⁻² сут ⁻¹					
и $T_K = T[^\circ\text{C}] + 273,16$					
T_{max}		$^\circ\text{C}$	$T_{max,K} = T_{max} + 273,16$		К
T_{min}		$^\circ\text{C}$	$T_{min,K} = T_{min} + 273,16$		К
			$\sigma T_{max,K}^4$ (табл. 2.8)		МДж м ⁻² сут ⁻¹
			$\sigma T_{min,K}^4$ (табл. 2.8)		МДж м ⁻² сут ⁻¹
			$(\sigma T_{max,K}^4 + \sigma T_{min,K}^4)/2$		МДж м ⁻² сут ⁻¹
e_a		кПа	$(0,34 - 0,14 \sqrt{e_a})$		
R_s/R_{so}			$(1,35 R_s/R_{so} - 0,35)$		
			$R_{nl} = (\sigma T_{max,K}^4 + \sigma T_{min,K}^4)/2 (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) (1,35 R_s/R_{so} - 0,35)$	ур-е 39	МДж м ⁻² сут ⁻¹
Чистая радиация R_n					
			$R_n = R_{ns} - R_{nl}$	ур-е 40	МДж м ⁻² сут ⁻¹

Почвенный тепловой поток (G)

Для описания почвенного теплового потока существуют комплексные модели. Так как G мал по сравнению с R_n , особенно если поверхность покрыта растительностью и временные шаги расчета равны 24 часам и более, имеется простая процедура расчета для длинных временных шагов, исходящая из идеи, что температура почвы следует температуре воздуха:

$$G = c_s \frac{T_i + T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z \tag{41}$$

- где
- G - почвенный тепловой поток [МДж м⁻² сут⁻¹];
- c_s - тепловая емкость почвы [МДж м⁻³ °C⁻¹];
- T_i - температура воздуха во время i [°C];
- T_{i-1} - температура воздуха во время $i-1$ [°C];
- Δt - продолжительность временного интервала [сут];
- Δz - эффективная глубина почвы [м].

Поскольку температура почвы запаздывает за температурой воздуха, следует рассматривать среднюю температуру при определении суточного теплового потока, т. е. Δt должно превышать одни сутки. Глубина проникновения тепловой волны определяется длительностью

временного интервала. Эффективная глубина почвы Δz равна лишь 0,10-0,12 м для интервала в один или несколько дней, но может быть и 2 м для периодов, измеряемых месяцами. Почвенный тепловой поток зависит от минерального состава почвы и ее влажности.

- **Для суточного и 10-дневного периодов:**

Поскольку амплитуда теплового потока в течение 1 или 10 дней для эталонной травяной поверхности относительно мала, ею можно пренебречь и тогда:

$$G_{day} \approx 0 \quad (42)$$

- **Для месячных периодов:**

Принимая постоянную тепловую емкость почвы $2,1 \text{ МДж м}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и соответствующую глубину почвы, можно использовать уравнение 41 для определения G :

$$G_{month,i} = 0,07(T_{month,i+1} - T_{month,i-1}) \quad (43)$$

или, если $T_{month,i+1}$ неизвестно

$$G_{month,i} = 0,14(T_{month,i+1} - T_{month,i-1}) \quad (44)$$

где

$T_{month,i}$ - среднемесячная температура воздуха [$^\circ\text{C}$];

$T_{month,i-1}$ - среднемесячная температура воздуха предыдущего месяца [$^\circ\text{C}$];

$T_{month,i+1}$ - среднемесячная температура воздуха следующего месяца [$^\circ\text{C}$].

- **Для часового и более краткого периодов:**

Для часового (и более краткого) периода расчета G под плотным травяным покровом не коррелируется достаточно хорошо с температурой воздуха. Часовой G может быть рассчитан приблизительно в течение периодов светового дня как

$$G_{hr} = 0,1R_n \quad (45)$$

и для ночных периодов как

$$G_{hr} = 0,5R_n \quad (46)$$

Там, где почва нагревается, почвенный тепловой поток положительный. Количество энергии, требуемой для этого процесса, вычитается из R_n при определении эвапотранспирации.

ПРИМЕР 13

Определение почвенного теплового потока для месячных периодов

Определить тепловой поток в апреле в Алжире при нагревании почвы. Среднемесячные температуры марта, апреля и мая $14,1$; $16,1$ и $18,8$ $^\circ\text{C}$ соответственно.

Из ур-я 43:	для апреля $G = 0,07(18,8 - 14,1) =$	0,33	$\text{МДж м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$
Из ур-я 20:	выражено в эквивалентном испарении $= 0,408(0,33) =$	0,13	мм/сут
Почвенный тепловой поток равен $0,33 \text{ МДж м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$.			

СКОРОСТЬ ВЕТРА

Измерения

Ветер характеризуется направлением и скоростью. Направление ветра показывает направление, откуда дует ветер. Для расчета эвапотранспирации скорость ветра является очень важной переменной. Если скорость ветра на местности меняется во времени, ее необходимо выразить как среднее за временной интервал. Скорость ветра выражается в метрах в секунду (м с^{-1}) или километрах в день (км сут^{-1}).

Скорость ветра измеряется анемометрами. Анемометры обычно устанавливаются на метеостанциях и состоят из пропеллеров, которые вращаются силой ветра. Средняя скорость ветра за период рассчитывается подсчетом количества оборотов за определенное время.

Зависимость ветрового профиля

Скорости ветра, измеренные на различной высоте, отличаются друг от друга. Трение о поверхность снижает скорость ветра над ней. Поэтому анемометры устанавливаются на стандартной высоте: 10 м для метеостанций и 2 или 3 м для агрометеостанций. Для расчета эвапотранспирации требуется замер скорости ветра на высоте 2 м над поверхностью Земли. Чтобы скорректировать данные по скорости ветра, измеренной на другой высоте, можно использовать логарифмический ветровой профиль для измерений над поверхностью с коротким травяным покровом:

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8z - 5,42)} \quad (47)$$

где

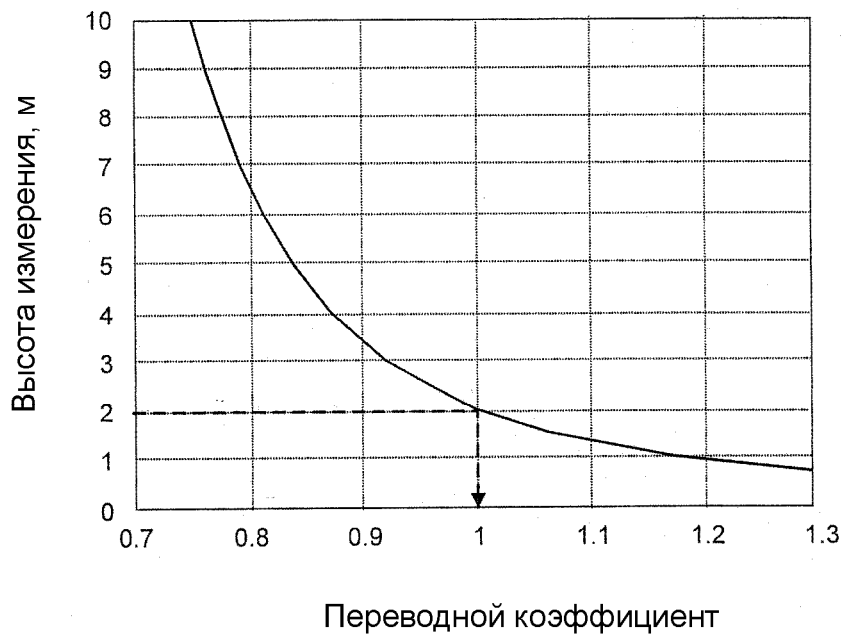
u_2 - скорость ветра на высоте 2 м над поверхностью земли [м с^{-1}];

u_z - скорость ветра, измеренная на высоте z м над поверхностью земли [м с^{-1}];

z - высота измерений [м].

Соответствующие переводные коэффициенты приведены в приложении 2 (табл. 2.9) и показаны на рис. 16.

Рис. 16. Коэффициент преобразования скорости ветра, измеренной на определенной высоте, в скорость ветра на стандартной высоте (2 м) над поверхностью Земли



ПРИМЕР 14

Приведение скорости ветра к стандартной высоте

Определить скорость ветра на высоте 2 м, если скорость 3,2 м/с измерена на высоте 10 м над поверхностью Земли.

	$uz =$	3,2	м/с
	$z =$	10	м
	переводной коэффициент = $4,87 / \ln(67,8(10) - 5,42) =$	0,75	-
Из ур-я 47:	выражено в эквивалентном испарении = $0,408 (0,33) =$	2,4	м/с
Скорость ветра на высоте 2 м над поверхностью Земли равна 2,4 м/с.			

СБОР КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Метеостанции

Метеоданные фиксируются различными типами метеостанций. Агрометеорологические станции располагаются на орошаемых площадях, где приборы открыты для атмосферных условий, подобных тем, что существуют для сельхозкультур. На этих станциях обычно измеряют температуру воздуха, влажность, скорость ветра и продолжительность солнечного сияния на высоте 2 м на обширной площади, засеянной травой или низкорослой культурой. Там, где это необходимо и возможно, покрытие станции увлажняется. Руководство по устройству метеостанций приводится в выпуске 27 ФАО. В данной книге описываются все типы инструментов, их установка и надежность.

Данные, собранные со станций, отличных от агрометеорологических, требуют тщательного анализа пригодности перед их использованием. Например, на аэронавигационных станциях измеряются данные, относящиеся к авиации. Аэропорты часто расположены вблизи городов, температуры могут быть выше по сравнению с сельской местностью. Поэтому здесь скорость ветра обычно измеряется на высоте 10 м.

Информация о климатических данных, собранных с различных типов метеостанций, должна быть запрошена у национальной метеорологической службы. Национальная служба обычно публикует метеорологические бюллетени с обработанными климатическими данными с различных станций.

Приложения описывают процедуры статистического анализа, оценки, корректировки и восстановления частичных или отсутствующих данных.

Приложение № 4: Статистический анализ метеоданных;

Приложение № 5: Измерение и оценка метеоданных;

Приложение № 6: Корректировка метеоданных по наблюдаемым и неэталонным площадкам для расчета эталонной эвапотранспирации.

Агроклиматические месячные базы данных

Начиная с 1984 г., ФАО публикует среднемесячные агроклиматические данные с 2300 станций в следующих томах:

№ 22: том 1: данные по Африке, страны к северу от экватора (1984);

том 2: данные по Африке, страны к югу от экватора (1984);

№ 24: Агроклиматические данные по Латинской Америке и Карибскому бассейну (1985);

№ 25: том 1: Агроклиматические данные по Азии (А-Ј) (1987);

том 2: Агроклиматические данные по Азии (К-Z) (1987);

CLIMWAT для CROPWAT (публикация ФАО по ирригации и дренажу № 46) содержит месячные данные с 3262 станций на пяти отдельных дискетах. Станции сгруппированы по странам и континентам. На дискетах записаны среднемесячные значения максимальных и минимальных температур, средней относительной влажности, скорости ветра, часов солнечного сияния, радиации, осадков и ET_0 , рассчитанная по формуле Пенмана-Монтейта, для средних долгосрочных условий.

FAOCLIM обеспечивает пользователю удобный интерфейс на компакт-диске к агроклиматическим данным Агрометеорологической группы ФАО. Представленные данные являются продолжением прежней серии публикаций по производству и защите растений и количество страниц увеличено с 2300 до 19000. Тем не менее, не по всем станциям имеются основные метеорологические параметры. Многие станции содержат данные лишь по температуре воздуха и осадкам.

Эти базы данных должны быть проанализированы, чтобы проверить их сходимость с реальной базой данных или определить пропущенные климатические параметры.

Однако, они могут быть использованы только для предварительных исследований, т. к. они содержат лишь среднемесячные данные. FAOCLIM обеспечивает месячные временные ряды только для нескольких станций. Информация из этих баз данных никогда не заменит реальных данных.

Другие электронные базы данных для частей земного шара опубликованы Международным институтом водного хозяйства (IWMI). Эти базы данных включают дневные и месячные температуры воздуха, осадки и ET_0 , предсказанную с использованием уравнения Харгрейва, основанного на разнице между суточным максимумом и минимумом температуры воздуха.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Определение ET_0 методом Пенмана-Монтейта разработано в главе 4. Расчет требует средних суточных, декадных и месячных температур воздуха (T_{\max} и T_{\min}), фактического давления пара (e_a), чистой радиации (R_n) и скорость ветра, измеренную на высоте 2 м (u_2). Если один из требуемых параметров отсутствует или не может быть рассчитан, рекомендуется определять отсутствующие климатические данные с помощью одной из следующих процедур и использовать метод Пенмана-Монтейта для расчета ET_0 . Использование альтернативной процедуры расчета ET_0 , требующей ограниченных метеорологических параметров, не рекомендуется. Процедуры по определению отсутствующей влажности, радиации и скорости ветра даны в этом разделе.

Определение отсутствующих данных по влажности

Там, где данные по влажности отсутствуют или их качество сомнительное, фактическое давление пара e_a может быть получено с помощью допущения, что температура точки росы (T_{dew}) близка к суточной минимальной температуре (T_{\min}). Это допущение предполагает, что на рассвете, когда температура воздуха близка к минимальной T_{\min} , воздух почти насыщен водяным паром, а относительная влажность близка к 100 %. Если T_{\min} используется в качестве T_{dew} , то:

$$e_a = e^0(T_{\min}) = 0,611 \exp \left[\frac{17,27 T_{\min}}{T_{\min} + 237,3} \right] \quad (48)$$

Отношение $T_{\min} \approx T_{\text{dew}}$ типично для площадей, где растительность вокруг метеостанций хорошо увлажнена. Тем не менее, особенно в аридных регионах, воздух может и не быть насыщенным при минимальной температуре. Следовательно, T_{\min} может быть больше T_{dew} и может потребоваться дальнейшая калибровка для определения температуры точки росы. В этих условиях T_{\min} в вышеприведенном уравнении может быть лучше аппроксимировано путем вычитания 2-3 °C из T_{\min} . Соответствующие процедуры корректировки даются в приложении 6. В гумидном и полу-гумидном климате T_{\min} и T_{dew} , измеренные ранним утром, могут быть меньше, чем T_{dew} , измеренная в течение дневного времени, ввиду конденсации росы в ночное время. После рассвета испарение росы опять увлажнит воздух и повысит значение T_{dew} , измеренной в дневное время. Этот феномен иллюстрируется на рис. 5.4 приложения 5. Тем не менее, это стандартная практика 24-часовых расчетов ET_0 с использованием T_{dew} , измеренной или рассчитанной ранним утром.

Следует проверить определение e_a из T_{\min} . Когда прогноз через уравнение 48 оценивается для региона, он может быть использован для определения суточного значения e_a .

Определение отсутствующих данных по радиации

Приборы для измерения чистой радиации, требующие профессионального контроля, редко устанавливаются на агрометеорологических станциях. В отсутствие прямых измерений, длинноволновая и чистая радиация могут быть выведены из более общих метеорологических параметров, т. е. солнечной радиации или часов солнечного сияния, температуры воздуха и давления пара. Если солнечная радиация не измеряется, она может быть определена из продолжительности часов яркого солнечного сияния (n). Тем не менее, там, где нет данных по часам солнечного сияния, солнечная радиация не может быть рассчитана с помощью ранее предложенной процедуры. В данном разделе приводятся различные методы определения солнечной

радиации по альтернативной методике.

Данные по солнечной радиации с близлежащих метеостанций

Этот метод основывается на факте, что переменные, влияющие на приходящую солнечную радиацию R_s и продолжительность солнечного сияния p для одного и того же месяца и даже для одного и того же дня, являются идентичными для целого региона. Это означает, что: (i) размер региона невелик; (ii) воздушные массы, управляющие дождем и облачностью, почти идентичны для частей региона; (iii) физико-географические параметры региона однообразны. Различия в рельефе должны быть незначительными, ибо они сильно влияют на движение воздушных масс. В этих условиях могут быть использованы данные по радиации, наблюдаемые на близлежащих станциях.

Следует проявлять осторожность при использовании этого метода для горных и прибрежных районов, где разница в экспозиции и абсолютной отметке может быть важна, или где дождь является переменной в зависимости от условий конвекции. Более того, не могут быть использованы данные с близлежащей метеостанции, расположенной по другую сторону гор, т. к. условия, управляющие радиацией, отличаются. Пользователь должен рассмотреть климатические условия в обеих местностях и получить информацию от местного персонала о разнице в типе и плотности облачности.

Там, где расстояние с севера на юг в пределах однородного региона превышает 50 км и значение R_a изменяется, измерение R_s должно быть адаптировано с использованием отношения солнечной радиации к внеземной R_s/R_a :

$$R_s = \frac{R_{s,reg}}{R_{a,reg}} R_a \quad (49)$$

где

$R_{s,reg}$ - солнечная радиация на уровне региона [МДж м⁻² сут⁻¹];

$R_{a,reg}$ - внеземная радиация на уровне региона [МДж м⁻² сут⁻¹].

После выведения солнечной радиации из данных по радиации с близлежащей метеостанции, можно рассчитать чистую длинноволновую радиацию (ур-е 39) и чистую радиацию (ур-е 40).

Уравнение 49 рекомендовано для расчета месячных значений ET_0 . При использовании метода суточного определения ET_0 необходим тщательный анализ метеоданных, чтобы проверить, расположены ли обе метеостанции в однородном климатическом регионе и достаточно ли близки, чтобы их условия были одинаковы в один и тот же день. Анализ должен включать сравнение суточных, особенно максимальной и минимальной температуры воздуха и влажности. Фактически, подобная облачность и продолжительность солнечного сияния приводят к подобию температуры и влажности.

Обычно дневные расчеты ET_0 с определенной радиацией являются удовлетворительными, когда она определяется как сумма или среднее за период в несколько дней. Это случай расчета средней эвапотранспирации между последовательными поливами или при планировании графика поливов. В этих условиях относительная ошибка для одного дня часто компенсируется ошибкой для другого дня за период осреднения. Дневные определения не должны быть использованы как истинные суточные определения, но только как средние значения за рассматриваемый период.

Солнечная радиация, выведенная из разности температур воздуха

Разница между максимальной и минимальной температурой зависит от степени облачности. При ясной погоде днем бывают высокие температуры (T_{max}), так как атмосфера прозрачна для поступающей солнечной радиации, а ночью - низкие (T_{min}), так как атмосферой поглощается меньше излучаемой длинноволновой радиации. С другой стороны, в условиях облачно-

сти T_{\max} относительно меньше, так как значительная часть поступающей солнечной радиации никогда не достигает земной поверхности, а поглощается или отражается облаками. Подобно этому, T_{\min} будет сравнительно выше, так как облачность действует наподобие одеяла и снижает чистую излучаемую длинноволновую радиацию. Следовательно, разница между максимальной и минимальной температурой воздуха ($T_{\max} - T_{\min}$) может быть использована, как индикатор части внеземной радиации, достигающей земной поверхности. Этот принцип использован Харгрейвом и Самани для определения E_T , с использованием лишь температурных данных.

Формула радиации Харгрейва, проверенная и оцененная на нескольких метеостанциях, в различных климатических условиях, имеет вид:

$$R_s = k_{R_s} \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} R_a \quad (50)$$

где

R_a - внеземная радиация [$\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$];

T_{\max} - максимальная температура воздуха [$^{\circ}\text{C}$];

T_{\min} - минимальная температура воздуха [$^{\circ}\text{C}$];

k_{R_s} - корректирующий коэффициент (0,16...0,19) [$^{\circ}\text{C}^{-0,5}$].

Квадратный корень из разницы температур тесно связан с существующей дневной солнечной радиацией в данной местности. Корректирующий коэффициент k_{R_s} является эмпирическим и отличается для "внутренних" и "прибрежных" регионов.

- для "внутренних" местностей, где доминирует земная поверхность и воздушные массы не подвергаются сильному влиянию со стороны большого водного тела, $k_{R_s} \cong 0,16$;
- для "прибрежных" местностей, расположенных вблизи большого водного тела, $k_{R_s} \cong 0,19$.

Отношение между R_s/R_a и разницей температур показано на рис. 17 для внутренних и прибрежных территорий. Часть внеземной радиации, которая достигает поверхности Земли, R_s/R_a , изменяется от 0,25 днем при сильной облачности до 0,75 в ясный день. R_s , прогнозируемая уравнением 50, должна быть ограничена до $\leq R_{s_0}$ из уравнения 36 или 37.



Метод разности температур рекомендуется для территорий, где невозможно взять данные о радиации с региональной метеостанции, или ввиду отсутствия однообразных климатических условий, либо данные по региону отсутствуют. Для условий острова, методика уравнения 50 неправомерна ввиду смягчающих эффектов близлежащего водного тела.

При вычислении суточных значений ET_0 необходима осторожность. Совет, данный для уравнения 49, вполне уместен и здесь. Рекомендовано, чтобы суточные определения ET_0 , основанные на определенной R_s , суммировались или усреднялись за период в несколько дней, например, за неделю, декаду или месяц с тем, чтобы уменьшить ошибку прогноза.

ПРИМЕР 15

Определение солнечной радиации из температурных данных

Определить солнечную радиацию за июль в Лионе (Франция) на широте $45^{\circ}43'$ с. ш. и отметке 200 м. В июле среднемесячная максимальная и минимальная температура равна $26,6$ и $14,8$ $^{\circ}C$, соответственно.

Из табл. 2.5 Из ур-я 21 или табл. 2.6 при- лож. 2	Широта = $45^{\circ}43' = +45,72$ десятичных градусов = День года - 15 июля $R_a =$	0,80 196 40,6	рад - МДж m^{-2} сут $^{-1}$
Из ур-я 50 (та же широта)	$R_s = 0,16 [\sqrt{(26,6 - 14,8)}] R_a = 0,55 (40,6) =$	22,3	МДж m^{-2} сут $^{-1}$
Из ур-я 21 (та же широта)	эквивалентное испарение = $0,408 (22,3) =$	9,1	мм/сут
В июле определенная солнечная радиация = $22,3$ МДж m^{-2} сут $^{-1}$.			

ПРИМЕР 16

Определение чистой радиации в отсутствие данных о ней

Рассчитать чистую радиацию для Бангкока (Филиппины) ($13^{\circ}44'$ с. ш.) с использованием T_{max} и T_{min} . Станция расположена на берегу в 2 м над уровнем моря. В апреле среднемесячное значение максимальной суточной температуры, суточной минимальной температуры и суточного давления пара равны, соответственно, $34,8$ $^{\circ}C$, $25,5$ $^{\circ}C$, 2,85 кПа.

Для широты $13^{\circ}44'$ с. ш. = $+13,73$ десятичных градусов = 0,24 радиан.
Для 15 апреля $J = 105$.

Из ур-я 21 или табл. 2.6.	$R_a =$ $k_{RS} =$ $(T_{max} - T_{min}) = (34,8 - 25,6) =$	38,1 0,19 9,2	МДж m^{-2} сут $^{-1}$ $^{\circ}C$
Из ур-я 50 Из ур-я 36 Из ур-я 38	$R_s = 0,19 \sqrt{(9,2)} R_a$ $R_{so} = 0,75 R_a$ $R_{ns} = 0,77 R_s$	21,9 28,5 16,9	МДж m^{-2} сут $^{-1}$ МДж m^{-2} сут $^{-1}$ МДж m^{-2} сут $^{-1}$
	$\sigma =$ $T_{max} =$ $\sigma T_{max,K}^4 =$	$4,903 \cdot 10^{-9}$ 34,8 44,1	МДж $K^{-4} m^{-2} сут^{-1}$ $^{\circ}C$ МДж m^{-2} сут $^{-1}$
	T_{min} $\sigma T_{min,K}^4 =$ $(\sigma T_{max,K}^4 + \sigma T_{min,K}^4) / 2 = (44,1 + 39,1) / 2 =$	25,6 39,1 41,6	$^{\circ}C$ МДж m^{-2} сут $^{-1}$ МДж m^{-2} сут $^{-1}$
	$e_a =$ $(0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) =$	2,85 0,10	кПа -
	$R_s/R_{so} =$ $(1,35 (R_s/R_{so}) - 0,35) =$	0,77 0,69	- -
Из ур-я 39 Из ур-я 40	$R_{nl} = 41,6 (0,10) 0,69 =$ $R_n = (16,9 - 2,9) =$	3,0 13,9	МДж m^{-2} сут $^{-1}$ МДж m^{-2} сут $^{-1}$
Из ур-я 20	эквивалентное испарение = $0,408 (13,9) =$	5,7	мм/сут
Чистая радиация равна $13,9$ МДж m^{-2} сут $^{-1}$.			

Эмпирическая методика для островных территорий

Для островов, где земная поверхность от береговой линии простирается на 20 км и меньше, водное тело влияет на воздушные массы во всех направлениях. В этой ситуации температурный метод неприменим. Если данные о радиации невозможно получить из другого места на острове, в первом приближении среднемесячная радиация может быть определена по эмпирической формуле:

$$R_s = 0,7R_a - b \quad (51)$$

где

R_s - солнечная радиация [МДж м⁻² сут⁻¹];

R_a - внеземная радиация [МДж м⁻² сут⁻¹];

b - эмпирическая константа, равная 4 МДж м⁻² сут⁻¹.

Эта зависимость может быть использована лишь для низких абсолютных отметок (0-100 м). Эмпирическая константа показывает, что на островных территориях облачность имеется всегда, делая, таким образом, среднюю солнечную радиацию 4 МДж м⁻² сут⁻¹ при слабой облачности (0,7 R_a). Местная коррекция эмпирической константы может улучшить определение.

Метод применим лишь для месячных определений. Постоянное отношение между R_s и R_a не дает точные суточные определения.

Отсутствующие данные по скорости ветра

Данные по скорости ветра с ближайшей метеостанции

Заимствование данных о скорости ветра с ближайшей метеостанции, то же для данных о радиации, основывается на факте, что поток воздуха над "однородным" регионом может относительно сильно изменяться в течение дня, но эти изменения невелики по отношению к длительным периодам или к суммарным значениям за сутки. Данные с соседней метеостанции могут быть использованы в том случае, когда воздушные массы имеют одинаковое происхождение и управляются одним фронтом и когда рельеф является идентичным.

При использовании данных по скорости ветра с ближайшей метеостанции должны быть сопоставлены региональный климат, тенденции в изменении других метеорологических параметров и рельеф. Сильные ветры часто ассоциируются с низкой относительной влажностью, а легкие - с высокой. Таким образом, тенденции в изменении максимальной и минимальной суточной относительной влажности должны быть одинаковы в обеих местностях. В горных районах данные не обязательно заимствовать с ближайшей метеостанции, но можно взять их с соседних станций с одинаковой абсолютной отметкой и подверженных воздействию преобладающих ветров. Парные станции могут меняться посезонно в зависимости от преобладающих ветров.

Заимствованные данные могут быть использованы для месячных определений эвапотранспирации. Суточные расчеты используются как сумма или среднее за период, такой, как неделя или декада.

Эмпирические определения месячной скорости ветра

Поскольку изменение средней скорости ветра в течение месяца сравнительно мало и колеблется вокруг неких средних значений, могут быть определены месячные значения скорости ветра. "Среднее" определение может быть выбрано из информации о региональном климате, но следует принимать во внимание сезонные изменения. Общие значения приведены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4
Общие классы месячной скорости ветра

Описание	Среднемесячная скорость на высоте 2 м
легкий ветер	... ≤ 1,0 м/с
легкий до умеренного	1 - 3 м/с
умеренный до сильного	3 - 5 м/с
сильный	... ≥ 5 м/с

Если в регионе нет данных о скорости ветра, в качестве временной величины может быть принята 2 м/с. Это значение является средним для 2000 метеорологических станций по всему земному шару.

В целом, скорость ветра на высоте 2 м должна быть ограничена $u_2 \geq 0,5$ м/с при ее использовании в уравнении ET_o (ур-е 6). Необходимо учитывать нестабильность пограничного слоя и обмен паром на поверхности при безветренной погоде. Этот эффект возникает в случаях малой скорости ветра и воздушном обмене вблизи поверхности Земли. Ограничение $u_2 \geq 0,5$ м/с в уравнениях ET_o повышает точность расчетов в условиях очень низкой скорости ветра.

Минимальные требования к данным

Этот раздел показывает, как солнечная радиация, давление пара и ветер могут быть определены при их отсутствии. Многие из предложенных процедур основаны на измерениях максимальной и минимальной температуры. К сожалению, не существует методов определения температуры, если ее замеры пропущены. Следовательно, предполагается, что наличие суточной максимальной и минимальной температуры является минимальным требованием, необходимым для применения метода Пенмана-Монтейта.

Альтернативное уравнение для ET_o , когда отсутствуют метеоданные

Когда данные о солнечной радиации, относительной влажности и/или скорости ветра отсутствуют, они определяются согласно процедуре, изложенной в этом разделе. Как альтернатива, ET_o может быть определена с использованием уравнения Харгрейва

$$ET_o = 0,023(T_{mean} + 17,8)(T_{max} - T_{min})^{0,5} R_a \quad (52)$$

где все параметры предварительно определены. Единицей измерения для ET_o и R_a в уравнении 52 является мм/сут. Уравнение 52 должно быть проверено в каждом новом регионе путем сравнения с данными, полученными по уравнению Пенмана-Монтейта (ур-е 6) на метеостанциях, где солнечная радиация, температура воздуха, влажность и скорость ветра измерены. Если необходимо, уравнение 52 может быть калибровано на месячной или годичной основе с определением эмпирических коэффициентов по уравнению $ET_o = a + b ET_{oEq.52}$, где Eq. 52 относится к определению ET_o с помощью уравнения 52. Коэффициенты a и b могут быть определены регрессивным анализом или визуальной подгонкой. В целом, определение солнечной радиации, давления пара и скорости ветра, как это описано в уравнениях 48-51 и табл. 4, а затем использование этих определений в уравнении 6 (уравнении Пенмана-Монтейта), обеспечивает более точные определения в сравнении с определением ET_o напрямую, используя уравнение 52. Это следует отнести к способности уравнений включать общие климатические характеристики,

такие, как высокая или низкая скорость ветра или высокая или низкая сравнительная влажность в определении ET_0 через уравнение 6.

Уравнение 52 имеет тенденцию к занижению при высокой скорости ветра ($u_2 > 3$ м/с) или к завышению при высокой относительной влажности.

Глава 4

Определение ET_0

В этой главе излагается метод определения эталонной эвапотранспирации растений (ET_0) по метеорологическим данным или по замерам эвапориметра.

Метод Пенмана-Монтейта является единственным стандартным методом для определения ET_0 по метеорологическим данным. Сам метод представлен в главе 2, а расчет всех данных, необходимых для определения ET_0 , обсуждается в главе 3. Эта глава дает руководство по расчету ET_0 с различными временными рядами, от часов до месяцев и при отсутствии климатических данных. Расчет ET_0 может быть сделан вручную или на компьютере.

ET_0 может быть также определена по потерям воды на испарение с водной поверхности. В данной главе также представлены процедура получения ET_0 по данным эвапориметра и коэффициенты для различных типов приборов.

УРАВНЕНИЕ ПЕНМАНА-МОНТЕЙТА

Уравнение Пенмана-Монтейта было выведено из первоначального уравнения Пенмана-Монтейта, а также уравнений аэродинамики и сопротивления кроны:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (6)$$

где

ET_0 - эталонная эвапотранспирация [мм сут⁻¹];

R_n - чистая радиация на поверхности растений [МДж м⁻² сут⁻¹];

G - плотность теплового потока почвы [МДж м⁻² сут⁻¹];

T - среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м [°C];

u_2 - скорость ветра на высоте 2 м [м с⁻¹];

e_s - давление пара насыщения [кПа];

e_a - фактическое давление [кПа];

$(e_s - e_a)$ - дефицит давления пара насыщения [кПа];

Δ - градиент кривой давления пара [кПа °C⁻¹];

γ - психрометрическая постоянная [кПа °C⁻¹].

Уравнение Пенмана-Монтейта определяет эвапотранспирацию с гипотетической эталонной травяной поверхности и обеспечивает стандарт, с которым сопоставляется эвапотранспирация для различных периодов года или других регионов, а также других культур.

Процедура расчета

Расчетная таблица

ET_0 может быть определена из расчетной таблицы, представленной в боксе 11. В таблице приводятся ссылки на приложение II для определения некоторых климатических параметров. Процедура расчета состоит из следующих шагов:

1. Вывод некоторых климатических параметров из суточной максимальной (T_{\max}) и минимальной (T_{\min}) температуры воздуха, абсолютной отметки (z) и средней скорости ветра (u_2).
2. Расчет дефицита давления пара ($e_s - e_a$). Давление пара насыщения (e_s) выводится из T_{\max} и T_{\min} , тогда как фактическое давление пара (e_a) может быть выведено из температуры точки росы (T_{dew}), максимальной (RH_{\max}) и минимальной (RH_{\min}) относительной влажности, из максимальной (RH_{\max}) или средней (RH_{mean}) относительной влажности.
3. Определение чистой радиации (R_n) как разницы между чистой коротковолновой (R_{ns}) и чистой длинноволновой (R_{nl}) радиацией. Влияние почвенного теплового потока (G) для суточных расчетов игнорируется, поскольку его величина сравнительно мала. Чистая радиация, выраженная в $\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$, преобразуется в мм/сут (эквивалентное испарение) в уравнении Пенмана-Монтейта с помощью преобразующего коэффициента 0,408.
4. ET_0 получается соединением результатов предыдущих шагов.

Примеры 17 и 20 показывают расчеты с помощью таблицы.

Расчеты при помощи компьютера

Расчеты ET_0 часто компьютеризированы. В главе 3 представлены процедуры расчета всех параметров, необходимых для определения ET_0 методом Пенмана-Монтейта. Типовая последовательность расчетов приведена в таблице. Процедуры, представленные в боксах 7 (дефицит давления пара), 9 (внеземная радиация и часы дневного света), 10 (чистая радиация) и 11 (ET_0) могут использоваться для разработки схемы или компьютерной программы расчета ET_0 .

Для определения ET_0 методом Пенмана-Монтейта создано множество компьютерных программ. Например, программа ФАО CROPWAT для планирования поливов, представленная на рис. 18.

Расчет ET_0 для различных временных интервалов

Выбор временного интервала для расчета ET_0 зависит от цели расчета, требуемой точности и временных шагов измерения имеющихся климатических данных.

БОКС 11				
Расчетная таблица E_T (метод Пенмана-Монтейта) с использованием метеорологических таблиц приложения 2				
Параметры				
T_{max}		$^{\circ}C$		
T_{min}		$^{\circ}C$	$T_{mean} = (T_{max} + T_{min})/2$	$^{\circ}C$
T_{mean}		$^{\circ}C$	Δ (табл. 2.4 прил. 2)	кПа/ $^{\circ}C$
Отметка		м	γ (табл. 2.2 прил. 2)	кПа/ $^{\circ}C$
u_2		м/с	$(1 + 0,34 u_2)$	
			$\Delta / [\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)]$	
			$\gamma / [\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)]$	
			$[900 / (T_{mean} + 273)] u_2$	
Дефицит давления пара				
T_{max}		$^{\circ}C$	$e^0(T_{max})$ (табл. 2.3)	кПа
T_{min}		$^{\circ}C$	$e^0(T_{min})$ (табл. 2.3)	кПа
Давление пара насыщения $e_s = [e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})]/2$				кПа
e_a, выведенное из температуры точки росы				
T_{dew}		$^{\circ}C$	$e_a = e^0(T_{dew})$ (табл. 2.3)	кПа
e_a, выведенное из максимальной и минимальной относительной влажности				
RH_{max}		%	$e^0(T_{min}) RH_{max} / 100$	кПа
RH_{min}		%	$e^0(T_{max}) RH_{min} / 100$	кПа
			e_a : (средняя)	кПа
e_a, выведенное из максимальной относительной влажности (рекомендуется, если в RH_{min} есть ошибка)				
RH_{max}		%	$e_a = e^0(T_{min}) RH_{max} / 100$	кПа
e_a, выведенное из средней относительной влажности (рекомендуется менее ввиду нелинейности)				
RH_{mean}		%	$e_a = e_s RH_{mean} / 100$	кПа
Дефицит давления пара $(e_s - e_a)$				кПа
Радиация				
широта		$^{\circ}$		
день			R_a	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
месяц			N	час
n		час	n/N	
Если данные R_s отсутствуют: $R_s = (0,25 + 0,50 n/N) R_a$				МДж $m^{-2}сут^{-1}$
$R_{s0} = [0,75 + 2 (отметка) / 100\ 000] R_a$				МДж $m^{-2}сут^{-1}$
R_s / R_{s0}				
$R_{ns} = 0,77 R_s$				МДж $m^{-2}сут^{-1}$
T_{max}			$\sigma T_{max,K}^4$ (табл. 2.8)	МДж $m^{-2}сут^{-1}$

T_{min}			$\sigma T_{min,K}^4$ (табл. 2.8)		МДж м ⁻² сут ⁻¹
$(\sigma T_{max,K}^4 + \sigma T_{min,K}^4)/2$					МДж м ⁻² сут ⁻¹
e_a		кПа	$(0,34 - 0,14 \sqrt{e_a})$		
R_s/R_{so}			$(1,35 R_s/R_{so} - 0,35)$		
$R_{nl} = (\sigma T_{max,K}^4 + \sigma T_{min,K}^4)/2 (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) (1,35 R_s/R_{so} - 0,35)$					МДж м ⁻² сут ⁻¹
$R_n = R_{ns} - R_{nl}$					МДж м ⁻² сут ⁻¹
T_{month}		°C	G_{day} ()	0	МДж м ⁻² сут ⁻¹
$T_{month-1}$		°C	$G_{month} = 0,14 (T_{month} - T_{month-1})$		МДж м ⁻² сут ⁻¹
$R_n - G$					МДж м ⁻² сут ⁻¹
$0,408 (R_n - G)$					мм/сут
Эталонная эвапотранспирация для травяного покрова					
$\left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \right] [0,408(R_n - G)]$					мм/сут
$\left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \right] \left[\frac{900}{T + 273} \right] u_2 [(e_s - e_a)]$					мм/сут
$ET_o = \frac{0,408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$					мм/сут

Рис. 18. Значения ET_o , рассчитанные по методике CROPWAT

Месячные значения эталонной эвапотранспирации по Пенману-Монтейту							
Метеостанция: Cabinda				Страна: Ангола			
Абсолютная отметка: 20 м				Координаты: - 5.33 South 12.11 East			
Месяц	Мин. температура, °C	Макс. температура, °C	Влажность, %	Скорость ветра, км/сут	Часы солнечного сияния	Радиация MJ/m ² /день	ET _o -PenMon мм/день
Январь	22.8	29.6	81	78	4.0	15.7	3.4
Февраль	22.7	30.3	82	69	4.6	16.9	3.7
Март	23.0	30.6	80	78	5.1	17.4	3.8
Апрель	23.0	30.2	82	69	5.0	16.4	3.5
Май	22.0	28.6	84	69	3.8	13.5	2.9
Июнь	19.2	26.5	81	69	3.3	12.2	2.6
Июль	17.6	25.1	78	78	3.2	12.3	2.6
Август	18.6	25.3	78	78	2.6	12.4	2.6
Сентябрь	20.5	26.5	78	104	2.0	12.4	2.8
Октябрь	22.5	28.0	79	130	2.2	12.9	3.1
Ноябрь	23.0	28.7	80	104	3.2	14.4	3.3
Декабрь	23.0	29.1	82	95	3.8	15.2	3.4
Год	21.5	28.2	80	85	3.6	14.3	3.1

Десятидневный или месячный временной интервал

Несмотря на нелинейность в уравнении Пенмана-Монтейта и некоторых методов определения по метеоданным, среднедекадные и среднемесячные данные могут быть использованы для расчета среднедекадных и среднемесячных значений ET_0 . Значение ET_0 , рассчитанное по среднемесячным данным, идентично значению, рассчитанному по среднесуточным данным для этого месяца.

Метеорологические данные состоят из:

- Температуры воздуха: декадного или месячного среднесуточного максимума (T_{max}) и среднесуточного минимума (T_{min}).
- Влажности воздуха: декадного или месячного среднесуточного давления пара (e_a), выведенного из данных психрометрии, точки росы и относительной влажности.
- Скорости ветра: декадной или месячной среднесуточной скорости ветра, измеренной на высоте 2 м (u_2).
- Радиации: декадной или месячной среднесуточной чистой радиации (R_n), рассчитанной по средней декадной или месячной коротковолновой радиации или из фактической продолжительности часов солнечного сияния (n). Внеземная радиация (R_a) и часы дневного света (N) для конкретного дня месяца могут быть рассчитаны с использованием уравнений 21 и 34 или выбраны из табл. 2.5 и 2.6 приложения 2.

Когда почва нагревается (весной) или охлаждается (летом), почвенный тепловой поток (G) для месячных периодов может стать существенным по отношению к среднемесячной R_n . В этих случаях G не может игнорироваться и его значение следует определить из среднемесячной температуры воздуха предыдущего и последующего месяцев. В главе 3 описываются процедуры расчета (уравнения 43 и 44).

ПРИМЕР 17

Определение ET_0 по среднемесячным данным

Даны средние месячные климатические данные для апреля для Бангкока (Филиппины), расположенного на $13^{\circ}44'$ с. ш. на высоте 2 м над уровнем моря.

-	Месячная среднесуточная максимальная температура (T_{max}) =	34,8	$^{\circ}C$
-	Месячная среднесуточная минимальная температура (T_{min}) =	25,5	$^{\circ}C$
-	Месячное среднесуточное давление пара (e_a) =	2,85	кПа
Измеренная на высоте 2 м	Месячная среднесуточная скорость ветра (u_2) =	2	м/с
-	Месячная среднесуточная продолжительность солнечного сияния (n) =	8,5	час/сут
Для апреля	Среднемесячная температура ($T_{month,i}$) =	30,2	$^{\circ}C$
Для марта	Среднемесячная температура ($T_{month,i-1}$) =	29,2	$^{\circ}C$
Определение по описанию в боксе 11 (расчетная таблица ET_0)			
Параметры			
-	$T_{mean} = [(T_{max} = 34,8) + (T_{min} = 25,6)]/2 =$	30,2	$^{\circ}C$
Из табл. 2.4 или ур-я 13:	$\Delta =$	0,246	кПа/ $^{\circ}C$
Из табл. 2.1 и 2.2 или ур-й 7 и 8:	Высота =	2	м
	$P =$	101,3	кПа
	$\gamma =$	0,0674	кПа/ $^{\circ}C$
-	$(1 + 0,34 u_2) =$	1,68	-
-	$\Delta/[\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)] = 0,246/[0,246 + 0,0674 (1,68)] =$	0,685	-
-	$\gamma/[\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)] = 0,0667/[0,246 + 0,0674 (1,68)] =$	0,188	-
-	$900/(T_{mean}+273) u_2 =$	5,94	-

Дефицит давления пара			
Из табл. 2.3 или ур-я 11:	$T_{max} =$ $e^0(T_{max}) =$	34,8 5,56	$^{\circ}C$ кПа
Из табл. 2.3 или ур-я 11:	$T_{min} =$ $e^0(T_{min}) =$	25,6 3,28	$^{\circ}C$ кПа
- дано:	$e_s = (5,56 + 3,28)/2 =$ $e_a =$	4,42 2,85	кПа кПа
-	Дефицит давления пара $(e_s - e_a) = (4,42 - 2,85) =$	1,57	кПа
Радиация (месяц - апрель)			
Из табл. 2.6 или 2.5 или ур-я 21:	J (для 15 апреля) Широта = $13^{\circ}44'$ с. ш. = $(13 + 44/60) =$ $R_a =$	105 13,73 38,06	- $^{\circ}C$ ш. МДж $m^{-2}сут^{-1}$
N (табл. 2.7 или ур-е 34):	Продолжительность дня $N =$	12,31	час
-	$n/N = (8,5/12,31) =$	0,69	-
-	$R_s = [0,25 + 0,50 (0,69)] 38,06 =$	22,65	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
-	$R_{s0} = (0,75 + 2 (2)/100 000) 38,06 =$	28,54	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
-	$R_s/R_{s0} = (22,65/28,54) =$	0,79	-
-	$R_{ns} = 0,77 (22,65) =$	17,44	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
Из табл. 2.8:	$T_{max} =$	34,8	$^{\circ}C$
	$\sigma T_{max,K}^4 =$	44,10	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
Из табл. 2.8:	$T_{min} =$	25,6	$^{\circ}C$
	$\sigma T_{min,K}^4 =$	39,06	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
-	$(\sigma T_{max,K}^4 + \sigma T_{min,K}^4)/2 = (44,10 + 39,06)/2 =$	41,58	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
-	$e_a =$	2,85	кПа
-	$(0,34 - 0,14 \sqrt{e_a})$	0,10	-
-	$R_s/R_{s0} =$	0,79	-
-	$(1,35 R_s/R_{s0} - 0,35) =$	0,72	-
-	$R_{nl} = 41,58 (0,10) 0,72 =$	3,11	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
-	$R_n = (17,44 - 3,11) =$	14,33	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
-	$G = 0,14 (30,2 - 29,2) =$	0,14	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
-	$(R_n - G) = (14,33 - 0,14) =$	14,19	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
-	$0,408 (R_n - G) =$	5,79	мм/сут
Эталонная эвапотранспирация травы			
-	$0,408 (R_n - G) \Delta / [\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)] =$		
-	$(5,79) 0,685 =$	39,7	мм/сут
-	$900 u_2 / (T+273) (e_s - e_a) \gamma / [\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)] =$		
-	$5,94 (1,57) 0,188 =$	1,75	мм/сут
-	$ET_0 = (3,97 + 1,75) =$	5,72	мм/сут
Эталонная эвапотранспирация травы равна 5,7 мм/сут			

Суточный временной интервал

Расчет ET_0 по Пенману-Монтейту в 24-часовом временном масштабе обычно обеспечивает точные результаты. Требуются следующие метеоданные:

- Максимальная (T_{max}) и минимальная (T_{min}) суточная температура воздуха.
- Влажность воздуха: среднесуточное фактическое давление пара (e_a), выведенное из психрометрических данных, температуры точки росы или относительной влажности.
- Скорость ветра: среднесуточное значение для 24 часов, измеренное на высоте 2 м (u_2).
- Радиация: чистая радиация (R_n), рассчитанная или рассчитанная из солнечной или длинноволновой радиации или из фактической продолжительности часов солнечного сияния (n). Внеземная радиация (R_a) и часы дневного света (N) для конкретного дня месяца

должны быть рассчитаны с использованием уравнений 21 и 34. Поскольку величина суточного почвенного потока (G) под эталонной травяной поверхностью относительно мала, она может быть проигнорирована для 24-часовых временных шагов.

ПРИМЕР 18			
Определение ET_0 по суточным данным			
Даны метеорологические данные, измеренные в июле в Брюсселе (Бельгия), расположенном на $50^{\circ}48'$ с. ш. на высоте 100 м над уровнем моря.			
-	максимальная температура воздуха (T_{max}) =	21,5	$^{\circ}C$
-	минимальная температура воздуха (T_{min}) =	12,3	$^{\circ}C$
-	максимальная относительная влажность (RH_{max}) =	84	%
-	минимальная относительная влажность (RH_{min}) =	63	%
-	скорость ветра на высоте 10 м =	10	км/ч
-	продолжительность солнечного сияния (n) =	9,25	час/сут
Преобразование скорости ветра			
На высоте 10 м	Скорость ветра = 10 км/ч или u_z =	2,78	м/с
Из ур-я 47 при $z = 10$ м	На стандартной высоте $u_2 = 0,748 (2,78) =$	2,078	м/с
Параметры			
Из ур-я 7:	Высота =	100	м
-	$P =$	100,1	кПа
-	$T_{mean} = (21,5 + 12,3)/2 =$	16,9	$^{\circ}C$
Из ур-я 13:	$T_{mean} =$	16,9	$^{\circ}C$
-	$\Delta =$	0,122	кПа/ $^{\circ}C$
Из ур-я 8:	$P =$	100,1	кПа
-	$\gamma =$	0,0666	кПа/ $^{\circ}C$
-	$(1 + 0,34 u_2) =$	1,71	-
-	$\Delta/[\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)] =$ $0,122/[0,122 + 0,0666 (1,71)] =$	0,518	-
-	$\gamma/[\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)] =$ $0,0666/[0,122 + 0,0666 (1,71)] =$	0,282	-
-	$900/(T_{mean} + 273) u_2 =$	6,450	-
Дефицит давления пара			
Из ур-я 11:	$T_{max} =$	21,5	$^{\circ}C$
-	$e^0(T_{max}) =$	2,564	кПа
Из ур-я 11:	$T_{min} =$	12,3	$^{\circ}C$
-	$e^0(T_{min}) =$	1,431	кПа
-	$e_s = (2,564 + 1,431) =$	1,997	кПа
относительн. влажность:	$RH_{max} =$	84	%
-	$RH_{min} =$	63	%
-	$e_a = [1,431 (0,84) + 2,564 (0,63)]/2 =$	1,409	кПа
-	Дефицит давления пара ($e_s - e_a$) = $(1,997 - 1,409) =$	0,589	кПа
Радиация			
Из табл. 2.5:	Месяц = 7, день = 6 $J =$	187	-
Из ур-я 21:	Широта = $50^{\circ}48'$ с. ш. = $J =$ $R_a =$	50,80 187 41,09	$^{\circ}C$ ш. - МДж $m^{-2}сут^{-1}$
Из ур-я 34:	Широта = $50^{\circ}48'$ с. ш. = $J =$ $N =$ $n/N = 9,25/16,3 =$	50,80 187 16,1 0,57	$^{\circ}C$ ш. - час -
Из ур-я 35:	$R_s = [0,25 + 0,50 (0,57)] 41,09 =$	22,07	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
Из ур-я 37:	$R_{so} = (0,75 + 2 (100)/100 000) 41,09 =$	30,90	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
-	$R_s/R_{so} =$	0,71	-

Из ур-я 38:	$R_{ns} = 0,77 (22,07) =$	17,00	МДж м ⁻² сут ⁻¹
-	$T_{max} =$	21,5	°С
-	$T_{max,K} = 21,5 + 273,16 =$	294,7	К
-	$\sigma T_{max,K}^4 =$	36,96	МДж м ⁻² сут ⁻¹
-	$T_{min} =$	12,3	°С
-	$T_{min,K} = 12,3 + 273,16 =$	285,5	К
-	$\sigma T_{min,K}^4 =$	32,56	МДж м ⁻² сут ⁻¹
-	$(\sigma T_{max,K}^4 + \sigma T_{min,K}^4)/2 = (36,96 + 32,56)/2 =$	34,76	МДж м ⁻² сут ⁻¹
-	$(0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) =$	0,17	-
-	$(1,35 R_s/R_{so} - 0,35) =$	0,61	-
-	$R_{nl} = 34,76 (0,17) 0,61 =$	3,71	МДж м ⁻² сут ⁻¹
-	$R_n = (17,00 - 3,71) =$	13,28	МДж м ⁻² сут ⁻¹
-	$G =$	0	МДж м ⁻² сут ⁻¹
-	$(R_n - G) = (13,28 - 0) =$	13,28	МДж м ⁻² сут ⁻¹
-	$0,408 (R_n - G) =$	5,42	мм/сут
Эталонная эвапотранспирация травы			
-	$0,408 (R_n - G) \Delta / [\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)] =$	2,81	мм/сут
-	$900 / (T+273) (e_s - e_a) \gamma / [\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)] =$	1,07	мм/сут
-	$ET_o = 2,81 + 1,07 = 3,88 \approx$	3,9	мм/сут
Эталонная эвапотранспирация травы равна 3,9 мм/сут			

Часовой временной интервал

На территориях, где в течение суток происходят существенные изменения скорости ветра, точки росы или облачности, расчет ET_o с использованием часового временного интервала лучше, чем 24-часового. Частые изменения могут исказить испаряющую силу среды в течение некоторой части дня и внести ошибку в вычисления. Тем не менее, в большинстве случаев применение уравнения Пенмана-Монтейта для 24-часового интервала дает точные результаты.

На электронных автоматизированных метеостанциях данные постоянно измеряются с часовым или более коротким интервалом. Следовательно, в случае компьютерных расчетов уравнение Пенмана-Монтейта может быть использовано с часовой периодичностью с хорошими результатами. При использовании часового или более короткого временного шага уравнение и некоторые процедуры должны быть скорректированы. Уравнение Пенмана-Монтейта для часового шага имеет вид:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^o(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (53)$$

где

ET_o - эталонная эвапотранспирация [мм сут⁻¹];

R_n - чистая радиация на поверхности растений [МДж м⁻² сут⁻¹];

G - плотность теплового потока почвы [МДж м⁻² сут⁻¹];

T_{hr} - среднечасовая температура воздуха [°С];

u_2 - среднечасовая скорость ветра на высоте 2 м [м с⁻¹];

$e^o(T_{hr})$ - давление пара насыщения при температуре воздуха T_{hr} [кПа] (ур-е 11);

e_a - среднечасовое фактическое давление [кПа] (ур-е 54);

Δ - градиент кривой давления пара насыщения при T_{hr} [кПа °С⁻¹] (ур-е 13);

γ - психрометрическая постоянная [кПа °С⁻¹].

При известной влажности фактическое давление пара определяется как:

$$e_a = e^o(T_{hr}) \frac{RH_{hr}}{100} \quad (54)$$

где

e_a - среднечасовое фактическое давление [кПа];

$e^o(T_{hr})$ - давление пара насыщения при T_{hr} [кПа] (ур-е 11);

RH_{hr} - среднечасовая относительная влажность [%].

Чистая радиация - это разница между чистой коротковолновой радиацией (R_{ns}) и чистой длинноволновой радиацией (R_{nl}) при часовом временном шаге. Следовательно:

- Если необходимо рассчитать R_{ns} и R_{nl} , используется внеземная радиация (R_a) за часовой период (ур-е 28).
- При вычислении R_{nl} с помощью ур-я 39 ($\sigma T_{max,K}^4 + \sigma T_{min,K}^4$)/2 есть $\sigma T_{hr,K}^4$ и постоянная Стефана-Больцмана:
 $\sigma = (4,903/24) 10^{-9} = 2,043 10^{-10}$ МДж м⁻²сут⁻¹.

Поскольку соотношение R_s/R_{s0} используется для характеристики облачности, при расчете R_{nl} для часового периода в ночное время это соотношение должно быть установлено равным расчетному для периода за 2-3 часа до заката, до того, как угол стояния Солнца станет малым. Это обычно служит хорошим приближением для облачности в последующее ночное время. Часовой период за 2-3 часа до заката устанавливается путем расчета R_a как период, когда ω , вычисленная в уравнении 31, находится в пределах $(\omega_s - 0,79) \leq \omega \leq (\omega_s - 0,52)$, где ω_s рассчитывается по уравнению 25. В качестве более близкой альтернативы можно допустить $R_s/R_{s0} = 0,4-0,6$ в течение ночного времени во влажном и полувлажном климате и $R_s/R_{s0} = 0,7-0,8$ - в аридном и полуаридном климате. Значение $R_s/R_{s0} = 0,3$ предполагает сплошную облачность.

Почвенный тепловой поток G очень важен для почасовых расчетов. Уравнения 45 и 46 могут быть использованы для вывода G для часовых интервалов.

Необходимы следующие метеоданные:

- Температура воздуха: среднечасовая температура (T_{hr}).
- Влажность воздуха: среднечасовая влажность воздуха (RH_{hr}).
- Скорость ветра: среднечасовая скорость ветра, измеренная на высоте 2 м (u_2).
- Радиация: суммарная часовая радиация (R_s) и чистая радиация (R_n).

Ввиду необходимости стандартизации постоянные в уравнении 53 представляют постоянное сопротивление поверхности (r_s) в 70 с/м в течение всех периодов. Это постоянное сопротивление может вызвать некоторое занижение часового значения ET_o в течение дневного периода, когда r_s может быть несколько ниже. Постоянное сопротивление может вызвать и некоторое завышение этой величины в течение вечернего периода, когда r_s может быть несколько выше. Тем не менее, когда расчеты часовых значений ET_o из уравнения 53 суммируются за весь 24-часовой период, чтобы получить эквивалент 24-часового ET_o , часовые разности компенсируют одна другую и результаты обычно эквивалентны расчетам ET_o для 24-часового временного интервала. Точные определения ET_o для конкретных часовых периодов могут потребовать использования функций аэродинамической стабильности и функций для модификации величины r_s , основанных на уровне радиации, влажности и температуры. Применение этих функций обычно не требуется, если почасовые расчеты суммируются за 24-часовой период. Следовательно, нет необходимости описывать здесь эти функции.

ПРИМЕР 19				
Определение ET_0 по часовым данным				
Даны среднечасовые данные между 02.00 и 03.00 и 14.00 и 15.00 часов 1 октября для Н'Диайе (Сенегал), расположенном на $16^{\circ}13'$ с. ш. и $16^{\circ}15'$ в. д. на высоте 8 м над уровнем моря. В отсутствие калиброванных коэффициентов, значения a_s и b_s (ф-ла Ангстрема) используются и для коэффициентов чистой длинноволновой радиации (ур-е 39).				
Измеренные климатические данные		02.00-03.00 ч	14.00-15.00 ч	
T_{hr} : среднечасовая температура		28	38	$^{\circ}C$
RH_{hr} : среднечасовая относительная влажность		90	52	%
u_2 : среднечасовая скорость ветра		1,9	3,3	м/с
R_s : суммарная солнечная радиация		-	2,450	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
Параметры				
Из ур-я 13:	$\Delta =$	0,220	0,358	кПа/ $^{\circ}C$
Из ур-я 8:	$\gamma =$	0,0673	0,0673	кПа/ $^{\circ}C$
Дефицит давления пара				
Из ур-я 11:	$e^0(T) =$	3,780	6,625	кПа
Из ур-я 54:	$e_a =$	3,402	3,445	кПа
-	$e_s - e_a =$	0,378	3,180	кПа
Внеземная радиация				
Из табл. 2.5 на 1 октября:	$J = 274$			-
Из ур-я 22:	$\varphi = \pi/180 (16,22) = 0,2830$			рад
Из ур-я 23:	$d_r = 1,0001$			-
Из ур-я 24:	$\delta = -0,0753$			рад
Из ур-я 33:	$b = 3,3315$			-
Из ур-я 32:	$S_c =$			ч
-	$L_z =$			град
-	$L_m =$			град
-	$t =$	2,5	14,5	ч
Из ур-я 31:	$\omega =$	-2,46	0,682	рад
-	$t_l =$	1	1	ч
Из ур-я 29:	$\omega_1 =$	-	0,5512	рад
Из ур-я 21:	$\omega_2 =$	-	0,8130	рад
Из ур-я 28:	$R_a =$	0	3,543	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
Радиация				
Дано	$R_s =$	0	2,450	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
Из ур-я 37:	$R_{so} =$	0	2,658	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
Из ур-я 38:	$R_{ns} =$	0	1,887	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
-	$\sigma T_K^4 =$	1,681	1,915	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
-	$(0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) =$	0,082	0,080	-
-	$R_s/R_{so} =$	0,8 (принято)	0,922	-
-	$(1,35 R_s/R_{so} - 0,35) =$	0,730	0,894	-
Из ур-я 39:	$R_{nl} =$	0,100	0,137	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
Из ур-я 40:	$R_n =$	-0,100	1,749	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
Из ур-я 46, 45:	$G =$	-0,050	0,175	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
-	$(R_n - G) =$	-0,050	1,574	МДж $m^{-2}сут^{-1}$
-	$0,408 (R_n - G) =$	-0,020	0,642	мм/ч
Эталонная эвапотранспирация травы				
-	$0,408 (R_n - G)$			
-	$\Delta/[\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)] =$	-0,01	0,46	мм/ч
-	$37/(T+273) u_2 (e_s - e_a)$			
-	$\gamma/[\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)] =$	0,01	0,17	мм/ч
Из ур-я 53:	$ET_0 =$	0,00	0,63	мм/ч
Эталонная эвапотранспирация травы равна 0,00 мм/ч для времени между 02.00 и 03.00 и 0,63 мм/ч - между 14.00 и 15.00 часов.				

ПРОЦЕДУРЫ РАСЧЕТА С НЕДОСТАЮЩИМИ ДАННЫМИ

Метеоданные, требуемые для определения ET_0 по уравнению Пенмана-Монтейта: температура воздуха, влажность воздуха, скорость ветра и радиация. Если некоторые из этих данных пропущены или не могут быть подсчитаны, рекомендуется, чтобы пользователь определил отсутствующие данные с помощью одной из процедур, представленных в главе 3 и использовал уравнение Пенмана-Монтейта для расчета ET_0 . Использование другой процедуры расчета, требующей ограниченного числа метеоданных, рекомендуется в меньшей степени.

Пример 20 иллюстрирует определение месячной величины ET_0 по методу Пенмана-Монтейта из данных, содержащих лишь максимальную и минимальную температуру воздуха. Процедуры, представленные в главе 3 для определения отсутствующих данных по влажности, радиации и скорости ветра, должны быть оценены путем сопоставления ET_0 , рассчитанной по ограниченному данным, с метеостанциями в регионе с полным набором данных.

ПРИМЕР 20			
Определение ET_0 при пропущенных данных			
Даны среднесуточные минимальные и максимальные температуры июля с метеостанции близ Лиона, Франция (46°43' с. ш., абс. отметка 200 м). Других метеоданных не имеется.			
-	максимальная температура воздуха (T_{max}) =	26,6	°C
-	минимальная температура воздуха (T_{min}) =	14,8	°C
Определение согласно боксу 11 (расчетная таблица ET_0)			
Определение скорости ветра: 2 м/с использованы как временное определение. Ввиду сравнительно низкой высоты культуры (0,12 м для эталонной культуры) и появления u_2 как в числителе, так и в знаменателе уравнения Пенмана-Монтейта, оно не слишком чувствительно к нормальным пределам скорости ветра.			
Параметры			
-	$T_{mean} = (26,6 + 14,8)/2 =$	20,7	°C
Из табл. 2.4 или ур-я 13:	$T_{mean} =$ $\Delta =$	20,7 0,150	°C кПа/°C
Из табл. 2.2 или ур-я 8:	Высота =	200	м
-	$\gamma =$ $(1 + 0,34 u_2) = (1 + 0,34 (2)) =$	0,066 1,68	кПа/°C -
-	$\Delta/[\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)] =$ $0,150/[0,150 + 0,066 (1,68)] =$	0,576	-
-	$\gamma/[\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)] =$ $0,066/[0,150 + 0,0666 (1,68)] =$	0,252	-
-	$900/(T_{mean} + 273) u_2 =$	6,13	-
Определение влажности:			
Принято (ур-е 48):	$T_{dew} \approx T_{min} =$	14,8	°C
ур-е 14 или табл. 2.3:	$T_{dew} =$ $e_a =$	14,8 1,68	°C кПа
Из табл. 2.3 или ур-я 11:	$T_{max} =$ $e^0(T_{max}) =$	26,6 3,48	°C кПа
Из табл. 2.3 или ур-я 11:	$T_{min} =$ $e^0(T_{min}) =$	14,8 1,68	°C кПа
-	$e_s = (3,48 + 1,68)/2 =$	2,58	кПа
-	$(e_s - e_a) = (2,58 - 1,68) =$	0,90	кПа
соотносится с:	$RH_{max} = 100 e_a/e^0(T_{min}) =$ $RH_{min} = 100 e_a/e^0(T_{max}) = 100 (1,68/3,48) =$	100 48	% %

	$RH_{mean} = (RH_{max} + RH_{min})/2 =$	74	%
Определение радиации:			
R_s может быть выведено из разницы между T_{max} и T_{min} :			
Из ур-я 50:	$R_s = 0,16 \sqrt{(26,6 - 14,8) R_a}$ $R_s = 0,55 R_a$	- -	МДж м ⁻² сут ⁻¹ МДж м ⁻² сут ⁻¹
Табл. 2.6 или ур-е 21:	День = 15 Месяц = июль, J = Широта = 45°43' с. ш. = $R_a =$	196 45,72 40,55	°с. ш. МДж м ⁻² сут ⁻¹
-	$R_s = 0,55 R_a = 0,55 (40,55) =$	22,29	МДж м ⁻² сут ⁻¹
-	$R_{so} = (0,75 + 2 (200)/100 000) 40,55 =$	30,58	МДж м ⁻² сут ⁻¹
-	$R_s/R_{so} =$	0,73	-
-	$R_{ns} = 0,77 (22,29) =$	17,16	МДж м ⁻² сут ⁻¹
Табл. 2.8:	$T_{max} =$	26,6	°С
-	$T_{max,K} = 26,6 + 273,16 =$	299,76	К
-	$\sigma T_{max,K}^4 =$	39,59	МДж м ⁻² сут ⁻¹
Табл. 2.8:	$T_{min} =$	14,8	°С
-	$T_{min,K} = 14,8 + 273,16 =$	287,96	К
-	$\sigma T_{min,K}^4 =$	33,71	МДж м ⁻² сут ⁻¹
-	$(\sigma T_{max,K}^4 + \sigma T_{min,K}^4)/2 = (39,59 + 33,71)/2 =$	36,65	МДж м ⁻² сут ⁻¹
-	$e_a =$	1,68	кПа
-	$(0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) =$	0,16	-
-	$R_s/R_{so} =$	0,73	-
-	$(1,35 R_s/R_{so} - 0,35) =$	0,63	-
-	$R_{nl} = 36,65 (0,16) 0,63 =$	3,68	МДж м ⁻² сут ⁻¹
-	$R_n = (17,16 - 3,68) =$	13,48	МДж м ⁻² сут ⁻¹
-	$G =$	0	МДж м ⁻² сут ⁻¹
-	$(R_n - G) = (13,48 - 0) =$	13,48	МДж м ⁻² сут ⁻¹
-	$0,408 (R_n - G) =$	5,50	мм/сут
Эталонная эвапотранспирация травы			
-	$0,408 (R_n - G) \Delta / [\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)] =$	3,17	мм/сут
-	$900 / (T+273) u_2 (e_s - e_a) \gamma / [\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)] =$	1,39	мм/сут
-	$ET_0 = 3,17 + 1,39 =$	4,56	мм/сут
Эталонная эвапотранспирация травы равна 4,6 мм/сут. Если вместо 2 м/с скорость ветра определена как 1 или 3 м/с, ET_0 будет соответственно на 7 % ниже (4,2 мм/сут) или на 6 % выше (4,8 мм/сут). Для сравнения, уравнение Харгрейва (ур-е 52) предсказывает $ET_0 = 5,0$ мм/сут.			

МЕТОД ЭВАПОРИМЕТРА

Испарение из емкости

Испарение из емкости, наполненной водой, легко может быть определено. В отсутствие дождя количество воды, испарившейся из емкости, соответствует понижению уровня воды за этот период. Эвапориметр измеряет интегральное воздействие радиации, ветра, температуры и влажности по испарению с открытой водной поверхности. Хотя прибор реагирует одинаково на сходные климатические факторы, влияющие на транспирацию растениями, некоторые факты образуют существенную разницу в потере воды с водной поверхности и орошаемой площади. Отражение солнечной радиации водой в мелкой емкости может отличаться от 23 %, принятых для эталонной травяной поверхности. Накопление тепла внутри емкости может вызвать существенное испарение в ночное время, в то время, как большинство растений транспирируют лишь в дневное время. Имеются различия и в турбулентности, температуре и влажности воздуха непосредственно над соответствующей поверхностью. Кроме того, имеет место передача тепла через стенки емкости, что влияет на энергетический баланс.

Несмотря на разницу между испарением из емкости и эвапотранспирацией с засаженной поверхностью, может быть гарантировано использование эвапориметров для предсказания E_{T_0} для периодов 10 дней и более.

Испарение с эвапориметра соотносится с эталонной эвапотранспирацией через эмпирически определенный коэффициент эвапориметра:

$$E_{T_0} = K_p E_{\text{пан}} \tag{55}$$

где

E_{T_0} - эталонная эвапотранспирация [мм/сут];

K_p - коэффициент эвапориметра [-];

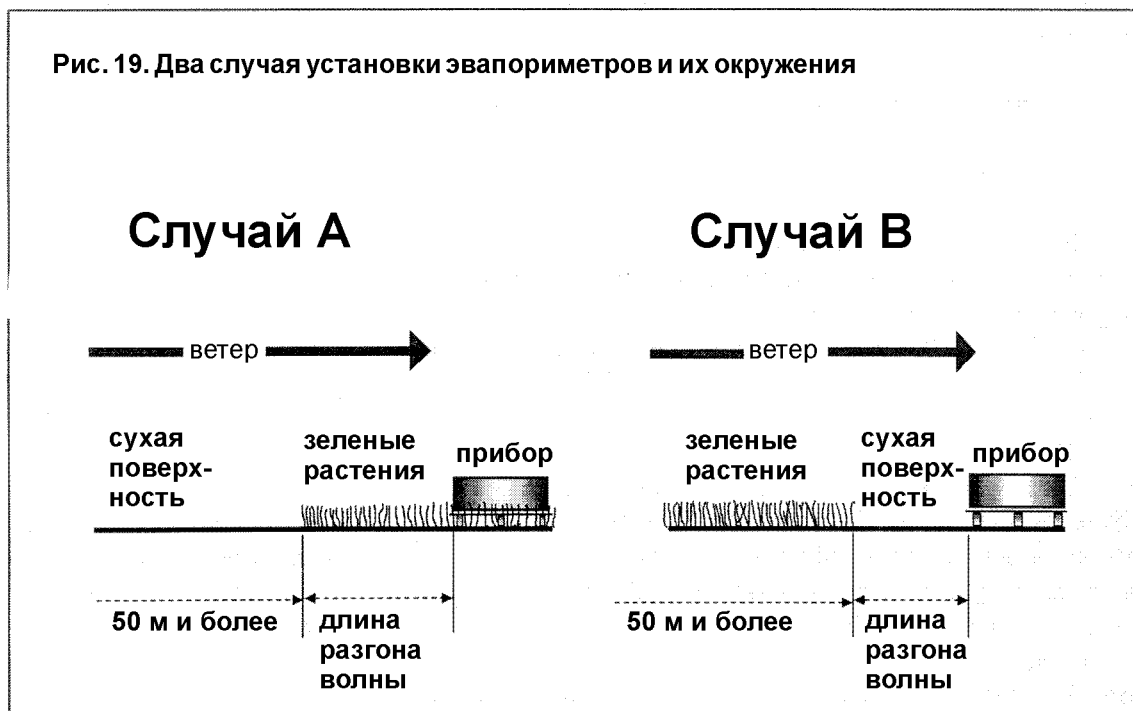
$E_{\text{пан}}$ - испарение из эвапориметра [мм/сут].

Коэффициент эвапориметра (K_p)

Типы эвапориметров и окружающая среда

Существуют различные типы эвапориметров. Описание утопленных приборов Класа А и Колорадо дано в боксах 12 и 13. Поскольку цвет, размеры и положение прибора оказывают существенное влияние на результаты измерений, коэффициенты приборов являются специфическими.

При выборе соответствующего коэффициента проверяются не только тип прибора, но и поверхность почвы на станции, основные условия ветровой деятельности и влажности воздуха. Положение прибора и окружающие условия также важны, в особенности, если прибор установлен на залежных землях. Обычно рассматриваются два случая: случай А, когда прибор установлен на травяном покрове и окружен необрабатываемыми землями; случай В, когда прибор установлен на залежных землях и окружен травяным покровом (рис. 19).



Коэффициенты эвапориметра

Коэффициенты будут отличаться в зависимости от типа прибора, размера и состояния подветренной буферной зоны. Чем больше буферная зона, тем больше ветра проходит над прибором в равновесии с буферной зоной. В равновесии с буферной зоной воздух содержит больше водяного пара и тем меньше тепла в случае А и в случае В. Коэффициенты для эвапориметров класса А и для утопленных эвапориметров Колорадо для различной грунтовой поверхности, а также характеристика буферной зоны и климатические условия представлены в табл. 5 и 6. Уравнения регрессии, выведенные из таблиц, представлены в табл. 7. Там, где имеются данные измерений по другим типам утопленных эвапориметров, они должны быть использованы для затопленного эвапориметра Колорадо или для уравнения Пенмана-Монтейта для расчета K_p . Соотношение между испарением из утопленного эвапориметра и из утопленного эвапориметра Колорадо для различных климатических условий и приборов приведены в табл. 8.

Там, где данные отсутствуют, скорость ветра может быть определена из глобальной величины $u_2 = 2$ м/с, или, как показано в табл. 4. RH_{mean} может быть аппроксимирована из температуры воздуха как $RH_{mean} = 50 e^{0(T_{min})}/e^{0(T_{max})} + 50$.

Адаптация (подгонка) коэффициентов

В некоторых условиях, не учтенных в таблицах, K_p может нуждаться в некотором уточнении (подгонке). Это необходимо на залежных землях или там, где эвапориметры соседствуют с высокими культурами. Несоблюдение стандартной окраски эвапориметра и установка экранов могут повлиять на показания прибора и потребовать некоторой подгонки коэффициента.

В условиях неосвоенных и обширных голых земель (большая буферная зона, случай В), например, в пустынных и полупустынных районах, значения K_p для аридных ветреных областей могут быть снижены на 20 %. Для площадей с умеренным ветром, температурой и относительной влажностью они могут быть снижены на 5-10 %. Небольшое снижение или никакого снижения не требуется для влажных прохладных условий.

Там, где эвапориметры окружены высокой растительностью, например, кукурузой высотой 2,5 м, коэффициенты следует увеличить до 30 % для сухого ветреного климата и лишь на 5-10 % - для спокойного влажного климата.

Окраска также может повлиять на испарение. Для гальванизированных приборов, ежегодно покрываемых алюминием или нержавеющей сталью, представленные коэффициенты соответствуют реальным величинам. Небольшая разница в E_{pan} будет иметь место, если прибор внутри или снаружи окрашен белой краской. Увеличение E_{pan} до 10 % может иметь место, если прибор окрашен черной краской. Материал, из которого изготовлен прибор, может оказывать влияние в пределах лишь нескольких процентов.

Важен уровень воды, поддерживаемый в приборе. Суммарная ошибка может достигать 15 %, если уровень в приборах Класа А упадет на 10 см ниже принятого стандарта (5-7,5 см ниже кромки прибора). Экраны, установленные над прибором, снижают E_{pan} на 10 %. Чтобы избежать использования прибора для водопоя птицами, вблизи эвапориметров Класа А устанавливаются емкости, наполненные до краев: птицы предпочтут емкость, заполненную до краев. Прибор должен быть установлен в большом, безопасном закрытом месте, с тем, чтобы воспрепятствовать водопою животных. Мутность воды обычно не влияет на E_{pan} больше, чем на 5 %. В общем, изменение E_{pan} не является постоянным во времени ввиду старения, разрушения и повторной окраски прибора.

ТАБЛИЦА 5

Коэффициенты эвапориметра (K_p) Класса А для различных случаев установки прибора и окружающей среды, а также различных уровней средней относительной влажности и скорости ветра (публикация ФАО № 24)

Класс А	Случай А: прибор установлен на площадке с зеленой сельхозкультурой				Случай В: прибор установлен на сухих заброшенных землях			
	RH_{mean} (%) →	низкий < 40	средний 40-70	высокий > 70		низкий < 40	средний 40-70	высокий > 70
Скорость ветра (м/с)	Расстояние от земной культуры с подветренной стороны (м)				Расстояние от земной культуры с подветренной стороны (м)			
Слабый	1	0,55	0,65	0,75	1	0,7	0,8	0,85
< 2	10	0,65	0,75	0,85	10	0,6	0,7	0,8
	100	0,7	0,8	0,85	100	0,55	0,65	0,75
	1000	0,75	0,85	0,85	1000	0,5	0,6	0,7
Умеренный	1	0,5	0,6	0,85	1	0,65	0,75	0,8
2-5	10	0,6	0,7	0,75	10	0,55	0,65	0,7
	100	0,65	0,75	0,8	100	0,5	0,6	0,65
	1000	0,7	0,8	0,8	1000	0,45	0,55	0,6
Сильный	1	0,45	0,5	0,6	1	0,6	0,65	0,7
5-8	10	0,55	0,6	0,65	10	0,5	0,55	0,65
	100	0,6	0,65	0,7	100	0,45	0,5	0,6
	1000	0,65	0,7	0,75	1000	0,4	0,45	0,55
Очень сильный	1	0,4	0,45	0,5	1	0,5	0,6	0,65
	10	0,45	0,55	0,6	10	0,45	0,5	0,55
> 8	100	0,5	0,6	0,65	100	0,4	0,45	0,5
	1000	0,55	0,6	0,65	1000	0,35	0,4	0,45

ТАБЛИЦА 6

Коэффициенты эвапориметра (K_p) для утепленных приборов Колорадо для различных случаев установки прибора и окружающей среды, а также различных уровней средней относительной влажности и скорости ветра (публикация ФАО № 24)

Колорадо	Случай А: прибор установлен на площадке с зеленой сельхозкультурой				Случай В: прибор установлен на сухих заброшенных землях (1)			
	RH_{mean} (%) →	низкий < 40	средний 40-70	высокий > 70		низкий < 40	средний 40-70	высокий > 70
Скорость ветра (м/с)	Расстояние от земной культуры с подветренной стороны (м)				Расстояние от земной культуры с подветренной стороны (м)			
Слабый	1	0,75	0,75	0,8	1	1,1	1,1	1,1
< 2	10	1,0	1,0	1,0	10	0,85	0,85	0,85
	≥ 100	1,1	1,1	1,1	100	0,75	0,75	0,8
					1000	0,7	0,7	0,75
Умеренный	1	0,65	0,7	0,7	1	0,95	0,95	0,95
2-5	10	0,85	0,85	0,9	10	0,75	0,75	0,75
	≥ 100	0,95	0,95	0,95	100	0,65	0,65	0,7
					1000	0,6	0,6	0,65
Сильный	1	0,55	0,6	0,65	1	0,8	0,8	0,8
5-8	10	0,75	0,75	0,75	10	0,65	0,65	0,65
	≥ 100	0,8	0,8	0,8	100	0,55	0,6	0,65
					1000	0,5	0,55	0,6
Очень сильный	1	0,5	0,55	0,6	1	0,7	0,75	0,75
	10	0,65	0,7	0,7	10	0,55	0,6	0,65
> 8	≥ 100	0,7	0,75	0,75	100	0,5	0,55	0,6
					1000	0,45	0,5	0,55

ТАБЛИЦА 7

Коэффициент эвапориметра (K_p): уравнения регрессии, выведенные из таблиц 5 и 6

Класс А с зеленой буферной зоной	$K_p = 0,108 - 0,0286 u_2 + 0,0422 \ln(FET) + 0,1434 \ln(RH_{mean}) - 0,000631 [\ln(FET)]^2 \ln(RH_{mean})$
Класс А с сухой буферной зоной	$K_p = 0,61 + 0,00341 RH_{mean} - 0,000162 u_2 RH_{mean} - 0,0000959 u_2 FET + 0,00327 u_2 \ln(FET) - 0,00289 u_2 \ln(86,4 u_2) - 0,0106 \ln(86,4 u_2) \ln(FET) + 0,00063 [\ln(FET)]^2 \ln(86,4 u_2)$
Утопленный прибор Колорадо с зеленой буферной зоной	$K_p = 0,87 + 0,119 \ln(FET) - 0,0157 [\ln(86,4 u_2)]^2 - 0,0019 [\ln(FET)]^2 \ln(86,4 u_2) + 0,013 \ln(86,4 u_2) \ln(RH_{mean}) - 0,000053 \ln(86,4 u_2) \ln(FET) RH_{mean}$
Утопленный прибор Колорадо с сухой буферной зоной	$K_p = 1,145 - 0,080 u_2 + 0,000903 (u_2)^2 \ln(RH_{mean}) - 0,0964 \ln(FET) + 0,0031 u_2 \ln(FET) + 0,0015 [\ln(FET)]^2 \ln(RH_{mean})$
Коэффициенты и параметры	K_p коэффициент эвапориметра u_2 среднесуточная скорость ветра (м/с) RH_{mean} среднесуточная относительная влажность [%] $= (RH_{max} + RH_{min})/2$ FET буферная зона (трава, низкие деревья для случая А, сухие культуры или голая почва для случая В)
Диапазон изменения переменных	$1 \text{ м} < FET < 1000 \text{ м}$ (эти пределы должны соблюдаться) $30 \% < RH_{mean} < 84 \%$ $1 \text{ м/с} \leq u_2 \leq 8 \text{ м/с}$

Рекомендации

Выше приведенные суждения показывают, что использование таблиц или соответствующих уравнений может быть недостаточно для учета всех местных факторов, влияющих на K_p и тогда необходима подгонка к местным условиям. Рекомендуется соответствующая калибровка E_{pan} в отношении ET_o , рассчитанная по методу Пенмана-Монтейта.

Рекомендуется устанавливать эвапориметр не в центре, а на расстоянии минимум 10 м от края зеленых культур в наветренном направлении.

Если на площади отсутствуют данные по скорости ветра и относительной влажности, требуемые для расчета K_p , следует использовать эти переменные с ближайшей метеостанции. Затем эти переменные следует осреднить за расчетный период и тогда E_{pan} будет также осреднена за этот период.

Уравнение 1 в табл. 7 дает $K_p = 0,83$ для данных в уравнении 21, как показано в примере 22.

ТАБЛИЦА 8
Соотношение между испарением из утепленного прибора и прибора Колорадо для различных климатических условий и окружающей среды (публикация ФАО № 24)

		Соотношение $E_{пан}$ упомянутого прибора и прибора Колорадо			
		Влажный-умеренный климат		Аридный до полуаридного (сухой сезон)	
Почвенный покров вокруг прибора (50 м и более)		Короткий зеленый покров	Сухие залежные земли	Короткий зеленый покров	Сухие залежные земли
	Площадь чаши (m^2)				
GGI 20 диаметр 5 м, глубина 2 м (бывш. СССР)	19,6	1,0	1,1	1,05	0,25
Утепленный прибор, диаметр 12 футов (3,66 м), глубина 3,3 фута (Израиль)	10,5				
ВРІ, диаметр 6 футов (1,83 м), глубина 2 фута (0,61 м) (США)	2,6				
Кенийский прибор, диаметр 4 фута (1,22 м), глубина 14 дюймов (0,356 м)	1,2				
Австралийский прибор, диаметр 3 фута (0,91 м), глубина 3 фута (0,91 м)	0,7		1,0		1,0
Прибор Симмонса, площадь 6 кв. футов ($0,56 m^2$), глубина 2 фута (0,61 м)	0,6				
Прибор Аслинга, площадь $0,33 m^2$, глубина 1 м (Дания)	0,3			1,0	
GGI 3000 диаметр 0,618 м, глубина 60-80 см (бывш. СССР)	0,3				
Утепленный прибор, диаметр 50 см, глубина 25 см (Нидерланды)	0,2	1,0	0,95	1,0	0,95

ПРИМЕР 21
Определение ET_o по испарению из прибора с использованием таблиц

Дано испарение для первой недели июля для прибора класса А, установленного на зеленой площади, окруженной короткими поливными культурами: 8,2; 7,5; 7,6; 6,8; 7,6; 8,9 и 8,5 мм/сут. Средняя скорость ветра за этот период равнялась 1,9 м/с, среднесуточная относительная влажность - 73 %. Определить среднюю за 7 суток эталонную эвапотранспирацию.

Прибор установлен на зеленой поверхности: случай А

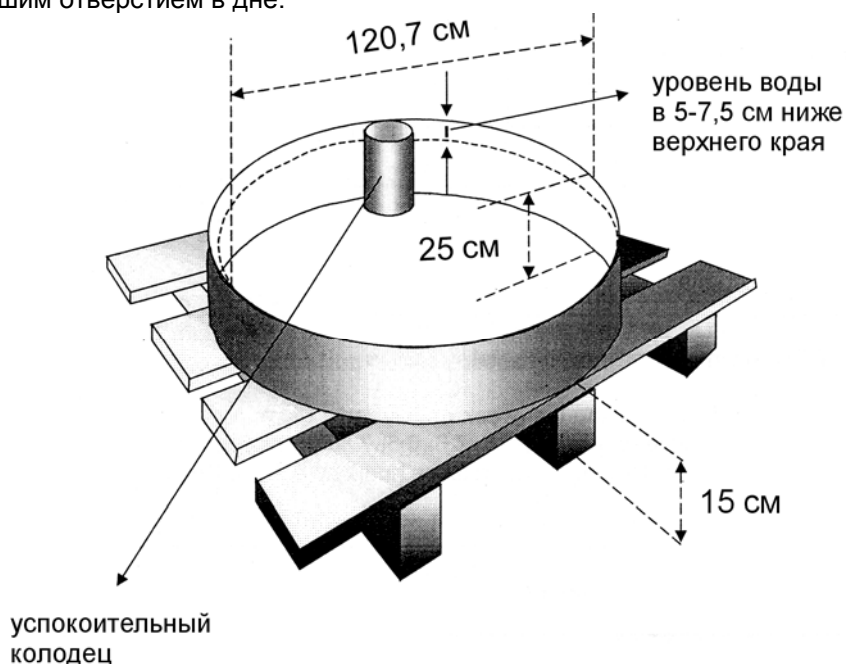
Прибор окружен поливными культурами:	$fetch_{max} =$	1000	м
Скорость ветра - небольшая:	$u <$	2	м/с
Относительная влажность - высокая:	$RH_{mean} >$	70	%
Из табл. 5 (для вышеуказанных условий):	$K_p =$	0,85	-
-	$E_{пан} = (8,2+7,5+7,6+6,8+7,6+8,9+8,5)/7 =$	7,9	мм/сут
Из ур-я 55:	$ET_o = 0,85 (7,9) =$	6,7	мм/сут
Средняя за 7 дней эталонная эвапотранспирация равна 6,7 мм/сут.			

БОКС 12**Описание прибора класса А**

Эвапориметр класса А круглый, диаметр 120,7 см, глубина 25 см. изготовлен из гальванического железа (сорт 22) или металла Монеля (0,8 мм). Прибор установлен на деревянной открытой платформе в 15 см от поверхности Земли. Он наполнен водой до уровня 5 см ниже верхнего края емкости. Уровень воды не должен опускаться ниже 7,5 см от края. Вода должна добавляться регулярно, минимум раз в неделю, чтобы исключить излишнюю мутность. Гальванический прибор окрашивается ежегодно алюминиевой краской. Экран над прибором не является стандартным требованием и обычно не должен использоваться. Прибор следует загораживать оградой от животных.

Поверхность желательно должна быть покрыта травой 20х20 м, открытой со всех сторон для свободной циркуляции воздуха. Желательно устанавливать прибор в центре площадки или с наветренной стороны от большой засаженной культурами площади.

Показания прибора снимаются ежедневно рано утром одновременно с измерением осадков. Замеры производятся в успокоительном колодеце. Расположенном на краю емкости. Успокоительный колодец представляет собой металлический цилиндр диаметром 10 см и глубиной 20 см с небольшим отверстием в дне.

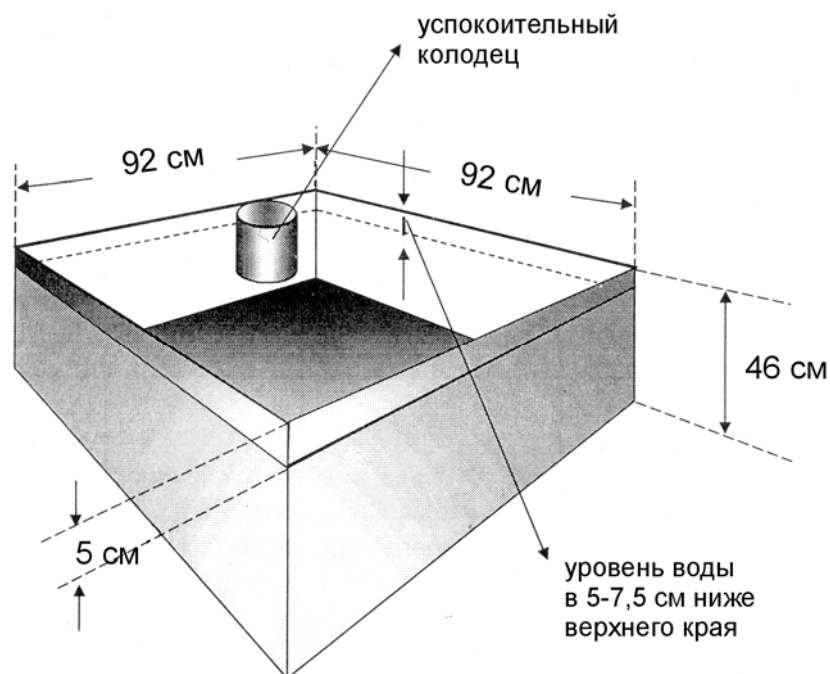


БОКС 13**Описание утепленного прибора Колорадо**

Прибор представляет собой квадратный бак со стороной 92 см (3 фута), глубиной 46 см (18 дюймов), изготовленный из железа толщиной 3 мм, закопанный в землю. Верхняя кромка установленного прибора находится в 5 см от поверхности Земли. Используются также размеры 1 м² и 0,5 м (глубина). Бак выкрашен черной краской. Уровень воды поддерживается чуть-чуть ниже уровня Земли и 5-7,5 см ниже верхнего края бака.

Замеры производятся аналогично приборам класса А. Требования к установке и окружающей среде также аналогичны.

Приборы Колорадо предпочтительны при изучении требований растений на воду, т. к. они дают лучшее прямое определение эталонной эвапотранспирации, чем приборы класса А. Недостатком является более сложное содержание и невидимые утечки.



ПРИМЕР 22

Определение ET_o из эвапориметров с использованием уравнений

Даны средние значения испарения за 7 дней из примера 21. определить ET _o для двух типов эвапориметров и двух типов буферной зоны, представленных уравнениями в табл. 7. Допустим, что буферная зона равна 1000 м в обоих случаях (зеленая и сухая).				
	fetch = u ₂ = RH _{mean} =		1000 1,9 73	м м/с %
Класс А с зеленой буферной зоной	$K_p = 0,108 - 0,0286 u_2 + 0,0422 \ln(FET) + 0,1434 \ln(RH_{mean}) - 0,000631 [\ln(FET)]^2 \ln(RH_{mean})$ $E_{pan} =$ $ET_o =$	$K_p = 0,108 - 0,0286 1,9 + 0,0422 \ln(1000) + 0,1434 \ln(73) - 0,000631 [\ln(1000)]^2 \ln(73)$ $ET_o = 0,83 (7,9)$	0,83 7,9 6,6	- мм/сут мм/сут
Класс А с сухой буферной зоной	$K_p = 0,61 + 0,00341 RH_{mean} - 0,000162 u_2 RH_{mean} - 0,00000959 u_2 FET + 0,00327 u_2 \ln(FET) - 0,00289 u_2 \ln(86,4 u_2) - 0,0106 \ln(86,4 u_2) \ln(FET) + 0,00063 [\ln(FET)]^2 \ln(86,4 u_2)$ $E_{pan} =$ $ET_o =$	$K_p = 0,61 + 0,00341 (73) - 0,000162 (1,9) (73) - 0,0000959 (1,9) (1000) + 0,00327 (1,9) \ln(1000) - 0,00289 (1,9) \ln(86,4 (1,9)) - 0,0106 \ln(86,4 (1,9)) \ln(1000) + 0,00063 [\ln(1000)]^2 \ln(86,4 (1,9))$ $ET_o = 0,61 (7,9)$	0,61 7,9 4,8	- мм/сут мм/сут
Колорадо с зеленой буферной зоной	$K_p = 0,87 + 0,119 \ln(FET) - 0,0157[\ln(86,4u_2)]^2 - 0,0019 [\ln(FET)]^2 \ln(86,4 u_2) + 0,013 \ln(86,4u_2) \ln(RH_{mean}) - 0,000053 \ln(86,4u_2) \ln(FET)RH_{mean}$ $E_{pan} =$ $ET_o =$	$K_p = 0,87 + 0,119 \ln(1000) - 0,0157[\ln(86,4(1,9))]^2 - 0,0019 [\ln(1000)]^2 \ln(86,4 (1,9)) + 0,013 \ln(86,4(1,9)) \ln(73) - 0,000053 \ln(86,4(1,9)) \ln(1000) (73)$ $ET_o = 0,97 (7,9)$	0,97 7,9 7,7	- мм/сут мм/сут
Колорадо с сухой буферной зоной	$K_p = 1,145 - 0,080 u_2 + 0,000903 (u_2)^2 \ln(RH_{mean}) - 0,0964 \ln(FET) + 0,0031 u_2 \ln(FET) + 0,0015 [\ln(FET)]^2 \ln(RH_{mean})$ $E_{pan} =$ $ET_o =$	$K_p = 1,145 - 0,080 (1,9) + 0,000903 (1,9)^2 \ln(73) - 0,0964 \ln(1000) + 0,0031 (1,9) \ln(1000) + 0,0015 [\ln(1000)]^2 \ln(73)$ $ET_o = 0,69 (7,9)$	0,69 7,9 5,4	- мм/сут мм/сут
Средняя за 7 дней эталонная эвапотранспирация для 4 сочетаний типов приборов и буферных зон равна 6,6; 4,8; 7,7 и 5,4 мм/сут.				

Часть В

Эвапотранспирация растений в стандартных условиях

В этой части рассматривается эвапотранспирация здоровых, хорошо удобренных культур, растущих на полях большого размера при оптимальной влажности почвы и дающих максимальный урожай для данных климатических условий.

Влияние различных климатических условий на эвапотранспирацию объединяется в ET_0 (часть А). Влияние характеристик, определяющих различие между рассматриваемой площадью и эталонной поверхностью, объединяются в коэффициенте культуры. Перемножая ET_0 на коэффициент культуры, получаем ET_c .

Типовые коэффициенты культуры, процедуры адаптации коэффициента культуры и расчета ET_c представлены в этой части книги. Описаны два подхода к расчетам: подход одиночного коэффициента и подход двойного коэффициента культуры. В первом случае разница в эвапотранспирации между посеянной и эталонной травой объединяется в один коэффициент. Во втором случае коэффициент культуры разбивается на два фактора, описывающих отдельно различие в испарении и транспирации между культурой и эталонной поверхностью.

Как обсуждается в главе 5 и суммировано в табл. 10, метод одиночного коэффициента культуры используется в основном при планировании орошения, проектировании и управлении. Метод двойного коэффициента культуры используется в расчетах, когда требуется детальное определение испарения почвенной влаги, например, при детальном планировании орошения в реальном времени, моделировании качества воды и исследованиях.

Глава 5

Введение в эвапотранспирацию культур (ET_c)

В этой главе описывается метод коэффициента культуры для расчета эвапотранспирации в стандартных условиях (ET_c). Стандартные условия относят к культурам, растущим на полях большого размера в отличных агрономических и почвенных условиях. Эвапотранспирация растений существенно отличается от эталонной эвапотранспирации (ET_o), поскольку растения отличаются от травы по степени покрытия поверхности, кронам растений и аэродинамическому сопротивлению. Влияние характеристик, отличающих сельхозкультуры от травы, объединяются в коэффициенте культуры (K_c). В методе коэффициента культуры эвапотранспирация культуры рассчитывается перемножением ET_o на K_c .

Различия в испарении и транспирации между полевыми культурами и эталонным травяным покровом могут быть объединены в единичном коэффициенте культуры (K_c) или разделены на два коэффициента: основной коэффициент культуры (K_{c_b}) и коэффициент испарения почвы (K_e), т. е. $K_c = K_{c_b} + K_e$. Метод должен быть выбран в зависимости от цели расчета, требуемой точности и наличия данных.

ПРОЦЕДУРЫ РАСЧЕТА**Прямой расчет**

Эвапотранспирация с сельхозкультур может быть измерена напрямую методом массопереноса или энергетического баланса. Она может быть также получена изучением баланса почвенной влаги, определенного на полях сельхозкультур или в лизиметрах.

Эвапотранспирация культур может быть также выведена из метеорологических данных и данных о сельхозкультуре с помощью уравнения Пенмана-Монтейта (ур-е 3). Адаптируя альбедо, аэродинамику и сопротивление кроны растений к характеристикам роста конкретной культуры, можно напрямую определить эвапотранспирацию. Альбедо и сопротивление, тем не менее, трудно определить точно, т. к. они могут постоянно изменяться в течение вегетационного периода с изменением климатических условий, по мере развития растения и в зависимости от влажности почвы. На сопротивление кроны в дальнейшем воздействует влагоемкость почвы, и она резко возрастает, если растение подвергается водному стрессу.

Поскольку существует значительный дефицит консолидированной информации по аэродинамике и сопротивлению кроны для различных поверхностей, занятых сельхозкультурами, уравнение Пенмана-Монтейта используется в этой книге лишь для определения ET_o - эвапотранспирации с хорошо увлажненной гипотетической травяной поверхности с фиксированной высотой растений, альбедо и сопротивлением поверхности.

Метод коэффициента культуры

В данном методе эвапотранспирация культуры ET_c рассчитывается по произведению эталонной эвапотранспирации культуры на коэффициент культуры K_c :

$$ET_c = K_c ET_o \quad (56)$$

где

ET_c - эвапотранспирация культуры [мм/сут];

K_c - коэффициент культуры [-];

ET_o - эталонная эвапотранспирация [мм/сут].

Основное влияние различных погодных условий концентрируется в оценке ET_o . Следовательно, поскольку ET_o представляет показатель воздействия климата, K_c изменяется преимущественно в зависимости от конкретных характеристик культуры и лишь в определенной степени - от климата. Это позволяет производить перенос стандартных значений K_c между регионами с различным климатом. Эта одна из основных причин для глобального принятия метода коэффициента культуры и факторов K_c , разработанных в более ранних исследованиях.

Эталонная ET_o определяется и рассчитывается с помощью уравнения Пенмана-Монтейта (глава 4). Коэффициент культуры K_c является отношением ET_c к эталонной ET_o и представляет собой объединенное влияние четырех различных характеристик, которые отличают культуру от эталонной травы. Эти характеристики следующие:

- Высота растения. Высота растения воздействует на аэродинамическое сопротивление r_a уравнения Пенмана-Монтейта и турбулентный перенос пара от растения в атмосферу. Величина r_a в полной форме уравнения Пенмана-Монтейта присутствует дважды.
- Альbedo (отражающая способность) поверхности "растение-почва". На альbedo влияют часть поверхности, покрытая растительностью и влажность почвы. Альbedo поверхности, в свою очередь, влияет на чистую радиацию поверхности R_n , которая является главным источником обмена энергией для процесса испарения.
- Сопротивление кроны. Сопротивление растений удалению пара зависит от площади листового покрова (количество устьиц), возраста листьев и их условий, и степени контроля устьиц. Сопротивление кроны влияет на сопротивление поверхности r_s .
- Испарение с почвы, особенно обнаженной.

Влажность поверхности почвы и часть поверхности, покрытая растительностью, влияют на сопротивление поверхности r_s . После увлажнения почвы скорость отвода от нее пара высока, особенно для растений, не полностью покрывающих почву. Суммарное сопротивление почвы и кроны растений определяет (суммарное) сопротивление поверхности r_s . Сопротивление поверхности в уравнении Пенмана-Монтейта представляет сопротивление отводу пара с листьев растений и с почвы.

K_c в уравнении 56 предсказывает ET_c в стандартных условиях, которые предполагают отсутствие ограничений на рост растений или эвапотранспирацию ввиду дефицита воды, густоты (плотности) растений или болезней, сорняков, насекомых и солевого давления. ET_c , скорректированное K_c , адаптируется, если необходимо, к нестандартным условиям - $ET_{c\ adj}$, где любые условия среды и характеристики имеют влияние на ET_c или ограничивают ее значение. Корректирующие факторы для преобразования ET_c в $ET_{c\ adj}$ описаны в части С.

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ КОЭФФИЦИЕНТ КУЛЬТУРЫ

Коэффициент культуры объединяет влияние характеристик, которые отличают типичную полевую культуру от эталонной травы, которая имеет постоянный вид и полностью покрывает почву. Следовательно, различные культуры имеют разные коэффициенты K_c . Изменяющиеся в течение вегетационного периода характеристики культуры также оказывают влияние на коэффициент K_c . И, наконец, испарение является интегральной частью эвапотранспирации растений. Условия, влияющие на испарение, также влияют на K_c .

Тип культуры

Ввиду различия в альбедо, высоте культуры, аэродинамическим свойствам, свойствам листьев и устьиц, эвапотранспирация с полностью развитой, хорошо увлажненной культуры отличается от ET_0 .

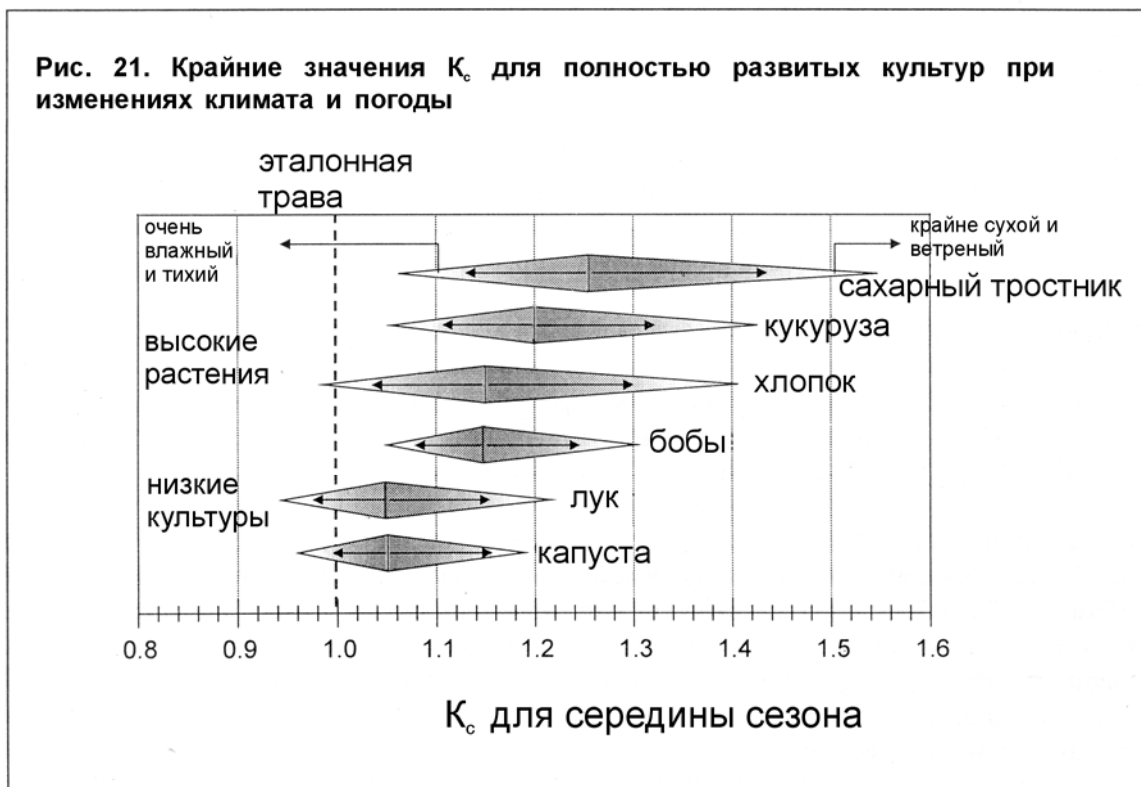
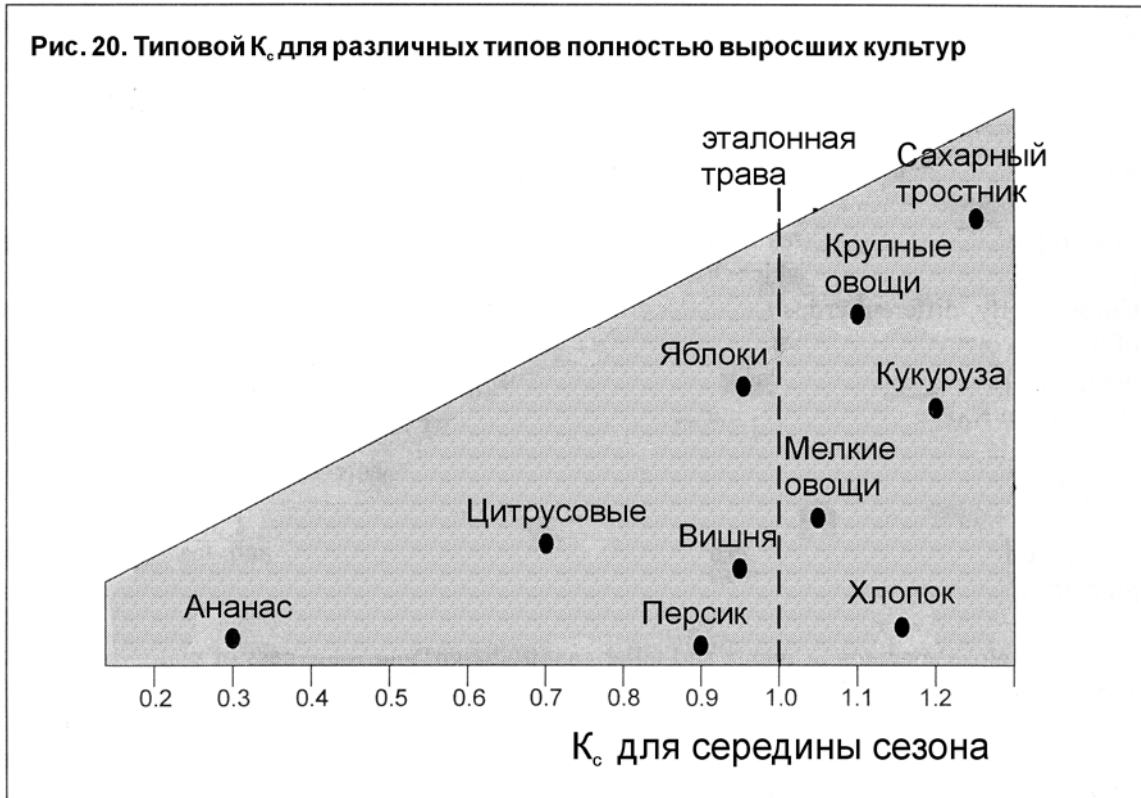
Близкое расстояние между растениями и большая их высота и неравномерность определяют величину K_c больше 1. Часто значение K_c на 5-10 % выше по сравнению с эталонным (где $K_c = 1,0$) и даже на 15-25 % больше для таких высоких растений, как кукуруза, сорго и сахарный тростник (рис. 20). Типовые значения коэффициента культуры для полностью развитых растений ($K_{c\text{mid}}$) даны в табл. 12.

Такие культуры, как ананас, которые закрывают свои устьица в дневное время, имеют очень низкие значения коэффициента культуры. Большинство разновидностей, тем не менее, раскрывает устьица с ростом освещенности. Кроме реакции устьиц на изменение среды, их количество и положение, а также сопротивление поверхности листа удалению пара определяют потери воды растением. Разновидности с устьицами лишь на нижней стороне листа и высоким сопротивлением поверхности листа имеют сравнительно низкий K_c . Это типично для цитрусовых и других фруктовых деревьев, в основном, с опадающими листьями. Для контроля транспирации расстояния между деревьями закладывают с таким расчетом, чтобы для взрослых деревьев поверхность земли покрывалась на 70 %, K_c может быть меньше 1, если под деревьями не посеяны травы (рис. 20).

Климат

Значения K_c из табл. 12 являются типичными величинами, ожидаемыми для среднего K_c в стандартных климатических условиях, которые определяются как суб-гумидный климат со среднесуточной минимальной относительной влажностью (RH_{min}) ≈ 45 % и умеренной скоростью ветра в среднем 2 м/с.

Изменения ветра меняют аэродинамическое сопротивление культур и, следовательно, их коэффициенты, особенно для культур, которые устойчиво выше гипотетической эталонной травы. Влияние различий аэродинамических свойств между эталонным травяным покровом и сельхозкультурами является не только специфическим для культур. Оно изменяется также в зависимости от климатических условий и высоты растений. Поскольку аэродинамические свойства для многих культур в сравнении с эталонной травой больше, соотношение ET/ET_0 (т. е. K_c) для многих культур возрастает с увеличением скорости ветра и уменьшением относительной влажности. Более аридный климат и большая скорость ветра вызывают более высокие значения K_c . Более влажный климат и меньшая скорость ветра дают меньшие значения K_c .



Относительное влияние климата на K_c для взрослых растений показано на рис. 21. Верхние границы представляют крайне аридные и ветренные условия, тогда как нижние границы характерны для влажных и спокойных условий. Ожидаемые изменения K_c с изменением климата и погодных условий небольшие для низких культур, но большие - для высоких. Руководство по адаптации K_c к климатическим условиям как функции от высоты растений дано в главе 6.

В гумидных и спокойных условиях K_c становится менее зависимым от разницы между аэродинамическими компонентами ET_c и ET_o и значения K_c для сельхозкультур "полного покрытия" не превышают 1,0 более, чем на 0,05. Это объясняется тем, что культуры "полного покрытия" и эталонная трава обеспечивают почти максимальное поглощение коротковолновой радиации, которая является основным источником энергии для испарения во влажных и безветренных условиях. Обычно альбедо α одинаково для многих культур "полного покрытия", включая эталонную культуру. Поскольку дефицит давления пара ($e_s - e_a$) во влажных условиях невелик, разница в ET , вызванная различиями в аэродинамическом сопротивлении r_a между сельхозкультурами и эталонной культурой также невелика, особенно при скорости ветра от низкой до умеренной.

В аридных условиях влияние разницы r_a между сельхозкультурой и эталонной травой по ET_c становится более заметным, т. к. ($e_s - e_a$) может быть сравнительно большим. Большие значения ($e_s - e_a$) усиливают разницу в аэродинамическом смысле в числителе уравнения Пенмана-Монтейта как для культуры, так и для эталонной культуры. Следовательно, K_c будет выше в аридных условиях, когда сельхозкультура имеет большую площадь листьев и неравномерность в высоте растений, которые превышают таковые для эталонной культуры.

Так как выражение $1/r_a$ в числителе уравнения Пенмана-Монтейта умножается на дефицит давления пара ($e_s - e_a$), ET высоких растений будет больше ET_o , чем ET низких растений, когда относительная влажность низкая. K_c для высоких культур, высотой 2-3 м, может быть на 30 % больше в ветренном аридном климате, по сравнению со спокойным влажным климатом. Рост K_c вызывается влиянием большей аэродинамической неравномерности высоких культур по отношению к траве при транспортировке водяного пара с поверхности.

Испарение с почвы

Различия в испарении с почвы и транспирации растений между полевыми культурами и эталонной поверхностью, учитываются в коэффициенте культуры. K_c для культур "полного покрытия" прежде всего отражает различия в транспирации, т. к. вклад в испарение с почвы является относительно малым. После дождя или полива, когда культура мала и плохо покрывает поверхность почвы, преобладающим является эффект испарения. Для этих условий K_c определяется, в основном, частотой увлажнения почвы. Если почва постоянно увлажнена за счет дождя и поливов, испарение с поверхности почвы будет значительным и K_c может превышать 1. С другой стороны, там, где поверхность почвы сухая, испарение ограничено, K_c будет малым и может даже упасть до величины 0,1 (рис. 22).

Различия в испарении с почвы между полевой культурой и эталонной поверхностью могут быть предсказаны более точно с использованием двойного коэффициента культуры.

Рис. 22. Влияние испарения на K_c . Горизонтальная линия представляет K_c при постоянно увлажненной поверхности. Кривая соответствует K_c , когда поверхность сухая, но культура получает достаточно воды для поддержания полной транспирации

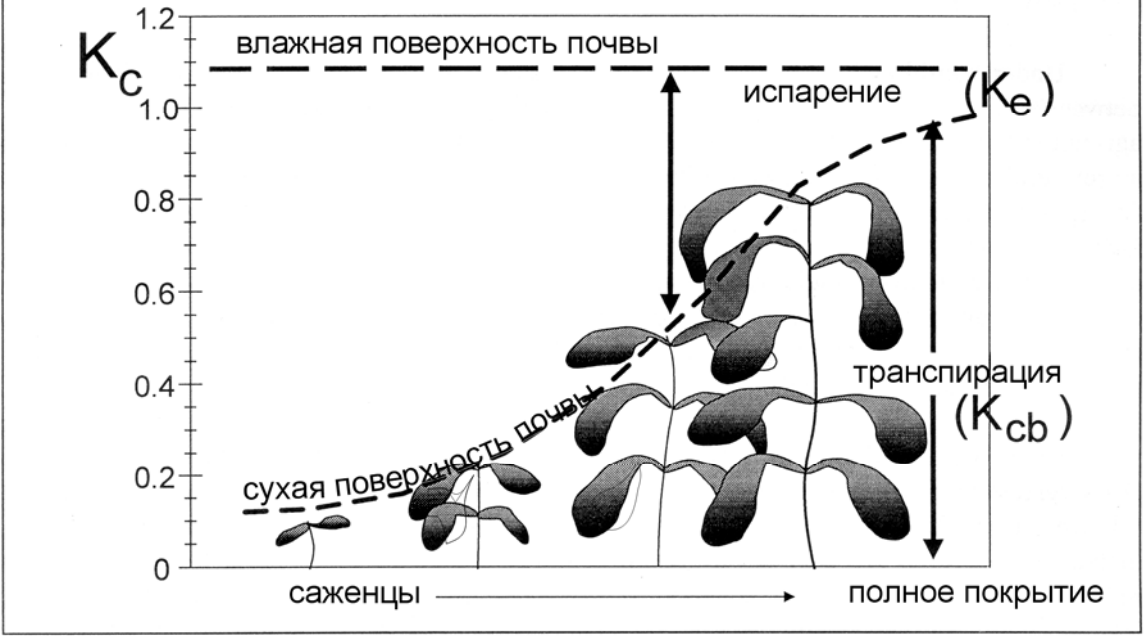
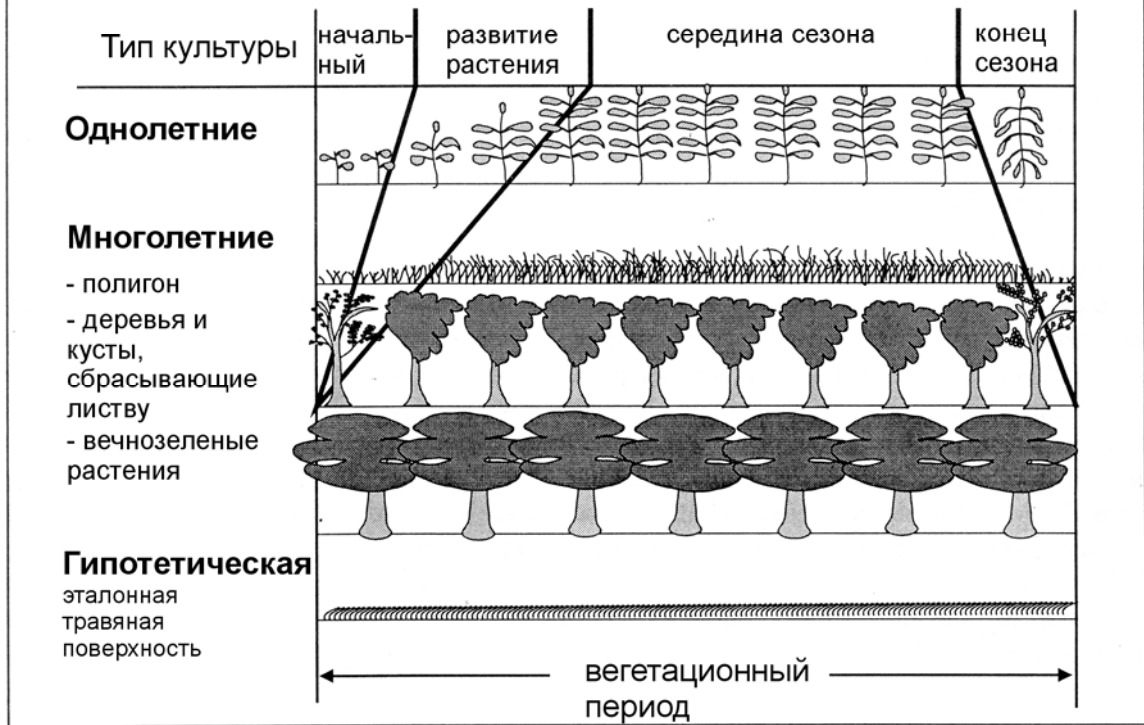


Рис. 23. Стадии роста растения для различных типов культур



Стадии роста культуры

По мере развития растения изменяются: покрытие поверхности, высота растений и площадь листьев. Ввиду различий в эвапотранспирации в течение различных стадий роста K_c для данной культуры будет изменяться в течение вегетационного периода. Вегетационный период может быть поделен на четыре стадии роста: начальную, развитие растения, середину сезона и конец сезона. Рис. 23 иллюстрирует общую последовательность и пропорции этих стадий для различных видов культур.

Начальная стадия

Начальная стадия длится с даты посадки до 10 % покрытия поверхности почвы. Длительность начального периода зависит от культуры, ее разновидности, даты посадки и климата. Окончание начального периода определяется временем 10 % покрытия земной поверхности растительностью. Для многолетних культур дата посадки заменяется датой "озеленения", т. е. временем появления новых листьев.

В течение начального периода площадь листьев мала и эвапотранспирация происходит, в основном, в виде испарения с поверхности почвы. Следовательно, K_c в течение начального периода ($K_{c\ ini}$) большой, когда почва влажная после орошения или дождя, и малый, когда поверхность сухая. Время высыхания почвы определяется интервалом между увлажнениями, испарительной силой атмосферы (ET_o) и степенью увлажнения. Общее определение $K_{c\ ini}$, как функции от частоты увлажнения и ET_o , дано в табл. 9. Данные предполагают средние почвы. Процедура определения $K_{c\ ini}$ представлена в главе 6.

ТАБЛИЦА 9

Приблизительные значения $K_{c\ ini}$ для случаев средней степени увлажнения

Интервал увлажнения	Испаряющая сила атмосферы (ET_o)			
	низкая 1 - 3 мм/сут	умеренная 3 - 5 мм/сут	высокая 5 - 7 мм/сут	очень вы- сокая > 7 мм/сут
менее, чем через неделю	1,2-0,8	1,1-0,6	1,0-0,4	0,9-0,3
еженедельно	0,8	0,6	0,4	0,3
более, чем через неделю	0,7-0,4	0,4-0,2*	0,3-0,2*	0,2*-0,1*

Цифры взяты из рис. 29 и 30.

* Интервалы увлажнения могут быть слишком большие для поддержания полной транспирации для молодых однолетних культур

Стадия развития растения

Стадия развития растения длится, начиная с 10 % до полного покрытия растениями поверхностей. Эффективное полное покрытие для многих культур совпадает с началом цветения. Для культур, растущих рядами, таких, как бобы, сахарная свекла, картофель и кукуруза, эффективное покрытие может определяться как время, когда листья с соседних рядов начинают перекрывать друг друга, так что поверхность оказывается почти полностью затененной, или когда растения достигают почти полного размера, если перекрытия листьев не происходит. Для некоторых культур, особенно выше 0,5 м, средняя доля поверхности, покрытой растительностью (f_c) к началу эффективного полного покрытия равна 0,7-0,8. Доля освещенной и затененной почвы и листьев существенно не меняются с ростом растения ($f_c \approx 0,7-0,8$). Понятно, что культура или растение может продолжать расти как в высоту, так и по площади листьев после времени полного покрытия. Поскольку трудно определить визуально, когда густо посеянная растительность, такая, как озимые и яровые зерновые и некоторые травы, достигает полного эффектив-

ного покрытия, для этих типов культур обычно используется начало цветения.

Для густой травы эффективное полное покрытие может наступить при высоте 0,10-0,15 м. Для небольших полигонов высота травы может достичь 0,3-0,5 м до наступления полного покрытия. Густо посаженные кормовые, такие, как люцерна и клевер, достигают полного покрытия при высоте 0,3-0,4 м.

Еще один способ определения полного эффективного покрытия - по достижению индексом площади листьев (LAI) значения 3. LAI определяется как отношение средней общей площади листьев (одна сторона) к единице площади поверхности почвы.

По мере того, как растение развивается и все больше затеняет почву, испарение все больше ограничивается и транспирация становится основным процессом. В стадии развития растения значение K_c соответствует покрытию поверхности и развитию растения. Обычно если поверхность почвы сухая, $K_c = 0,5$ соответствует 25-40 % покрытию поверхности растительностью благодаря эффекту затененности и микропереносу физического тепла из почвы в растительность. $K_c = 0,7$ часто соответствует 40-60 % покрытию. Эти значения варьируют, в зависимости от культуры, частоты увлажнения и от того, потребляет ли растение больше воды, чем эталонная культура при полном покрытии (т. е. в зависимости от архитектуры кроны и высоты растений по отношению к подстриженной траве).

Стадия середины сезона

Стадия середины сезона начинается с момента полного эффективного покрытия до момента начала созревания. Начало созревания обычно характеризуется началом старения, пожелтения и опадания листьев или пожелтения фруктов до степени, когда эвапотранспирация снижается относительно ET_0 . Стадия середины сезона является самой продолжительной для многолетних культур и многих однолетних, но может быть относительно короткой для овощей, которые снимаются свежими.

В стадии середины сезона K_c достигает максимальной величины. Значение K_c ($K_{c\ mid}$) является относительно постоянным для большинства условий произрастания культур. Отклонения $K_{c\ mid}$ от эталонной величины "1", в первую очередь, благодаря разнице в высоте растений и сопротивлении между эталонным травяным покровом и сельхозкультурой и погодным условиям.

Стадия окончания сезона

Стадия конца сезона длится с начала созревания до уборки урожая или полного опадания листьев. Расчет K_c и ET_c приурочен к сбору урожая, естественному высыханию или опаданию листьев.

Для некоторых многолетних растений в регионах с безморозным климатом культуры могут расти круглый год, так что дата завершения сезона может быть совмещена с датой посадки растений.



K_c к концу завершения сезона ($K_{c\text{ end}}$) отражает практику управления культурами и водой. $K_{c\text{ end}}$ имеет большую величину, если культура часто увлажняется до уборки в свежем виде. Если культуре позволяют высохнуть в поле до уборки, $K_{c\text{ end}}$ будет небольшим.

Рис. 24 иллюстрирует изменения K_c для различных культур, под влиянием погодных факторов и развития растений.

ЭВАПОТРАНСПИРАЦИЯ КУЛЬТУРЫ (ET_c)

Эвапотранспирация культуры рассчитывается умножением ET_0 на K_c - коэффициент, выражающий разницу в эвапотранспирации между сельхозугодьями и эталонной травяной поверхностью. Разница может быть объединена в едином коэффициенте или может быть разбита на два фактора, описывающих отдельно разницу в испарении и транспирации между двумя поверхностями. Выбор подхода зависит от целей расчета, требуемой точности, наличия климатических данных и временных интервалов расчета. Общие критерии выбора приведены в табл. 10.

ТАБЛИЦА 10
Общие критерии выбора методов расчета единого и двойного коэффициентов культуры

	Единый коэффициент культуры K_c	Двойной коэффициент культуры $K_{cb} + K_e$
Цель расчета	<ul style="list-style-type: none"> - планирование и проектирование орошения - управление орошением - базовые графики орошения - планирование орошения в реальном времени для редких поливов (поверхностное орошение и дождевание) 	<ul style="list-style-type: none"> - исследования - планирование орошения в реальном времени - планирование орошения для частых поливов (микроорошение и автоматизированное дождевание) - дополнительное орошение - детальные исследования почвенного и гидрологического водного баланса
Временной интервал	ежедневно, подекадно, ежемесячно (данные и расчет)	ежедневно (данные и расчет)
Метод решения	графический карманный калькулятор компьютер	компьютер

Метод единого и двойного коэффициента культуры

Метод единого коэффициента культуры (K_c)

В данном методе влияние транспирации культуры и испарения почвы объединены в едином коэффициенте K_c . Коэффициент соединяет в себе разницу между испарением с почвы и транспирацией растениями для культуры и эталонного травяного покрова. Поскольку испарение с почвы может колебаться ежедневно в результате выпадения дождя или орошения, единый коэффициент выражает лишь осредненное во времени (многодневное) влияние эвапотранспирации.

Поскольку единый коэффициент осредняет испарение с почвы и транспирацию, метод используется для расчета ET_c еженедельно или для более длительных периодов, хотя расчеты могут быть продолжены и на ежедневной основе. Единый коэффициент K_c , осредненный во времени, используется для исследований по планированию орошения и проектирования ирригационных систем, где осредненные эффекты увлажнения почвы приемлемы и соответствуют требованиям. Это характерно для поверхностного орошения и дождевания, где интервал между поливами составляет несколько дней или больше. Для управления типовым орошением достаточен единый осредненный во времени K_c .

Метод двойного коэффициента культуры ($K_{cb} + K_e$)

В методе двойного коэффициента эффект транспирации растениями и испарения с почвы определяется раздельно. Используются два коэффициента: базовый коэффициент культуры (K_{cb}) для описания транспирации растениями и коэффициент испарения с почвы (K_e) для описания испарения с почвы. Единый коэффициент K_c заменяется на:

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (57)$$

где

K_{cb} - базовый коэффициент культуры;

K_e - коэффициент испарения с почвы.

Базовый коэффициент культуры K_{cb} определяется как отношение ET_c к ET_o , когда поверхностный слой почвы сухой, но средняя влажность почвы в корневой зоне соответствует потребности полной транспирации растений. K_{cb} представляет базовый потенциальный K_c в отсутствие дополнительных эффектов увлажнения почвы поливами или осадками. Коэффициент испарения с почвы K_e , описывает компонент испарения с поверхности почвы. Если почва влажная после орошения или осадков, K_e может быть большим. Тем не менее, сумма K_{cb} и K_e никогда не может превысить величину $K_{c\ max}$, определенную по наличию энергии для эвапотранспирации с поверхности почвы. По мере высыхания поверхности почвы, K_e уменьшается и падает до нуля, когда для испарения не остается воды. Определение K_e требует расчета ежедневного водного баланса для определения почвенной влаги, оставшейся в верхнем слое почвы.

Метод двойного коэффициента культуры требует большего объема расчетов, чем метод единого осредненного во времени коэффициента K_c . Метод двойного коэффициента является наилучшим при планировании орошения в реальном времени, расчете водного баланса почвы и исследованиях, когда важными являются влияние ежедневных изменений влажности поверхности почвы и результирующее влияние на ежедневную ET_o водного профиля почвы, а также глубинная фильтрация. Это случай высокочастотного орошения в системах микроорошения или системах горизонтального движения, таких, как дождеватели центрального или линейного типа.

Кривая коэффициента культуры

После выбора метода расчета могут быть определены продолжительность стадий роста растений и соответствующие коэффициенты культуры, а также их кривые. Кривая представляет изменение коэффициента культуры в течение вегетационного периода. Форма кривой представляет изменения в растительности и покрове поверхности почвы в процессе развития и созревания растений, которое влияет на отношение ET_c к ET_o . Из кривой могут быть определены K_c и ET_c для любого периода в разрезе сезона вегетации.

Единый коэффициент культуры

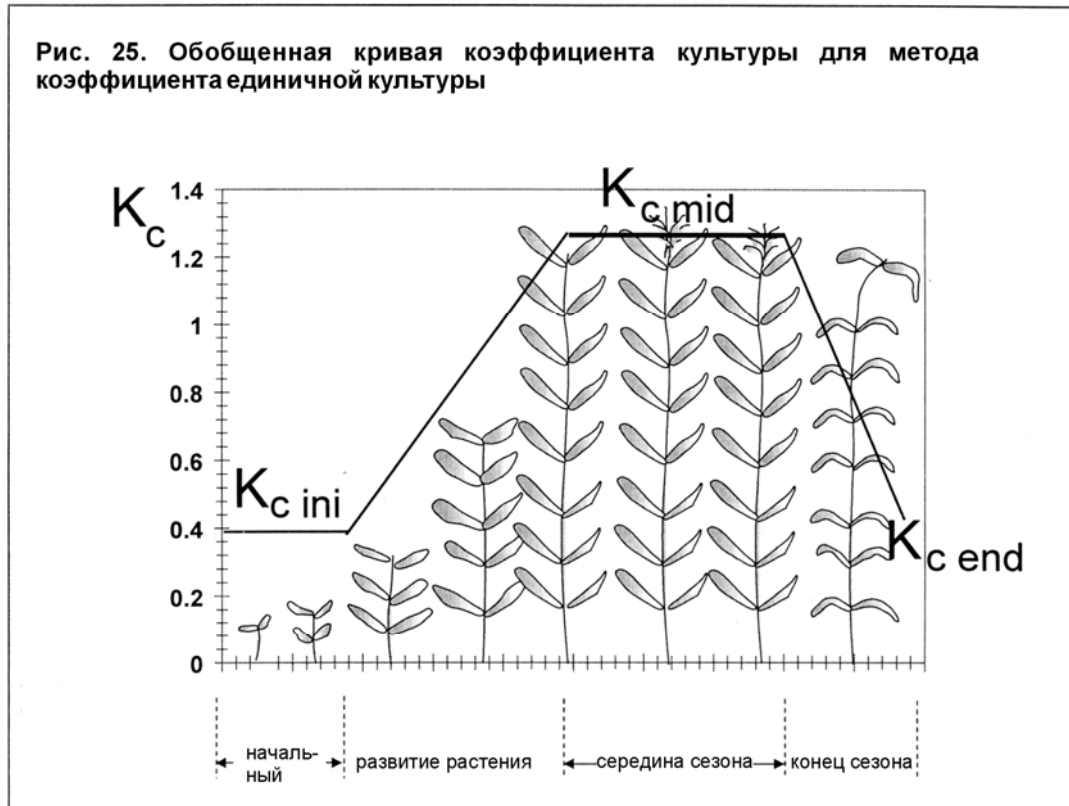
Обобщенная кривая коэффициента культуры показана на рис. 25. Сразу после посадки однолетних или появления листьев многолетних растений K_c имеет малые значения, часто менее 0,4. K_c начинает увеличиваться от начального значения $K_{c\ ini}$ с момента начала быстрого развития растения и достигает максимальной величины $K_{c\ mid}$ к моменту максимального или близкого к максимальному развития растения. В течение сезона, по мере того, как листья начинают стареть ввиду естественных причин или причин, вызванных сельскохозяйственной практикой, K_c начинает снижаться, пока не достигнет более низкой величины к концу вегетационного периода, равной $K_{c\ end}$.

Двойной коэффициент культуры

Кривая единого осредненного во времени коэффициента K_c на рис. 25 соединяет осредненный эффект увлажнения в рамках фактора K_c . Значение $K_{c\ mid}$ является относительно постоянным для большинства условий растениеводства. Тем не менее, значения $K_{c\ ini}$ и $K_{c\ end}$ могут значительно колебаться в течение суток, в зависимости от частоты увлажнения орошением или осадками. Методом двойного коэффициента K_c рассчитывается фактическое увеличение K_c для каждого дня, как функция развития растений и влажности поверхности почвы.

Поскольку единый K_c включает осредненное влияние испарения с почвы, базовый коэффициент культуры K_{cb} , описывающий только транспирацию растений, имеет значение ниже K_c (рис. 26). Наибольшая разница между K_c и K_{cb} приходится на начальную стадию роста растений, когда эвапотранспирация в форме испарения с почвы и транспирации растениями еще мала. Поскольку в середине сезона кроны растений полностью или почти полностью покрывают поверхность почвы, испарение с почвы в таких условиях оказывает меньшее влияние на эва-

потранспирацию растений и величина K_{cb} в середине сезона будет близка к значению K_c . В зависимости от покрова базовый коэффициент культуры в середине сезона может быть лишь на 0,05-0,1 меньше K_c . В зависимости от частоты орошения в течение конечного периода вегетационного сезона K_{cb} будет равен (при частом орошении) или меньше K_c .

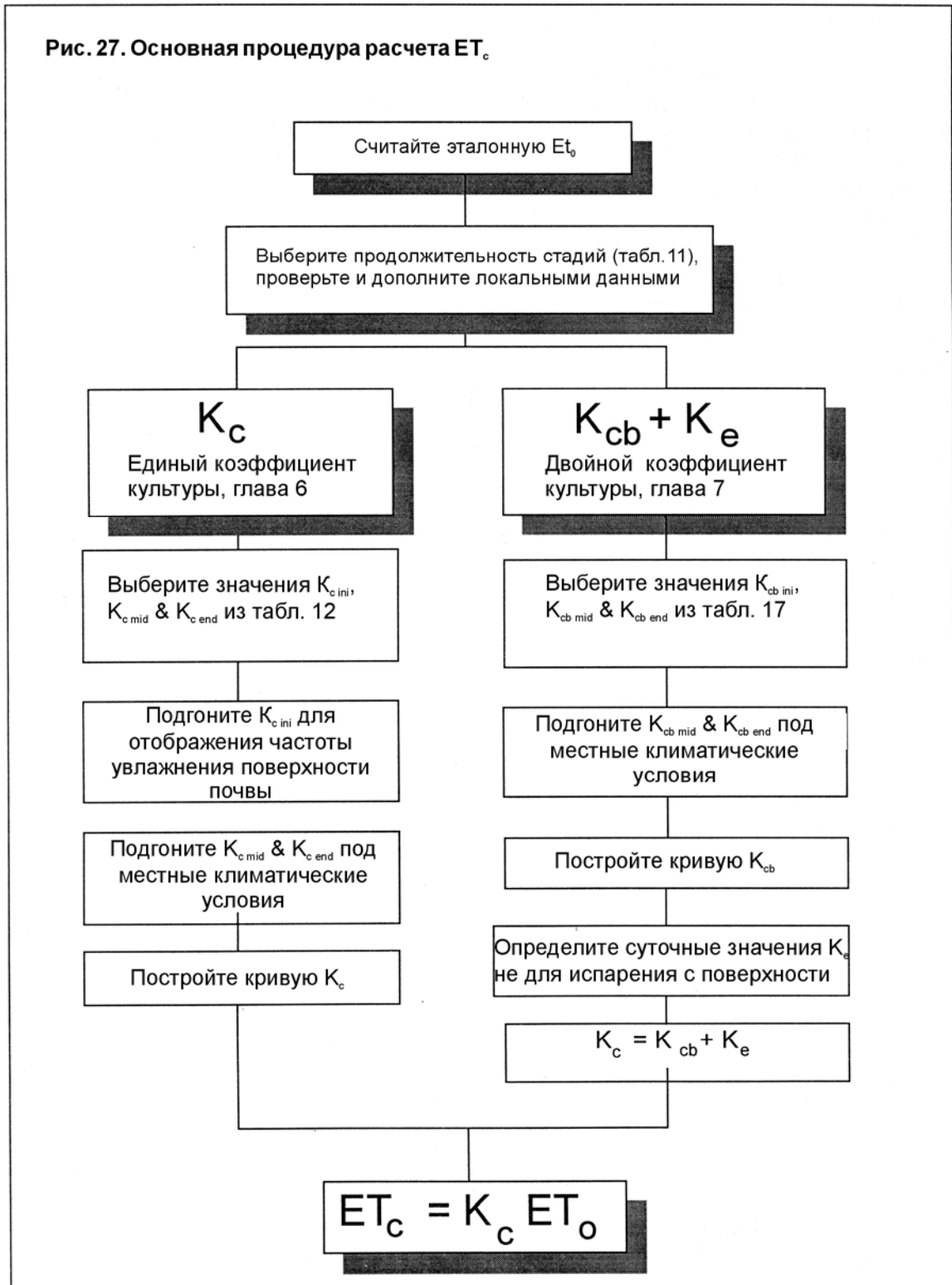


На рис. 26 представлены типовые кривые K_{cb} , K_e и единый K_c . Кривая K_{cb} представляет минимальный K_c для условий соответствующей влажности и сухой поверхности почвы. Пики на кривой K_e представляют возросшее испарение, когда поверхность почвы увлажнена орошением или осадками и ET_c временно повышена. Эти пики испарения с влажной почвы уменьшаются по мере высыхания верхнего слоя почвы. Пики обычно достигают максимальной величины 1,0-1,2, в зависимости от климата, грузности полива и площади увлажняемой почвы.

Суммирование K_{cb} и K_e дает единый коэффициент культуры K_c . Общая кривая K_c , показанная пунктирной линией на рис. 26, иллюстрирует эффект осредненных во времени $K_{cb} + K_e$ и является "сглаженной" кривой. Эта сглаженная кривая получена в результате расчета единого K_c . Кривая K_c лежит ниже кривой K_{cb} с потенциально большей разницей в течение начального периода и стадии развития растений в зависимости от частоты увлажнения.

СХЕМА РАСЧЕТОВ

Процедуры расчетов коэффициента культуры разработаны в следующих главах. В главе 6 использован единый осредненный по времени коэффициент культуры для расчета ET_c . Метод с использованием двух коэффициентов для описания эффектов культуры и почвы в отдельности описан в главе 7. На рис. 27 представлены общие процедуры расчетов.

Рис. 27. Основная процедура расчета ET_c .

Глава 6

ET_c – единый коэффициент культуры (K_c)

Эта глава посвящается расчету водопотребления культур (ET_c) при стандартных условиях. На рост культур или водопотребление влияют подпочвенные воды, засоление, густота растений, сельскохозяйственные вредители и болезни, сорняки или низкое плодородие почв. ET_c определяется методом коэффициента культуры, посредством которого влияние различных погодных условий включено в ET_o, а характеристики культуры – в коэффициент K_c.

$$ET_c = K_c ET_o \quad (58)$$

Влияние транспирации культур и испарения почв объединены в единый коэффициент культуры. Коэффициент K_c включает характеристики культур и осредненное влияние испарения почв. В целях планирования и управления стандартным орошением, для развития базовых ирригационных схем и для большого числа исследований гидрологического водного баланса, средние коэффициенты культур являются уместными и более удобными, чем K_c, вычисляемый постоянно с использованием отдельной культуры и коэффициента почвы (глава 7). Отдельный коэффициент транспирации и испарения (K_{cb} + K_c) должен рассматриваться только тогда, когда нужны значения K_c на ежедневной основе для специфичных полей культур и в особые годы.

Расчет эвапотранспирации культур ET_c включает:

1. отождествление стадий роста культур, определение их продолжительности и подбор соответствующих коэффициентов K_c;
2. сверку отобранных коэффициентов K_c с частотой увлажнения или климатическими условиями в течение этих стадий;
3. построение кривой коэффициента культур K_c (разрешается одна для определения значений K_c любого периода роста культур);
4. расчет ET_c в качестве конечного продукта ET_c и K_c.

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ СТАДИЙ РОСТА

Публикация № 24 FAO по ирригации и дренажу предоставляет продолжительность четырех характерных стадий роста и общий период вегетации для различных типов климата и местности. Эта информация дополняется другими источниками и сведена в таблицу 11.

В некоторых ситуациях время вегетации и время эффективного полного покрытия может быть предсказано использованием уравнений совокупной ступенчатой регрессии или более сложных моделей роста растений. Эти типы моделей должны быть выверены и оценены для данной области или для специфического разнообразия культур с использованием местных наблюдений.

ТАБЛИЦА 11

Продолжительность стадий развития культур* для различных периодов посадки и климатических регионов (в днях)

Культура	Нач. (L _{ini})	Разв. (L _{dev})	Сред. (L _{mid.})	Позд. (L _{late})	Общая	Дата посадки	Регион
а. Мелкие овощи							
Брокколи	35	45	40	15	135	Сентябрь	Пустыня, Калифорния, США
Капуста	40	60	50	15	165	Сентябрь	Пустыня Калифорния, США
Морковь	20 30 30	30 40 50	50/30 60 90	20 20 30	100 150 200	Окт/Янв февр/март Октябрь	Арид. Климат Средиземноморье Пустыня, Калифорния, США
Цветная капуста	35	50	40	15	140	Сентябрь	Пуст., Калифорния, США
Сельдерей	25 25 30	40 40 55	95 45 105	20 15 20	180 125 210	Октябрь Апрель Январь	(Полу) Аридный Средиземноморье (Полу) Аридный
Крुциферы ¹ (крестоцветные)	20 25 30	30 35 35	20 25 90	10 10 40	80 95 195	Апрель Февраль Окт/Нояб.	Средиземноморье Средиземноморье Средиземноморье
Салат	20 30 25 35	30 40 35 50	15 25 30 45	10 10 10 10	75 105 100 140	Апрель Нояб/Янв. Окт/Нояб. Февраль	Средиземноморье Средиземноморье Аридный регион Средиземноморье
Лук (репчатый)	15 20	25 35	70 110	40 45	150 210	Апрель Окт; Янв.	Средиземноморье Аридный регион; Калифорния
Лук зеленый	25 20 30	30 45 55	10 20 55	5 10 40	70 95 180	Апр/Май Октябрь Март	Средиземноморье Аридный регион Калифорния, США
Лук (семен.)	20	45	165	45	275	Сентябрь	Пуст., Калиф., США
Шпинат	20 20	20 30	15/25 40	5 10	60/70 100	Апр; Сент. Окт. Ноябрь	Средиземноморье Аридный Регион
Редиска	5 10	10 10	15 15	5 5	35 40	Март/Апр Зима	Средиземном.; Европа Аридный Регион
б. Овощи- семейство пасленовых (Solanaseae)							
Баклажаны	30 30	40 45	40 40	20 25	130/1 40	Октябрь Май/июнь	Аридный регион Средиземноморье
Сладкий перец							Европа и Средиземн-е Аридный регион
Томаты	30 35 25 35 30	40 40 40 45 40	40 50 60 70 45	25 30 30 30 30	135 155 155 180 145	Январь Апр/Май Январь Окт/Ноябрь Апр/Май	Аридный регион Калифорния, США Пуст., Калифорния, США Аридный регион Средиземноморье
с. Овощи – семейство тыквенных (Cucurbitaceae)							
Канталупа (мускусная дыня)	30 10	45 60	35 25	10 25	120 120	Январь Август	Калифорния, США Калифорния, США
Огурцы	20 25	30 35	40 50	15 20	105 130	Янв/Август Нояб; Февр.	Аридный Регион Аридный Регион
Тыква, Зимняя тыква	20 25	30 35	30 35	20 25	100 120	Март; Авг. Июнь	Средиземноморье Европа
Большая столовая тыква,	25	35	25	15	100	Апр; Декабрь	Средизем-е; Арид. регион

Культура	Нач. (L _{ini})	Разв. (L _{dev})	Сред. (L _{mid})	Позд. (L _{late})	Общая	Дата посадки	Регион
Цуккини	20	30	25	15	90	Май/Июнь	Средиземном-е; Европа
Сладкие дыни	25	35	40	20	120	Май	Средиземном-е Калифорния, США Пуст., Калиф., США Аридный регион
	30	30	50	30	140	Март	
	15	40	65	15	135	Август	
	30	45	65	20	160	Дек/Янв.	
Арбузы	20	30	30	30	110	Апрель	Италия Ближний Восток (пустыня)
	10	20	20	30	80	Март/Авг	
d. Корни и клубни							
Свекла столовая	15	25	20	10	70	Апр/Май	Средиземном-е Средиземн- Арид
	25	30	25	10	90	Февр/март	
Маниока: год 1 год 2	20	40	90	60	210	Дождливый сезон	Тропические регионы
	150	40	110	60	360		
Картофель	25	30	30/45	30	115/130	Янв/Ноябр	(Полу)Арид. Регион Континент. Климат Европа Айдахо, США пуст.,Калиф., США
	25	30	45	30	130	Май	
	30	35	50	30	145	Апрель	
	45	30	70	20	165	Апр/Май	
Батат	20	30	60	40	150	Апрель	Средиземном-е Тропические регионы
	15	30	50	30	125	Дождл. Сезоны	
	30	45	90	15	180	Март	
	25	30	90	10	155	Июнь	
Сахарная свекла	25	65	100	65	255	Сентябрь	Калифорния, США Калифорния, США Пуст., Калиф., США Айдахо, США Средиземном-е Средиземном-е Аридный регион
	50	40	50	40	180	Апрель	
	25	35	50	50	160	Май	
	45	75	80	30	230	Ноябрь	
	35	60	70	40	205	Ноябрь	
e. Бобовые (Leguminosae)							
Бобы (зеленые)	20	30	30	10	90	Февр/Мар	Калиф., Средизем-е Калиф., Египет, Ливан
	15	25	25	10	75	Авг/Сент	
Бобы (сухие)	20	30	40	20	110	Май/Июнь	Континет. Климат Пакистан, Калифор-я Айдахо, США
	15	25	35	20	95	Июнь	
	25	25	30	20	100	Июнь	
Боб конский, Боб огородный сухой зеленый	15	25	35	15	90	Май	Европа Средиземноморье Европа Европа
	20	30	35	15	100	Март/Апр	
	90	45	40	60	235	Ноябрь	
	90	45	40	0	175	Ноябрь	
Зеленый кофейный горох, коровий горох	20	30	30	20	110	Март	Средиземноморье
Земляной орех	25	35	45	25	130	Сухой сезон	Западная Африка Высокие широты Средиземноморье
	35	35	35	35	140	Май	
	35	45	35	25	140	Май/июнь	
Чечевица	20	30	60	40	150	Апрель	Европа Аридный Регион
	25	35	70	40	170	Окт/Ноябрь	
Горох	15	25	35	15	90	Май	Европа Средиземноморье Айдахо, США
	20	30	35	15	100	Март/Апр	
	35	25	30	20	110	Апрель	
Соевые бобы	15	15	40	15	85	Декабрь	Тропики

Культура	Нач. (L _{ini})	Разв. (L _{dev})	Сред. (L _{mid})	Позд. (L _{late})	Общая	Дата посадки	Регион			
	20 20	30/35 25	60 75	25 30	140 150	Май Июнь	Центральные США Япония			
f. Многолетние овощные культуры (с зимним состоянием покоя и первоначально лишённые растительности или закрытые мульчей почвы)										
Артишок	40 20	40 25	250 250	30 30	360 325	Апрель (1-й год) Май (2-й год)	Калифорния (обрезка в мае)			
Спаржа	50 90	30 30	100 200	50 45	230 365	Февраль Февраль	Теплая зима Средиземноморье			
g. Волокнистые культуры										
Хлопок	30 45 30 30	50 90 50 50	60 45 60 55	55 45 55 45	195 225 195 180	Март-май Март Сентябрь Апрель	Египет; Пакистан; Калиф. Пуст., Калифорния, США Йемен Техас			
	Лен	25 30	35 40	50 100	40 50	150 220	Апрель Октябрь	Европа Аризона		
	h. Масличные культуры									
	Касторовые бобы	25 20	40 40	65 50	50 25	180 135	Март Ноябрь	(Полу) Аридный климат Индонезия		
Сафлор	20 25 35	35 35 55	45 55 60	25 30 40	125 145 190	Апрель Март Окт/Ноябрь	Калифорния, США Высокие широты Аридный регион			
	Кунжут	20	30	40	20	100	Июнь	Китай		
	Подсолнечник	25	35	45	25	130	Апрель/май	Средиземн-е, Калифорния		
i. Хлебные злаки										
Ячмень/овес/ Пшеница Озимая пшеница	15 20 15 40 40 20 20 ² 30 160	25 25 30 30 60 50 60 ² 140 75	50 60 65 40 60 60 70 40 75	30 30 40 20 40 30 30 25	120 135 150 130 200 160 180 240 335	Ноябрь Март/апр Июль Апрель Ноябрь Декабрь Декабрь Ноябрь Октябрь	Центральная Индия 35-45° широты Восточная Африка Пуст., Калифорния, США Калифорния, США Средиземноморье Айдахо, США			
	Зерновые (мелкие)	20 25	30 35	60 65	40 40	150 165	Апрель Окт/Нояб	Средиземноморье Пакистан; Аридн. регион		
	Кукуруза (зерно)	30 25 20 20 30 30	50 40 35 35 40 40	60 45 40 40 50 50	40 30 30 30 30 50	180 140 125 125 150 170	Апрель Дек/январь Июнь Октябрь Апрель Апрель	Восточная Африка (выс) Аридный климат Нигерия (влажность) Индия (сухой, прохлад.) Испания (весна, лето); Калиф. Айдахо, США		
		Кукуруза (сладкая)	20 20 20 30 20	20 25 30 30 40	30 25 50/30 30 70	10 10 10 10 ³ 10	80 80 90 110 140	Март Май/июнь Окт/дек Апрель Январь	Филиппины Средиземноморье Аридный климат Айдахо, США Пуст., Калифорния, США	
			Просо	15	25	40	25	105	Июнь	Пакистан

Культура	Нач. (L _{ini})	Разв. (L _{dev})	Сред. (L _{mid})	Позд. (L _{late})	Общая	Дата посадки	Регион
	20	30	55	35	140	Апрель	Центральные США
Сорго	20	35	40	30	130	Май/июнь	США, Пакист., Среди-земноморье
	20	35	45	30	140	Март/апр	
Рис	30	30	60	30	150	Дек; Май	Тропики, Средиземн-е Тропики
	30	30	80	40	180	Май	
j. Кормовые культуры							
Люцерна, весь период вегетации ⁴	10	30	Разн.	Разл.	Разл.		Посл. -4 ⁰ С весной до первых -4 ⁰ С осенью
Люцерна, 1-й цикл косьбы	10	20	20	10	60	Январь	Калифорния, США
	10	30	25	10	75	Апрель (посл. -4 ⁰ С)	
Люцерна, другие циклы косьбы	5	10	10	5	30	Март	Калифорния, США
	5	20	10	10	45	Июнь	
Бермудская трава на семена	10	25	35	35	105	Март	Пуст., Калифорния, США
Берм. Трава на сено (отд. косьба)	10	15	75		135	-	Пуст., Калифорния, США
Пастбищные травы	10	20	-	-	-		За 7 дней до -4 ⁰ С весной до 7 дней после первых -4 ⁰ С осенью
Суданская трава, 1-й цикл косьбы	25	25	15	10	75	Апрель	Пуст., Калифорния, США
Судан, другие цикла косьбы	3	15	12	7	37	Июнь	Пуст., Калифорния, США
к. Сахарный тростник							
Сах. тростник, целина	35	60	190	120	405		Низкие широты Тропики Гавайи, США
	50	70	220	140	480		
	75	105	330	210	720		
Сахарный тростник, отростки от корня	25	70	135	50	280		Низкие широты Тропики Гавайи, США
	30	50	180	60	320		
	35	105	210	70	420		
l. Тропические фрукты и деревья							
Бананы, 1-й год	120	90	120	60	390	Март	Средиземноморье
Бананы, 2-й год	120	60	180	5	365	Февраль	Средиземноморье
Ананас	60	120	600	10	790		Гавайи, США
м. Виноград и ягоды							
Виноград	20	40	120	60	240	Апрель	Низкие широты Калифорния, США
	20	50	75	60	205	Март	
	20	50	90	20	180	Май	
	30	60	40	80	210	Апрель	
Хмель	25	40	80	10	155	апрель	Айдахо, США
м. Фруктовые деревья							
Цитрусовые	60	90	120	95	365	Январь	Средиземноморье
Лиственный фруктовый сад	20	70	90	30	210	Март	Высокие широты Калифорния, США
	20	70	120	60	270	Март	
	30	50	130	30	240	март	
Маслины	30	90	60	90	270 ⁵	Март	Средиземноморье
Фисташки	20	60	30	40	150	Февраль	Средиземноморье
Грецкие орехи	20	10	130	30	190	Апрель	Штат Юта, США

Культура	Нач. (L _{ini})	Разв. (L _{dev})	Сред. (L _{mid})	Позд. (L _{late})	Общая	Дата посадки	Регион
о. Ветланды- умеренный климат							
Ветланды (ро-гоз широколиственный, камыш)	10 180	30 60	80 90	20 35	140 365	Май Ноябрь	Юта, США, смерт. холод Флорида, США
Ветланды (низкие раст.)	180	60	90	35	365	Ноябрь	Безморозный климат
* Сроки продолжительности стадий развития культур, представленные в таблице, являются показателями основных условий, но они меняются в зависимости от региона, климата и условий сбора урожая. Пользователю необходимо получить информацию для своей местности.							
¹ Крусиферы включают капусту, цветную капусту, брокколи и брюссельскую капусту. Существует широкий диапазон продолжительности сезона из-за различий видов.							
² Продолжительность таких периодов для озимой пшеницы представлена при наличии морозного периода для дней, имеющих нулевой потенциал роста или характеризующихся зимним покоем. При обычных условиях и отсутствии местных данных допускается осенний сев озимой пшеницы, происходящий в северном умеренном климате, когда 10-дневная среднесуточная температура воздуха падает до 17 °С или 1 декабря. Посев яровой пшеницы допускается, когда 10-дневная среднесуточная температура воздуха поднимается до 5 °С. Весенний сев зеленой кукурузы допускается при 10-дневной среднесуточной температуре воздуха, поднимающейся до 13 °С.							
³ Поздний сезон сбора сладкого маиса длится около 35 дней, когда зерна становятся спелыми и сухими.							
⁴ При климате с губительным для растений холодом вегетационный период люцерны и травы оценивается следующим образом: <u>Люцерна:</u> последние -4 °С весной до первых -4 °С осенью (Д. Эверсон, М. Фабьен и Д. Эймс, 1978 г. «Температуры замерзания и вегетационный период в Айдахо». 494 Бюллетень сельскохозяйственной экспедиции Университета Айдахо, 18 стр.) <u>Трава:</u> за 7 дней до последних -4 °С весной и 7 дней после последних -4 °С осенью (Е. Крузе и Х. Хэйси, 1974. «Водопотребление диких трав на лугах на больших высотах Колорадо». USDA Служба сельскохозяйственных исследований, отчет по Западному региону ARS-W-6-1974, 60 стр.)							
⁵ Оливковые деревья обретают новую листву в марте. Для дополнительной информации смотри сноску 24 таблицы 12, где K _c продолжается за пределы «вегетационного периода».							

Источник: Сборник ФАО по ирригации и дренажу № 24 (Дуренбос и Прутт, 1977), табл. 12.

Продолжительность начального периода и периода развития может быть относительно короткой для деревьев, теряющих на зиму листву и кустарников, которые могут сравнительно быстро покрыться листвой весной (рис. 23).

Скорость развития растительного покрова и время наступления эффективного полного растительного покрытия зависят от погодных условий в целом и среднесуточной температуры воздуха в частности. Следовательно, продолжительность между посадкой и развитием эффективного полного покрова будет меняться в зависимости от климата, широты, высоты и времени посадки. Она также будет меняться в зависимости от разновидности культур. В общем, как только будет развит эффективный полный растительный покров, скорость следующего фенологического развития (цветение, развитие семян, созревание и увядание) больше зависит от генотипа растения и меньше от погоды. В качестве примера на рис. 28 представлено изменение продолжительности периода роста одного сорта риса в одном регионе при различных датах сева.

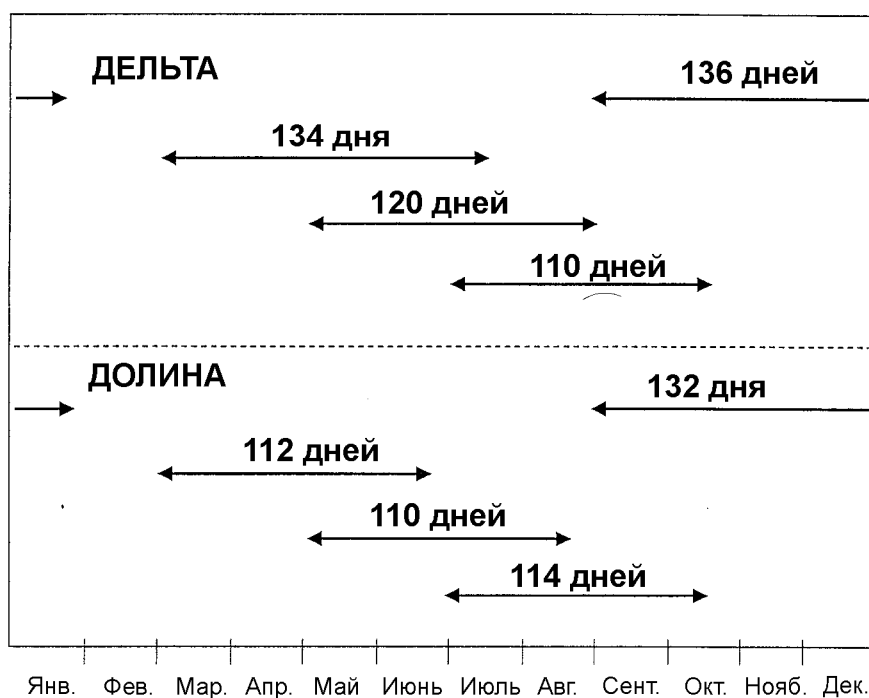
Конец середины сезона и начало конечного периода сезона обычно отмечены увяданием листьев, которое зачастую начинается с нижних листьев растений. Продолжительность конечного периода может быть относительно короткой (менее 10 дней) для растительности, побитой морозом (например, для маиса на плато выше 40⁰ с. ш.) или для сельскохозяйственных культур, убираемых зелеными с полей (например, свекла столовая и мелкие овощи).

Высокая температура может ускорить процесс созревания и увядания культур. Длительная высокая температура воздуха (> 35 °С) может вызвать состояние покоя у некоторых культур, таких как торфяная трава. Если высокая температура воздуха сочетается с водным стрессом, трава может находиться в покое постоянно до конца вегетационного периода. Водный стресс или любые другие экологические стрессы обычно ускоряют процесс созревания

культур и могут сократить продолжительность роста среднего и конечного сезонов.

Значения в табл. 11 полезны лишь для общей ориентации и сравнения. Перечисленные периоды стадий роста являются средними по регионам, они определены и рассчитаны только в качестве примеров. Должны использоваться местные наблюдения фазового развития специфических растений и, где это возможно, включать воздействия разновидностей растений, климата и практики возделывания. Информация на месте может быть получена путем опроса фермеров, скотоводов, агентов сельскохозяйственной службы инновации и местных исследователей, путем наземных наблюдений или дистанционными методами. При определении фазовых периодов путем наземных наблюдений могут быть полезными руководства и визуальные описания.

Рис. 28. Изменения продолжительности периода вегетации риса (сорт: Джайя), засеянного в разные месяцы года на различных местностях по реке Сенегал (Африка)



КОЭФФИЦИЕНТЫ КУЛЬТУР

Изменения в растительности и степени покрытия земли означают, что коэффициент K_c меняется в период роста. Тенденции изменения K_c в течение периода роста представлены кривой коэффициента культур. Для описания и построения кривой коэффициента культуры требуются только три значения K_c : во время начальной стадии ($K_{c\text{ ini.}}$), стадии середины сезона ($K_{c\text{ mid}}$) и в конце конечной стадии сезона ($K_{c\text{ end}}$).

Табличные значения K_c

Таблица 12 содержит типовые значения $K_{c\text{ ini.}}$, $K_{c\text{ mid}}$ и $K_{c\text{ end}}$ для различных сельскохозяйственных культур. Представленные коэффициенты объединены в группы (т. е. мелкие овощи, бобовые, злаковые и т. д.), чтобы помочь определить культуру в таблице и для сравнения

культур в рамках группы. Обычно коэффициенты одной группы культур аналогичны, так как высота растений, площадь листы, покрытие земли и управление водой обычно схожи.

Коэффициенты табл. 12 объединяют влияние как транспирации, так и испарения. Постоянное воздействие такой интеграции во времени представляет среднюю частоту увлажнения "стандартной" культуры в типичных условиях роста в орошаемых посадках. Значения K_c начальной и развитой стадий культур подвержены изменению под влиянием частоты увлажнения и, следовательно, значения, используемые для K_c, должны постоянно уточняться. Для высокой частоты увлажнения, при дождевании высокой частоты или атмосферных осадках значения K_c могут существенно увеличиться.

ТАБЛИЦА 12

Единые (усредненные по времени) коэффициенты культур K_c и средняя максимальная высота растений для не подверженных стрессу, хорошо увлажняемых культур в суб-влажном климате (RH_{min} ≈ 45 %, u₂ ≈ 2 м/с) с использованием уравнения Пенмана-Монтейта ET₀.

Культура	K _{c ini} ¹	K _{c mid}	K _{c end}	Максим. высота растений (h) (м)
а. Мелкие овощи	0,7	1,05	0,95	
Брокколи		1,05	0,95	0,3
Брюссельская капуста		1,05	0,95	0,4
Капуста кочанная		1,05	0,95	0,4
Морковь		1,05	0,95	0,3
Цветная капуста		1,05	0,95	0,4
Сельдерей салатный		1,05	1,00	0,6
Чеснок		1,00	0,70	0,3
Салат-Латук		1,00	0,95	0,3
Лук - сухой		1,05	0,75	0,4
- зеленый		1,00	1,00	0,3
- семена		1,05	0,80	0,5
Шпинат		1,00	0,95	0,3
Редис		0,90	0,85	0,3
б. Овощи –Семейство пасленовых	0,6	1,15	0,80	
Баклажан		1,05	0,90	0,8
Сладкий перец		1,05 ²	0,90	0,7
Томаты		1,05 ²	0,70-0,90	0,6
с. Овощи –Семейство Тыквенных	0,5	1,00	0,80	
Канталупа (мускусная дыня)	0,5	0,85	0,60	0,3
Огурцы - овощной рынок	0,6	1,00 ²	0,75	0,3
- машинный сбор	0,5	1,00	0,90	0,3
Тыква, Зимняя большая столовая тыква		1,00	0,80	0,4
Большая столовая тыква, Цуккини		0,95	0,75	0,3
Сладкие дыни		1,05	0,75	0,4
Арбуз	0,4	1,00	0,75	0,4
д. Корни и клубни	0,5	1,10	0,95	
Столовая свекла		1,05	0,95	0,4
Маниок 1 год	0,3	0,80 ³	0,30	1,0
2 года	0,3	1,10	0,50	1,5
Пастернак	0,5	1,05	0,95	0,4
Картофель		1,15	0,75 ⁴	0,6
Батат		1,15	0,65	0,4
Репа (и брюква)		1,10	0,95	0,6

Культура	$K_{c\ ini}^1$	$K_{c\ mid}$	$K_{c\ end}$	Максим. высота растений (h) (м)
Сахарная свекла	0,35	1,20	0,70 ⁵	0,5
е. Бобовые	0,4	1,15	0,55	
Фасоль, зеленая	0,5	1,05 ²	0,90	0,4
Фасоль, сухая и бобы	0,4	1,15 ²	0,35	0,4
Нут		1,00	0,35	0,4
Боб конский - свежий	0,5	1,15 ²	1,10	0,8
- сухой/семена	0,5	1,15 ²	0,30	0,8
Грabanцо	0,4	1,15	0,35	0,8
Зеленый кофейный горох и коровий горох		1,05	0,60-0,35 ⁶	0,4
Земляной орех (арахис)		1,15	0,60	0,4
Чечевица		1,10	0,30	0,5
Горох - свежий	0,5	1,15 ²	1,10	0,5
- сухой/семена		1,15	0,30	0,5
Соевые бобы		1,15	0,50	0,5-1,0
ф. Многолетние овощи (с зимним состоянием покоя и первоначально лишённые растительности или покрытые мульчей почвы)	0,5	1,00	0,80	
Артишоки	0,5	1,00	0,95	0,7
Спаржа	0,5	0,95 ⁷	0,30	0,2-0,8
Мята	0,60	1,15	1,10	0,6-0,8
Клубника	0,40	0,85	0,75	0,2
г. Волокнистые культуры	0,35			
Хлопок		1,15-1,20	0,70-0,50	1,2-1,5
Лен		1,10	0,25	1,2
Сизаль		0,4-0,7	0,4-0,7	1,5
н. Масличные культуры	0,35	1,15	0,35	
Боб касторовый		1,15	0,55	0,3
Семя рапса, канола		1,0 - 1,15 ⁹	0,35	0,6
Сафлор		1,0 - 1,15 ⁹	0,25	0,8
Кунжут		1,10	0,25	1,0
Подсолнечник		1,0 - 1,15 ⁹	0,35	2,0
и. Зерновые культуры	0,3	1,15	0,4	
Ячмень		1,15	0,25	1
Овес		1,15	0,25	1
Яровая пшеница		1,15	0,25-0,4 ¹⁰	1
Озимая пшеница:				
- с мерзлой почвой	0,4	1,15	0,25-0,4 ¹⁰	1
- с не мерзлыми почвами	0,7	1,15	0,25-0,4 ¹⁰	
Кукуруза, полевая (зеленая)		1,20	0,60-0,35 ¹¹	2
Кукуруза, сладкая (сладкое зерно)		1,15	1,05 ¹²	1,5
Просо		1,00	0,30	1,5
Сорго - зеленое		1,00-1,10	0,55	1-2
- сладкое		1,20	1,05	2-4
Рис	1,05	1,20	0,90-0,60	1
ж. Фуражная				
Люцерна фуражная				
- осредненный эффект косябы	0,40	0,95 ¹³	0,90	0,7
- периоды индивидуальной косябы	0,40 ¹⁴	1,20 ¹⁴	1,15 ¹⁴	0,7
- на семена	0,40	0,50	0,50	0,7

Культура	K _{c ini} ¹	K _{c mid}	K _{c end}	Максим. высота растений (h) (м)
Бермудская трава - осредненное влияние косьбы - весенние культуры на семена	0,55 0,35	1,00 ¹³ 0,90	0,85 0,65	0,35 0,4
Клеверное сено, Берсим – осредненное влияние косьбы - периоды индивидуальной косьбы	0,40 0,40 ¹⁴	0,90 ¹³ 1,15 ¹⁴	0,85 1,10 ¹⁴	0,6 0,6
Райграсс фуражный – осредненное влияние косьбы	0,95	1,05	1,00	0,3
Суданская трава (ежегод) – осредненное влияние косьбы - периоды индивидуальной косьбы	0,50 0,50 ¹⁴	0,90 ¹⁴ 1,15 ¹⁴	0,85 1,10 ¹⁴	1,2 1,2
– чередующаяся пастьба - экстенсивная пастьба	0,40 0,30	0,85-1,05 0,75	0,85 0,75	0,15-0,30 0,10
Торфяная трава - холодный сезон - теплый сезон	0,90 0,80	0,95 0,85	0,95 0,85	0,10 0,10
к. Сахарный тростник	0,40	1,25	0,75	3
l. Тропические фрукты и деревья				
Бананы - 1-й год - 2-й год	0,50 1,00	1,10 1,20	1,00 1,10	3 4
Какао	1,00	1,05	1,05	3
Кофе - земля, лишенная растительности - с сорняками	0,90 1,05	0,95 1,10	0,95 1,10	2-3 2-3
Финиковая пальма	0,90	0,95	0,95	8
Пальмовые деревья	0,95	1,00	1,00	8
Ананас ¹⁶ - голая земля - с растительным покровом	0,50 0,50	0,30 0,50	0,30 0,50	0,6-1,2 0,6-1,2
Каучуковые деревья	0,95	1,00	1,00	10
Чай - не затененный - затененный	0,95 1,10	1,00 1,15	1,00 1,15	1,5 2
m. Виноград и ягоды				
Ягоды (кустарники)	0,30	1,05	0,50	1,5
Виноград - столовый или изюм - винный	0,30 0,30	0,85 0,70	0,45 0,45	2 1,5 - 2
Хмель	0,3	1,05	0,85	5
n. Фруктовые деревья				
Миндаль, не закрывает землю	0,40	0,90	0,65 ¹⁸	5
Яблоки, вишня, груши ¹⁹ - не закрывает землю, убийств.холод - не закрывает землю, без морозов -активный покров земли, уб.холод -актив. покров земли, без мо-	0,45 0,60 0,50 0,80	0,95 0,95 1,20 1,20	0,70 ¹⁸ 0,75 ¹⁸ 0,95 ¹⁸ 0,85 ¹⁸	4 4 4 4

Культура	$K_{c\ ini}^1$	$K_{c\ mid}$	$K_{c\ end}$	Максим. высота растений (h) (м)
розов				
Абрикосы, персики, косточковые ^{19,20}				
-не закрывает землю, убийств.холод	0,45	0,90	0,65 ¹⁸	3
-не закрывает землю, без морозов	0,55	0,90	0,65 ¹⁸	3
-активный покров земли, уб.холод	0,50	1,15	0,90 ¹⁸	3
-актив. покров земли, без морозов	0,80	1,15	0,85 ¹⁸	3
Авокадо, не закрывает землю	0,60	0,85	0,75	3
Цитрусовые, не закрывает землю ²¹				
70 % кроны	0,70	0,65	0,70	4
50 % кроны	0,65	0,60	0,65	3
20 % кроны	0,50	0,45	0,55	2
Цитрусовые, с активным покрытием земли или сорняками ²²				
70 % кроны	0,75	0,70	0,75	4
50 % кроны	0,80	0,80	0,80	3
20 % кроны	0,85	0,85	0,85	2
Хвойные деревья ²³	1,00	1,00	1,00	10
Киви	0,40	1,05	1,05	3
Оливы (40 –60 % земли, закрытой кроной) ²⁴	0,65	0,70	0,70	3-5
Фисташки, не закрывает землю	0,40	1,10	0,45	3-5
Сад грецких орехов ¹⁹	0,50	1,10	0,65 ¹⁸	4-5
о. Ветланды-умеренный климат				
Рогоз широколистый, Камыши, гибельный холод	0,30	1,20	0,30	2
Рогоз широколистый, камыш, безморозный климат	0,60	1,20	0,60	2
Низкие овощи, безморозный	1,05	1,10	1,10	0,3
Болотный камыш, стоячая вода	1,00	1,20	1,00	1-3
Болотный камыш, влажная почва	0,90	1,20	0,70	1-3
р. Специальные культуры				
Открытая водная поверхность < 2 м глубиной Или полувлажный климат или тропики		1,05	1,05	
Открытая водная поверхность > 5 м. глубиной, чистая или мутная, умеренный климат		0,65 ²⁵	1,25 ²⁵	

¹ Это общие значения для $K_{c\ ini}$ при типичном управлении ирригацией и увлажнении почв. Для такой частоты увлажнения как дождевание высокой частоты или ежедневные осадки, эти значения могут значительно увеличиться и достигнуть 1,0 до 1,2. $K_{c\ ini}$ является функцией интервала увлажнения и скорости потенциального испарения в течение начального периода и периода развития и более точно определяется с использованием рис. 29 и 30, или уравнения 7-3 в

Приложении 7, или двойного $K_{cb\ ini} + K_E$.

² Фасоль, горох, бобовые, томаты, перец и огурцы иногда растут на длинных стеблях, достигающих 1,5-2 метра в высоту. В подобных случаях требуется брать повышенные значения K_c . Для зеленой фасоли, перца и огурцов может быть принято значение 1,15, а для томатов, сухой фасоли и гороха - 1,20. При таких условиях h должна быть тоже увеличена.

³ Значения середины сезона для маниоки допускают отсутствие стресса, во время сезона дождей или сразу после него. Значения $K_{c\ end}$ рассчитываются с учетом состояния покоя в течение засушливого периода.

⁴ Значение $K_{c\ end}$ для картофеля равно примерно 0,40 для картофеля с длительной вегетацией и наличием вредителей.

⁵ Это значение $K_{c\ end}$ дано для отсутствия орошения во время конечной стадии вегетационного периода. Значение $K_{c\ end}$ для сахарной свеклы выше, во время орошения или значительного дождя в течение последнего месяца - до 1,0.

⁶ Первый $K_{c\ end}$ дан для уборки свежих овощей. Второе значение – для уборки сухих овощей.

⁷ K_c для спаржи обычно остается равным значению $K_{c\ ini}$ во время уборки побегов из-за редкого растительного покрова. Значение $K_{c\ mid}$ дано для последующего перерастания растений после окончания уборки побегов.

⁸ K_c для сизаля зависит от плотности посадки и управления водой (т. е. намеренный стресс влаги)

⁹ Пониженные значения даны для богарных культур с меньшей плотностью популяций растений.

¹⁰ Повышенные значения типичны для культур, убираемых вручную.

¹¹ Первое значение $K_{c\ end}$ для сбора зерновых высокой влажности. Второе значение $K_{c\ end}$ для сбора полностью высохших зерновых (около 18 % влажности, основа влажной массы)

¹² В случае сбора свежими для потребностей людей. Применение $K_{c\ end}$ для кукурузы в случае, когда сладкая кукуруза полностью созрела и высохла.

¹³ Этот коэффициент $K_{c\ mid}$ для фуражных культур является общим средним коэффициентом $K_{c\ mid}$, который усредняет оба коэффициента K_c до и после косьбы. Применяется в период, следующий за первым периодом развития до начала конечной поздней фазы вегетационного периода.

¹⁴ Эти коэффициенты K_c для фуражных культур представляют ситуацию, непосредственно следующую за косьбой; полный покров; и непосредственно перед косьбой. Вегетационный период описан как серия периодов индивидуальной косьбы (рис. 35).

¹⁵ Сорты трав прохладного сезона включают густые всходы мятлика лугового, райграса и овсяницы. Сорты теплого сезона включают бермудскую траву и траву Святого Августина. Значение 0,95 для трав прохладного сезона представляет 0,06 до 0,08 м - высоту косьбы в типовых торфяных условиях. Там, где практикуется водосбережение и не требуется быстрый рост, K_c для торфа может быть уменьшен до 0,10.

¹⁶ У ананаса низкая транспирация за счет того, что устьица в течение дня закрыты и раскрываются лишь ночью. Поэтому ET_c ананаса большей частью заключается в испарении с почвы. Коэффициент $K_{c\ mid} < K_{c\ ini}$, так как $K_{c\ mid}$ встречается во время полного растительного покрова, когда испарение почвы меньше. Данные значения допускают, чтобы 50 % поверхности земли было покрыто темной пластичной мульчей и при дождевании. Для капельного орошения под пластичной мульчей данные K_c могут сократиться до 0,10.

¹⁷ Включает требования на воду тенистых деревьев.

¹⁸ Эти значения $K_{c\ end}$ представляют K_c до листопада. После листопада $K_{c\ end} \approx 0,20$ для голой сухой почвы или мертвой земляной подстилки и $K_{c\ end} \approx 0,50-0,80$ для активно растущего земляного покрова (глава 11).

¹⁹ См. уравнения 94, 97 или 98 и сноски 21 и 22 для расчета K_c для незрелых всходов.

²⁰ К категории косточковых деревьев относятся персики, абрикосы, груши, сливы и орехи пекан.

²¹ Эти значения K_c могут быть рассчитаны из уравнения 98 для $K_{c\ min} = 0,15$ и $K_{c\ ful} = 0,75, 0,70$ и $0,75$ для начального, среднего и конечного сезонов вегетационного периода, а $f_{c\ eff} = f_c =$ часть земли, покрытой кроной деревьев (т. е. предполагается, что Солнце находится прямо над головой). Перечисленные значения соответствуют значениям по Дуренбосу и Прутту (1977) и более

современным измерениям. Значения середины сезона ниже значений начального и конечного сезонов из-за влияния закрытия устьиц во время пиковых периодов ET. Для влажного и полу-влажного климатов, где контроль устьиц меньше, для цитрусовых значения K_c нач., K_c mid. и K_c end. могут увеличиться до 0,1-0,2 (Роджерс и др., 1983).

²² Эти значения K_c рассчитываются как $K_c = f_c K_{c\text{ngc}} + (1 - f_c) K_{c\text{cover}}$, где $K_{c\text{ngc}}$ это K_c цитрусовых культур с неактивным покрытием земли (рассчитан как в сноске 21), $K_{c\text{cover}} - K_c$ с активным покровом земли (0,95) и f_c определен в сноске 21. Перечисленные значения соответствуют Дуренбосу и Прутту (1977) и наиболее современным измерениям. K_c для цитрусовых с активным покровом земли также может быть рассчитан непосредственно из уравнения 98, выполняя

$K_{c\text{min}} = K_{c\text{cover}}$. Для влажного и полувлажного климатов, где контроль устьиц меньше, для цитрусовых значения $K_{c\text{ini}}$, $K_{c\text{mid}}$ и $K_{c\text{end}}$ могут увеличиться до 0,1-0,2, (Роджерс и др., 1983). Для неактивного или умеренного покрытия земли (активный означает зеленый и растущий покров с LAI > 2-3), K_c должен оцениваться как среднее значение между K_c без покрытия земли и K_c с активным покрытием земли на основе "степени озеленения" и приблизительной листовой площади покрова.

²³ Представляет существенный устьичный контроль благодаря уменьшенному аэродинамическому сопротивлению. K_c можно легко уменьшить ниже представленных значений при хорошем увлажнении огромных лесных массивов.

²⁴ Эти коэффициенты представляют 60 % покрытия земли. См. уравнение 98 и сноски 21 и 22 для расчета K_c для незрелых всходов. В Испании Пастор и Оргаз (1994) нашли следующий ежемесячный коэффициент K_c для оливковых садов с 60 %-покрытием земли: 0,50, 0,50, 0,65, 0,60, 0,55, 0,50, 0,45, 0,45, 0,55, 0,60, 0,65, 0,50, с января по декабрь, соответственно. На эти коэффициенты можно сослаться путем использования $K_{c\text{ini}} = 0,65$, $K_{c\text{mid}} = 0,45$ и $K_{c\text{end}} = 0,65$ с продолжительностью = 30, 90 и 60 дней, соответственно, для начального, среднего и конечного периодов, K_c зимой (межсезонье) с декабря по февраль равен 0,50.

²⁵ Эти коэффициенты для глубокой воды в умеренных широтах, где встречаются большие температурные изменения в водном теле, а испарение начального и пикового периодов ниже, так как энергия излучения поглощается в глубокое водное тело. В осенний и зимний периоды ($K_{c\text{end}}$) тепло освобождается из водного тела, что увеличивает испарение. Поэтому $K_{c\text{mid}}$ соответствует периоду, когда водное тело получает термальную энергию, а $K_{c\text{end}}$ – когда освобождается термальная энергия. Эти коэффициенты K_c должны использоваться осторожно.

Первичные источники:

$K_{c\text{ini}}$: Дуренбос и Кассам (1979 г.)

$K_{c\text{mid}}$ и $K_{c\text{end}}$: Дуренбос и Прутт (1977 г.); Прутт (1986 г.); Райт (1981, 1982 г.), Шнайдер и др. (1989 г.)

Значения для $K_{c\text{mid}}$ и $K_{c\text{end}}$ в табл. 12 даны для полувлажного климата со средней ежедневной минимальной влажностью (RH_{mid}) 45 % и умеренной скоростью ветра в среднем 2 м/сек. В условиях более влажного или аридного климата, или в более активных ветровых условиях коэффициенты K_c в середине и в конце сезона должны быть модифицированы, как описано в этой главе.

Значения K_c в табл. 12 – это значения для культур, не находящихся в стрессовом состоянии, культивируемых в превосходных агрономических условиях, прекрасном водоуправлении и достижении максимального урожая культур (стандартные условия). Там, где густота всходов, высота растений или площадь листьев меньше, чем запланировано в подобных условиях, значения для $K_{c\text{mid}}$ для большинства культур и $K_{c\text{end}}$ необходимо модифицировать (часть C, главы 8, 9 и 10).

Коэффициент культур для начальной стадии ($K_{c\ ini}$)

Процедура расчета

Значения для $K_{c\ ini}$ в табл.12 только приблизительные и должны использоваться для расчета ET_c во время первоначальных или планируемых исследований. Для отдельных групп рассматривается только одно значение для $K_{c\ ini}$, представляющее целую группу типичного управления орошением. Более точные расчеты $K_{c\ ini}$ могут быть получены, рассматривая:

Временной интервал между увлажнениями

Эвапотранспирация во время начальной стадии для однолетних культур выражена преимущественно в виде испарения. Следовательно, точные расчеты K_c должны рассматривать частоту, с которой поверхность почвы увлажняется в течение начального периода. Там, где почва часто увлажняется за счет орошения или дождей, рассматривается испарение с поверхности почвы и K_c будет большим. Там, где поверхность почвы сухая, испарение невелико и $K_{c\ ini}$ будет небольшим (табл. 9).

Испаряющая сила атмосферы

На значение $K_{c\ ini}$ влияет испаряющая сила атмосферы, т. е. ET_0 . Чем выше испаряющая сила атмосферы, тем суше будет почва между поливами и меньше среднее по времени K_c для любого периода.

Величина увлажнения

Поскольку количество доступной влаги в поверхностном слое почвы для испарения и, следовательно, время высыхания поверхности почвы - это функция от величины увлажнения, $K_{c\ ini}$ будет меньше при легком увлажнении, чем при сильном.

В зависимости от временного интервала между увлажнениями, величины увлажнения и испаряющей силы атмосферы $K_{c\ ini}$ может колебаться между 0,1 и 1,15. Процедура численного определения $K_{c\ ini}$ дана в приложении 7.

Временной интервал между увлажнениями

В основном средний интервал времени между увлажнениями рассчитывается с учетом всех осадков и поливов, происшедших во время начального периода, которые составляют больше нескольких миллиметров. Случаи увлажнения, происходящие один за другим в смежные дни, можно охарактеризовать как одно событие. Средний интервал между увлажнениями рассчитывается делением продолжительности начального периода на количество событий.

Когда доступны только ежемесячные значения осадков без какой-либо информации о количестве дождливых дней, количество случаев в пределах месяца можно вычислить делением ежемесячной глубины атмосферных осадков на глубину типичного случая выпадения дождя. Типичная глубина, если таковая существует, может широко варьировать от климата к климату, от региона к региону и от сезона к сезону. Таблица 13 предоставляет некоторую информацию по глубине выпадения осадков. После определения типа выпадения дождя для региона и времени года можно вычислить количество дождливых дней и средний интервал между увлажнениями.

ТАБЛИЦА 13
Классификация глубины выпадения дождя

Дождь	Глубина
Очень слабый (морось)	≤ 3 мм
Слабый (легкий ливень)	5 мм
Средний (ливень)	≥ 10 мм
Сильный (гроза)	≥ 10 мм

Там, где дождей недостаточно, требуется хорошее орошение. Даже там, где орошение еще не развито, средний интервал между будущими поливами должен рассчитываться с целью получения требуемой частоты увлажнения, необходимой культурам во избежание стресса. Интервал для небольших овощных культур может быть малым (несколько дней), а для злаковых культур, в зависимости от климатических условий, до недели и более. Там, где расчет интервала делать не обязательно, пользователь может сослаться на значения $K_{c\ ini}$ табл. 12.

ПРИМЕР 23
Расчет интервала между увлажнениями

Определить на основе данных среднемесячных выпадений осадков, интервал между дождями в течение дождливого сезона для площади в умеренном климате (Париж, Франция: 50 мм/мес), сухом климате (Гафса, Тунис: 20 мм/мес) и тропическом климате (Калькутта, Индия: 300 мм/мес)

Местоположение	Ежемесячное выпадение дождей (мм/мес)	Типичное выпадение атмосферных осадков (мм)	Количество дождливых дней	Интервал между дождями
Париж	50	3	17	~ 2 дня
Гафса	20	5	4	неделя
Калькутта	300	20	15	~ 2 дня

Определение $K_{c\ ini}$

Коэффициент культуры для начальной стадии роста можно получить из рис. 29 и 30, представляющих расчеты $K_{c\ ini}$ в качестве функции среднего интервала между увлажнениями, испаряющей силы атмосферы ET_0 и значимости события увлажнения.

Легкое увлажнение (глубина инфильтрации 10 мм или менее): атмосферные осадки и ирригационные системы высокой частоты

Рис 29. используется для всех типов почв при слабом увлажнении. Когда увлажнение в начальной стадии выражается только в виде атмосферных осадков, для определения $K_{c\ ini}$ обычно используется рис. 29. График может использоваться, если орошение осуществляется системами высокочастотного орошения, например микроорошение или дождевальными установками с центральным вращением и применяется слабо при увлажнении на 10 мм и менее.

ПРИМЕР 24**Графическое определение $K_{c\ ini}$**

Илисто-суглинистая почва орошается каждые 2 дня в начальной стадии роста путем дождевания. Средняя глубина, используемая системой, равна 12 мм за одно событие и средняя ET_o в начальный период равно 4 мм/сут. Определить эвапотранспирацию культур за этот период.

Из рис. 29 используя кривую двух-дневного интервала:

$$K_{c\ ini} = ET_o = K_c ET_o = 0.85 (4,0) =$$

0,85

-

-

3,4

мм/сут

Средняя эвапотранспирация культур начальной стадии роста равна 3,4 мм/сут

Случай сильного увлажнения (глубина просачивания 40 мм и более): поверхностное орошение и дождевание

Рис. 30 применяется при сильном увлажнении, когда глубина просачивания превышает 40 мм, например, когда увлажнение главным образом происходит благодаря периодическому орошению - дождеванию или поверхностному. При таком увлажнении количество воды в верхнем слое почвы значительно и продолжительность высыхания почвы увеличивается. Следовательно, здесь K_c становится больше, чем при слабом увлажнении. Так как время, необходимое для того, чтобы поверхность почвы высохла, определяется объемом воды в верхнем слое почвы, независимо от испаряемости и частоты увлажнения, делается различие для типов почв.

Рис. 29. Зависимость среднего $K_{c\ ini}$ от уровня ET_o и интервала между поливами и/или значительными дождями в течение начальной стадии для всех типов почв при слабом и среднем увлажнении (3 10 мм на событие)

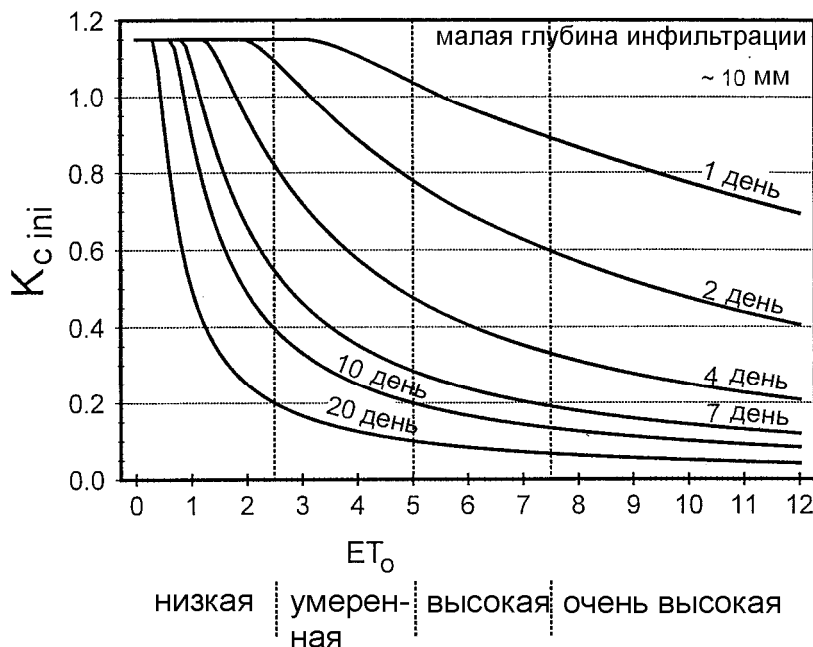
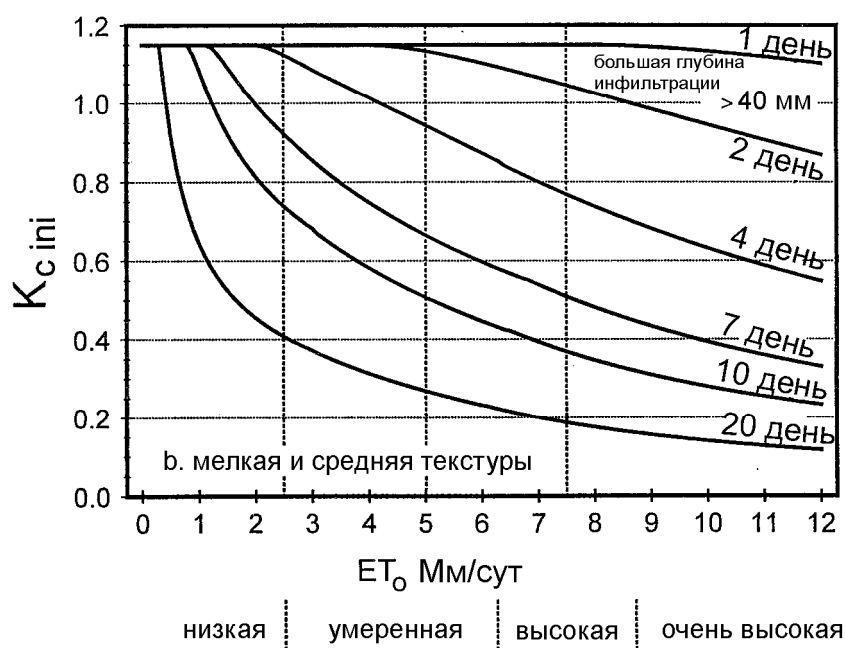
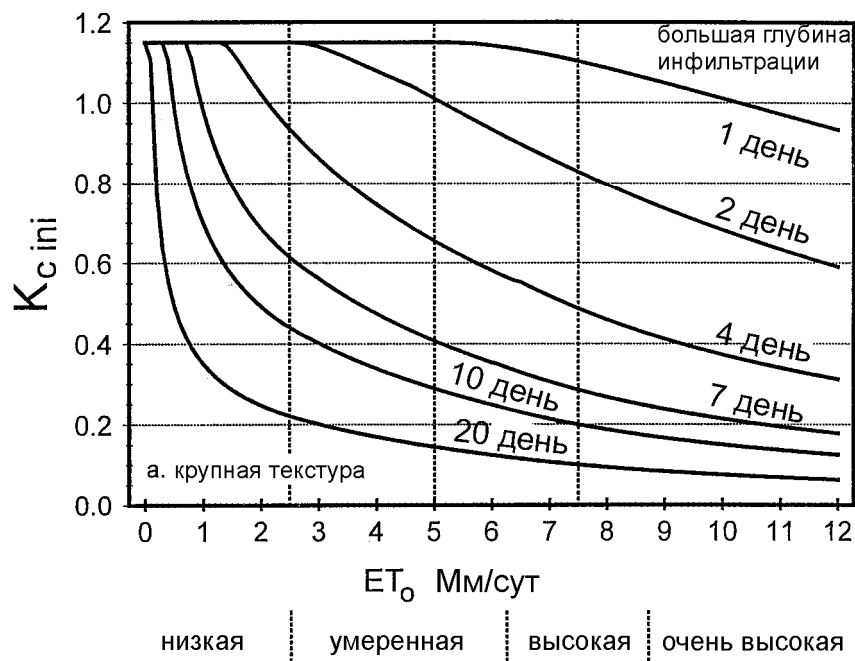


Рис. 30а используется для почв крупной текстуры, а рис. 30б – для почв мелкой и средней текстуры. Почвы крупной текстуры включают в себя песчаные и суглинисто-песчаные почвы. Почвы средней текстуры включают супеси, суглинки, бурые суглинки и илстые почвы. Почвы мелкой текстуры включают в себя илстые жирные суглинки, илстые глинистые почвы.

Рис. 30. Зависимость среднего $K_{c\ ini}$ от уровня ET_0 и интервала между поливами, больше или равным 40 мм, во время начальной стадии роста для а) почв грубой текстуры; б) почв средней и мелкой текстуры.



Случаи среднего увлажнения (глубина инфильтрации 10-40 мм)

Когда средняя глубина инфильтрации колеблется от 10 до 40 мм, значение для K_{c ini} можно рассчитать из рис. 29 и 30:

$$K_{c\ ini} = K_{c\ ini\ (рис.\ 29)} + \frac{(I - 10)}{(40 - 10)} [K_{c\ ini\ (рис.\ 30)} - K_{c\ ini\ (рис.\ 29)}] \quad (59)$$

где

K_{c ini (рис. 29)} - значение для K_{c ini} из рис. 29;

K_{c ini (рис. 30)} - значение для K_{c ini} из рис. 30;

I - средняя глубина инфильтрации [мм].

Значения 10 и 40 в уравнении 59 - это величины средней глубины инфильтрации (в мм), на которых основаны рис. 29 и 30.

ПРИМЕР 25**Интерполяция между легким и обильным увлажнением**

Овощные культуры, культивируемые в засушливых районах на грубо-текстурных почвах, получают 20 мм воды дважды в неделю благодаря системе дождевания. Средняя ET_o в начальной стадии равна 5 мм/сут. Рассчитать эвапотранспирацию культур на протяжении этой стадии:

	7/2 = ET _o = и грубо-текстурные почвы	3,5 5	Интервал дня мм/сут
Из рис. 29:	K _{c ini (рис. 29)} ≈	0,55	-
Из рис.30а:	K _{c ini (рис. 30 а)} ≈	0,7	-
Из ур-я 59:	I = K _{c ini} = 0,55 + [(20 - 10)/(40 - 10)] (0,7 - 0,55) = 0,55 + 0,33 (0,15) =	20 0,60	мм -
Из ур-я 58:	ET _c = 0,60 (5) =	3,0	мм/сут
Средняя эвапотранспирация начальной стадии роста для небольших овощных культур равна 3,0 мм/сут			

Регулирование частичного увлажнения путем орошения

Многие типы оросительных систем увлажняют только поверхность почвы. Например, при капельном орошении значение f_w может быть равно только 0,4. При бороздковом орошении f_w может колебаться от 0,3 до 0,8. Общие значения площадей увлажненной поверхности почвы путем орошения или выпадения атмосферных осадков даны в табл. 20. Если увлажнена только поверхность почвы, значение K_{c ini}, полученное из табл. 12 или рис. 29 или 30, должно быть умножено на часть увлажненной поверхности для регулирования частичного (неполного) увлажнения.

$$K_{c\ ini} = f_w K_{c\ ini\ (табл.,\ рис.)} \quad (60)$$

где

f_w - часть поверхности, увлажненной орошением или дождями [0-1],

K_{c ini (табл., рис.)} – значение K_{c ini}, взятое из табл. 12 или рис. 29 или 30.

Кроме того, в выборе рисунка для дальнейшего использования (т. е. рис. 29 или 30), средняя глубина инфильтрации, выраженная в миллиметрах по всей поверхности поля, должна делиться на f_w для того, чтобы представить действительную глубину инфильтрации воды увлажненной части поверхности (рис. 31):

$$I_w = \frac{I}{f_w} \quad (61)$$

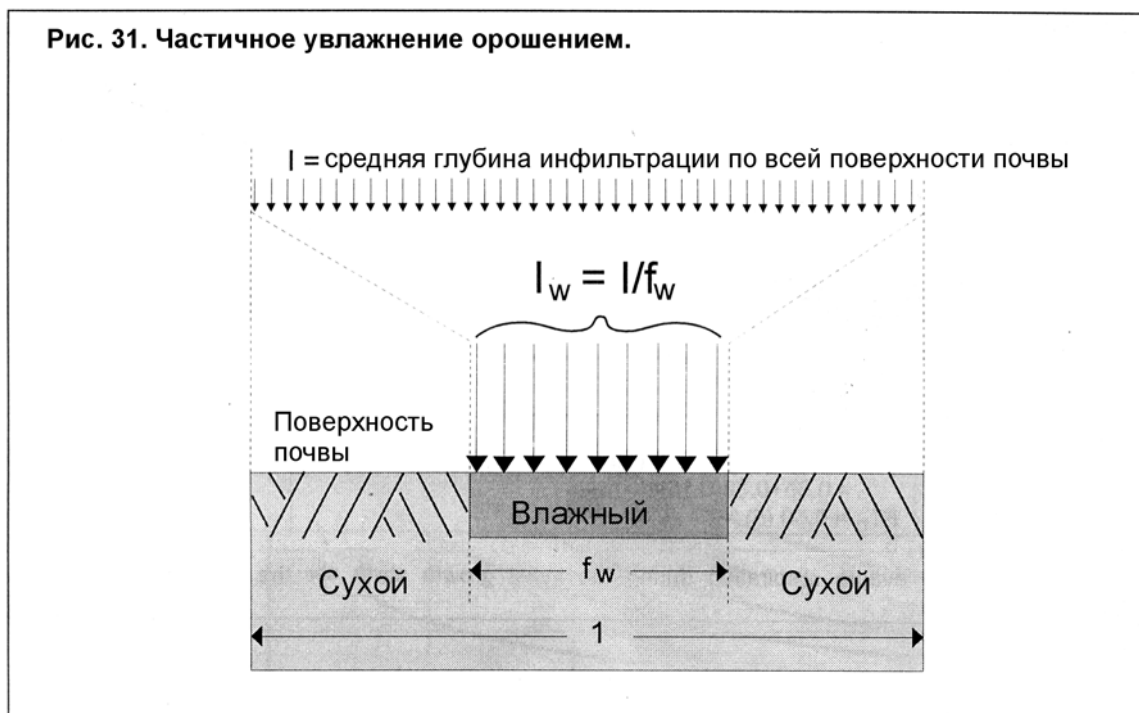
где

I_w - глубина полива увлажненной части поверхности [мм];

f_w - часть поверхности, увлажненной орошением;

I - глубина орошения поля [мм].

Когда в течение начального периода происходит одновременно орошение части поверхности почвы и выпадение атмосферных осадков над всей поверхностью почвы, f_w должна представлять взвешенное значение f_w для каждого типа увлажнения, в соответствии с глубиной инфильтрации для каждого типа.



ПРИМЕР 26			
Определение K_{c ini} частичного увлажнения поверхности почвы			
Определить эвапотранспирацию культуры из примера 24, когда применяется капельное орошение каждые два дня (12 мм выражают эквивалентную глубину по всей площади поля), когда средняя часть увлажненной поверхности равна 0,4 и во время начального периода выпадение атмосферных осадков скудное или отсутствует вообще.			
Средняя глубина инфильтрации на каждый случай в увлажненной части поверхности:			
Из ур-я 61:	$I_w = I / f_w = 12 \text{ мм} / 0,4 =$	30	мм
Следовательно, можно интерполировать между рис. 29, представляющим случаи легкого увлажнения (~ 10 мм на каждый случай) и рис. 30, представляющим средне-текстурные почвы и случаи большого увлажнения (~ 40 мм на случай).			
Рис 29 представляет Рис. 30 представляет Из ур-я 59:	ET _o = 4 мм/сут и двухдневный интервал увлажнения: K _{c ini} = 0,85 K _{c ini} = 1,15 K _{c ini} = 0,85 + [(30 - 10)/(40 - 10)] (1,15 - 0,85) =	4 - 0,85 1,15 1,05	мм/сут - - - -
Поскольку часть поверхности почвы, увлажняемая системой капельного орошения, равна 0,4, действительное K _{c ini} при капельном орошении рассчитывается следующим образом:			
Из ур-я 60:	K _{c ini} = f _w K _{c ini рис} = 0,4 (1,05) =	0,42	-
-	Это значение (0,42) представляет K _{c ini} как использованное для всей площади поля, ET _c = K _{c ini} ET _o = 0,42 (4) =	1,7	мм/сут
Средняя эвапотранспирация культуры в начальной стадии роста для культур, орошаемых капельным способом, равна 1,7 мм/сут.			

K_{c ini} для деревьев и кустарников

K_{c ini} для деревьев и кустарников должен отражать состояние грунта до появления листьев для деревьев или кустарников, теряющих на зиму листву, и состояние грунта во время зимнего покоя или периода низкой активности – для вечнозеленых деревьев и кустарников. K_{c ini} зависит от травяного покрова или сорняков, частоты увлажнения почвы, плотности насаждения деревьев и плотности мульчи. Для деревьев, теряющих на зиму листву в условиях безморозного климата, K_{c ini} может достигать до 0,8-0,9, где существует травяной покров и 0,3-0,4 - там, где поверхность земли обнажена и увлажнение применяется редко. K_{c ini} для вечнозеленых садов с периодом зимнего покоя мало отличается от K_{c mid}, как показано для цитрусовых в табл. 12, сносках 21 и 22. Для деревьев с кроной, покрытых на 50 % и менее, K_{c ini} также отражает состояние земельного покрова (обнаженная почва, мульча или хороший травяной или сорняковый покров).

K_{c ini} для риса-сырца

При выращивании риса на рисовых полях с глубиной воды 0,10-0,20 м, ET_c во время начальной стадии, главным образом, заключается в испарении стоячей воды. K_{c ini} должен регулироваться в соответствии с местными условиями, как показано в табл. 14.

ТАБЛИЦА 14
 $K_{c\ ini}$ риса при различных климатических условиях

Влажность	Скорость ветра		
	слабая	умеренная	сильная
Аридный–полу-аридный	1,10	1,15	1,20
Суб-влажный – влажный	1,05	1,10	1,15
Очень влажный	1,00	1,05	1,10

Коэффициент культур стадии середины сезона ($K_{c\ mid}$)

Иллюстрация климатического воздействия

Типичные значения коэффициента культур для стадии роста середины сезона $K_{c\ mid}$ приведены в таблице 12 для различных сельскохозяйственных культур.

Как обсуждалось в главе 5, влияние различий в аэродинамических свойствах между травяной поверхностью и сельскохозяйственными культурами заключается не только в специфике культур, но также в различиях климатических условий и в высоте культур (рис. 21). Более засушливый климат и более ветреные условия будут давать более высокие значения $K_{c\ mid}$. Более влажный климат и более низкая скорость ветра будут давать более низкие значения $K_{c\ mid}$.

Соответствующее влияние климата на $K_{c\ mid}$ показано на рис. 23, где значения, взятые из табл. 12, демонстрируют различные типы климата, среднюю дневную скорость ветра и различную высоту культур. В качестве примера в приложении 4 даны различия $K_{c\ mid}$ для томатов в зависимости от региональных климатических условий.

Определение $K_{c\ mid}$

Для специальной калибровки по климатическим условиям, где RH_{\min} отличается от 45 % или где u_2 больше или меньше 2,0 м/с, значения $K_{c\ mid}$, взятые из табл. 12, установлены следующим образом:

$$K_{c\ mid} = K_{c\ mid\ (Табл)} + [0,04 (u_2 - 2) - 0,004 (RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (62)$$

где

$K_{c\ mid\ (табл)}$ - значение $K_{c\ mid}$, взятое из табл. 12;

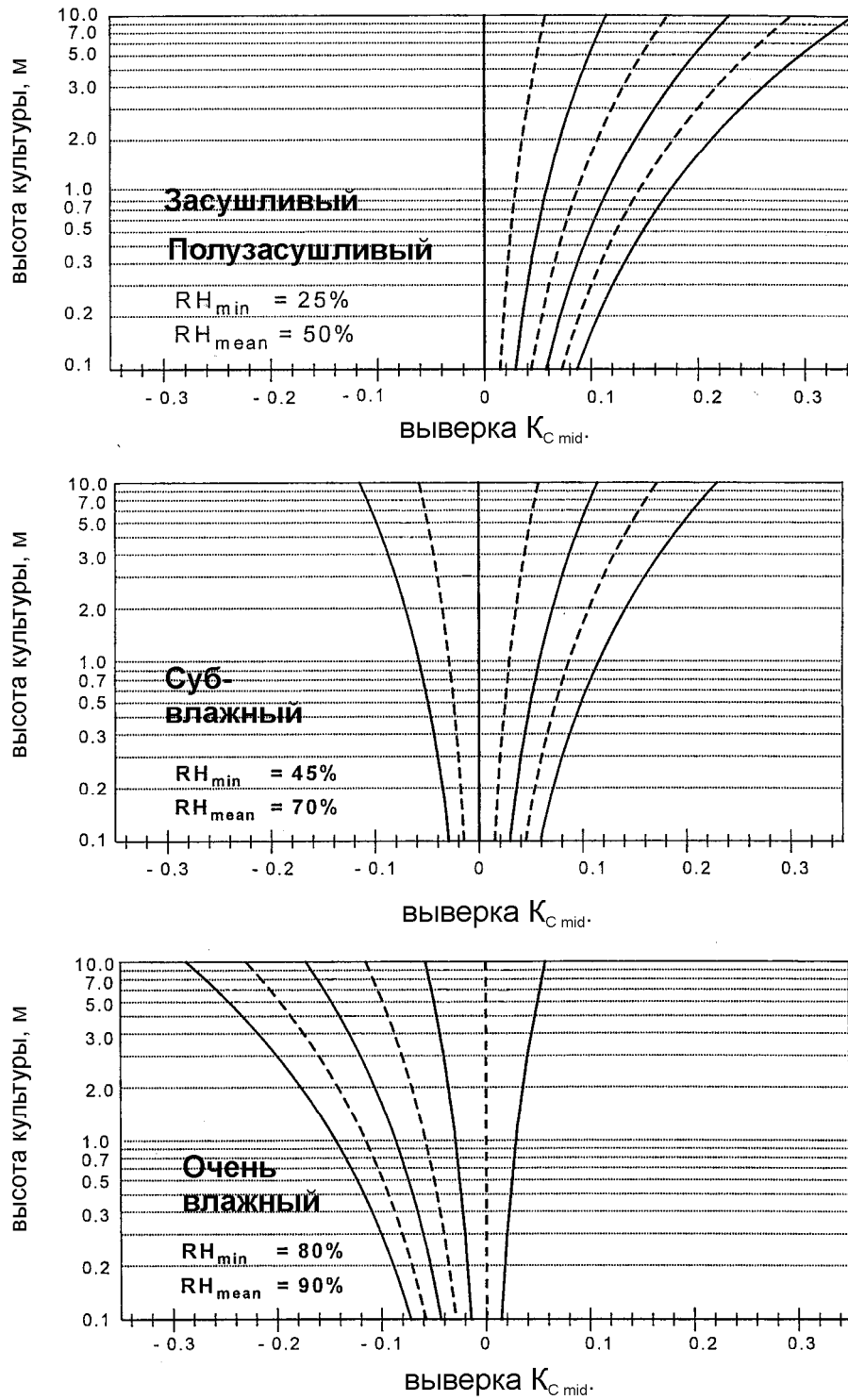
u_2 - среднее значение дневной скорости ветра на высоте 2 м от травы во время стадии роста в середине сезона [$м\ с^{-1}$], для $1\ м\ с^{-1} \leq u_2 \leq 6\ м\ с^{-1}$,

RH_{\min} - среднее значение дневной минимальной влажности в течение стадии роста в середине сезона (%), для $20\ \% \leq RH_{\min} \leq 80\ \%$,

h - средняя высота растения во время стадии середины сезона [м] для $0,1\ м < h < 10\ м$.

Значения $K_{c\ mid}$, определенные из уравнений 62 и 65, являются средними для периодов середины сезона и позднего сезона. Значения параметров u_2 и RH_{\min} должны приниматься за средние величины этих периодов (см. пример, приложение 8). Должны быть рассмотрены ограничения параметров u_2 и RH_{\min} , и h .

Рис. 32. Выверка (дополнительно) значений $K_{C\text{mid}}$ из табл.12 для культур различной высоты и среднесуточной скорости ветра (u_2) для различных условий влажности.



БОКС 14**Демонстрация влияния климата на $K_{c\ mid}$ для зерновых культур в полевых условиях**

Из табл. 12 значение для пшеницы $K_{c\ mid} = 1,15$ и $h = 1,0$ м

Для условий полусухливого и засушливого периода

- сильный ветер (4 м/с) $K_{c\ mid} = 1,15 + 0,10 = 1,25$
- умеренный ветер (2 м/с) $K_{c\ mid} = 1,15 + 0,05 = 1,20$
- спокойный ветер (1 м/с) $K_{c\ mid} = 1,15 + 0,00 = 1,17$

Для суб-влажного климата

- сильный ветер (4 м/с) $K_{c\ mid} = 1,15 + 0,05 = 1,20$
- умеренный ветер (2 м/с) $K_{c\ mid} = 1,15 + 0,00 = 1,15$
- спокойный ветер (1 м/с) $K_{c\ mid} = 1,15 - 0,05 = 1,12$

Для влажного и очень влажного климата

- сильный ветер (4 м/с) $K_{c\ mid} = 1,15 - 0,05 = 1,10$
- умеренный ветер (2 м/с) $K_{c\ mid} = 1,15 - 0,10 = 1,05$
- спокойный ветер (1 м/с) $K_{c\ mid} = 1,15 - 0,15 = 1,02$

В зависимости от степени засушливости климата и ветровых условий коэффициент культур для пшеницы в стадии середины сезона меняется от 1,02 (влажный и безветрие) до 1,25 (засушливый и сильный ветер).

Когда у пользователя нет возможности произвести расчет с использованием экспоненциальной функции, выражение $(h/3)^{0,3}$ может быть заменено на $[h/3^{0,5}]^{0,5}$, с использованием квадратного корня.

Использование RH_{min} предпочтительней, чем RH_{mean} , так как проще аппроксимировать RH_{min} из T_{max} , в случаях, если нет соответственных данных о влажности. Кроме того, при общих условиях, когда T_{min} достигает T_{dew} (т. е. $RH_{max} \approx 100\%$), дефицит давления пара ($e_s - e_a$), с e_s из уравнения 12 и e_a из уравнения 17, соответствует $[(100 - RH_{min})/200] e^0(T_{max})$, $e^0(T_{max})$ - это давление пара насыщения при максимальной суточной температуре воздуха. Это означает, что RH_{min} лучше отражает влияние дефицита давления пара по K_c , чем это делает RH_{mean} .

RH_{min} рассчитывается на основе суточных или среднемесячных данных:

$$RH_{min} = \frac{e^0(T_{dew})}{e^0(T_{max})} 100 \quad (63)$$

где T_{dew} - средняя температура точки росы и T_{max} - средняя ежедневная максимальная температура воздуха во время стадии роста в середине сезона. Когда температура точки росы или другие гидрометрические данные недоступны или сомнительного качества, RH_{min} может быть рассчитана путем замены средней суточной минимальной температуры воздуха T_{min} на T_{dew}^1 . В этом случае:

$$RH_{min} = \frac{e^0(T_{min})}{e^0(T_{max})} 100 \quad (64)$$

¹ В случае аридного или полу-аридного климата T_{min} в уравнении 64 должна быть откорректирована, как показано в приложении 6 (уравнение 6-6), вычитанием $2^{\circ}C$ из среднего значения T_{min} .

Для стадии роста в середине сезона требуются только приблизительные значения u_2 и RH_{\min} . Поскольку уравнение 62 не очень чувствительно к этим значениям, каждый 1 м/с изменения u_2 и каждые 10 % изменений в RH_{\min} для культур высотой 3 м вызывают изменения на 0,04. В главе 3 даны измерения и расчеты при отсутствии данных ветра и влажности. Для нахождения значений скорости ветра на высоте 2 м над травой при измерениях на других высотах используют уравнение 47. Когда нет доступных данных по u_2 и RH_{\min} , можно использовать общую классификацию скорости ветра и влажности из табл. 15 и 16.

ТАБЛИЦА 15
Эмпирические расчеты ежемесячных данных скорости ветра

Описание	Среднемесячная скорость ветра на высоте 2 м
Слабый ветер	... ≤ 1,0 м/с
Ветер от слабого до умеренного	2,0 м/с
Умеренный-сильный ветер	4,0 м/с
Сильный ветер	... ≥ 5,0 м/с
Основные условия	2 м/с

ТАБЛИЦА 16
Типичные значения RH_{\min} в сравнении с RH_{mid} для основных климатических классификаций

Классификация климата	RH_{\min} , (%)	RH_{mid} , (%)
Аридный	20	45
Полуаридный	30	55
Суб-аридный	45	70
Влажный	70	85
Очень влажный	80	90

Уравнение 62 действительно для растений средней высотой до 10 м. Растения высотой меньше 0,1 м аэродинамически будут вести себя также как эталонная трава и уравнение 62 в этом случае не используется. Типичные значения высоты для различных культур показаны в табл. 12. Однако, средняя высота растений будет сильно меняться с многообразием культур и практикой культивирования. Следовательно, по возможности, h должна определяться на основе полевых исследований. Однако присутствие показателя степени 0,3 в уравнении 62 делает такие уравнения относительно нечувствительными к небольшим погрешностям значений, используемых для определения h . В целом, для периода середины сезона используется единое значение h .

Регулирование частоты увлажнения

Частота увлажнения влияет меньше на $K_{c \text{ mid}}$, чем на $K_{c \text{ ini}}$, так как растительность в этот период, как правило, полностью покрывает землю, так что влияние поверхностного испарения на K_c мало. При частом орошении культур (чаще, чем каждые 3 дня) и когда $K_{c \text{ mid}}$ из табл. 12 меньше 1,0, значение может заменяться приблизительно на 1,1-1,3 для учета комбинированного влияния постоянно увлажняемой почвы, испарения и неравномерной растительности, особенно, когда система увлажняет большую часть поверхности почвы ($f_w > 0,3$).

ПРИМЕР 27**Определение $K_{c\ mid}$**

Расчет $K_{c\ mid}$ для маисовых культур около Тайбея, Тайвань, и Мохи, Йемен. Средняя ежедневная скорость ветра (u_2) в середине сезона в Тайбее около 1,3 м/с и минимальная относительная влажность (RH_{\min}) во время этого периода составляет в среднем 75 %. Средняя u_2 в середине сезона около Мохи составляет 4,6 м/с, а RH_{\min} – 44 %.

Из табл.12 значение $K_{c\ mid}$ равно 1,20 для маиса. Значение h из табл. 12 – 2 м. Используем уравнение 62.

Для Тайбея (влажный климат):

$$K_{c\ mid} = 1,20 + [0,04 (1,3 - 2) - 0,004 (75 - 45)] \left(\frac{2}{3}\right)^{0,3} = 1,07$$

Для Мохи (аридный климат)

$$K_{c\ mid} = 1,20 + [0,04 (4,6 - 2) - 0,004 (44 - 45)] \left(\frac{2}{3}\right)^{0,3} = 1,30$$

Средний коэффициент культур, прогнозируемый в середине сезона, равен 1,07 для Тайбея и 1,30 для Мохи.

Коэффициент культур для конца стадии позднего сезона ($K_{c\ end}$)

Типовые значения коэффициента культур для конца стадии роста позднего сезона $K_{c\ end}$ для различных сельскохозяйственных культур перечислены в таблице 12. Значения, данные для $K_{c\ end}$, отражают практику управления водой и культурами применительно к этим культурам. Если культура орошается часто до сбора урожая, поверхность земли остается влажной и $K_{c\ end}$ будет соответственно высоким. С другой стороны, культуры, которые созрели и высыхают в поле до сбора урожая, в течение стадии позднего сезона получают воды меньше или не орошаются вообще. В результате чего поверхность почвы и растительность сухие и значение для $K_{c\ end}$ будет соответственно низким (рис. 33).

Когда местное управление водой и практика выбора времени для сбора урожая отклоняются от типовых значений, представленных в табл. 12, пользователь должен отрегулировать значения для $K_{c\ mid}$. Некоторые указания по регулировке значений $K_{c\ end}$ для частоты увлажнения представлены в главе 7. Для досрочного сбора урожая пользователь может построить кривую K_c , используя значение $K_{c\ end}$ из табл. 12 и продолжительность позднего сезона, типичную для нормальной даты сбора урожая, затем завершив использование построенной кривой в соответствии со временем раннего сбора урожая.

Значения $K_{c\ end}$ в табл. 12 являются типичными для среднего $K_{c\ end}$ в стандартных климатических условиях. В условиях более сухого климата и большей скорости ветра значения $K_{c\ end}$ будут выше. В условиях более влажного климата и скорости ветра значения $K_{c\ end}$ будут ниже. Для особого регулирования при климате, где RH_{\min} отличается от 45 % или где u_2 больше или меньше чем 2,0 м/сек, можно использовать уравнение 65:

$$K_{c\ end} = K_{c\ end\ (табл)} + [0,4 (u_2 - 2) - 0,004 (RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (65)$$

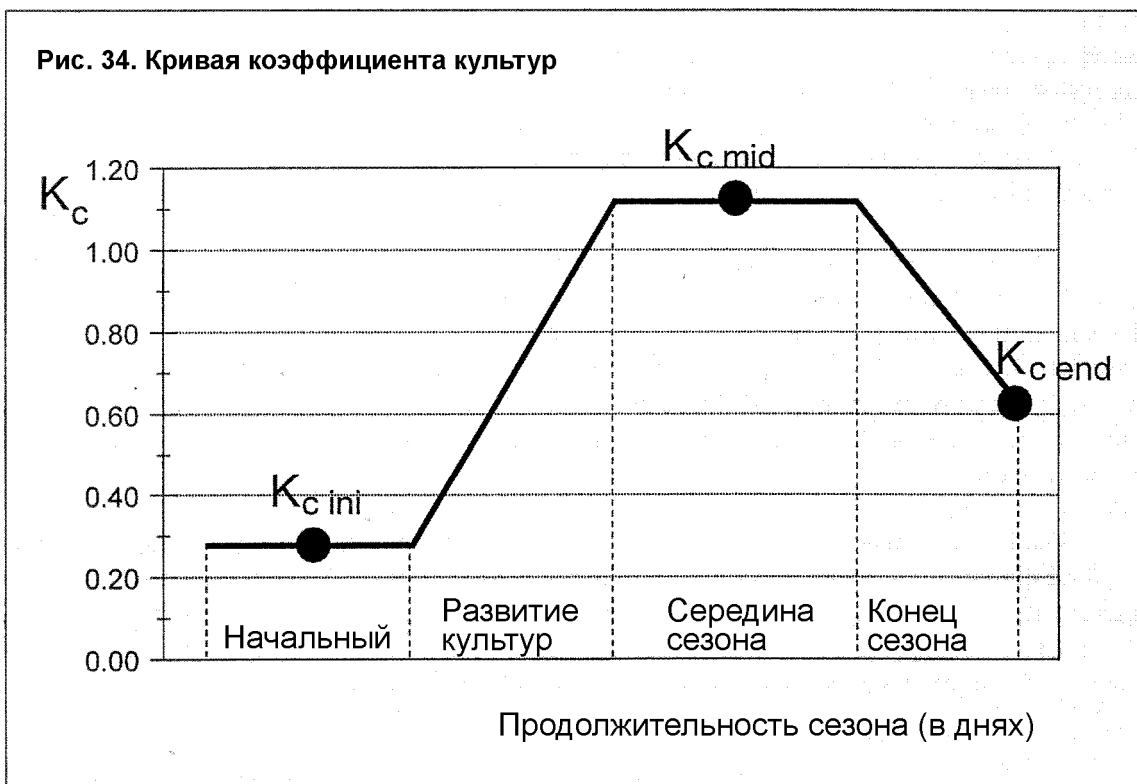
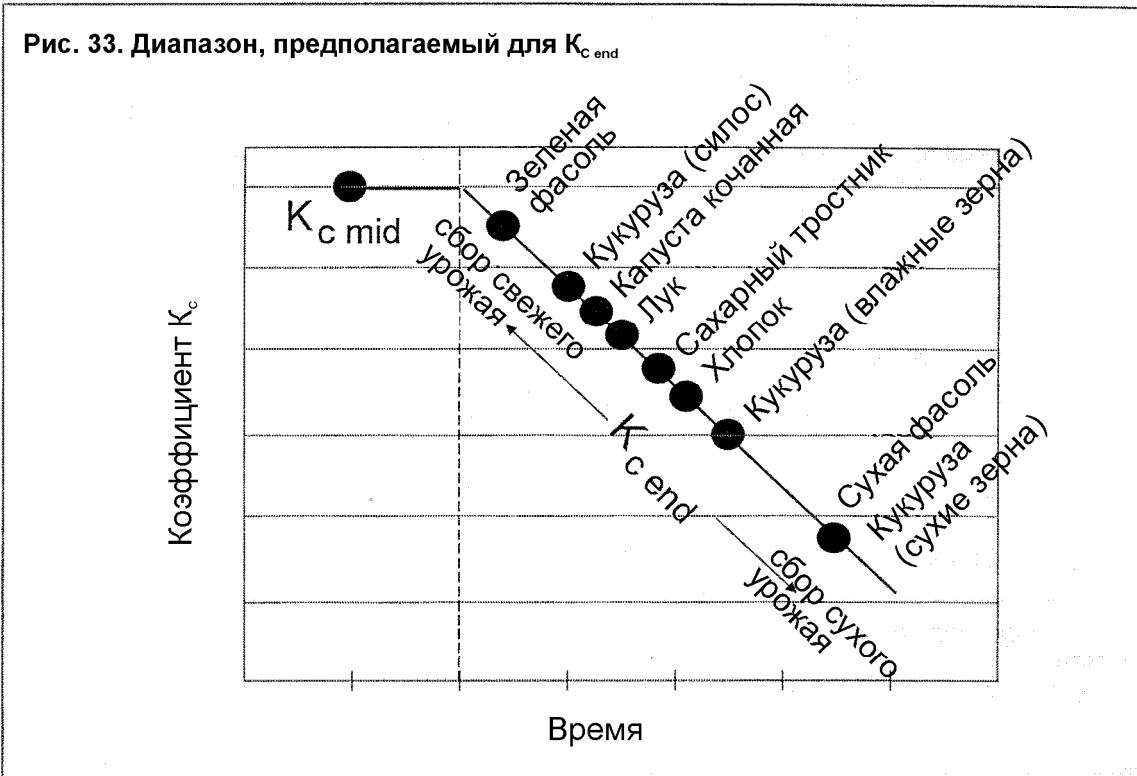
где

$K_{c\ end\ (табл)}$ - значение $K_{c\ end}$, взятое из табл. 12,

u_2 - среднее значение суточной скорости ветра на высоте 2 м над травой во время стадии роста в конце сезона [$м\ с^{-1}$], для $1\ м\ с^{-1} \leq u_2 \leq 6\ м\ с^{-1}$;

RH_{\min} - среднее значение для суточной минимальной относительной влажности во время конечного сезона [%], для $20\ \% \leq RH_{\min} \leq 80\ \%$;

h - средняя высота растения во время конца сезона [м], для $0,1\ м \leq h \leq 10\ м$.



Уравнение 65 используется только тогда, когда табличные значения $K_{c\text{ end}}$ превышают 0,45. Уравнение уменьшает значение $K_{c\text{ end}}$ с увеличением RH_{min} . Уменьшение в $K_{c\text{ end}}$ характеризует культуры, убираемые "зелеными" или до увядания и высыхания (т. е. $K_{c\text{ end}} \geq 0,45$).

Регулировка не требуется при $K_{c\text{ end (табл)}} < 0,45$ (т. е. $K_{c\text{ end}} = K_{c\text{ end (табл)}}$). Если допускается увядание и высыхание культур в поле (как это видно при $K_{c\text{ end}} < 0,45$), u_2 и RH_{min} меньше влияют на $K_{c\text{ end}}$ и в выверке нет необходимости. По сути, $K_{c\text{ end}}$ может уменьшаться с уменьшением RH_{min} для культур, созревших и сухих во время сбора урожая, поскольку пониженная относительная влажность способствует высыханию.

ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ K_c

Однолетние культуры

Для описания и построения кривой K_c требуется всего три точечных значения K_c . Кривая (так, как она изображена на рис. 34) построена следующим образом:

1. Вегетационный период следует разделить на четыре основных стадии роста, характеризующих фенологию культур или развитие (начальная, развитие культур, середина сезона и стадия конца сезона), определить продолжительность стадий роста и установить три значения K_c , соответствующих $K_{c\text{ ini}}$, $K_{c\text{ mid}}$ и $K_{c\text{ end}}$ из табл. 12.

2. Значение K_c корректируется по частоте увлажнения и/или климатическим условиям стадий роста, как описано в предыдущей части.

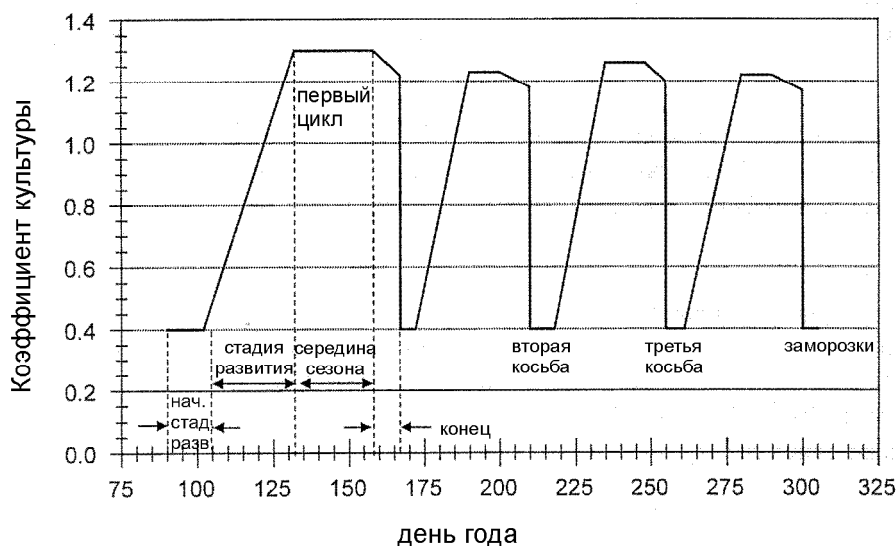
3. Кривая K_c строится путем соединения отрезков прямых, проходящих через каждую из четырех стадий роста. Горизонтальные линии изображают $K_{c\text{ ini}}$ в начальной стадии и продолжение $K_{c\text{ mid}}$ в середине сезона. Диагональные линии изображают переход от $K_{c\text{ ini}}$ к $K_{c\text{ mid}}$ в течение стадии развития культур и переход $K_{c\text{ mid}}$ к $K_{c\text{ end}}$ в течение стадии конца сезона.

Кривые K_c для фуражных культур

Многие культуры, предназначенные для фуража и сена, убираются несколько раз во время вегетационного сезона. Каждый сбор урожая завершает "суб"-период вегетации и связанную с ним кривую K_c и начинает новый "суб"-период и кривую K_c . Результирующая кривая K_c для полного вегетационного периода является агрегацией серии кривых K_c , связанных с каждым "суб"-периодом. Рисунок 35 представляет кривую K_c для полного вегетационного периода, построенную для люцерны, выращенной на сене в южном Айдахо.

При климате южного Айдахо образование листы начинается весной и длится около 90 дней в году. Культуру обычно убирают (срезают) на сено три-четыре раза за время вегетационного периода. Следовательно, рис. 35 показывает четыре суб-цикла K_c или сенокосных цикла: суб-цикл-1 - после появления листы весной и три дополнительных суб-цикла K_c при сенокосе. Косьба культур приводит к 10 %-му вегетационному покрову. 1 цикл косьбы продолжительнее 2, 3 и 4-го циклов благодаря низким температурам воздуха и почвы во время этого периода, что сокращает нормы роста культур. Продолжительность 1 цикла сенокоса для первого появления люцерны ("1-й цикл косьбы") взята из табл. 11 для Айдахо, США (10/30/25/10). Продолжительность 2, 3 и 4-го циклов для люцерны взята из табл. 11 для "периодов индивидуальной косьбы" применительно к Айдахо, США (5/20/10/10). Продолжительность основана на наблюдениях. В климатических условиях южного Айдахо морозы иногда ограничивают вегетационный период осенью, обычно длящийся 280-290 дней в году (с начала года до середины октября).

Рис. 35. Кривая K_c, построенная для люцерны в южном Айдахо, Соединенные Штаты, с использованием значений из табл. 11 и 12 и выверенная с помощью уравнений 62 и 65. (data from Wright, 1990 г.)



Значения K_c в середине каждого цикла сезона косьбы показаны на рис. 35. Они меняются от цикла к циклу из-за влияния регулируемых значений $K_{c\text{ mid}}$ и $K_{c\text{ end}}$ для каждого цикла скашивания из уравнения 62 и 65. В этих уравнениях значения u_2 и RH_{min} брались средними в течение середины сезона и последнего сезона в пределах каждого цикла скашивания. Основные кривые K_{cb} , подобные кривым на рис. 35, могут быть построены для фуражных культур по процедурам, представленным в главе 7.

K_{c mid} при усредненном влиянии периодов индивидуальной косьбы

При некоторых условиях пользователь может пожелать усреднить влияние косьбы на фуражные культуры во время вегетационного периода. Когда влияние косьбы берется средним, требуются единые значения для $K_{c\text{ mid}}$ и кривой K_c для всего вегетационного периода. В таком случае строится "нормальная" кривая K_c , как на рис. 25, где показан только период середины сезона для фуражных культур. $K_{c\text{ mid}}$ за весь этот период должен усреднить влияния сенокоса или сбора урожая. Значение, используемое для $K_{c\text{ mid}}$, следовательно, является средним значением кривой K_c для периода, начиная с первого озеленения и заканчиваясь в начале последнего заключительного сезона перед зимним покоем или морозом. Значение, используемое для $K_{c\text{ mid}}$ в таких усредненных условиях, может составлять около 80 % кривой K_c , которая представляет полное покрытие земли. Эти усредненные значения $K_{c\text{ mid}}$ для всего сезона представлены в табл. 12. Например, для люцерны, выращиваемой на сено, усредненное сезонное значение $K_{c\text{ mid}}$ составляет 1,05; отметим, что $K_{c\text{ mid}}$ для периода индивидуальной косьбы равен 1,20.

Фруктовые деревья

Значения коэффициента культур в течение середины и конца сезона даны в табл. 12. Как упоминалось выше, перечисленные значения K_c являются значениями для стандартных климатических условий и требуют выверки, используя уравнения 62 и 65, где u_2 и RH_{min} отли-

чаются. Поскольку стадии середины и конца сезона для лиственных деревьев достаточно длительные, специфичная выверка K_c применительно к RH_{\min} и u_2 должна учитывать меняющиеся климатические условия во время сезона. Поэтому зачастую требуется несколько выверок K_c , т. е. весной, летом, осенью или во влажные и сухие сезоны. $K_{c\ ini}$ и $K_{c\ end}$ для вечнозеленых деревьев и кустарников часто не отличаются там, где климатические условия не меняются, как это случается в тропическом климате. Следовательно, в таких условиях не требуется сезонная выверка, так как изменение ET_c зависит, главным образом, от изменений ET_o .

РАСЧЕТ ET_c

На основе кривой коэффициента культуры можно графически или численно определить значение K_c для любого периода роста. После выведения значения K_c эвапотранспирацию культур ET_c можно вычислить путем умножения значений K_c на соответствующие значения ET_o .

Графическое определение K_c

Еженедельные, декадные или ежемесячные значения K_c необходимы, когда расчет ET_c делается на те же периоды времени. Основная процедура - это построение кривой K_c продолжительностью в неделю, декаду или месяц и получение графическим способом значений для рассматриваемого периода (рис. 36). Допущение, что все месяцы состоят из трех декад, способствует получению K_c и введению небольшой ошибки в расчет ET_o .

Построенная в боксе 15 кривая K_c была использована для построения кривой на рис. 36. Эта кривая соответствует продолжительности всех декад. Были использованы значения K_c 0,15, 1,19 и 0,35 и действительные продолжительности стадий роста, равные 25, 25, 30 и 20 дням. Культуры были посажены в начале последней декады мая и убраны спустя 100 дней в конце августа.

Для всех декад значения K_c могут быть получены из кривой. Значение в середине декады рассматривается как среднее K_c для этого 10-дневного периода. Только вторая декада июня, когда значение K_c резко меняется, требует некоторого расчета.

БОКС 15

Конкретное исследование культуры зрелой фасоли в Кимберли, штат Айдахо, США (единный коэффициент культуры)

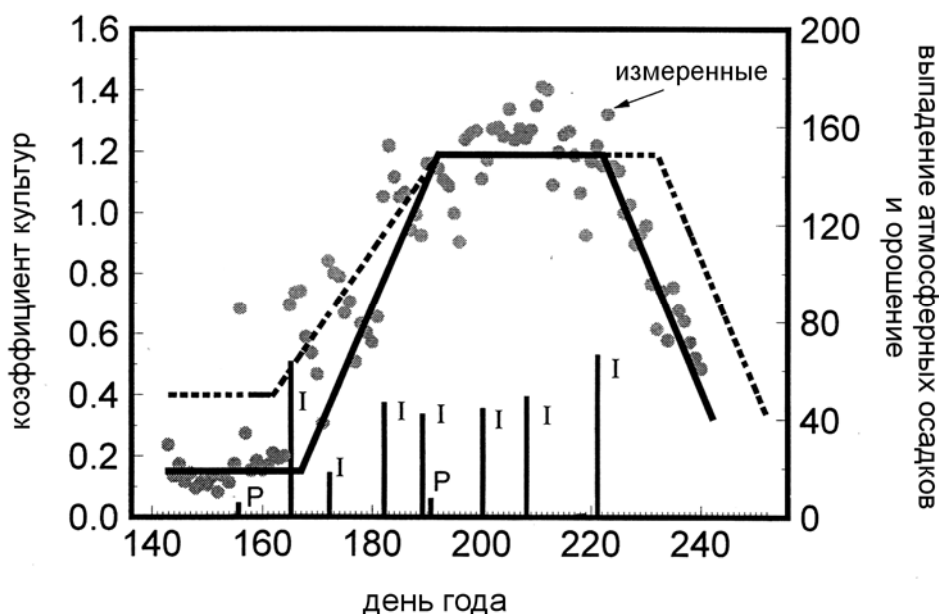
Пример использования процедуры K_c для условий средней влажности почвы представлен для культуры зрелой фасоли, посаженной 23 мая 1974 г. в Кимберли, Айдахо, США (42,4° с. ш.). Продолжительность стадий начального, развития, среднего и последнего сезонов взяты из табл. 11 для континентального климата - 20, 30, 40 и 20 дней (продолжительность стадий для южного Айдахо не была использована в этом примере для того, чтобы продемонстрировать только примерную точность значений из табл. 11, когда значения для конкретного местоположения недоступны). Первоначальные значения $K_{c\ ini}$, $K_{c\ mid}$ и $K_{c\ end}$ выбраны из табл. 12 как 0,4, 1,15 и 0,35.

Средние RH_{\min} и u_2 для середины сезона и конца сезона составляли 30 % и 2,2 м/сек. Максимальная высота, предложенная в табл. 12 для зрелой фасоли, равна 0,4 м. Следовательно, $K_{c\ mid}$ после выверки с использованием уравнения 62 составляет:

$$K_{c\ mid} = 1,15 + [0,4 (2,2 - 2) - 0,004 (30 - 45)] \left(\frac{0,4}{3} \right)^{0,3} = 1,19$$

Так как $K_{c\ end} = 0,35$, т. е. меньше, чем 0,45, выверка не требуется. Значение $K_{c\ mid}$ незначительно расходится с табличным, поскольку $u_2 \approx 2$ м/сек, RH_{\min} только на 15 % ниже, чем 45 %, представленные в табл. 12 и высота фасоли относительно небольшая. В целях планирования начального сезона можно изобразить кривую начального K_c для зрелой фасоли в Айдахо, как показано на графике (пунктирной линией), где $K_{c\ ini}$, $K_{c\ mid}$ и $K_{c\ end}$ равны 0,4, 1,19 и 0,35, а продол-

жительность четырех стадий роста - 20, 30, 40 и 20 дней. Следует отметить, что $K_{c\ ini} = 0,4$, взятый из табл. 12, используется только для первоначального, приблизительного расчета $K_{c\ ini}$.



Построенные на основе значений из табл.11 и 12 кривые K_c (пунктирная линия) и модифицированного $K_{c\ ini}$ из рис. 29 и $L_{ini} = 25$, $L_{dev} = 25$, $L_{mid} = 30$, $L_{late} = 20$ дней (жирная линия) для зрелой фасоли в Кимберли, штат Айдахо. Показан также K_c , измеряемый ежедневно (данные лизиметра Райта, 1990)

$K_{c\ ini}$ можно рассчитать точно, используя метод, описанный в этой главе. ET_o в начальный период в Кимберли (конец мая - начало июня, 1974) была в среднем 5,3 мм/сут, а интервал увлажнения в этот период был примерно равен 14 дням (2 дождя в среднем по 5 мм). Поскольку дожди были слабыми (< 10 мм каждый), использовался рис. 29. Структура почвы в Кимберли, Айдахо - бурый суглинок. Из рис. 29 $K_{c\ ini}$ для интервала между увлажнениями в 14 дней и $ET_o = 5,3$ мм/сут составляет 0,15. Это значение значительно ниже основного значения 0,4 из табл. 12 и подчеркивает потребность в использовании местных данных об осадках и орошении при определении $K_{c\ ini}$.

Сравнение построенных кривых с измерениями

Поскольку данные ET_o для зрелой фасоли в Кимберли, штат Айдахо, были измерены с помощью точной лизиметрической системы в течение 1974 г. Райтом (1990), измерения K_c можно сравнить с построенными кривыми K_c , где действительный K_c был вычислен путем деления данных лизиметрических измерений ET_c на ET_o , рассчитанную ежедневно по уравнению Пенмана-Монтейта.

Как показано на графике, продолжительность середины сезона, взятая из табл. 11 для континентального климата, превышала действительную продолжительность середины сезона для зрелой фасоли в южном Айдахо и равна в среднем 30 дням, что предпочтительнее 40 дней, как было предложено в табл. 11. Это иллюстрирует предпочтение использования местных наблюдений перед значениями из табл. 11.

В конечном счете, наилучший расчет кривой K_c для зрелой фасоли в южном Айдахо вычерчен пунктиром (нижняя кривая в графике) на основе значений K_c 0,15; 1,19 и 0,35, а реальная продолжительность стадий равна 25, 25, 30 и 20 дням. Следует отметить влияние ошибки при расчете продолжительности середины сезона в области кривой K_c , что поддерживает мнение о необходимости местных наблюдений за сроками и продолжительностью стадий роста.

Значение, рассчитанное для $K_{c\ mid}$ (1,19), оказывается выше измеренного значения K_c в течение

каких-то отрезков времени периода середины сезона в Кимберли. Такой эффект имел место из-за влияния, возросшего испарения воды из почвы после четырех поливов в середине сезона 1974 г., что повысило эффективный K_c . Это показано в боксе 16, куда включен и продемонстрирован основной метод $K_{cb} + K_e$ для таких примеров.

Значение 0,15, рассчитанное для $K_{c\ ini}$ с использованием ур-я 29, тесно согласовано с K_c , измеренным в начальный период. K_c , измеренный в период развития, превышает окончательную кривую K_c во время или вслед за увлажнением. Ежедневные изменения в лизиметре, измеряющем K_c , считаются нормальными и вызваны изменениями в погоде, направлении ветра, ошибками в прогнозировании R_n и ET_o и случайными ошибками в лизиметрических измерениях и измерениях погоды.



В первые пять дней этой декады $K_c = 0,15$, хотя в течение второй части декады K_c варьирует от 0,15 до 0,36 в конце десятого дня. Средний K_c этой декады в результате равен: $5/10 (0,15) + 5/10 (0,15 + 0,36)/2 = 0,20$.

Численное определение K_c

Коэффициент K_c любого периода вегетационного сезона можно получить, принимая K_c начального и срединного сезонов постоянным и равным значению K_c стадии роста. В стадии развития культуры и стадии конца сезона K_c линейно колеблется между K_c конца предыдущего периода ($K_{c\ prev}$) и K_c начала следующей стадии ($K_{c\ next}$), являющимся $K_{c\ end}$ стадии конца сезона:

$$K_{c\ i} = K_{c\ prev} + \left[\frac{i - \sum(L_{prev})}{L_{stage}} \right] (K_{c\ next} - K_{c\ prev}) \quad (66)$$

где
i - количество дней вегетационного периода [1... продолжительность вегетационного периода];

K_{c i} - коэффициент культур по дням i;

L_{stage} - продолжительность исследуемой стадии (в днях);

Σ (L_{prev}) совокупность продолжительностей всех предыдущих стадий (в днях).

Уравнение 66 используется для всех четырех стадий.

ПРИМЕР 28			
Численное определение K_c			
Определить K _c на 20, 40, 70 и 95 день для культуры зрелой фасоли (рис. 36)			
стадия роста культуры		продолжительность (дни)	K _c
начальная		25	K _{c ini} = 0,15
развитие культуры		25	0,15 ... 1,19
середина сезона		30	K _{c mid} = 1,19
конец сезона		20	1,19 .. K _{c end} = 0,35
i = 20:	начальная стадия, K _c = K _{c ini} =		0,15 -
i = 40	стадия развития культуры,		
для:	Σ(L _{prev}) = L _{ini} =	25	дней
и:	L _{stage} = L _{dev} =	25	дней
из ур-я 66:	K _c = 0,15 + [(40 - 25)/25] (1,19 - 0,15) =	0,77	-
i = 70:	стадия середины сезона, K _c = K _{c mid} =		1,19 -
i = 95:	стадия конца сезона		
для:	Σ(L _{prev}) = L _{ini} + L _{dev} + L _{mid} = (25 + 25 + 30) =	80	дней
и:	L _{stage} = L _{late} =	20	дней
из ур-я 66:	K _c = 1,19 + [(95 - 80)/20] (0,35 - 1,19) =	0,56	-
Коэффициенты культур на 20, 40, 70 и 95 день для культуры зрелой фасоли составили 0,15, 0,77, 1,19 и 0,59, соответственно.			

КОЭФФИЦИЕНТЫ КУЛЬТУРЫ ЛЮЦЕРНЫ

Поскольку в разных частях мира используются два эталонных определения культуры (травы и люцерны), были разработаны две кривые K_c для сельскохозяйственных культур. Кривые K_c на основе люцерны по Wright (1981; 1982), кривые на основе травы по Pruitt (Doorenbos и Pruitt, 1977; Jensen, 1990) и которые указаны в этой статье. Пользователь должен проявить осторожность во избежание смешивания значений K_c травы с эталонным значением ET люцерны и наоборот. Обычно K_c, основанный на эталонном значении люцерны, может быть “преобразован” для использования с эталонным значением травы путем умножения на коэффициент варьирующийся от 1,0 до 1,3, в зависимости от климата (1,05 - для влажного, безветренного, 1,2 - для полу-аридного, умеренно ветреного, и 1,35 - для аридного, ветреного):

$$K_{c \text{ (трава)}} = K_{\text{ratio}} K_{c \text{ (люцерна)}} \quad (67)$$

где

$K_{c \text{ (трава)}}$ - на основе травы K_c (справочное значение),

$K_{c \text{ (люцерна)}}$ - на основе люцерны K_c ,

K_{ratio} - коэффициент преобразования (1,0 ... 1,3).

Эталонное соотношение преобразования может быть установлено для любого климата путем использования $K_{c \text{ mid}} = 1,20$, указанного для люцерны в таблице 12 и затем уточнения $K_{c \text{ mid}}$ для климата, используя уравнение 62. Например, по Кимберли, Айдахо, США, где $RH_{\text{min}} = 30 \%$ и $u_2 = 2,2$ м/с являются средними значениями для периода летних месяцев, эталонное соотношение преобразования между эталонными люцерной и травой с использованием уравнения 62 приблизительно равно:

$$K_{\text{ratio}} = 1,2 + [0,04 (2,2 - 2) - 0,003 (30-45)] \left(\frac{0,5}{3} \right)^{0,3} = 1,24 \quad (68)$$

где

$h = 0,5$ м - стандартная высота эталонной люцерны.

ВОЗМОЖНОСТЬ ПЕРЕНЕСЕНИЯ ПРЕДЫДУЩИХ ЗНАЧЕНИЙ K_c

Значения $K_{c \text{ mid}}$ и K_c , указанные в таблице 12, большей частью основаны на первоначальных значениях, представленных в публикациях ФАО по ирригации и дренажу № 24 и 33 (ФАО-24 и ФАО-33), с некоторым уточнением и пересмотром, отражающими последние результаты. Подобные уточнения в $K_{c \text{ mid}}$ компенсируют различия в аэродинамической шероховатости и площади листа, как представлено в уравнении 62, исходя из значений K_c , данных для различного состояния ветра и RH_{min} в отношении K_c по таблице из ФАО-24, с некоторыми уточнениями, чтобы лучше отразить увеличенные значения ЕТ при высоком ветре и низком RH_{min} с использованием уравнения Пенмана-Монтейта.

Значения K_c по ФАО-24 основывались первично на эталонной культуре травы. Уравнение Пенмана-Монтейта, используемое в этой публикации, представляет такую же стандартную эталонную культуру травы. По этой причине значения K_c в этих публикациях в целом отличаются не очень, за исключением высокого ветра и низкого RH_{min} .

Модифицированное уравнение Пенмана (ФАО-24) неоднократно давало ошибку до 25 % в определении ET_0 при высоком ветре и низкой эвапотранспирации и требовало частой существенной местной калибровки (глава 2). Значения K_c , взятые из изучения водопотребления растений, которые использовались в уравнении Пенмана для вычисления эвапотранспирации эталонной культуры травы, не могут быть использованы и требуют уточнения с использованием значения ET_0 , взятого из уравнения Пенмана-Монтейта. Аналогично этому, оценка требования растений на воду, основанная на модифицированном уравнении Пенмана (ФАО-24), должна быть откорректирована с целью обнаружения различий в эталонных уравнениях Пенмана (ФАО-24) и Пенмана-Монтейта.

Глава 7

ET_c - ДВОЙНОЙ КОЭФФИЦИЕНТ КУЛЬТУРЫ (K_c = K_{cb} + K_e)

Подобно главе 6, эта глава также связана с расчетом эвапотранспирации растениями (ET_c) в стандартных условиях, где нет ограничений на рост растений или эвапотранспирацию. Эта глава представляет процедуру прогноза влияния случайного увлажнения на значение коэффициента культуры K_c. Решение заключается в разделении K_c на два отдельных коэффициента, один - для транспирации растений, т. е. базовый коэффициент культур (K_{cb}) и другой - для испарения с почвы (K_e):

$$ET_c = (K_{cb} + K_t) ET_0 \quad (69)$$

Метод двойного коэффициента культуры более сложен, чем метод единого коэффициента культуры (K_c) (глава 6). Процедура проводится на суточной основе и адаптирована для использования компьютера. Рекомендуется следовать этому методу при необходимости оценки K_c, например, чтобы расписать поливы для индивидуальных полей по дням.

Процедура расчета эвапотранспирации культур ET_c состоит из:

1. Определения длительности стадий роста растений и отбора соответствующих коэффициентов K_{cb};
2. Уточнения отобранных коэффициентов K_{cb} в соответствии с климатическими условиями в течение стадии;
3. Построение кривой базового коэффициента культуры (позволяет определить значения K_{cb} в любой период в течение вегетационного периода);
4. Определения суточных значений K_e для поверхностного испарения;
5. Расчета ET_c в качестве результата по ET₀ и (K_{cb} + K_e).

КОМПОНЕНТ ТРАНСПИРАЦИИ (K_{cb} ET₀)

Базовый коэффициент культуры (K_{cb})

Базовый коэффициент культуры (K_{cb}) определен как отношение эвапотранспирации растений к эталонной эвапотранспирации (ET_c/ET₀), когда поверхность почвы сухая, но испарение происходит по потенциальной норме, т. е. вода не ограничивает испарение (рис. 22). Следовательно, 'K_{cb} ET' представляет первичный компонент испарения ET_c. K_{cb} ET включает компонент остаточного диффузионного испарения, поставляемого подпочвенной водой ниже сухой поверхности и подпочвенной водой из-под густой растительности.

Поскольку значения K_c в главе 6 включают осредненные значения испарения с поверхности почвы, значения K_{cb} лежат ниже значений K_c, как показано на рис. 26 и в отдельной таблице для значений K_{cb}. Рекомендованные значения K_{cb}, указанные в таблице 17, являются теми

же, что и для культур, указанных в таблице 12. В соответствии с таблицей 12, значения K_{cb} в таблице указаны для влажного климата с умеренной скоростью ветра. Для климата, где RH_{min} отличается от 45 % или где скорость ветра выше или меньше 2 м/с, значения $K_{cb\ mid}$ и $K_{cb\ end}$ выше чем 0,45 должны быть уточнены, используя следующее уравнение:

$$K_{cb} = K_{cb\ (табл)} + [0,04 (u_2 - 2) - 0,004 (RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (70)$$

где

$K_{cb\ (табл)}$ - значение $K_{cb\ mid}$ или $K_{cb\ end}$ (если $\geq 0,45$) из таблицы 17;

u_2 - среднее значение суточной скорости ветра на 2 м выше травы в течение стадии роста середины или конца сезона [$m\ c^{-1}$] для $1\ m\ c^{-1} \leq u_2 \leq 6\ m\ c^{-1}$;

RH_{min} - среднее значение суточной минимальной влажности в течение стадии роста для середины или конца сезона [%] для $20\% \leq RH_{min} \leq 80\%$;

h - средняя высота растения в течение середины или конца сезона [м] (из таблицы 12) для $20\% \leq Rh_{min} \leq 80\%$.

Для полного учета влияния климата и численного определения $K_{cb\ mid}$ и $K_{cb\ end}$, пользователь отсылается к главе 6.

Таблица 18 объединяет общие руководства, которые были использованы при извлечении значений K_{cb} из значений K_C указанных в таблице 17. Результаты проведенного местного исследования показали, что значения K_{cb} из таблицы 17 могут быть модифицированы, чтобы отразить влияние местных условий, культурной практики или разнообразия культур на K_{cb} . Однако, местные значения K_{cb} не должны отклоняться больше чем на 0,2 от значений в таблице 17. Большое отклонение должно стать сигналом к необходимости в дополнительном исследовании или оценке местной техники исследований, оборудования и культурной практики. При использовании местных значений K_{cb} , нет необходимости в уточнении климата с использованием уравнения 70.

ПРИМЕР 29

Отбор и уточнение базового коэффициента культур K_{cb}

Отберите $K_{cb\ ini}$ и $K_{cb\ end}$ для культуры зрелой фасоли из бокса 15.

$K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$ и $K_{cb\ end}$ могут быть отобраны непосредственно из таблицы 17 для зрелой фасоли 0,15 и 0,25. Уточнение по климату, используя уравнение 70:

$$K_{cb\ ini} = 0,15$$

$$K_{cb\ mid} = 1,10 + (0,04(2,2-2) - 0,004(30-45)) (0,4/3)^{0,3} = 1,14$$

$$K_{cb\ end} = 0,25 \quad (K_{cb} < 0,45)$$

Высота фасоли, взятая из таблицы 12, равна- 0,4м

Соответствующая кривая K_{cb} показана на рис. 37

ТАБЛИЦА 17

Базовый коэффициент культуры K_c для не угнетенных, ухоженных культур в суб-влажном климате ($RH_{\min} \approx 45\%$, $u_2 \approx 2$ м/с) для использования с ET_0 по Пенману-Монтейту.

Культура	$K_{cb\ ini}^1$	$K_{cb\ mid}^1$	$K_{cb\ end}^1$
а. Овощи	0,15	0,95	0,85
Брокколи		0,95	0,85
Капуста брюссельская		0,95	0,85
Капуста кочанная		0,95	0,85
Морковь		0,95	0,85
Капуста цветная		0,95	0,85
Сельдерей		0,95	0,85
Чеснок		0,90	0,60
Салат-латук		0,90	0,90
Лук - сухой		0,95	0,65
- зеленый		0,90	0,90
- семена		1,05	0,70
Шпинат		0,90	0,85
Редис		0,85	0,75
б. Овощи - семейство пасленовых	0,15	1,10	0,70
Баклажан		1,00	0,80
Перец сладкий (колокол)		1,00 ²	0,80
Помидор		1,10 ²	0,60-0,80
с. Овощи - семейство тыквенных	0,15	0,95	0,70
Дыня		0,75	0,50
Огурец - Овощной рынок		0,95 ²	0,70
- Сборка машиной		0,95	0,80
Тыква, Зимний кабачок		0,95	0,70
Кабачок, Цукини		0,90	0,70
Сладкая Дыня		1,00	0,70
Арбуз		0,95	0,70
д. Корневые и клубневые	0,15	1,00	0,85
Свекла,		0,95	0,85
Маниока - 1 год		0,70 ³	0,20
- 2 год		1,00	0,45
Пастернак		0,95	0,85
Картофель		1,10	0,65 ⁴
Батат		1,10	0,55
Репка (и брюква)		1,00	0,85
Сахарная свекла		1,15	0,50 ⁵
е. Бобовые	0,15	1,10	0,50
Фасоль, горох		1,00 ²	0,80
Фасоль, зрелая и Бобы		1,10 ²	0,25
Нут		0,95	0,25
Боб конский (огородный) - незрелый		1,10 ²	1,05
- зрелый/семена		1,10 ²	0,20
Грабанзо		1,05	0,25
Зеленый кофейный горох и коровий горох		1,00	0,55-0,25 ⁶
Земляной орех		1,10	0,50
Чечевица		1,05	0,20
Горох - незрелый		1,10 ²	1,05
- зрелый/семена		1,10	0,20
Соевые бобы		1,10	0,30

Культура	$K_{cb\ ini}^1$	$K_{cb\ mid}^1$	$K_{cb\ end}^1$
f. Многолетние овощи (с зимнем покоем и изначально обнаженной или рыхлой почвой)			
Артишок	0,15	0,95	0,90
Спаржа	0,15	0,90 ⁷	0,20
Мята	0,40	1,10	1,05
Клубника	0,30	0,80	0,70
g. Волокнистые культуры	0,15		
Хлопок		1,10-1,15	0,50-0,40
Лен		1,05	0,20
Сизаль ⁸		0,4-0,7	0,4-0,7
h. Масленичные культуры	0,15	1,10	0,25
Касторовый боб		1,10	0,45
Семена рапса,		0,95-1,10 ⁹	0,25
Сафлор		0,95-1,10 ⁹	0,20
Кунжут		1,05	0,20
Подсолнух		0,95-1,10 ⁹	0,25
i. Зерновые	0,15	1,10	0,25
Ячмень		1,10	0,15
Овес		1,10	0,15
Яровая пшеница		1,10	0,15-0,30 ¹⁰
Озимая пшеница	0,15-0,5 ¹¹	1,10	0,15-0,30 ¹⁰
Кукуруза - полевая (зерно)	0,15	1,15	0,50, 0,15 ¹²
- сахарная кукуруза		1,10	1,00 ¹³
Просо		0,95	0,20
Сорго - зерно		0,95-1,05	0,35
- сахарное		1,15	1,00
Рис	1,00	1,15	0,70-0,45
j. Фуражные культуры			
Люцерна на сено - периоды индивидуального укоса	0,30 ¹⁴	1,15 ¹⁴	1,10 ¹⁴
- семена	0,30	0,45	0,45
Бермуда на сено - осредненные результаты укоса	0,50	0,95 ¹⁵	0,80
- весенняя культура на семена	0,15	0,85	0,60
Клевер на сено - периоды индивидуального укоса	0,30 ¹⁴	1,10 ¹⁴	1,05 ¹⁴
Райграсс на сено - осредненные результаты укоса	0,85	1,00 ¹⁵	0,95
Суданская трава на сено (однолетнее растение)			
- периоды индивидуального укоса	0,30 ¹⁴	1,10 ¹⁴	1,05 ¹⁴
Пастбища - сменный выпас	0,30	0,80-1,00	0,80
- экстенсивный выпас	0,30	0,70	0,70
Торф - холодный сезон ¹⁶	0,85	0,90	0,90
- теплый сезон ¹⁶	0,75	0,80	0,80
k. Сахарный тростник	0,15	1,20	0,70
l. Тропические фрукты и деревья			
Банан - первый год	0,15	1,05	0,90
- второй год	0,60	1,10	1,05
Какао	0,90	1,00	1,00
Кофе - очищенная земля	0,80	0,90	0,90
- земля с сорняками	1,00	1,05	1,05
Финики	0,80	0,85	0,85
Пальма	0,85	0,90	0,90
Ананас ¹⁷ (многолетняя культура)			
- голая земля	0,15	0,25	0,25
- земля с травой	0,30	0,45	0,45
Каучуковые деревья	0,85	0,90	0,90
Чай - не затененный	0,90	0,95	0,90
- затененный	1,00	1,10	1,05

Культура	$K_{cb\ ini}^1$	$K_{cb\ mid}^1$	$K_{cb\ end}^1$
т. Виноград и ягоды			
Ягоды (кустарники)	0,20	1,00	0,40
Виноград - столовый или изюм	0,15	0,80	0,40
- винный	0,15	0,65	0,40
Хмель	0,15	1,00	0,80
п. Фруктовые деревья			
Миндаль, земля без покрытия	0,20	0,85	0,60 ¹⁹
Яблоня, вишня, груша ²⁰			
- земля без покрытия, мороз опасный для растения			
- земля без покрытия, без мороза	0,35	0,90	0,65 ¹⁹
- активное покрытие, мороз опасный для растения	0,50	0,90	0,70 ¹⁹
- активное покрытие, без мороза	0,45	1,15	0,90 ¹⁹
	0,75	1,15	0,80 ¹⁹
Абрикос, персики, косточковый плод ^{20,21}			
- земля без покрытия, мороз опасный для растения			
- земля без покрытия, без мороза	0,35	0,85	0,60 ¹⁹
- активное покрытие, мороз опасный для растения	0,45	0,85	0,60 ¹⁹
- активное покрытие, без мороза	0,45	1,10	0,85 ¹⁹
	0,75	1,10	0,80 ¹⁹
Авокадо, земля без покрытия	0,50	0,80	0,70
Цитрусовые, без покрытия ²²			
70% кроны	0,65	0,60	0,65
50% кроны	0,60	0,55	0,60
20% кроны	0,45	0,40	0,50
Цитрусовые, с активным покрытием или сорняками ²³			
70% кроны			
50% кроны	0,75	0,70	0,75
20% кроны	0,75	0,75	0,75
	0,80	0,80	0,85
Хвойные деревья ²⁴	0,95	0,95	0,95
Киви	0,20	1,00	1,00
Оливки (40 до 60% покрытия кроной)	0,55	0,65	0,65
Фисташки, земля без покрытия	0,20	1,05	0,40
Грецкие орехи ²⁰	0,40	1,05	0,60 ¹⁹

¹ Значения K_{cb} представлены для условий сухой поверхности почвы. Эти значения предназначены для использования только с двойным $K_{cb\ ini} + K_e$. Значения максимальной высоты h культуры даны в таблице 12 для уточнения K_{cb} по климату.

² Фасоль, горох, бобы, помидоры, перец и огурцы иногда растут на стеблях высотой 1,5-2 метра. В таких случаях должны быть взяты повышенные значения K_{cb} . Для зеленой фасоли, перца и огурцов - 1,10, а для помидоров, зрелой фасоли и гороха - 1,15. В таких случаях h должна быть также увеличена.

³ Значения середины сезона для маниоки предполагают отсутствие стресса в течение сезона дождей или в последующий период. Значения $K_{cb\ end}$ в условиях покоя в течение сухого сезона.

⁴ Значение $K_{cb\ end}$ картофеля примерно равно 0,35 для позднего картофеля с сорняком.

⁵ Значение $K_{cb\ end}$ взято в отсутствие орошения в последний месяц вегетационного периода. Значение $K_{cb\ end}$ для сахарной свеклы высокое, до 0,9, при орошении или значительном выпадении осадков в течение последнего месяца вегетационного периода.

⁶ Первое значение $K_{cb\ end}$ для уборки зеленой травы, второе для сухой.

⁷ Значение K_{cb} для спаржи обычно остается на уровне $K_{cb\ ini}$ в период уборки побегов из-за редкого покрытия. Значение $K_{cb\ mid}$ относится к последующему росту растений после уборки побегов.

⁸ K_{cb} для сизаля зависит от густоты посева и управления водой (т. е. намеренный водный стресс).

- ⁹ Меньшие значения принадлежат богарным культурам, имеющим меньшую густоту посева.
- ¹⁰ Более высокие значения принадлежат культурам, предназначенным для ручной уборки.
- ¹¹ Два значения $K_{cb\ ini}$ для озимой пшеницы: меньше 10 % покрытия и период зимнего покоя; если растение полностью покрывает поверхность в отсутствие мороза.
- ¹² Первое значение $K_{cb\ end}$ для урожая зерна высокой влажности. Второе $K_{cb\ end}$ для урожая после полной просушки зерна (примерно 18 % влажности, влажная масса).
- ¹³ Если укос зеленой массы предназначен для потребления человеком; $K_{cb\ end}$ используется для полевой кукурузы, если сладкая кукуруза зреет и сохнет в поле.
- ¹⁴ Коэффициенты K_{cb} фуражных культур представлены непосредственно по укосу; на покрытой поверхности; и непосредственно перед укосом, соответственно. Вегетационный период представлен сериями периодов индивидуальных укосов.
- ¹⁵ Коэффициент $K_{cb\ mid}$ для культур бермуды и райграсса является общим средним коэффициентом $K_{cb\ mid}$, осредняющим K_{cb} для обеих культур перед и в течение укоса. Он применяется в период, следующий за первым периодом развития до начала позднего последнего сезона вегетации.
- ¹⁶ Травы холодного сезона включают плотное стояние мятлика лугового, райграсса и овсяницы; теплого сезона - бермуды и травы Св. Августина. Значения 0,90 для холодного сезона представляют высоту 0,06 до 0,08 при общих условиях торфа. В условиях правильного управления водой и не требующих скорейшего роста, K_{cb} для торфа может быть снижен на 0,10.
- ¹⁷ Ананасовые растения имеют очень низкую транспирацию, потому что они закрывают устьица в течение дня и открывают ночью. Следовательно, большая часть ET_0 ананасов является испарением с почвы.
- ¹⁸ Включает требование на воду затемненными деревьями.
- ¹⁹ Эти значения $K_{cb\ end}$ представляют K_{cb} до опадания листьев. После опадания $K_{cb\ end} \approx 0,15$ для обнаженной сухой почвы или плохо покрытой, а $K_{cb\ end} \approx 0,45$ до 0,75 для активно растущего покрытия (глава 11).
- ²⁰ Смотрите уравнения 94, 97 или 98 и примечания 22 и 23 при оценке K_{cb} для незрелых растений.
- ²¹ Категория косточковых плодов применяется к персикам, абрикосам, грушам, сливам и орехам пекан.
- ²² Значения K_{cb} могут быть рассчитаны с использованием уравнения 98 для $K_{c\ min} = 0,15$ и $K_{cb\ full} = 0,70, 0,65$ и $0,70$ для начала, середины и конца сезона и $f_{c\ eff} = f_c$, где f_c = часть земли, покрытая кронами деревьев (т. е. предполагается Солнце в зените). Значения для среднего сезона ниже, чем начальные и конечные значения из-за закрытия устьиц в период пика ET . Для влажного и суб-влажного климата, с пониженным контролем устьиц цитрусовыми, значения $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$ и $K_{cb\ end}$ могут быть увеличены до 0,1-0,2 (Роджерс, 1983).
- ²³ Значения K_{cb} могут быть рассчитаны как $K_{cb} = f_c K_{cb\ ngc} + (1-f_c) K_{cb\ cover}$, где $K_{cb\ ngc}$ является K_{cb} для цитрусовых с неактивным покрытием (сноска 22), $K_{cb\ cover}$ - это K_{cb} для активного покрытия (0,90), а f_c определено в сноске 22. С другой стороны, K_{cb} для цитрусовых с активным покрытием может быть определен непосредственно из уравнения 98 при $K_{c\ min} = K_{cb\ cover}$. Для влажного и суб-влажного климата, где существует меньший контроль устьиц цитрусовыми, значения $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$ и $K_{cb\ end}$ могут быть увеличены на 0,1-0,2, по данным Роджерса и др. (1983).
Для неактивного или умеренно активного покрытия (активные показатели травы и растущего покрытия с $LAI >$ примерно 2-3), K_{cb} должно быть оценено между K_{cb} в отсутствии земляного покрытия и K_{cb} для активного покрытия, с оценкой на основе "травы" и приблизительной площади листа земляного покрытия.
- ²⁴ Хвойные деревья существенно контролируют устьица вследствие уменьшенного аэродинамического сопротивления. K_{cb} может легко снизить представленные значения, которые показывают хорошие водные условия большинства лесов.
- ²⁵ Коэффициент, представляющий примерно 40-60 % земляного покрытия. Смотрите уравнение 98, пример 43 и примечание 22 и 23 по оценке K_{cb} незрелых растений.

Первичный источник $K_{cb\ ini}$: Doorenbos u Kassam (1979); $K_{cb\ mid}$ и $K_{cb\ end}$: Doorenbos u Pruiitt (1977); Pruiitt (1986); Wright (1981, 1982), Snyder et al. (1989).

ТАБЛИЦА 18
Общие руководства по получению K_{cb} из значений K_c , указанных в таблице 12

Стадия роста	Состояние почвы, оросительная и культурная практика	K_{cb}	Дальнейшее уточнение
Начальная	Однолетняя культура - (почти) обнаженная поверхность почвы	0,15	-
	Многолетняя культура - (почти) обнаженная поверхность почвы	0,15-0,20	-
	Трава, кусты и деревья - заморозки	0,30-0,40	-
	Многолетняя культура - земляное или листовое покрытие	$K_{c\ ini}^{(табл. 12)} - 0,1$	-
	- нечасто орошаемые (оливки, пальмовые деревья, фруктовые деревья, ...) - часто орошаемые (садовые овощи)	$K_{c\ ini}^{(табл. 12)} - 0,2$	-
Середина сезона	Земляное покрытие больше чем 80 %	$K_{c\ mid}^{(табл. 12)} - 0,05$	Климат (ур-е 70)
	Земляное покрытие меньше чем 80 % (овощи)	$K_{c\ mid}^{(табл. 12)} - 0,10$	Климат (ур-е 70)
На конец сезона	нечасто орошаемая или увлажняемая в течение конца сезона	$- K_{c\ end}^{-0,05}$	Климат (ур-е 70)
	часто орошаемая или увлажняемая в течение конца сезона	$K_{c\ end}^{-0,1}$	

Климат: Уточнение по климату с использованием уравнения 70, где $K_{cb} > 0,45$

Определение суточных значений K_{cb}

Как изложено в главе 6, требуется только три точечных значения для описания и построения кривой коэффициента культуры. После разделения периода роста на четыре основные стадии роста, отбора и уточнения значений K_{cb} , соответствующих начальной стадии ($K_{cb\ ini}$), середине сезона ($K_{cb\ mid}$) и концу сезона ($K_{cb\ end}$), может быть составлена кривая коэффициента культуры (рис. 37) и получены коэффициенты K_{cb} (пример 30).

ПРИМЕР 30

Определение суточных значений K_{cb}

Рассчитать базовый коэффициент культуры зрелой фасоли (пример 29, рис.37) на середину каждой из четырех стадий роста.

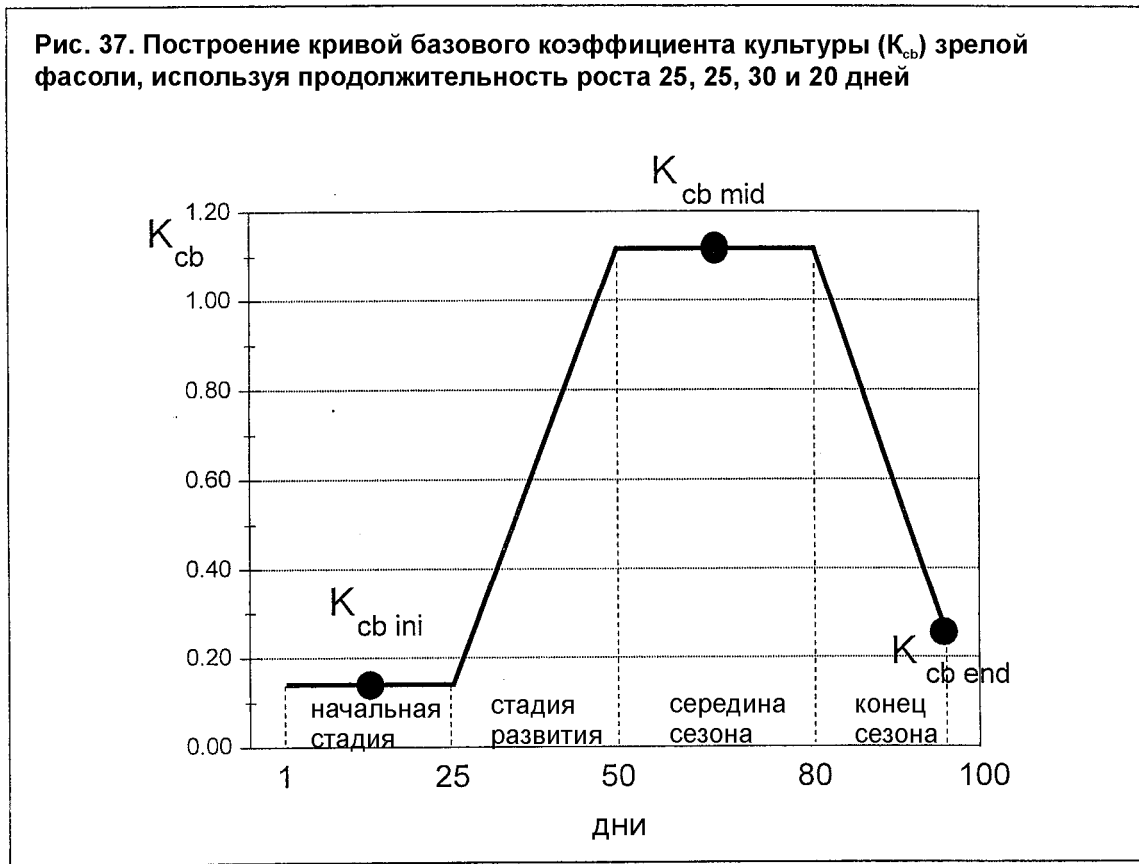
Начальная стадия ($L_{ini} = 25$ дней), на 12 день периода роста:
 $K_{cb} = K_{cb\ ini} = 0,15$

Стадия развития растения ($L_{dev} = 25$ дней), на $(25 + 25/2 =)$ 37 день периода роста, используя уравнение 66:
 $K_{cb} = 0,15 + [(37 - 25)/25] (1,14 - 0,15) = 0,63$

Середина сезона ($L_{mid} = 30$ дней), на $(25 + 25 + 30/2 =)$ 65 день периода роста:
 $K_{cb} = K_{cb\ mid} = 1,14$

Конец сезона ($L_{late} = 20$ дней), на $(25 + 25 + 30 + 20/2 =)$ 90 день периода роста, Уравнение 66:
 $K_{cb} = 1,14 + [(90 - (25 + 25 + 30))/20] (0,25 - 1,14) = 0,70$

Базовыми коэффициентами культуры K_{cb} на 12, 37, 65 и 90 дни периода роста являются 0,15, 0,63, 1,14 и 0,70, соответственно



КОМПОНЕНТ ИСПАРЕНИЯ (K_e ET₀)

Коэффициент испарения с почвы K_e описывает компонент испарения ET_c. При влажной поверхности почвы, после дождя или орошения, K_e будет максимальным. При сухой поверхности значение коэффициента K_e мало и даже равно нулю, если нет воды, расположенной близко к поверхности почвы.

Процедура расчета

При влажной почве, испарение с почвы происходит по максимальной норме. Однако, коэффициент культуры ($K_c = K_{cb} + K_e$) не может превысить максимальное значение $K_{c\ max}$. Это значение определяется наличием энергии для эвапотранспирации на поверхности почвы ($K_{cb} + K_e \leq K_{c\ max}$), или $K_e \leq (K_{c\ max} - K_{cb})$.

При сухой поверхности почвы для испарения доступно меньше воды и сокращение испарения начинает происходить в пропорции к количеству воды, оставшейся в поверхностном слое почвы, или:

$$K_e = K_r (K_{c\ max} - K_{cb}) \leq f_{cw} K_{c\ max} \quad (71)$$

где
 K_e - коэффициент испарения с почвы,
 K_{cb} - базовый коэффициент культуры,
 $K_{c\max}$ - максимальное значение K_c после дождя или орошения,
 K_r - безразмерный коэффициент сокращения испарения зависящий от кумулятивной глубины воды, испаряемой с поверхности почвы,
 f_{ew} - участок почвы, который обнажен и увлажнен, т. е. участок поверхности почвы, с которой происходит интенсивное испарение.

В компьютерной терминологии уравнение 71 выражено как

$$K_e = \min(K_r (K_{c\max} - K_{cb}), f_{ew} K_{c\max}).$$

После дождя или орошения $K_r = 1$, а испарение определяется наличием энергии для испарения. При сухой поверхности K_r становится меньше 1 и испарение сокращается. K_r становится нулевым при отсутствии воды в верхнем слое почвы.

Испарение происходит преимущественно с обнаженного участка почвы. Следовательно, испарение ограничивается в любой момент наличием энергии на обнаженном участке почвы, т. е., K_e не может превысить $f_{ew} K_{c\max}$, где f_{ew} - участок почвы, с которого происходит интенсивное испарение, т. е. участок почвы, не покрытый растительностью и увлажненный посредством орошения или осадков.

Процедура расчета заключается в определении:

- верхнего предела $K_{c\max}$;
- коэффициента снижения испарения с почвы K_r ;
- обнаженного и увлажненного участка f_{ew}

Оценка K_r требует вычисления суточного водного баланса для поверхностного слоя почвы.

Верхний предел $K_{c\max}$

$K_{c\max}$ представляет верхний предел испарения и транспирации с любой засаженной поверхности и отражает природные ограничения на имеющуюся энергию, представленную разницей баланса энергии $R_n - G - H$ (уравнение 1). $K_{c\max}$ колеблется примерно от 1,05 до 1,30, когда используется эталонная ET_0 травы:

$$K_{c\max} = \max \left(\left\{ 1.2 + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right\}, \{K_{cb} + 0.05\} \right) \quad (72)$$

где

h - средняя максимальная высота растения в период расчета (начало, развитие, середина, конец сезона) [м],

K_{cb} - базовый коэффициент культуры,

$\max ()$ - максимальное значение параметров в скобках $\{ \}$, разделенных запятой.

Уравнение 72 гарантирует, что коэффициент $K_{c\max}$ всегда больше или равен сумме $K_{cb} + 0,05$. При этом предполагается, что влажная почва будет всегда увеличивать значение K_{cb} на 0,05 после завершения увлажнения поверхности почвы, даже в период полного покрытия почвы. В уравнении 72 для $K_{c\max}$ вместо 1 используется 1,2 из-за увеличенной аэродинамической шероховатости окружающих культур в период развития, середины и конца сезона, которая может увеличить турбулентный перенос пара с обнаженной поверхности почвы. Коэффициент "1,2" также отражает влияние сниженной отражательной способности влажной почвы и действие тепла, сохраненного в сухой почве до увлажнения. Все эти факторы могут способствовать увеличению испарения до величины, превышающей эталонную.

Коэффициент "1,2" в уравнении 72 представляет влияние интервалов увлажнения, которые происходят реже 3-4 дней. При орошении или частом выпадении осадков, например, ежедневно или каждые два дня, почва имеет меньшую возможность поглощать тепло между ув-

лажнениями, и коэффициент "1,2" в уравнении 72 может быть снижен примерно до 1,1. Временной промежуток для вычисления $K_{C \max}$ может варьироваться от суток до месяца.

Коэффициент сокращения испарения с почвы (K_r)

Испарение с обнаженной почвы предположительно происходит в две стадии: стадия ограничения энергии и стадия снижения скорости. При увлажненной поверхности почвы $K_r = 1$. Когда содержание воды в поверхности почвы ограничено или когда общее количество воды, которое может быть испарено с поверхности почвы, истощено, K_r становится нулевым.

Максимальное количество воды, которое может быть испарено

В простой процедуре испарения предполагается, что влажность испаряющего слоя почвы находится при полевой влагоемкости θ_{FC} , сразу после обильного увлажнения и что почва может высохнуть до уровня увлажнения между осушением (полностью отсутствует вода) и точкой увядания θ_{WP} . Количество воды, которое может быть израсходовано путем испарения в течение полного цикла высыхания, может быть оценено как:

$$TEW = 1000 (\theta_{FC} - 0,5 \theta_{WP}) Z_e \quad (73)$$

где

TEW - общая испаряемая вода = максимальной глубине воды, которая может быть испарена с почвы, когда поверхность почвы первоначально полностью увлажнена [мм],

θ_{FC} - влажность почвы при полевой влагоемкости [$\text{м}^3 \text{ м}^{-3}$],

θ_{WP} - влажность почвы при точке увядания [$\text{м}^3 \text{ м}^{-3}$],

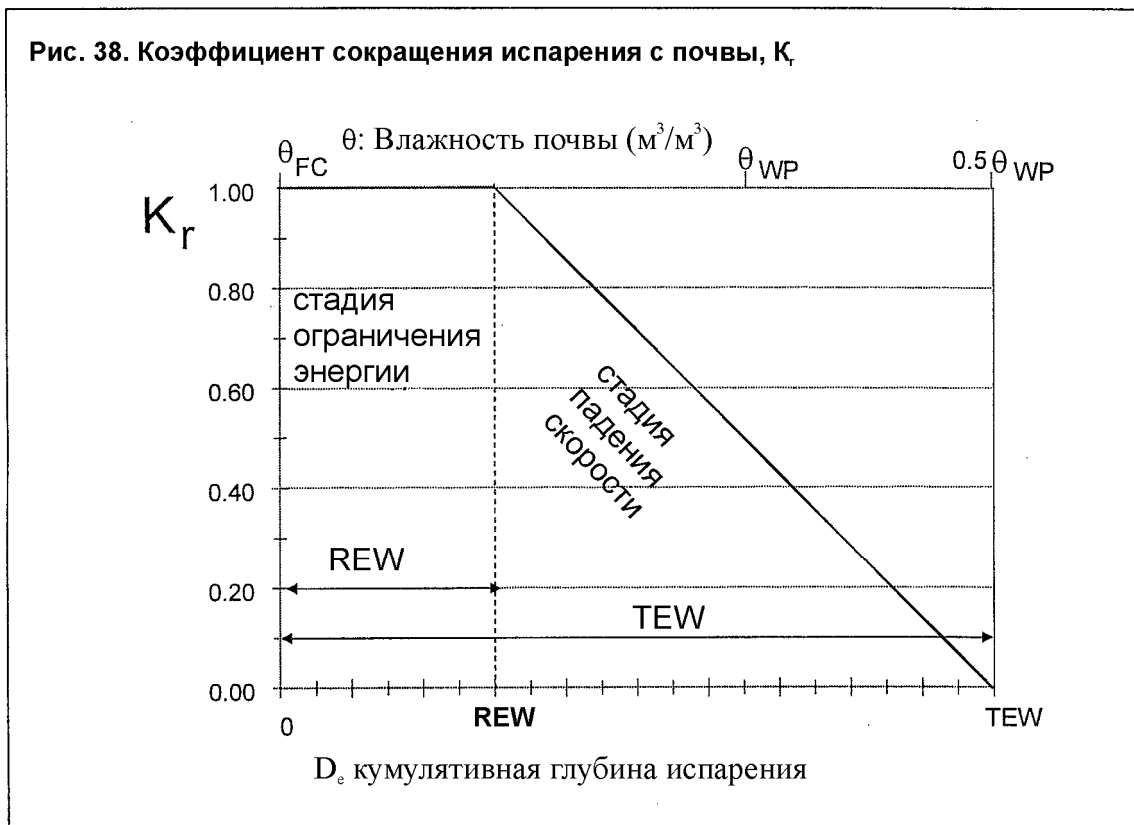
Z_e - глубина поверхностного слоя почвы, который подвержен осушению через испарение [0,10-0,15 м].

При неизвестном значении Z_e рекомендована эффективная глубина испаряющего слоя почвы 0,10-0,15 м. Типовые значения для θ_{FC} , θ_{WP} и TEW даны в таблице 19.

ТАБЛИЦА 19
Типовые характеристики влажности для различных типов почвы

Тип почвы	Характеристики влажности			Параметры испарения	
	θ_{FC}	θ_{WP}	$(\theta_{FC} - \theta_{WP})$	Количество воды, которое может быть израсходовано путем испарения	
Американская классификация текстуры почвы				стадия 1	стадия 1 и 2
				REW	TEW* ($Z_e = 0,10\text{м}$)
	$\text{м}^3/\text{м}^3$	$\text{м}^3/\text{м}^3$	$\text{м}^3/\text{м}^3$	мм	мм
Песок	0,07-0,17	0,02-0,07	0,05-0,11	2-7	6-12
Глинистый песок	0,11-0,19	0,03-0,10	0,06-0,12	4-8	9-14
Супесь	0,18-0,28	0,06-0,16	0,11-0,15	6-10	15-20
Суглинок	0,20-0,30	0,07-0,17	0,13-0,18	8-10	16-22
Иловатый суглинок	0,22-0,36	0,09-0,21	0,13-0,19	8-11	18-25
Ил	0,28-0,36	0,12-0,22	0,16-0,20	8-11	22-26
Иловатый тяжелый суглинок	0,30-0,37	0,17-0,24	0,13-0,18	8-11	22-27
Иловатая глина	0,30-0,42	0,17-0,29	0,13-0,19	8-12	22-28
Глина	0,32-0,40	0,20-0,24	0,12-0,20	8-12	22-29

*TEW = $(\theta_{FC} - 0,5 \theta_{WP}) Z_e$



Стадия 1: стадия ограничения энергии

В начале сухого цикла, после обильных осадков или орошения, содержание влаги в поверхности почвы находится на уровне полевой влагоёмкости, а количество воды, израсходованной через испарение — нулевое. В течение стадии 1 процесса осушения поверхность почвы остается влажной и предполагается, что испарение с обнаженной почвы в атмосферу будет происходить при максимальной скорости, ограничиваясь только энергией, имеющейся в поверхности почвы. Эта стадия поддерживается до кумулятивной глубины испарения D_e , до такого состояния, когда гидравлические особенности верхнего слоя почвы станут ограничивающими и вода не сможет подойти к поверхности почвы со скоростью, которая может обеспечить потенциальный спрос. В течение стадии 1 $K_r = 1$.

Кумулятивная глубина испарения D_e на конец стадии 1 осушения — REW (легко испаряемая вода, являющаяся максимальной глубиной воды, которая может испаряться с поверхностного слоя почвы без ограничения в течение стадии 1). Глубина обычно колеблется от 5 до 12 мм и особенно высока для средней и тонкой текстуры почвы. Типовые значения REW даны в таблице 19.

Стадия 2: стадия снижения скорости

Вторая стадия (где скорость испарения снижается) обозначена, как «стадия снижения скорости» испарения и начинается тогда, когда D_e превышает REW . В этой точке поверхность почвы является, видимо сухой, а испарение с обнаженной почвы снижается в пропорции к количеству воды, оставшейся в поверхностном слое почвы:

$$K_r = \frac{TEW - D_{e, i-1}}{TEW - REW} \quad \text{для } D_{e, i-1} > REW \quad (74)$$

где

K_r - безразмерный коэффициент сокращения испарения, зависящий от расхода влаги (накопительная глубина испарения) с поверхностного слоя почвы ($K_r = 1$, где

$D_{e, i-1} \leq REW$),

$D_{e, i-1}$ - накопительная глубина испарения (расход) с поверхностного слоя почвы на конец дня $i-1$ (предыдущий день) [м],

TEW - максимальная накопительная глубина испарения (расход) с поверхностного слоя почвы, где $K_r = 0$ (TEW = общая испаряемая вода) [мм],

REW - накопительная глубина испарения (расход) на конец стадии 1 (REW = легко испаряемая вода) [мм].

ПРИМЕР 31

Определение эвапотранспирации с обнаженной почвы

Определить эвапотранспирацию с обнаженной глинистой поверхности почвы ($K_{cb} \approx 0,15$) для 10 последующих дней после обильных осадков. Эталонная эвапотранспирация в течение засушливого периода $ET_0 = 4,5$ мм/сут при суб-влажном климате с легким ветром.

Из таблицы 19

Для суглинка: TEW \approx 20 мм и REW \approx 9 мм

Для осадков на обнаженной почве

$f_{ew} = 1$

Из уравнения 72

$K_{c \max} = 1,20$

(1) День	(2) D_e начало мм	(3) Стадия	(4) K_r	(5) K_e	(6) $K_e ET_0$ мм/сут	(7) D_e конец мм	(8) ET_c мм/сут
1	0,00	1	1	1,05	4,73	4,73	5,4
2	4,73	1	1	1,05	4,73	9,45	5,4
3	9,45	2	$(20-9,45)/(20-9)=0,96$	1,01	4,53	13,98	5,2
4	13,98	2	$(20-13,98)/(20-9)=0,55$	0,57	2,59	16,57	3,3
5	16,57	2	$(20-16,57)/(20-9)=0,31$	0,33	1,47	18,04	2,1
6	18,04	2	$(20-18,04)/(20-9)=0,18$	0,19	0,84	18,88	1,5
7	18,88	2	$(20-18,88)/(20-9)=0,10$	0,11	0,84	19,36	1,2
8	19,36	2	$(20-19,36)/(20-9)=0,06$	0,06	0,27	19,64	0,9
9	19,64	2	$(20-19,64)/(20-9)=0,03$	0,03	0,16	19,79	0,8
10	19,79	2	$(20-19,79)/(20-9)=0,02$	0,02	0,09	19,88	0,8

(1) Номер дня.

(2) Расход на начало дня (= расход на конец предыдущего дня).

(3) Стадия испарения с почвы (стадия 2 начинается при $D_e > REW = 9$ мм).

(4) K_r ($K_r = 1$ для стадии 1. Используется уравнение 74 для стадии 2).

(5) Из уравнения 21: $K_e = K_r (K_{c \max} - K_{cb}) = K_r (1,20 - 0,15) = 1,05$ $K_r \leq 1,20$.

(6) Компонент испарения: $K_e ET_0 = K_e (4,5$ мм/сут).

(7) Расход на конец дня = (2)-(6).

(8) $ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_0 = (0,15 + K_e) ET_0 = (0,15 + K_e) 4,5$ мм/сут,

где $K_{cb} ET_0 = (0,15 ET_0) \approx 0,7$ мм/сут является базовым, "диффузионным" испарением с почвы, возможно с низкой глубины Z_e (~ 0,10 до 0,15). Поскольку почва в этом случае обнажена, можно принимать значение $K_{cb} = 0$ так, чтобы максимальное значение K_e стало равным $K_e = K_{c \max} = 1,20$. Тогда может быть вычислено все испарение с поверхностного слоя почвы.

Пример показывает, что оценка коэффициента K_r требует расчета суточного водного баланса. Дальнейшее развитие показано в секции расчета суточного коэффициента K_e .

Обнаженный и увлажненный участок почвы (f_{ew})

f_{ew} : процедура расчета

При неполном покрытии земли растениями, испарение с почвы часто происходит неравномерно над всей поверхностью, но оно сильнее между растениями, где почва открыта солнечным лучам и где больше доступа воздуха, который способствует выносу паров с поверхности почвы выше кроны. Это особенно верно там, где только часть поверхности почвы увлажнена орошением.

Установлено, что расположение участка почвы, открытого солнечным лучам, изменяется в некоторой степени во времени суток и зависит от расположения борозд.

Представленная здесь процедура позволяет вычислить общий осредненный участок поверхности почвы, с которой происходит интенсивное испарение. Диффузионное испарение с почвы ниже кроны растения предположительно должно быть включено в базовый коэффициент K_{cb} .

Там, где вся поверхность почвы увлажнена осадками или дождеванием, часть поверхности почвы, с которой происходит интенсивное испарение, f_{ew} , определена как $(1 - f_c)$, где f_c - средний участок почвы покрытый растительностью и $(1 - f_c)$ - приблизительный обнаженный участок поверхности почвы. Однако для оросительных систем, при которых увлажняется только часть поверхности почвы, f_{ew} должно быть ограничено значением f_w , т. е. частью поверхности почвы, увлажненной орошением (рис. 39). Следовательно, f_{ew} рассчитывается как:

$$f_{ew} = \min (1 - f_c, f_w) \quad (75)$$

где
 $1 - f_c$ - средний открытый участок почвы, не покрытый (или затемненный) растительностью [0,01-1],
 f_w - средний участок почвы, увлажненный осадками или орошением [0,01-1].

Функция “ $\min ()$ ” подбирает наименьшую величину значений “ $1 - f_c$ ” и “ f_w ”. Рисунок 39 показывает соотношение f_{ew} к $(1 - f_c)$ и f_w .

Ограничение, установленное уравнением 75, предполагает, что участок почвы, увлажненный орошением, находится в пределах участка почвы, открытого солнечным лучам и вентиляции. Это применительно для всех случаев, исключая капельное орошение (рисунок 39).

В случае капельного орошения, где большая часть почвы увлажнена орошением, возможно под кронами растений и, следовательно, может быть затемнена, могут потребоваться более сложные модели поверхности почвы и увлажнения для точной оценки общего испарения с почвы. В этом случае величина f_w может быть снижена примерно на одну вторую - одну треть от той, что дана в таблице 20 для расчета влияния капельниц, затемненных кронами растений, на скорость испарения с увлажненной почвы (пример 34). Общий подход позволяет умножить f_w на $[1 - (2/3) f_c]$ для капельного орошения.

f_w : участок поверхности почвы, увлажненный орошением или осадками

Таблица 20 представляет типовые величины f_w . Там, где смесь орошения и осадков происходит в один и тот же засушливый период или в один и тот же день, величина f_w должна быть основана на средневзвешенном значении f_w для осадков ($f_w = 1$) и f_w для оросительной системы. Взвешенное значение должно быть приблизительно пропорционально глубинам просачивания от каждого источника воды.

Рис. 39. Определение переменной f_{ew} в виде функции участка с покрытой поверхностью (f_c) и участка с увлажненной поверхностью (f_w)

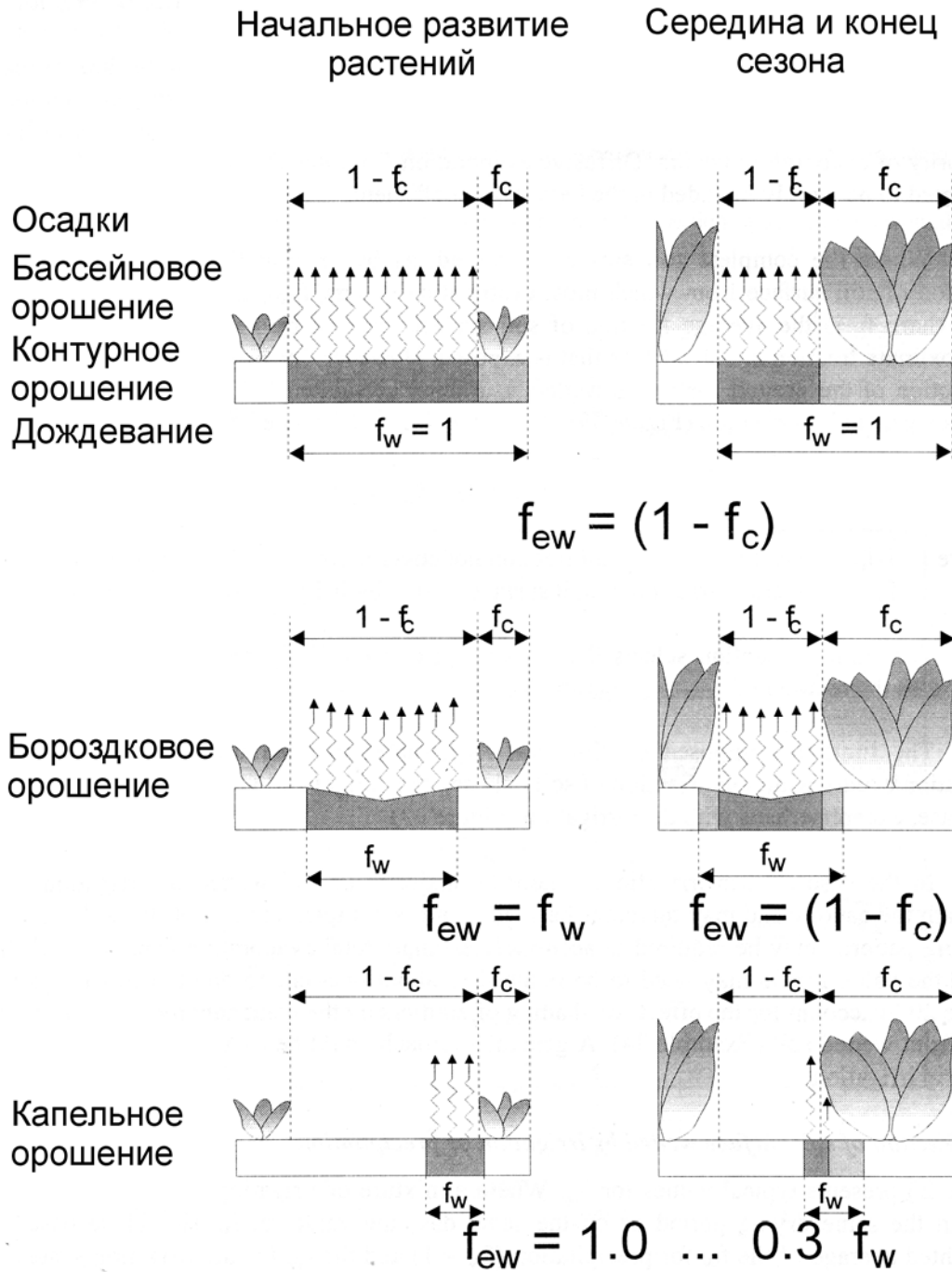


ТАБЛИЦА 20

Общие величины f_w участка поверхности почвы, увлажненного орошением или осадками

Увлажнение	f_w
Осадки	1,0
Дождевание	1,0
Бассейновое орошение	1,0
Контурное орошение	1,0
Бороздковое орошение (каждая борозда), узкие грядки	0,6 ... 1,0
Бороздковое орошение (каждая борозда), широкие грядки	0,4 ... 0,6
Бороздковое орошение (чередующиеся борозды)	0,3 ... 0,5
Капельное орошение	0,3 ... 0,4

Альтернативно, на каждый день применения, могут быть использованы следующие правила определения f_w для данных и последующих дней в более упрощенной форме:

- Поверхность, увлажненная орошением или дождями: f_w для оросительной системы;
- Поверхность, увлажненная орошением: f_w для оросительной системы;
- Поверхность увлажненная обильными дождями (> 3-4 мм) без орошения: $f_w = 1$;
- Без орошения и без обильных осадков: f_w предыдущего дня.

1 - f_c : обнаженный участок почвы

Участок поверхности почвы, который покрыт растительностью, обозначается как f_c . Следовательно, $(1 - f_c)$ представляет участок почвы, который открыт солнечным лучам и вентиляции воздуха и который служит в качестве площадки для интенсивного испарения с увлажненной почвы. Величина f_c ограничена $< 0,99$. Пользователь должен принимать подходящие величины для различных стадий роста. Типичные величины для f_c и $(1 - f_c)$ даны в таблице 21.

ТАБЛИЦА 21

Общие величины участков, покрытых растительностью (f_c) и открытых солнечным лучам ($1-f_c$)

Стадия роста культуры	f_c	$1 - f_c$
Начальная стадия	0,0 - 0,1	1,0 - 0,9
Стадия развития культуры	0,1 - 0,8	0,9 - 0,2
Стадия середины сезона	0,8 - 1,0	0,2 - 0,0
Стадия конца сезона	0,8 - 0,2	0,2 - 0,8

Там, где величина f_c не измерена, f_c может быть оценена, по отношению:

$$f_c = \left(\frac{K_{cb} - K_{c \min}}{K_{c \max} - K_{c \min}} \right)^{(1+0.5h)} \quad (76)$$

где

f_c - эффективный участок поверхности почвы, покрытый растительностью [0-0,99],

K_{cb} - значение базового коэффициента культуры для определенного дня или периода,

$K_{c \min}$ - минимальное значение K_c для сухой обнаженной почвы без покрытия [$\approx 0,15 - 0,20$],

$K_{c \max}$ - максимальный K_c непосредственно после увлажнения (уравнение 72),

h - высота растения [м].

Это уравнение должно использоваться с осторожностью и проверяться полевыми исследованиями.

$K_{C \min}$ является минимальным коэффициентом культуры для сухой обнаженной почвы, где транспирация и испарение с почвы близки к базовым (диффузионным) уровням. Рекомендуется величина $K_{C \min} \approx 0,15 - 0,20$. Величина $K_{cb \min}$ используется для однолетних культур в условиях приблизительно обнаженной почвы (0,15 - 0,20).

Уравнение 76 предполагает, что на значение K_{cb} влияет площадь почвы, покрытая растительностью. Это хорошее предположение для большинства растений и условий. В уравнении показатель степени "1 + 0,5 h" представляет влияние высоты растения на затемнение поверхности почвы и на увеличение величины K_{cb} для специфического значения f_c . Пользователь должен ограничить разницу $K_{cb} - K_{C \min}$ до $\geq 0,01$ для численной стабильности. Величина f_c будет изменяться в течение суток так же, как K_{cb} , поэтому, указанное уравнение применяется посуточно.

Применение уравнения 76 предсказывает, что f_c снижается в течение периода конца сезона пропорционально K_{cb} , даже если почва остается покрытой увядающей растительностью. Это предсказание поможет рассчитать местный перенос ощутимого тепла со стареющих листьев на поверхность почвы.

ПРИМЕР 32

Расчет коэффициента культуры ($K_{cb} + K_e$) при дождевании

Хлопковое поле полито дождеванием. Коэффициент K_{cb} для конкретного дня (в течение периода развития) вычислен по уравнению 70, а затем взят из кривой K_{cb} как 0,9. $ET_0 = 7$ мм/сут, $u_2 = 3$ м/с и $RH_{\min} = 20$ %. Оценить коэффициент культуры ($K_{cb} + K_e$)

Предполагается $h = 1$, из уравнения 72 $K_{C \max}$ для аридного климата:

$$K_{C \max} = \max \left(\{1,2 + [0,04 (3 - 2) - 0,004 (20 - 45)] \left(\frac{1}{3} \right)^{0,3} \}, \{0,9 + 0,05\} \right) = 1,30$$

Из Уравнения 76, где $K_{C \min} = 0,15$

$$f_c = \frac{[(K_{cb} - K_{C \min}) / (K_{C \max} - K_{C \min})]^{(1+0,5h)}}{[(0,9 - 0,15) / (1,3 - 0,15)]^{(1+0,5(1))}} = 0,53$$

Поскольку поле было полито дождеванием, $f_w = 1,0$ и из уравнения 75:

$$f_{ew} = \min (1 - f_c, f_w) \\ = \min (1 - 0,53, 1,0) = 0,47.$$

Предполагается, что орошение было достаточным для заполнения испаряющего слоя до полевой влагоемкости,

так что $K_r = 1$, и испарение будет в стадии 1.

Из уравнения 71: $K_e = 1,00 (1,30 - 0,90) = 0,40$

Величина сравнивается с верхним пределом $f_{ew} K_{C \max}$ гарантируя, что она меньше верхнего предела:

$f_{ew} K_{C \max} = 0,47 (1,30) = 0,61$, т. е. больше величины K_e . Следовательно, величина K_e может использоваться без ограничения.

Общее K_C поля, предполагается без водного стресса ввиду сухого профиля почвы,

$$K_C = K_{cb} + K_e \\ = 0,9 + 0,40 = 1,30.$$

Эта величина высока из-за очень влажной поверхности почвы, относительно высоких растений и неравномерных по сравнению с эталонной травой и аридного климата ($u_2 = 3$ м/с и $RH_{\min} = 20$ %). В этой ситуации может случиться, что K_C равен $K_{C \max}$, поскольку поле было увлажнено дождеванием.

ПРИМЕР 33**Расчет коэффициента культуры ($K_{cb} + K_e$) при бороздковом поливе**

Хлопковое поле как в предыдущем примере увлажнено вместо дождевания поливом по бороздам чередующимися грядами, увлажненный участок поверхности поля составляет 0,3 общей площади.

f_c в этом случае используется уравнение 75:

$$f_c = \min(1 - f_c, f_w) = \min(1 - 0,53, 0,3) = 0,3.$$

Предполагая, что орошение было достаточным для заполнения порции f_{ew} испаряющего слоя до полевой влагоемкости, так что $K_r = 1$, испарение должно быть в стадии 1.

$$\text{Из уравнения 71: } K_e = 1,00 (1,30 - 0,9) = 0,40$$

Величина сравнивается с верхним пределом $f_{ew} K_{c \max}$, который представляет 0,30 (1,30) = 0,39. Так как $0,40 > 0,39$, K_e из f_{ew} поверхности площади ограничивается долей 0,39.

Общий коэффициент K_c для поля, орошенного по бороздам, без водного стресса ввиду сухой почвы, $K_c = K_{cb} + K_e = 0,9 + 0,39 = 1,29$. Эта величина такая же, как в предыдущем примере, поскольку процедура предполагает, что почва между чередующимися грядами является частью, которая увлажняется путем орошения, большая часть поверхности поля имеет или растительный покров или влажную почву.

ПРИМЕР 34**Расчет коэффициента культуры ($K_{cb} + K_e$) при капельном поливе**

Хлопковое поле как в предыдущих примерах орошено капельным способом, капельницы расположены ниже крон хлопка. Участок поверхности поля, увлажненный орошением, равен 0,3.

f_{ew} в этом случае рассчитывается из уравнения 75 как $f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w)$. Поскольку капельницы находятся ниже крон, на испарение приходится меньше энергии, величина для f_w сокращена путем умножения на $1 - (2/3) f_c$, так что:

$$f_{ew} = \min[(1 - f_c), (1 - 0,67 f_c) f_w] = \min[(1 - 0,53), (1 - 0,67 (0,53)) (0,3)] = 0,19$$

Предполагается, что орошение было достаточным для заполнения f_w порции испаряющего слоя до полевой влагоемкости, так что $K_r = 1$, испарение должно быть в стадии 1.

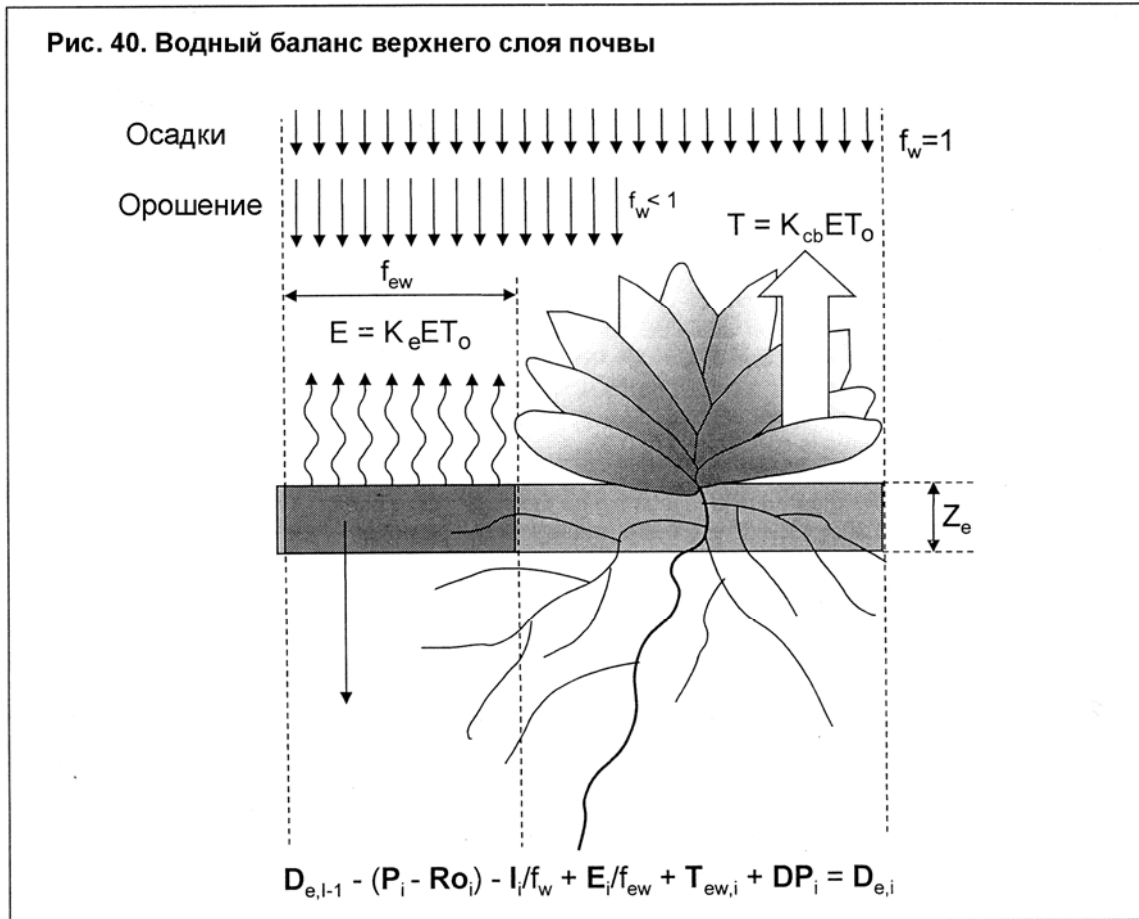
$$\text{Из уравнения 71: } K_e = 1,00 (1,30 - 0,90) = 0,40.$$

Величина сравнивается с верхним пределом $f_{ew} K_{c \max} = 0,19 (1,30) = 0,25$. Так как $0,25 < 0,40$, K_e с общего участка f_w поверхности площади ограничивается имеющейся энергией. Следовательно, $K_e = 0,25$.

Общий коэффициент K_c для поля при капельном орошении, без водного стресса ввиду сухой почвы: $K_c = K_{cb} + K_e = 0,9 + 0,25 = 1,15$. Величина K_c меньше чем при дождевании и орошении по бороздам (примеры 32 и 33).

Суточный расчет K_e **Суточный водный баланс**

Оценка K_e в процедуре расчета требует вычисления суточного водного баланса поверхностного слоя почвы с целью расчета кумулятивного испарения или расхода в условиях увлажнения. Уравнение суточного водного баланса для обнаженного и увлажненного участка почвы f_{ew} (рис. 40);



$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - (P_i - R_{o,i}) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_i}{f_{ew}} + T_{ew,i} + DP_{e,i} \quad (77)$$

где

$D_{e,i-1}$ - кумулятивная глубина испарения после увлажнения с открытого и увлажненного участка поверхности почвы, на конец дня $i-1$ [мм]

$D_{e,i}$ - кумулятивная глубина испарения (расхода) после увлажнения, на конец дня i [мм],

P_i - осадки за день i [мм],

$R_{o,i}$ - сток осадков с поверхности почвы за день i [мм],

I_i - глубина орошения на день i , которая просачивается в почву [мм],

E_i - испарение на день i (т. е. $E_i = K_e ET_0$) [мм],

$T_{ew,i}$ - глубина испарения с открытого и увлажненного участка поверхностного слоя почвы на день i [мм],

$DP_{e,i}$ - потеря на глубокое просачивание с поверхностного слоя почвы на день i , если влажность почвы превышает полевую влагоемкость [мм],

f_w - участок поверхности почвы, увлажненный орошением [0,01 - 1],

f_{ew} - открытый и увлажненный участок почвы [0,01 - 1].

Ограничения на $D_{e,i}$

Допуская, что поверхность почвы находится в состоянии полевой влагоемкости после обильных дождей или орошения, минимальная величина расхода $D_{e,i}$ нулевая. Поскольку поверхность почвы сухая, $D_{e,i}$ возрастает и при отсутствии какого-либо увлажнения будет постоянно достигать своего максимального значения TEW (уравнение 73). В этот момент не остается воды на испарение в верхнем слое почвы, K_T становится нулевым, а величина $D_{e,i}$ останется

равной TEW до тех пор, пока почва не будет увлажнена еще раз. Ограничения, налагаемые на $D_{e,i}$ следующие:

$$0 \leq D_{e,i} \leq TEW \quad (78)$$

Начальный расход

Для расчета водного баланса испаряющего слоя пользователь может предположить, что поверхность почвы близка к полевой влагоемкости после обильных дождей или орошения, т. е. $D_{e,i} = 0$. При длительном периоде времени, прошедшем после последнего увлажнения, пользователь может предположить, что вся испаряемая вода была израсходована с испаряющего слоя на начало расчета, т. е.

$$D_{e,i-1} = TEW = 1000 (\theta_{FC} - 0.5 \theta_{WP}) Z_e.$$

Осадки и сток

P_i эквивалентно суточным осадкам. Количество суточных осадков, меньшее $0,2 ET_0$, полностью испаряется и обычно игнорируется в K_e и расчетах водного баланса. Количество осадков, потерянное на сток, зависит от интенсивности осадков, уклона земли, типа почвы, гидравлических условий и состояния предшествующего увлажнению, использования земли и покрытия. Для общих ситуаций, значение RO_i может быть принято нулевым или может приниматься в виде определенного процента от P_i . Это особенно достоверно для водного баланса поверхностного слоя почвы, поскольку почти все осадки, имеющие достаточную интенсивность или глубину, чтобы вызвать сток, вероятно пополняют содержание воды в поверхностном слое почвы до полевой влагоемкости. Следовательно, влияние компонента стока может быть проигнорировано. Незначительные осадки будут, в основном, иметь маленький сток или не иметь вообще.

Орошение

I_i в основном выражается как глубина воды, которая эквивалентна значению глубины инфильтрации воды, распределяемой по всему полю. Следовательно, величина I_i/f_w используется для описания фактической концентрации объема орошения на участке почвы, которая увлажнена (рис. 31).

Испарение

Испарение ниже крон растений предположительно включается в K_{cb} и, следовательно, не полностью поддается определению. Вычисленное испарение полностью концентрируется на открытой увлажненной поверхности почвы. Испарение E_i через $K_e ET_0$. E_i/f_w показывает фактическую концентрацию испарения с открытого и увлажненного участка почвы.

Транспирация

Кроме культур с мелкими корнями (т. е. там, где максимальная глубина корневой зоны $< 0,5-0,6$ м), сумма транспирации с испаряющего слоя почвы мала и может быть проигнорирована (т. е. $T_{ew} = 0$). В добавок для ряда культур большое количество воды, извлекаемое корнями, может быть извлечено ниже крон растений. Следовательно, T_{ew} с f_{ew} участка поверхности почвы предположительно может быть нулевым.

ПРИМЕР 35**Оценка эвапотранспирации культур с применением метода двойного коэффициента культур**

Оценить эвапотранспирацию культур ET_c для 10 последовательных дней.

Предполагается что:

- тип почвы - супесь, характеризуется $\theta_{FC} = 0,23 \text{ м}^3 \text{ м}^{-3}$ и $\theta_{WP} = 0,10 \text{ м}^3 \text{ м}^{-3}$,
- глубина поверхностного слоя почвы, который подвержен высыханию через испарение, $Z_e - 0,1 \text{ м}$,
- в течение периода, высота растения $h = 0,30 \text{ м}$, средняя скорость ветра $u_2 = 1,6 \text{ м с}^{-1}$ и $RH_{\min} = 35 \%$,
- коэффициент K_{cb} на день 1 - 0,30 и возрастает до 0,40 на день 10,
- вся испаряемая вода была расходована с испаряющего слоя на начало вычислений ($D_{e, i-1} = TEW$),
- орошение происходит на начало дня 1 ($I = 40 \text{ мм}$), участок поверхности почвы, увлажненный орошением $f_w = 0,8$,
- дождь высотой столба 6 мм выпал в начале 6 дня.

Из таблицы 19

$$REW \approx 8 \text{ мм}$$

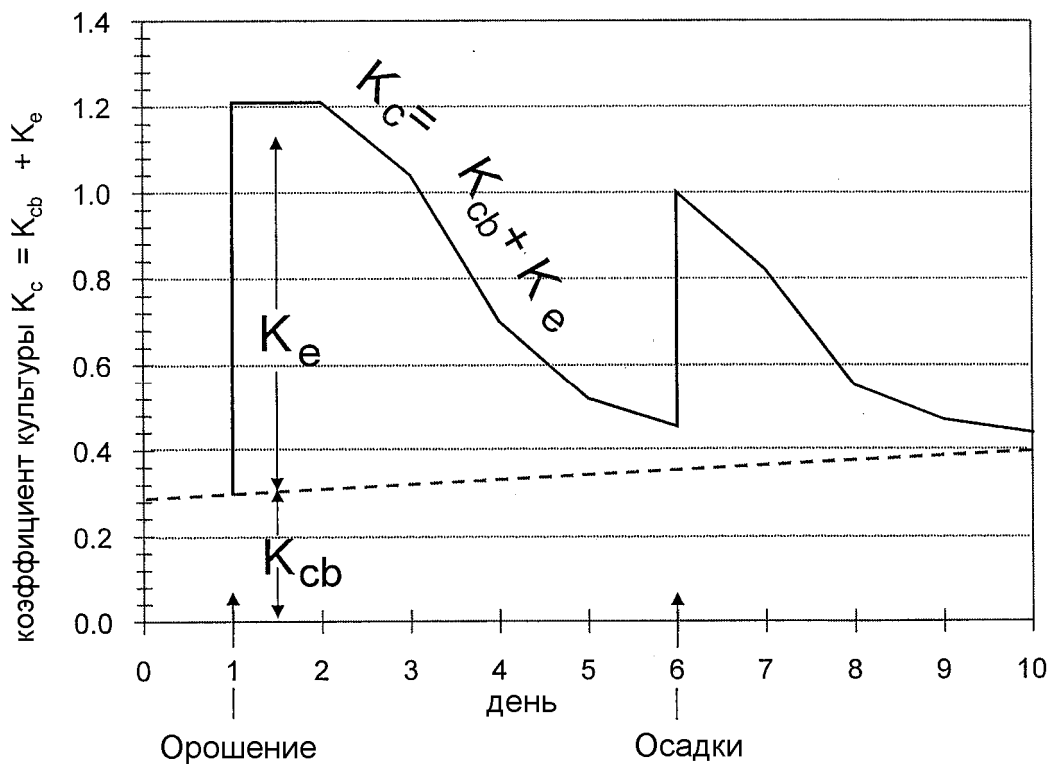
Из уравнения 73

$$TEW = 1000 (0,23 - 0,5 (0,10)) 0,1 = 18 \text{ мм}$$

Из уравнения 72

$$K_{c \max} = 1,2 + [0,04 (1,6-2) - 0,004 (35 - 45)] (0,3/3)^{0,3} = 1,21$$

Вся испаряемая вода была изъята на начало вычислений, $D_{e, i-1} = TEW = 18 \text{ мм}$



(1) День	(2) ET ₀	(3) P-RO	(4) I/f _w	(5) 1-f _c	(6) f _w	(7) f _{ew}	(8) K _{cb}	(9) D _{e,i} начало
	мм/сут	мм	мм					мм
начало	-	-	-	-	-	-	-	-
1	4,5	0	50	0,92	0,8	0,80	0,30	0
2	5,0	0	0	0,91	0,8	0,80	0,31	5
3	3,9	0	0	0,91	0,8	0,80	0,32	11
4	4,2	0	0	0,90	0,8	0,80	0,33	14
5	4,8	0	0	0,89	0,8	0,8	0,34	16
6	2,7	6	0	0,89	1	1	0,36	11
7	5,8	0	0	0,88	1	1	0,37	13
8	5,1	0	0	0,87	1	1	0,38	16
9	4,7	0	0	0,87	1	1	0,39	17
10	5,2	0	0	0,86	1	1	0,40	18
(10) K _r	(11) K _e	(12) E/f _{ew}	(13) DP _e	(14) D _{e,i} конец	(15) E	(16) K _c	(17) ET _c	
		мм	мм	мм	мм/сут		мм/сут	
-	-	-	-	18	-	-	-	
1,00	0,91	5,1	32	5	4,1	1,21	5,5	
1,00	0,90	5,6	0	11	4,5	1,21	6,1	
0,70	0,62	3,0	0	14	2,8	1,04	4,0	
0,40	0,35	1,8	0	16	1,5	0,70	2,9	
0,20	0,18	1,1	0	17	0,8	0,52	2,5	
0,75	0,64	2,0	0	13	1,7	1,00	2,7	
0,53	0,45	3,0	0	16	2,6	0,82	4,7	
0,20	0,17	1,0	0	17	0,9	0,55	2,8	
0,09	0,08	0,4	0	18	0,4	0,47	2,2	
0,05	0,04	0,2	0	18	0,2	0,44	2,3	

- (1) Номер дня,
 (2) Данное значение ET₀. Заметьте, что ET₀ будет представлена прогнозными значениями в реальном времени орошения, после прошествия дня и уточнения расчетами оно будет иметь известные значения,
 (3) (P-RO) известные значения после прошествия дня и уточненные расчетами,
 (4) Чистая глубина орошения на участке поверхности почвы увлажненной орошением,
 (5) (1-f_c) данная величина (интерполированная между 0,92 м на день 1 и 0,86 м на день 10),
 (6) при значительных осадках: f_{w,i} = 1,0 (таблица 20)
 при орошении: f_{w,i} = 0,8 (данное значение),
 в других случаях: f_{w,i} = f_{w,i-1},
 (7) Уравнение 75, участок поверхности почвы, с которой происходит обильное испарение
 (8) K_{cb} данный коэффициент (интерполированный между 0,30 на день 1 и 0,40 на день 10),
 (9) D_{e,i start} (расход на начало дня)
 Если осадки и орошение происходили утром, состояние расхода с верхнего слоя поверхности почвы (на начало дня) должно быть уточнено:
 = max (D_{e,i-1} - I_{n,i}/f_{wi} - (P-RO)_i, или 0), где D_{e,i-1} взято из столбца 14 предыдущего дня,
 Если осадки или орошение происходили вечером, столбец 6 должен быть равен D_{e,i-1} (столбец 14 предыдущего дня),
 (10) Если D_{e,i} ≤ REW K_r = 1 Если D_{e,i} > REW K_r = уравнение 74
 (11) Уравнение 71, где K_e = K_r (K_{c max} - K_{cb}) ≤ f_{ew} K_{c max} (K_e = min (K_r (K_{c max} - K_{cb}), f_{ew} K_{c max}),
 (12) Испарение с увлажненного и открытого участка поверхности почвы = (K_e ET₀)/f_{ew}
 (13) Уравнение 79, где DP_e ≥ 0, (глубокое просачивание из испаряющего слоя),
 (14) D_{e,i} (расход на конец дня) из уравнения 77, где D_{e,i-1} значение в столбце 14 предыдущего дня,
 (15) Среднее испарение для всей площади поля = K_eET₀,
 (16) K_c = K_{cb} + K_e,
 (17) Уравнение 69

Расчет суточного водного баланса произведен для поверхностного слоя. Для культур с поверхностным залеганием корней, не чувствительных к T_{ew} , поскольку T_{ew} - незначительная часть потока из глубины Z_e в первые 3-5 дней после увлажнения, следовательно, T_{ew} может быть проигнорирован. Результаты сокращения содержания воды в испаряющем поверхностном слое почвы T_{ew} могут быть проигнорированы, если предполагается, что $T_{ew} = 0$ при снижении значения Z_e , например, с 0,15 до 0,12 м или с 0,10 до 0,08 м.

Глубокое просачивание

После обильных осадков или орошения содержание влаги в поверхностном слое (слой Z_e) может превысить полевую влагоемкость. Однако, в этой простой процедуре предполагается, что содержание влаги после завершения увлажнения находится на уровне θ_{FC} , так что расход $D_{e,i}$ в уравнении 77 равен нулю. После обильных осадков или орошения просачивание воды из поверхностного слоя рассчитывается как:

$$DP_{e,i} = (P_i - RO_i) + \frac{I_i}{f_w} - D_{e,i-1} \geq 0 \quad (79)$$

Пока влажность почвы в испаряющем слое меньше полевой влагоемкости (т. е. $D_{e,i} > 0$), почва высыхать не будет и $DP_{e,i} = 0$.

Порядок расчета

При процедуре расчета $K_{cb} + K_e$, например, при использовании таблицы, расчеты должны происходить в следующем порядке: K_{cb} , h , $K_{c \max}$, f_c , f_w , f_{ew} , K_r , K_e , E , DP_e , D_e , I , K_c , и ET_c .

РАСЧЕТ ET_C

Процедура расчета адаптирована для применения компьютера, в форме электронных таблиц (пример 35) или в форме языков программирования. Процедура расчета состоит в определении:

а. Эталонное испарение ET₀:

Оценка ET₀: процедура дана в главе 4.

б. Стадии роста:

Определить четыре стадии роста, уточненных для местных условий (для полной информации см. таблицу 11):

- Начальная стадия роста: L_{ini} ,
- Стадия развития культуры: L_{dev} ,
- Стадия середины сезона: L_{mid} ,
- Стадия конца сезона: L_{late} ,

с. Базовый коэффициент культуры K_{cb}

Расчет базового коэффициента культуры для каждого дня периода роста:

- выбрать коэффициенты K_{cb} , $K_{cb\ mid}$ и $K_{cb\ end}$ из таблицы 17;
- уточнить $K_{cb\ mid}$ и $K_{cb\ end}$ для местных климатических условий (уравнение 70);
- определить суточные значения K_{cb}
- начальная стадия роста: $K_{cb} = K_{cb\ ini}$,
- стадия развития культуры: от $K_{cb\ ini}$ до $K_{cb\ mid}$ (уравнение 66),
- стадия середины сезона: $K_{cb} = K_{cb\ mid}$,
- стадия конца сезона: от $K_{cb\ mid}$ до $K_{cb\ end}$ (уравнение 66),

d. Коэффициент испарения K_e

Рассчитать максимальную величину K_e , т. е. верхний предел $K_{c\ max}$ (уравнение 72) и определить для каждого дня периода роста:

- участок почвы, покрытый растительностью, f (таблица 21 или уравнение 76),
- участок поверхности почвы увлажненный орошением или осадками, f_w (таблица 20),
- участок поверхности почвы, с которой происходит обильное испарение, f_w (уравнение 75),
- кумулятивный расход с испаряющего слоя почвы, D_e , определяемый через значение суточного водного баланса поверхности почвы (уравнение 77),
- соответствующий коэффициент снижения испарения, K_r (уравнение 74),
- коэффициент испарения с почвы, K_e (уравнение 71).

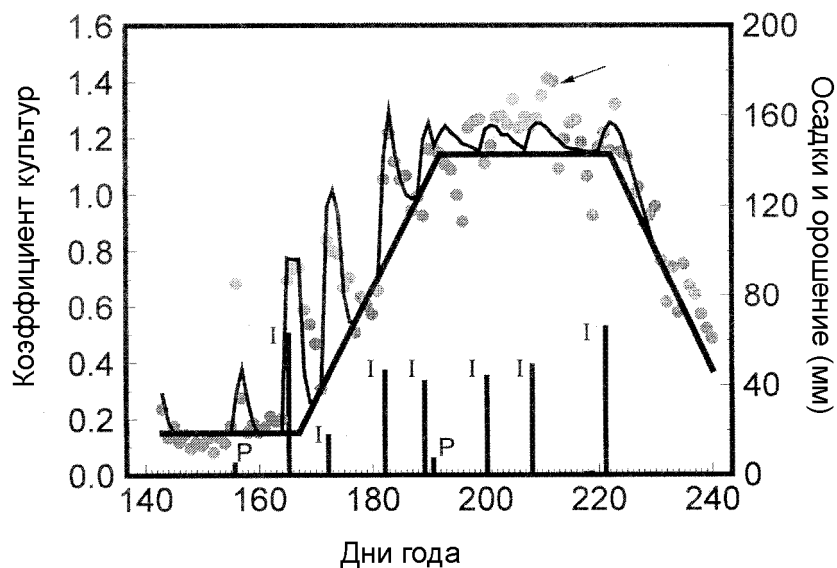
e. Эвапотранспирация культурами ET_c :

Расчет $ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_0$ (уравнение 69).

БОКС 16**Пример изучения культуры зрелой фасоли в Кимберли, Айдахо, США (двойной коэффициент культуры)**

Результаты процедуры использования $K_{cb} + K_e$ для ломкой фасоли, собранной в виде семян, показаны на рисунке, приведенном ниже. В этом примере используется такой же набор данных, который использовался в примере изучения в боксе 15. Данные ET_c были измерены при помощи точной лизиметрической системы в Кимберли, Айдахо. Значения $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$ и $K_{cb\ end}$ были рассчитаны в примере 29 как 0,15, 1,14 и 0,25. Продолжительность стадий роста 25, 25, 30 и 20 дней. Значения K_{cb} показаны на рисунке 37. Значение $K_{c\ max}$ из уравнения 72 на осредненный период середины сезона равно 1,24 и основано на $u_2 = 2,2$ м/с и $RH_{min} = 30\ %$. Почва в Кимберли имеет иловато-суглинистую текстуру. Предполагается, что глубина испаряющего слоя почвы $Z_e = 0,1$ м, значения $TEW = 22$ мм и $REW = 9$ мм из уравнения 73 при использовании данных из таблицы 19.

Периодичность и величины индивидуального увлажнения показаны на рисунке. Увлажнение происходило путем орошения. Поскольку орошение происходило по чередующимся бороздам, значение для f_w было равно 0,5. Орошение происходило примерно в полдень или до полудня. Сходимость между суточными оцененными значениями $K_{cb} + K_e$ (тонкая непрерывная линия) и фактическими 24-часовым измерениями (точки) относительно хорошая. Измеренные и прогнозные $K_{cb} + K_e$ были выше после увлажнения орошением или осадками, как и ожидалось. Два "пиковых" испарения, происходящих в течение конца начального периода и раннего периода развития (между днями 160 и 180) были ниже, чем $K_{c\ max}$, потому что испарение происходило из борозд, увлажненных путем орошения, где $f_w = 0,5$. Величина f_{ew} ограничена значением f_w в уравнении 75, в течение тех двух событий, поскольку в течение этого периода $f_w < 1 - f_c$. Следовательно, в испарение была преобразована не вся "потенциальная энергия" ввиду ограничения на максимальное испарение с единицы поверхности площади, которое было установлено в уравнении 71.



Измеренные (точки) и прогнозные (тонкая линия) суточные коэффициенты ($K_{cb} + K_e$) и базовая кривая культур (толстая линия) для культуры зрелой фасоли в Кимберли, Айдахо. "P" обозначает осадки, а "I" - орошение (Wright, 1990).

Часть С

Эватранспирация культурами в нестандартных условиях

На хорошо управляемых полях стандартными являются обычно фактические условия поля. Коэффициент ET_c , рассчитанный способом, описанным в части В, является эватранспирацией культурами в стандартных условиях поля.

Там, где условия поля отличаются от стандартных, необходима корректировка коэффициента ET_c . Низкое плодородие почвы, засоленность, заболоченность, вредители, болезни и трудно или непроницаемые горизонты почвы в корнеобитаемой зоне могут привести к скудному росту растений и низкой эвапотранспирации. Недостаток воды и засоление почвы могут снизить поглощение воды почвой и ограничить эвапотранспирацию культур. Эвапотранспирация с мелких изолированных участков растительности или с полей, где растут две различные культуры, или где используется мульча для сокращения испарения, может также отклоняться от эватранспирации культур в стандартных условиях.

Эта часть описывает влияние на ET в условиях управления и окружающей среды, которые отклоняются от стандартных условий. Влияние окружающей среды описано посредством введения коэффициентов стресса и уточнения K_c в соответствии с условиями поля.

Глава 8

ET_c в условиях водного стресса

Силы, действующие на почвенную влагу, снижают ее потенциальную энергию и делают ее менее доступной для извлечения корнями растений. Когда почва влажная, вода имеет высокую потенциальную энергию, свободно перемещается и доступна для корней растений. В сухой почве вода имеет низкий потенциал и сильно ограничена капиллярной и поглощающей силами и, следовательно, менее доступна растениям.

Когда потенциальная энергия влажности почвы ниже порогового значения, растения испытывают водный стресс. Влияние водного стресса описывается умножением базового коэффициента культуры на коэффициент водного стресса K_s :

$$ET_{c \text{ adj}} = (K_s K_{cb} + K_e) ET_0 \quad (80)$$

В условиях водного стресса $K_s < 1$. При отсутствии водного стресса $K_s = 1$.

K_s описывает действие водного стресса на транспирацию растений. При использовании единичного коэффициента культуры, действие водного стресса объединяется в K_c как:

$$ET_{c \text{ adj}} = K_s K_c ET_0 \quad (81)$$

Так как коэффициент водного стресса влияет только на транспирацию растений, а не на испарение с почвы, применение K_s , используя уравнение 80, более оправданно, чем применение уравнения 81. Однако в ситуации, где испарение с почвы не является главным компонентом ET_c , использование уравнения 81 обеспечит разумные результаты.

ВОДООТДАЧА ПОЧВЫ**Общее количество воды (TAW)**

Водоотдача определяется способностью почвы удерживать воду, доступную растениям. После выпадения обильных осадков или орошения почва будет осушаться до достижения полевой влагоемкости. Полевая влагоемкость - это количество воды, которую хорошо осушенная почва должна удерживать, несмотря на гравитационные силы, или количество оставшейся воды при значительно сниженном дренаже. При отсутствии водоподачи содержание воды в корневой зоне снижается из-за извлечения воды растениями. Поскольку процесс извлечения воды прогрессирует, оставшаяся вода сдерживается частицами почвы с большей силой, снижая ее потенциальную энергию и делая ее трудно доступной корням растений. Извлечение воды становится нулевым при достижении точки увядания. Точка увядания - это содержание воды, при котором растения будут вянуть.

Поскольку влажность выше полевой влагоемкости не может поддерживаться ввиду гравитационных сил, а влажность ниже точки увядания не может быть извлечена корнями расте-

ний, общее количество воды в корневой зоне представляет разницу между влажностью при полевой влагоемкости и при точке увядания:

$$TAW = 1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r \quad (82)$$

где

TAW - общее количество воды в корневой зоне [мм];

θ_{FC} - влажность при полевой влагоемкости [$\text{м}^3 \text{м}^{-3}$];

θ_{WP} - влажность при точке увядания [$\text{м}^3 \text{м}^{-3}$];

Z_r - глубина корней [м].

TAW - это количество воды, которое растение может извлечь из корневой зоны, его величина зависит от типа почвы и глубины корней. Типичные пределы полевой влагоемкости и точки увядания указаны в таблице 19 для различной текстуры почвы. Пределы максимальной эффективной глубины корней для различных культур даны в таблице 22.

Легко доступная вода (RAW)

Хотя теоретически вода доступна до точки увядания, извлечение воды растениями сокращается перед достижением точки увядания. При достаточно увлажненной почве почва предоставляет достаточно воды в соответствии со спросом культуры, т. е. извлечение воды равно ET_c. Когда содержание воды в почве снижается, вода становится труднодоступной для извлечения. Когда влажность почвы ниже порогового значения, вода не может достаточно быстро поступать к корням и отвечать требованиям транспирации, ввиду чего растения начинают испытывать стресс. Доля TAW, которую растение может извлекать из корневой зоны, не испытывая водного стресса, является легко доступной водой:

$$RAW = p TAW \quad (83)$$

где

RAW - легко доступная вода в корневой зоне [мм];

p - средняя доля общего количества воды (TAW), которая может быть изъята из корневой зоны до водного стресса (снижение ET) [0 - 1].

Значения p указаны в таблице 22. Множитель p различен для каждой культуры. Множитель p обычно варьирует от 0,30 для мелких корней растений при высоких значениях ET_c (> 8 мм сут⁻¹) до 0,70 для глубоких корней при низких значениях ET_c (< 3 мм сут⁻¹). Значение 0,50 для p является стандартным для многих культур.

Множитель p является функцией испаряющей силы атмосферы. При низких значениях ET_c, значения p, указанные в таблице 22, выше, чем при высоких значениях ET_c. Для жаркой сухой погоды, когда значения ET_c высокие, p на 10-25 % ниже значений, представленных в таблице 22, а почва остается влажной, возникает стресс. При низкой эвапотранспирации растений p будет на 20 % больше указанных значений. Часто для конкретного периода роста используется постоянное значение p вместо меняющихся значений. Численное приближение для уточнения p к значению ET_c является $p = p_{\text{таблица 22}} + 0,04 (5 - ET_c)$, где уточненное "p" ограничено $0,1 \leq p \leq 0,8$ и ET_c - мм/сут. Влияние численного уточнения показано на рисунке 41.

ТАБЛИЦА 22

Пределы максимальной эффективной глубины корней (Z_r) и доля извлечения воды без стресса (p), для общих культур

Культура	Максимальная глубина корней (м)	Доля извлечения ² (для $ET \approx 5$ мм/сут) p
а. Мелкие овощи		
Брокколи	0,4-0,6	0,45
Капуста брюссельская	0,4-0,6	0,45
Капуста	0,5-0,8	0,45
Морковь	0,5-1,0	0,35
Капуста цветная	0,4-0,7	0,45
Сельдерей	0,3-0,5	0,20
Чеснок	0,3-0,5	0,30
Латук	0,3-0,5	0,30
Лук - сухой	0,3-0,6	0,30
- зеленый	0,3-0,6	0,30
- семена	0,3-0,6	0,35
Шпинат	0,3-0,5	0,20
Редис	0,3-0,5	0,30
б. Овощи - семейство пасленовых		
Баклажан	0,7-1,2	0,45
Перец сладкий (колокол)	0,5-1,0	0,30
Помидор	0,7-1,5	0,40
с. Овощи - семейство тыквенных		
Канталупа	0,9-1,5	0,45
Огурец - зеленый базар	0,7-1,2	0,50
- машинная уборка	0,7-1,2	0,50
Тыква, тыква большая	1,0-1,5	0,35
Кабачок, цукини	0,6-1,0	0,50
Сладкие арбузы	0,8-1,5	0,40
Арбуз	0,8-1,5	0,40
д. Корневые и клубневые		
Свекла	0,6-1,0	0,50
Маниока - 1 год	0,5-0,8	0,35
- 2 год	0,7-1,0	0,40
Пастернак	0,5-1,0	0,40
Картофель	0,4-0,6	0,35
Батат	1,0-1,5	0,65
Репка (и брюква)	0,5-1,0	0,50
Сладкая свекла	0,7-1,2	0,55 ³
е. Бобовые		
Фасоль, горох	0,5-0,7	0,45
Фасоль зрелая и бобы	0,6-0,9	0,45
Фасоль лимская	0,8-1,2	0,45
Нут	0,6-1,0	0,50
Боб конский (огородный) - незрелый	0,5-0,7	0,45
- зрелый/семена	0,5-0,7	0,45
Грabanцо	0,6-1,0	0,45
Зеленый кофейный горох и коровий горох	0,6-1,0	0,45
Земляной орех	0,5-1,0	0,50
Чечевица	0,6-0,8	0,50
Горох - незрелый	0,6-1,0	0,35
- зрелый/семена	0,6-1,0	0,40
Соевые бобы	0,6-1,3	0,50

Культура	Максимальная глубина корней (м)	Доля извлечения ² (для ET \approx 5 мм/сут) р
f. Многолетние овощи (озимые, с изначально обнаженной или рыхлой почвой)		
Артишок	0,6-0,9	0,45
Спаржа	1,2-1,8	0,45
Мята	0,4-0,8	0,40
Клубника	0,2-0,3	0,20
g. Волокнистые культуры		
Хлопок	1,0-1,7	0,65
Лен	1,0-1,5	0,50
Сизаль	0,5-1,0	0,80
h. Масличные культуры		
Касторовый боб	1,0-2,0	0,50
Семена рапса,	1,0-1,5	0,60
Сафлор	1,0-2,0	0,60
Кунжут	1,0-1,5	0,60
Подсолнух	0,8-1,5	0,45
i. Зерновые		
Ячмень	1,0-1,5	0,55
Овес	1,0-1,5	0,55
Яровая пшеница	1,0-1,5	0,55
Озимая пшеница	1,5-1,8	0,55
Кукуруза - полевая (зерно)	1,0-1,7	0,55
- сахарная кукуруза	0,8-1,2	0,50
Просо	1,0-2,0	0,55
Сорго - зерно	1,0-2,0	0,55
- сахарное	1,0-2,0	0,50
Рис	0,5-1,0	0,20 ⁴
j. Кормовые культуры		
Люцерна - на сено	1,0 - 2,0	0,55
- на семена	1,0 - 3,0	0,60
Бермудская трава		
- на сено	1,0 - 1,5	0,55
- Яровая культура на семена	1,0 - 1,5	0,60
Клевер, берсим	0,6 - 0,9	0,50
Райграсс пастбищный	0,6 - 1,0	0,60
Суданская трава (однолетняя)	1,0 - 1,5	0,55
Пастбища - переменная пастьба	0,5 - 1,5	0,60
- экстенсивная пастьба	0,5 - 1,5	0,60
Торфяная культура - прохладный сезон	0,5 - 1,0	0,40
- теплый сезон	0,5 - 1,0	0,50
к. Сахарный тростник		
l. Тропические фрукты и деревья		
Банан - 1 ^й год	0,5 - 0,9	0,35
- 2 ^й год	0,5 - 0,9	0,35
Какао	0,7 - 1,0	0,30
Кофе	0,9 - 1,5	0,40
Финиковые пальмы	1,5 - 2,5	0,50
Пальмовые деревья	0,7 - 1,1	0,65
Ананас	0,3 - 0,6	0,50
Каучуконосы	1,0 - 1,5	0,40
Чай - незатененный	0,9 - 1,5	0,40
- затененный	0,9 - 1,5	0,45
m. Виноград и ягоды		
Ягоды (кустарники)	0,6 - 1,2	0,50

Культура	Максимальная глубина корней (м)	Доля извлечения ² (для $ET \approx 5$ мм/сут) р
Виноград - столовый или изюм	1,0 - 2,0	0,35
- вино	1,0 - 2,0	0,45
Хмель	1,0 - 1,2	0,50
п. Фруктовые деревья		
Миндаль	1,0 - 2,0	0,40
Яблони , вишни , груши	1,0 - 2,0	0,40
Абрикосы , персики , косточковые плоды	1,0 - 2,0	0,50
Авокадо	0,5 - 1,0	0,70
Цитрусы		
- 70 % кроны	1,2 - 1,5	0,50
- 50 % кроны	1,1 - 1,5	0,50
- 20% кроны	0,8 - 1,1	0,50
Хвойные деревья	1,0 - 1,5	0,70
Киви	0,7 - 1,3	0,35
Оливки (40 - 60 % покрытия земли)	1,2 - 1,7	0,65
Фисташки	1,0 - 1,5	0,40
Ореховые сады	1,7 - 2,4	0,50

¹ Высокие значения Z_r для почв, не имеющих значительного покрытия или других характеристик, которые могут ограничить глубину залегания корней. Низкие значения Z_r могут быть использованы для орошения, а высокие значения - для моделирования водного стресса или для условий богарных земель.

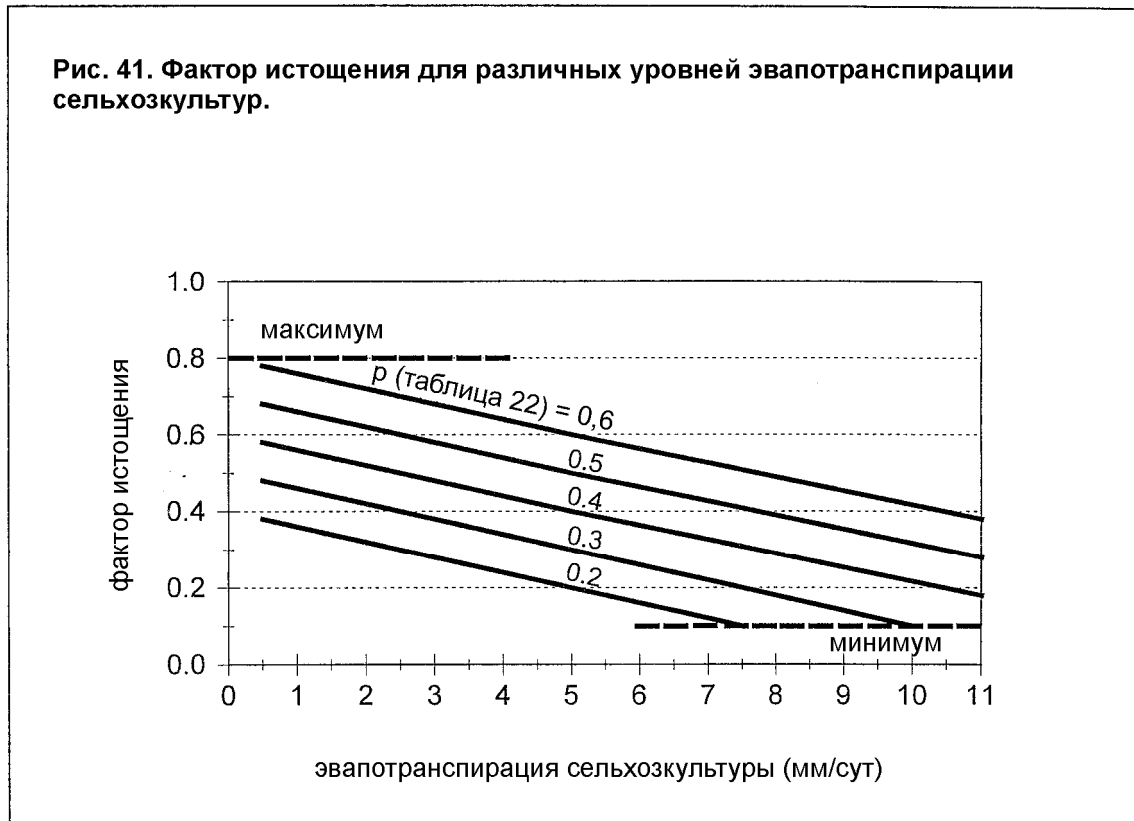
² Значения "р" применяются для $ET_c \approx 5$ мм/сут. Значение "р" может быть уточнено для различных коэффициентов ET_c согласно $p = p_{\text{таблица 22}} + 0,04 (5 - ET_c)$, где "р" выражено как доля ET_c в мм/сут.

³ Сахарная свекла часто подвергается увяданию после полудня в аридном климате даже при $p < 0,55$.

⁴ Значение "р" для риса - 0,20 от насыщения.

⁵ К травам прохладного сезона относятся мятлик луговой, райграсс пастбищный и овсяница. К травам теплого сезона относятся бермудская трава, буйволова трава и трава Св. Августина. Корневая зона у трав имеет различную глубину. Некоторые корни достигают 1,2 м и более, в то время, как у других трав корневая зона неглубокая. Травы имеют более глубокую корневую зону при бережном управлении водными ресурсами с большим высыханием почвы между поливами, чтобы корни разрастались на большую глубину.

Рис. 41. Фактор истощения для различных уровней эвапотранспирации сельхозкультур.



ПРИМЕР 36

Определение легко доступной почвенной влаги для различных культур и типов почв

Оценить RAW для полностью развитых лука, томатов и кукурузы. Предполагается, что культуры выращиваются на глинистом песке, пылеватых почвах и иловатой глине

Из таблицы 22	Лук	$Z_r \approx 0,4$ м,	$p = 0,30$
	Томат	$Z_r \approx 0,8$ м,	$p = 0,40$
	Кукуруза	$Z_r \approx 1,2$ м,	$p = 0,55$

Из таблицы 19 Глинистый песок $\theta_{FC} \approx 0,15 \text{ м}^3 \text{ м}^{-3}$, $\theta_{WP} \approx 0,06 \text{ м}^3 \text{ м}^{-3}$
 1000 ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$) = 90 мм (вода)/м (глубина почвы)

Пыль $\theta_{FC} \approx 0,32 \text{ м}^3 \text{ м}^{-3}$, $\theta_{WP} \approx 0,15 \text{ м}^3 \text{ м}^{-3}$
 1000 ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$) = 170 мм (вода)/м(глубина почвы)

Иловатая глина $\theta_{FC} \approx 0,35 \text{ м}^3 \text{ м}^{-3}$, $\theta_{WP} \approx 0,23 \text{ м}^3 \text{ м}^{-3}$
 1000 ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$) = 120 мм (вода)/м (глубина почвы)

	Глинистый песок		Пыль		Иловатая глина	
	TAW (ур.82) мм	RAW (Eq.83) мм	TAW (ур.82) мм	RAW (ур.83) мм	TAW (ур.82) мм	RAW (ур.83) мм
Лук	36	11	68	20	48	14
Томат	72	29	136	54	96	38
Кукуруза	108	59	204	112	144	79

Выражение толерантности культур к водному стрессу через функцию доли (p) от TAW не совсем корректно. Фактически, на скорость подъема корневой воды больше воздействует уровень потенциальной энергии почвенной влаги (потенциал почвенной матрицы и сопутствующая гидравлическая проводимость), а не содержание влаги. Поскольку потенциал почвен-

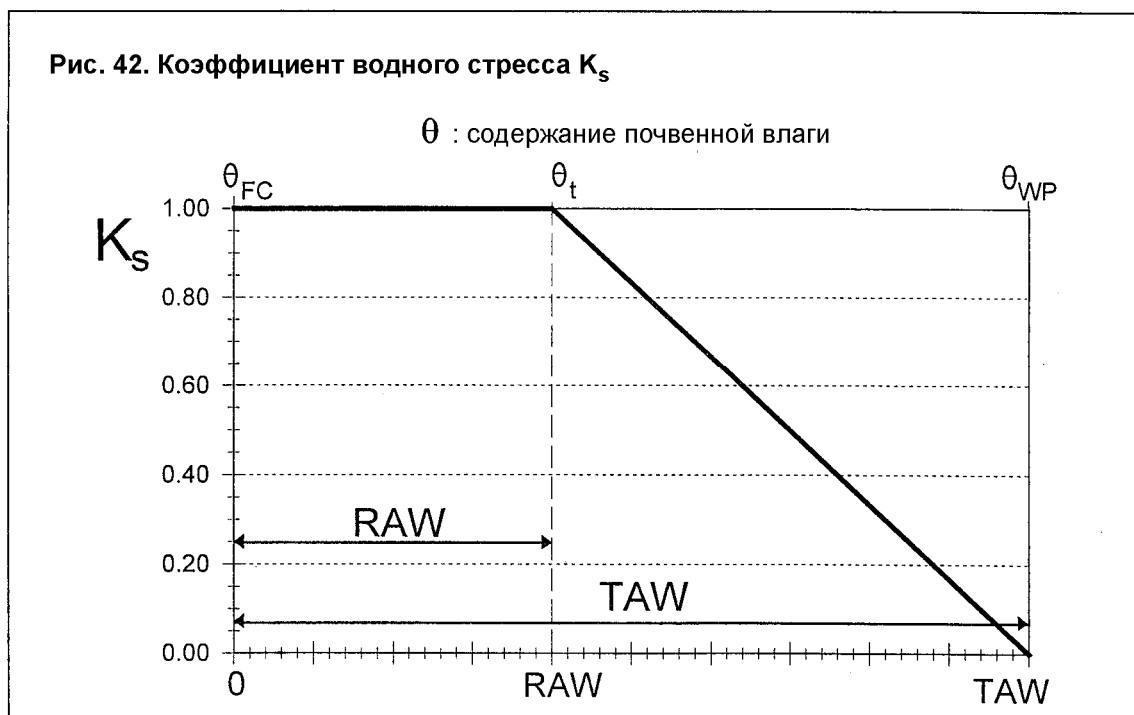
ной матрицы разных типов почв соответствует различному содержанию почвенной влаги, величина p зависит от типа почв. В общем, можно утверждать, что для почв с тонкой текстурой (глина) значения p из таблицы 22 могут быть уменьшены на 5-10 %, а для почв с более грубой текстурой (песок) они могут быть увеличены на 5-10 %.

RAW аналогичен допустимому управлению истощением (MAD), введенному Мерриам. Однако величины для MAD находятся под воздействием управления и экономических факторов, помимо физических факторов, влияющих на p . Обычно, $MAD < RAW$, если имеется неприятие или сомнение в появлении риска, и $MAD > RAW$, если водный стресс растений является неотъемлемым элементом управления почвенной влагой.

КОЭФФИЦИЕНТ ВОДНОГО СТРЕССА (K_s)

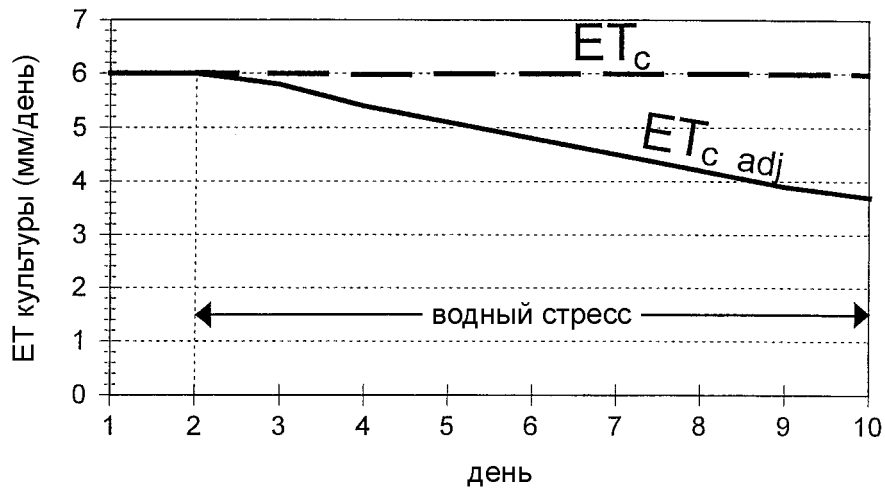
Действие стресса почвенной влаги на ET культуры описывается через уменьшение значения коэффициента культуры. Это выполняется путем умножения коэффициента сельхозкультуры на коэффициент водного стресса K_s (уравнения 80 и 81).

Содержание воды в корневой зоне может также выражаться истощением корневой зоны D_r , т. е. дефицитом воды относительно полевой влагоемкости. В состоянии полевой влагоемкости истощение корневой зоны равняется нулю ($D_r = 0$). При заборе почвенной влаги через эвапотранспирацию истощение растет и это приводит к стрессу, когда D_r равно RAW. После того, как истощение корневой зоны превысит RAW (содержание влаги падает ниже порога θ_t), оно становится достаточно высоким, чтобы ограничивать эвапотранспирацию ниже потенциальных величин и эвапотранспирация культур начинает уменьшаться пропорционально объему воды, остающемуся в корневой зоне (рис. 42).



ПРИМЕР 37**Действие водного стресса на эвапотранспирацию культур**

Оценить действие водного стресса на эвапотранспирацию вполне развитых томатов ($Z_r = 0,8$ м и $p = 0,40$) на пылеватых почвах ($\theta_{FC} = 0,32$ и $\theta_{WP} = 0,12$ м³ м⁻³) на последующие 10 дней, начальное истощение корневой зоны 55 мм, нет прогнозов на дождь и поливы не планируются. Ожидаемая ET_o на следующую декаду составляет 5 мм/сут и $K_c = 1,2$.



Из ур-я 82

TAW = 1000 (0,32 - 0,12) 0,8 = 160 мм

Из ур-я 83

RAW = 0,40 (160) = 64 мм

(1) Дни	(2) ET _o	(3) K _c	(4) ET _c	(5) D _{r,i} начало	(6) K _s	(7) ET _{c adj}	(8) D _{r,i} конец
	мм/сут		мм/сут	мм		мм/сут	мм
начало	-	-	-	-	-	-	55,0
1	5,0	1,2	6,0	55,0	1,00	6,0	61,0
2	5,0	1,2	6,0	61,0	1,00	6,0	67,0
3	5,0	1,2	6,0	67,0	0,97	5,8	72,8
4	5,0	1,2	6,0	72,8	0,91	5,4	78,3
5	5,0	1,2	6,0	78,3	0,85	5,1	83,4
6	5,0	1,2	6,0	83,4	0,80	4,8	88,2
7	5,0	1,2	6,0	88,2	0,75	4,5	92,6
8	5,0	1,2	6,0	92,6	0,70	4,2	96,9
9	5,0	1,2	6,0	96,9	0,66	3,9	100,8
10	5,0	1,2	6,0	100,8	0,62	3,7	104,5

(1) Номер дня.

(2) Эталонная эвапотранспирация культуры.

(3) Коэффициент сельхозкультуры.

(4) Ур-е 58, ET культуры при отсутствии водного стресса.

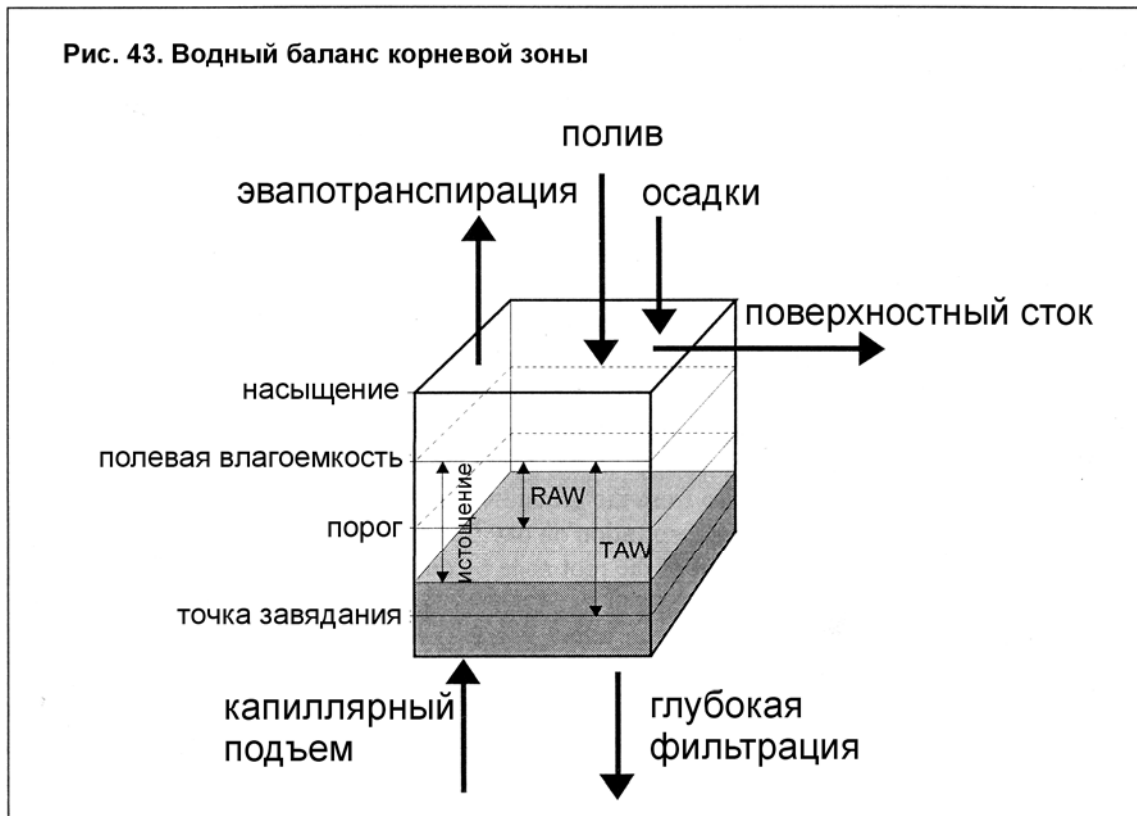
(5) Истощение корневой зоны в начале дня (столбец 8 предыдущего дня).

(6) Ур-е 84, где $K_s = 1$ если $D_{r,i} < RAW$.

(7) Ур-е 81, ET культуры в условиях водного стресса.

(8) Истощение на конец дня.

Пример показывает, что оценка K_s требует вычисления ежедневного водного баланса. Это развивается далее в следующем разделе.



При $D_r > RAW$ K_s выражается следующим образом:

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} = \frac{TAW - D_r}{(1 - p)TAW} \quad (84)$$

где

K_s - безразмерный фактор сокращения транспирации, зависящий от доступной почвенной влаги [0 - 1],

D_r - истощение корневой зоны [мм],

TAW - общая доступная почвенная влага в корневой зоне [мм],

p - доля TAW , которую культура может забрать из корневой зоны, не испытывая водного стресса [-].

После вычисления K_s скорректированная эвапотранспирация ET_c вычисляется при помощи уравнений 80 и 81, в зависимости от коэффициентов, используемых для описания эвапотранспирации. Когда истощение корневой зоны меньше RAW , $K_s = 1$.

БАЛАНС ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ

Оценка K_s требует вычисления суточных водных балансов для корневой зоны. Схематично (рис. 43) корневая зона может быть представлена как некоторый контейнер, в котором содержание влаги может колебаться. Полезно выражать содержание влаги через истощение корневой зоны. Это делает прибавление и вычитание потерь и притока простым, так как различные параметры баланса почвенной влаги обычно выражаются в виде слоя влаги. Осадки, полив и капиллярный подъем подземных вод добавляют воду в корневую зону и уменьшают ее истощение. Испарение с почвы, транспирация сельскохозяйственных культур и фильтрационные потери заби-

рают воду из корневой зоны и увеличивают истощение. Суточный водный баланс, выраженный через истощение на конец дня, имеет следующий вид:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (85)$$

где

$D_{r,i}$ - истощение корневой зоны на конец дня i [мм],

$D_{r,i-1}$ - содержание влаги в корневой зоне в конце предыдущего дня, $i-1$ [мм],

P_i - выпадение осадков на день i [мм],

RO_i - поверхностный сток на день i [мм],

I_i - чистый объем поливной воды, который просачивается в почву, на день i [мм],

CR_i - капиллярный подъем с зеркала подземных вод на день i [мм],

$ET_{c,i}$ - эвапотранспирация культуры на день i [мм],

DP_i - потери воды из корневой зоны через глубокую фильтрацию на день i [мм].

Ограничения для $D_{r,i}$

На рисунке 43 предполагается, что вода может сохраняться в корневой зоне, пока не будет достигнуто состояния полевой влагоемкости. Хотя после сильного дождя или полива содержание влаги может временно превысить полевую влагоемкость, предполагается, что объем воды выше полевой влагоемкости будет потерян в тот же день через глубокую фильтрацию при любой ET на этот день. Предполагая, что корневая зона находится в условиях полевой влагоемкости после сильного дождя или полива, минимальная величина истощения $D_{r,i}$ равна нулю. В результате фильтрации и эвапотранспирации содержание влаги в корневой зоне будет постепенно уменьшаться и истощение корневой зоны увеличится. При отсутствии какого-либо увлажнения содержание влаги достигнет своего минимума θ_{wp} . На тот момент в корневой зоне не останется воды на эвапотранспирацию, K_s становится нулевым и истощение корневой зоны достигает своего максимального значения TAW. Соответственно, получаем следующие ограничения для $D_{r,i}$:

$$0 \leq D_{r,i} \leq TAW \quad (86)$$

Начальное истощение

Для определения водного баланса корневой зоны должно быть оценено начальное истощение. Начальное истощение выводится из измеренной почвенной влаги с помощью следующей формулы:

$$D_{r,i-1} = 1000 (\theta_{FC} - \theta_{i-1}) Z_r \quad (87)$$

где

θ_{i-1} - среднее содержание влаги в почве для эффективной корневой зоны. После сильного дождя или полива можно предположить, что состояние корневой зоны приближено к полевой влагоемкости, т. е. $D_{r,i-1} \approx 0$.

Осадки (P), поверхностный сток (RO) и полив (I)

P_i эквивалентно суточному выпадению осадков. Суточные осадки в количестве, меньшем $0,2 ET_o$, обычно полностью испаряются и могут не учитываться при расчете водного баланса, особенно когда применяется метод с использованием единичного коэффициента культуры. I_i эквивалентно среднему объему поливной воды, идущей на инфильтрацию, для всей по-

верхности поля. Поверхностный сток во время выпадения осадков может быть предсказан с использованием стандартных процедур из гидрологических учебников.

Капиллярный подъем (CR)

Количество воды, переходящей с помощью капиллярного подъема с зеркала подземных вод в корневую зону, зависит от типа почвы, глубины зеркала и степени увлажненности корневой зоны. Обычно CR принимается равным нулю, если зеркало подземных вод расположено на глубине более 1 м от нижней границы корневой зоны. Некоторую информацию по CR можно найти в публикации ФАО по ирригации и дренажу № 24. CR будет одной из тем следующих публикаций ФАО.

Эвапотранспирация (ET_c)

Если истощение почвенной влаги меньше RAW, то эвапотранспирация культур $ET_c = K_c ET_o$. Как только $D_{r,i}$ превысит RAW, эвапотранспирация культур снижается и ET_c может быть вычислена с помощью уравнений 80 и 81.

Глубокая фильтрация (DP)

После сильного дождя или обильного полива содержание влаги в почве может превысить полевую влагоемкость. В данной простой процедуре предполагается, что содержание влаги находится на уровне θ_{FC} в день увлажнения, таким образом истощение $D_{r,i}$ в уравнении 85 становится нулевым. Следовательно, после сильного дождя или обильного полива

$$DP_i = (P_i - RO_i) + I_i - ET_{c,i} - D_{r,i-1} \geq 0 \quad (88)$$

Пока содержание влаги в корневой зоне лежит ниже полевой влагоемкости (т. е. $D_{r,i} > 0$), почва не иссушается и $DP_i = 0$.

DP_i из уравнений 85 и 88 нельзя путать с $DP_{e,i}$ из уравнений 77 и 79 для слоя, с которого происходит испарение. Оба члена можно вычислять одновременно, но они не зависят друг от друга.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛИВОВ

Орошение требуется, когда осадков недостаточно для компенсации потерь воды через эвапотранспирацию. Первостепенной задачей орошения является полив в надлежащий период и в надлежащем количестве. Вычисляя водный баланс корневой зоны на суточной основе (уравнение 85), можно планировать время и норму будущих поливов. Во избежание водного стресса поливы необходимо выполнять до или в момент, когда легкодоступная влага истощается ($D_{r,i} \leq RAW$). Чтобы избежать потерь на глубокую фильтрацию, которая может вымыть соответствующие питательные вещества из корневой зоны, чистая поливная норма должна быть меньше или равняться истощению корневой зоны ($I_i \leq D_{r,i}$).

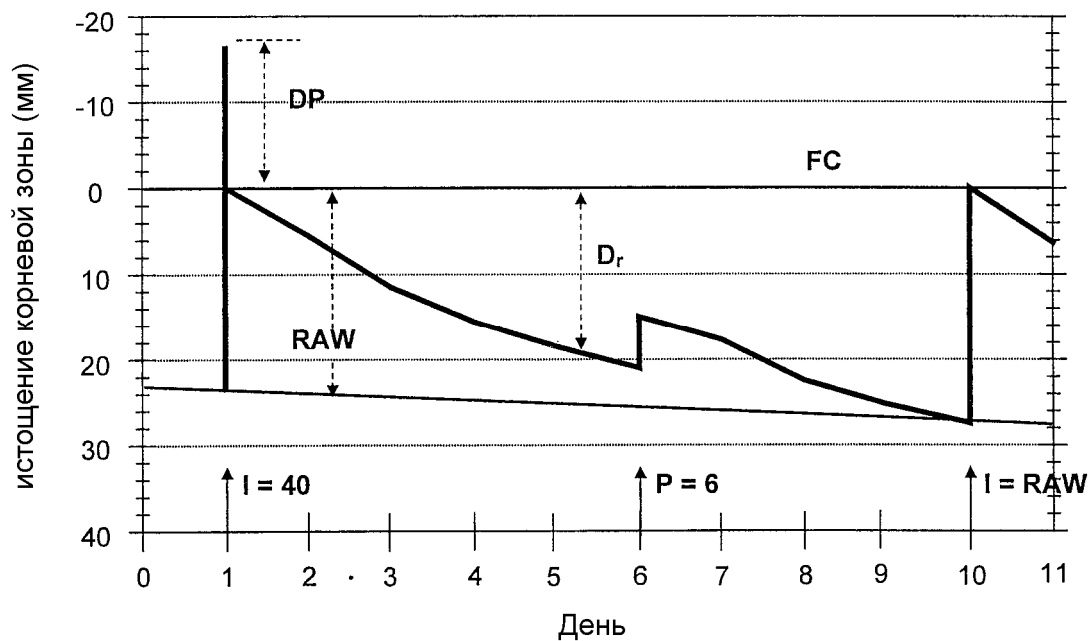
Пример 38 показывает использование водного баланса корневой зоны для определения сроков орошения во избежание водного стресса. В данном примере используются различные расчеты K_c из примера 35. Полная “таблица”, которая включает все необходимые расчеты для определения графиков орошения и прогнозирования $K_c = K_{cb} + K_e$ для суточного планирования, представлена в приложении 8.

ПРИМЕР 38**Планирование орошения во избежание водного стресса**

Составить план поливов для примера 35. Предполагается, что:

- поливы выполняются, когда RAW истощается,
- фактор истощения (p) равен 0,6,
- все поливы выполняются и осадки выпадают в начале дня,
- глубина корневой зоны (Z_r) составляет 0,3 м в 1-й день и увеличивается до 0,35 м к 10-му дню,
- истощение корневой зоны ($D_{r,i-1}$) на начало первого дня равно RAW.

Из уравнения 82 $TAW = 1\,000 (0.23 - 0.10) Z_{r,i} = 130 Z_{r,i}$ [мм]
 Из уравнения 83 $RAW = 0.6 TAW = 78 Z_{r,i}$ [мм]
 На 1й день, когда $Z_r = 0.3$ м: $D_{r,i-1} = RAW = 78 (0.3) = 23$ мм



(1) день	(2) ET _o	(3) Z _r	(4) RA W	(5) D _{r,i} на- чало	(6) P- RO	(7) I	(8) K _s	(9) K _{cb}	(10) K _e	(11) K _c	(12) ET _c	(13) DP	(14) D _{r,i} ко- нец
	мм/с	м	мм	мм	мм	мм					мм	мм	мм
нач.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23
1	4,5	0,30	23	0	0	40	1	0,30	0,91	1,21	5,5	17	5
2	5,0	0,31	24	5	0	0	1	0,31	0,90	1,21	6,1	0	12
3	3,9	0,31	24	12	0	0	1	0,32	0,72	1,04	4,0	0	16
4	4,2	0,32	25	16	0	0	1	0,33	0,37	0,70	2,9	0	18
5	4,8	0,32	25	18	0	0	1	0,34	0,18	0,52	2,5	0	21
6	2,7	0,33	26	15	6	0	1	0,36	0,64	1,00	2,7	0	18
7	5,8	0,33	26	18	0	0	1	0,37	0,45	0,82	4,7	0	22
8	5,1	0,34	26	22	0	0	1	0,38	0,17	0,55	2,8	0	25
9	4,7	0,34	27	25	0	0	1	0,39	0,08	0,47	2,2	0	27
10	5,2	0,35	27	0	0	27	1	0,40	0,81	1,21	6,3	0	6

(1) номер дня

(2) из примера 35

(3) Z_r известно (интерполировано между 0,3 м 1-го дня и 0,35 м 10-го дня)

(4) уравнение 83

(5) D_{r,i} нач (истощение корневой зоны на начало дня)

Если осадки выпадают и поливы выполняются в начале дня, то
 $D_{r,i \text{ нач}} = \max (D_{r,i-1 \text{ конец}} - I - (P-RO), \text{ или } 0)$

Если осадки выпадают и поливы выполняются в конце дня, то
 $D_{r,i \text{ нач}} = D_{r,i-1 \text{ конец}}$
 где D_{r,i-1} конец берется из столбца 14 предыдущего дня

Поскольку глубина корневой зоны увеличивается с каждым днем, для обновления D_{r,i} необходимо рассматривать содержание влаги подпочвы (θ_{sub})
 $D_{r,i} = D_{r,i-1} + 1\ 000 (\theta_{FC} - \theta_{sub,i-1}) \Delta Z_{r,i}$

В данном примере предполагается, что θ_{sub} находится в состоянии полевой влагоемкости (из-за обильного предварительного полива и чрезмерного выпадения осадков в предыдущие дни). Поэтому, для D_{r,i} можно использовать комбинацию уравнений.

(6) из примера 35

(7) орошение требуется, когда D_{r,i} ≥ RAW

В 1-й день норма орошения (с фильтрацией в почву) задается (из примера 35: I = 40 мм)

На 10-й день требуется уже другая норма. При чистой норме орошения 27 мм происходит подпитка корневой зоны и удается избежать потерь воды через глубокую фильтрацию (DP = 0).

(8) уравнение 84, где K_s = 1 для D_{r,i} ≤ RAW

(9) из примера 35

(10) дни 1-9: из примера 35

день 10-й: после дополнительного полива в начале дня верхний слой почвы увлажняется и □_r = 1 или из уравнения 71: K_e = (1,21 - 0,40) = 0,81

(11) K_c = K_sK_{cb} + K_e

(12) уравнение 80

(13) уравнение 88, где D_{r,i-1} берется из столбца 14 предыдущего дня

(14) D_{r,i} (истощение корневой зоны в конце дня) = начальное D_{r,i} на начало следующего дня (см. сноску 5). Из уравнения 85, где D_{r,i-1} берется из столбца 14 предыдущего дня.

ДЕЙСТВИЕ ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВ

Соли в почвенном растворе могут уменьшить эвапотранспирацию, делая почвенную влагу менее “доступной” для ее извлечения корнями растений. Соли связаны с водой, поэтому для растений требуется дополнительная сила, чтобы извлечь воду из засоленных почв. Присутствие солей в почвенном растворе уменьшает его полную потенциальную энергию. Кроме того, некоторые соли оказывают токсическое действие на растения и могут снизить метаболизм и рост растений. Здесь представлена функция, которая определяет снижение эвапотранспирации, вызванное минерализацией почвенной влаги. Данная функция получается из объединения уравнений связи урожайность-минерализация из сборника ФАО по ирригации и дренажу № 29 с уравнениями связи урожайность-ЕТ из сборника № 33. Итоговое уравнение дает первое приближение ожидаемого при различной минерализации снижения эвапотранспирации.

Имеются данные, что урожайность культур и транспирация не настолько чувствительны к низкому осмотическому потенциалу, как к низкому матричному потенциалу. В условиях засоления многие растения могут частично компенсировать низкий осмотический потенциал почвенной влаги формированием более высокого содержания растворенных веществ. Это выполняется путем абсорбирования ионов из почвенного раствора и синтеза органических осмолитов. Обе эти реакции уменьшают влияние осмотического потенциала на водоотдачу. Однако, синтез органических осмолитов требует затрат метаболической энергии. Поэтому, рост растений часто задерживается в условиях засоления. Это влияет на транспирацию через уменьшение покрытия растениями поверхности земли и, кроме того, иногда через частичное закрытие устьиц.

К другим воздействиям солей на почву относятся прямое натриевое и хлоридное отравление и нехватка питательных веществ. Это снижает рост растений через уменьшение степени удлиненности листа, расширения и разделения клеток в листьях. Модальность зависит от метода орошения. При дождевании адсорбция натрия и хлорида через лист может создать токсичные условия для всех разновидностей культур. При поверхностном или капельном орошении прямая токсичность обычно возникает только на виноградниках или деревьях; однако, высокий уровень натрия может вызвать нехватку кальция у всех культур.

Так как концентрация солей изменяется по мере изменения содержания почвенной влаги, засоление почвы обычно измеряется и выражается на основе электрической проводимости насыщенной вытяжки почвы (EC_e). EC_e определяется как электрическая проводимость почвенного раствора после добавления дистиллированной воды, достаточной для приведения содержания почвенной влаги к насыщению. EC_e обычно выражается в децисименсах на метр ($dCm\ m^{-1}$). При оптимальных условиях управления урожайность культур остается на потенциальном уровне, пока не будет достигнута определенная пороговая электрическая проводимость насыщенной вытяжки почвенной влаги ($EC_{e\ threshold}$). Если средняя EC_e корневой зоны становится выше данной критической пороговой величины, предполагается, что урожайность начинает падать пропорционально увеличению засоления. Степень падения урожайности с увеличением засоления обычно выражается как уклон b , измеряющийся в уменьшении урожайности (%) на увеличение EC_e (dCm/m).

Все растения неодинаково реагируют на засоление; некоторые культуры могут давать приемлемую урожайность при достаточно высоком уровне засоления почв. Это объясняется тем, что некоторые культуры могут лучше регулировать осмотические условия, что позволяет им извлекать больше воды из засоленной почвы, или они могут быть более устойчивы к некоторым из токсических действий засоления. Солеустойчивость большинства сельхозкультур дана в сборниках ФАО № 33 и 48. $EC_{e\ threshold}$ и уклон b перечислены в таблице 23 из этих же источников.

Из таблицы 23 видно, что диапазон солеустойчивости сельхозкультур изменяется в 8-10 раз. Таким образом, действие засоленности почв на урожайность и эвапотранспирацию культур зависит от каждой культуры в отдельности.

Параметры $EC_{e\ threshold}$ и b были определены в экспериментальных исследованиях, главным образом, с использованием стабильного орошения, при котором содержание почвенной

влаги поддерживалось на уровне, близком к полевой влагоемкости. Однако, при различных графиках орошения для дождевания и поверхностного орошения содержание почвенной влаги обычно значительно ниже полевой влагоемкости, таким образом, ЕС почвенного раствора EC_{sw} повышается до орошения, несмотря на то, что ЕС насыщенной вытяжки не изменяется. Повышенная концентрация солей в почвенном растворе уменьшает осмотический потенциал почвенного раствора (он становится отрицательным), так что растение должно затратить больше метаболической энергии и механической силы для абсорбции воды. Кроме того, метаболическое и токсическое действие солей на растения может стать более явно выраженным по мере иссушения почвы и увеличения концентрации солей. Однако изменения в содержании почвенной влаги во время межполивного интервала не влияют сильно на эвапотранспирацию культур. Это объясняется увеличением содержания почвенной влаги до уровней, лежащих выше наблюдаемых при стабильном орошении в начале длительного межполивного интервала. Позже, во время длительного межполивного интервала, происходит аналогичное нейтрализующее уменьшение содержания почвенной влаги. Помимо этого, распределение солей в корневой зоне при редком орошении может уменьшить воздействие засоления в первой части межполивного интервала. При частом орошении потери через испарение с почвы выше. Следовательно, при той же поливной норме доля выщелачивания уменьшается. По этим причинам продолжительность межполивного интервала и изменение ЕС почвенной влаги во время интервала обычно не являются факторами уменьшения ET, при условии, что одинаковые объемы воды просачиваются в корневую зону с течением времени.

В некоторых случаях, увеличенное испарение при частом орошении может нейтрализовать уменьшение K_s , вызванное высоким EC_e корневой зоны. В этих условиях суммарное K_s и ET_c не сильно отличаются от стандартных условий без засоления при менее частом орошении, даже если урожайность культур и эвапотранспирация уменьшаются. По этой причине в условиях засоления уменьшающий фактор K_s должен применяться только с использованием метода на основе двойного K_s .

В статьях о влиянии засоления почв на производство сельхозкультур Лети (1985) и Шелхевет (1994) пришли к заключению, что засоление почв и водный стресс обычно дополняют друг друга при воздействии на эвапотранспирацию культур. Поэтому, одни и те же функции связи урожайность-ET распространяются как на стресс, вызванный дефицитом воды, так и на стресс, вызванный засолением.

ЗАВИСИМОСТЬ УРОЖАЙНОСТЬ-ЗАСОЛЕНИЕ

Широко практикуемый метод для прогнозирования падения урожайности культур из-за засоления описан в сборнике ФАО по орошению и дренажу № 29. В данном методе предполагается, что при оптимальных условиях управления урожайность культур остается на потенциальном уровне, пока не будет достигнута определенная пороговая электрическая проводимость почвенного раствора. Когда засоление становится выше этого порога, предполагается, что урожайность культур падает пропорционально росту засоления. Минерализация почвенной влаги выражается через электрическую проводимость насыщенной вытяжки, EC_e . В форме уравнения это выглядит следующим образом:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = 1 - (EC_e - EC_{e\text{threshold}}) \frac{b}{100} \quad (89)$$

когда $EC_e > EC_{e\text{threshold}}$, где:

Y_a - фактическая урожайность культуры;

Y_m - максимальная потенциальная урожайность при $EC_e < EC_{e\text{threshold}}$;

EC_e - средняя электрическая проводимость насыщенной вытяжки из корневой зоны [дСм m^{-1}];

$EC_{e\text{threshold}}$ - электрическая проводимость насыщенной вытяжки на пороге EC_e , когда урожайность сельхозкультуры становится ниже Y_m [дСм m^{-1}];

b - сокращение урожайности по мере увеличения EC_e [%/(дСм m^{-1})].

Значения $EC_{e \text{ threshold}}$ и b даны в сборнике ФАО по ирригации и дренажу № 29 и 48, а также таблице 23 для многих сельскохозяйственных культур.

Данные засоление-урожайность из сборников ФАО №29 и 48 в основном были получены из исследований, когда содержание почвенной влаги держалось на потенциале -3 м (30 кПа) или выше на глубине 0,3-0,6 м в зависимости от вида сельхозкультуры. Однако, в данных сборниках указывается, что для большинства сельхозкультур эти данные можно переносить на типовые полевые условия, где легкодоступная почвенная влага (RAW) истощается между поливами.

ЗАВИСИМОСТЬ УРОЖАЙНОСТЬ-ВОДНЫЙ СТРЕСС

В сборнике ФАО №33 была введена простая линейная функция сельхозкультура-вода для прогнозирования снижения урожайности, когда стресс сельхозкультуры вызван дефицитом почвенной влаги:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_{c \text{ adj}}}{ET_c}\right) \quad (90)$$

где

K_y - фактор зависимости урожайности [-]

$ET_{c \text{ adj}}$ - скорректированная (фактическая) эвапотранспирация сельхозкультуры [мм сут^{-1}];

ET_c - эвапотранспирация сельхозкультуры для стандартных условий (отсутствие водного стресса) [мм сут^{-1}].

K_y - это фактор, который описывает снижение относительной урожайности по мере уменьшения ET_c , вызванного дефицитом почвенной влаги. В сборнике ФАО № 33 K_y имеет определенные значения для каждой сельхозкультуры и они могут изменяться в течение вегетационного сезона. Обычно спад урожайности вследствие дефицита воды в период вегетации и созревания относительно небольшой, а в период цветения и формирования плодов урожайность сильно уменьшается. Значения K_y для отдельных периодов роста и для всего вегетационного сезона включены в сборник ФАО №33. Сезонные значения K_y суммированы в таблице 24.

КОМБИНИРОВАННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЗАСОЛЕНИЕ-УМЕНЬШЕНИЕ ET

Отсутствие водного стресса ($D_r < RAW$)

Когда засоление возникает при отсутствии водного стресса, уравнения 89 и 90 могут быть скомбинированы и решены для эквивалента K_s , где $K_s = ET_{c \text{ adj}}/ET_c$:

$$K_s = 1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_{e \text{ thresh}}) \quad (91)$$

в условиях, когда $EC_e > EC_{e \text{ порог}}$ и истощение почвенной влаги меньше уровня легкодоступной влаги ($D_r < RAW$). D_r и RAW определены в предыдущем параграфе.

Наличие водного стресса ($D_r > RAW$)

Когда помимо засоления возникает стресс почвенной влаги, уравнение 84 из главы 8 и уравнения 89 и 90 комбинируются в следующее выражение:

$$K_s = \left(1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_{e\text{thresh}})\right) \left(\frac{TAW - D_r}{TAW - RAW}\right) \quad (92)$$

для условий, когда $EC_e > EC_{e\text{threshold}}$ и $D_r > RAW$. На рисунке 44 показано влияние уменьшения засоления на K_s по мере роста засоления. Отметьте, что данный подход предполагает, что RAW (и p) не изменяются с ростом засоления. Для некоторых сельхозкультур это не всегда хорошее предположение.

Ограничения

Поскольку влияние засоления на рост растений, урожайность и эвапотранспирацию сельхозкультуры является интегрированным во времени процессом, для прогнозирования уменьшения эвапотранспирации обычно используется только сезонное значение K_y . В сборнике ФАО № 33 значения K_y даны только для 23 сельхозкультур. Сезонные значения K_y из сборника № 33 суммированы в таблице 24. Для многих сельхозкультур сезонное K_y приблизительно равно 1. Для сельхозкультур с неизвестным K_y в уравнениях 91 и 92 можно использовать $K_y = 1$ или можно выбрать K_y для схожей сельхозкультуры.

Уравнения 91 и 92 предлагаются только в качестве приблизительной оценки влияния засоления на ET , и представляют общее действие засоления на эвапотранспирацию, возникающее в течение длительного периода времени (измеряемое неделями или месяцами). Эти уравнения не являются точными для прогнозирования ET_c для определенных дней. Они также не включают другие воздействия, как например токсичность ионов. Применение уравнений 91 и 92 предполагает, что EC_e представляет среднее значение EC_e для корневой зоны.

Данные уравнения могут быть недействительными при высокой степени засоления, где линейные зависимости между EC_e , урожайностью сельхозкультуры и K_s могут не действовать. Использование уравнений 91 и 92 обычно ограничивается $EC_e < EC_{e\text{threshold}} + 50/b$. Кроме того, уравнения предсказывают $Y_a = 0$ до того, как $K_s = 0$ когда $K_y > 1$ и наоборот.

Как указывалось ранее, уменьшение ET_c при засоленных почвах частично вызвано малым размером растения и долей покрытия земли растительным покровом. Эти эффекты в основном включены в коэффициентные величины в таблице 23. Поэтому там, где на рост растений действует засоление и применяются уравнения 91 и 92, другие ограничения K_c не требуются, например, использование LAI или доли покрытия земли растительным покровом, как описано в главе 9.

ТАБЛИЦА 23

Солеустойчивость сельхозкультур, выраженная через электрическую проводимость насыщенную вытяжки на пороге, когда урожайность падает ниже полного потенциала урожайности ($EC_{e, threshold}$) и через уклон (b) уменьшения урожайности при увеличении засоления выше $EC_{e, threshold}$

Сельхозкультуры ¹	$EC_{e, threshold}$ ² (дСм м ⁻¹) ³	b ⁴ (% / дСм м ⁻¹)	Оценка
а. Мелкие овощи			
Брокколи	2,8	9,2	MS
Брюссельская капуста	1,8	9,7	MS
Капуста	1,0 - 1,8	9,8 - 14,0	MS
Морковь	1,0	14,0	S
Цветная капуста	1,8	6,2	MS
Сельдерей	1,8 - 2,5	6,2 - 13,0	MS
Салат - латук	1,3 - 1,7	12,0	MS
Лук	1,2	16,0	S
Шпинат	2,0 - 3,2	7,7 - 16,0	MS
Редиска	1,2 - 2,0	7,6 - 13,0	MS
б. Овощи – семейство пасленовых			
Баклажан	-	-	MS
Перец	1,5 - 1,7	12,0 - 14,0	MS
Томат	0,9 - 2,5	9,0	MS
с. Семейство огурцовых			
Огурцы	1,1 - 2,5	7,0 - 13,0	MS
Дыня	-	-	MS
Тыква, зимняя	1,2	13,0	MS
Кабачок, цукини	4,7	10,0	MT
Кабачок (фестончатой формы)	3,2	16,0	MS
Арбуз	-	-	MS
д. Корнеплоды и клубнеплоды			
Свекла, красная	4,0	9,0	MT
Пастернак	-	-	S
Картофель	1,7	12,0	MS
Сладкий картофель	1,5 - 2,5	10,0	MS
Репка	0,9	9,0	MS
Сладкая свекла	7,0	5,9	T
е. Бобовые			
Бобы, красные	1,0	19,0	S
Боб огородный	1,5 - 1,6	9,6	MS
Коровий горох	4,9	12,0	MT
Земляной орех	3,2	29,0	MS
Горох	1,5	14,0	S
Соевые бобы	5,0	20,0	MT
ф. Многолетние овощи (с периодом покоя зимой и первоначально голый или мульчируемой почвой)			
Артишоки	-	-	MT
Спаржа	4,1	2,0	T
Мята	-	-	-
Земляника	1,0 - 1,5	11,0 - 33,0	S
г. Волокнистые культуры			
Хлопок	7,7	5,2	T
Лен	1,7	12,0	MS

Сельхозкультуры ¹	$EC_{e,threshold}$ ² (дСм м ⁻¹) ³	b ⁴ (% / дСм м ⁻¹)	Оценка
h. Масличные культуры			
Касторовый боб	-	-	MS
Сафлор	-	-	MT
Подсолнечник	-	-	MS
i. Злаки			
Ячмень	8,0	5,0	T
Овес	-	-	MT
Кукуруза	1,7	12,0	MS
Кукуруза, сладкая	1,7	12,0	MS
Просо	-	-	MS
Сорго	6,8	16,0	MT
Рис ⁶	3,0	12,0	S
Пшеница (<i>Triticum aestivum</i>)	6,0	7,1	MT
Пшеница, полукарликовая (<i>T. aestivum</i>)	8,6	3,0	T
Пшеница, твердая (<i>Triticum turgidum</i>)	5,7 - 5,9	3,8 - 5,5	T
j. Кормовые			
Люцерна	2,0	7,3	MS
Ячмень (кормовой)	6,0	7,1	MT
Бермудская трава	6,9	6,4	T
Клевер, берсим	1,5	5,7	MS
Клевер (шведский, красный, дикий)	1,5	12,0	MS
Коровий горох (кормовой)	2,5	11,0	MS
Овсяница	3,9	5,3 - 6,2	MT
Лисохвост	1,5	9,6	MS
Хардингграсс	4,6	7,6	MT
Полевичка	2,0	8,4	MS
Кукуруза (кормовая)	1,8	7,4	MS
Ежа сборная	1,5	6,2	MS
Райграсс (многолетний)	5,6	7,6	MT
Сесбания	2,3	7,0	MS
Сферофиса	2,2	7,0	MS
Суданская трава	2,8	4,3	MT
Ледвянец обыкновенный	5,0	10,0	MT
Ледвянец болотный	2,3	19,0	MS
Вика обыкновенная	3,0	11,0	MS
Житняк высокий	7,5	4,2	T
Житняк гребневидный, выведенный	7,5	6,9	T
Житняк гребневидный нормальный	3,5	4,0	MT
Волоснец, безостый	2,7	6,0	MT
к. Сахарный тростник			
	1,7	5,9	MS
l. Тропические фрукты и деревья			
Банан	-	-	MS
Кофе	-	-	-
Финиковые пальмы	4,0	3,6	T
Пальмовые деревья	-	-	T
Ананас (многолетняя культура)	-	-	MT
Чай	-	-	-
m. Виноград и ягоды			
Ежевика	1,5	22,0	S

Сельхозкультуры ¹	ЕС _{e,threshold} ² (дСм м ⁻¹) ³	b ⁴ (% / дСм м ⁻¹)	Оценка
Бойзенова ягода	1,5	22,0	S
Виноград	1,5	9,6	MS
Хмель	-	-	-
п. Фруктовые деревья			
Миндаль	1,5	19,0	S
Авокадо	-	-	S
Цитрусовые (грейпфрут)	1,8	16,0	S
Цитрусовые (апельсин)	1,7	16,0	S
Цитрусовые (лимон)	-	-	S
Цитрусовые (лайм)	-	-	S
Цитрусовые (помпельмус)	-	-	S
Цитрусовые (мандарин)	-	-	S
Хвойные деревья	-	-	MS/MT
Плодовые деревья			
- яблони	-	-	S
- персики	1,7	21,0	S
- вишни	-	-	S
- груша	-	-	S
- абрикос	1,6	24,0	S
- слива, чернослив	1,5	18,0	S
- гранат	-	-	MT
Оливки	-	-	MT

¹ Данные служат только в качестве руководства. Стойкость изменяется в зависимости от климата, почвенных условий и агротехники. Культуры обычно менее стойкие во время прорастания.

² ЕС_{e, threshold} означает среднее засоление корневой зоны, при котором урожайность начинает снижаться.

³ Засоление корневой зоны измеряется через электрическую проводимость насыщенной вытяжки, определяемую в децисименсах на метр (дСм м⁻¹) при 25 °С.

⁴ b – это процентное уменьшение урожайности к 1 дСм/м увеличения ЕС_e выше ЕС_{e, threshold}

⁵ Используются следующие оценки: T = стойкая, MT = среднестойкая, MS = среднечувствительная, S = чувствительная.

⁶ Так как пади рис растет в условиях затопления, величины относятся к электрической проводимости почвенной влаги, когда растения погружены в воду.

Первоисточники:

Ayers and Westcot, 1985. FAO Irrigation and Drainage Paper No 29. Water quality for agriculture; Rhoades, Kandiah and Mashali, 1992. FAO Irrigation and Drainage Paper No 48. The use of saline waters for crop productions.

Применение

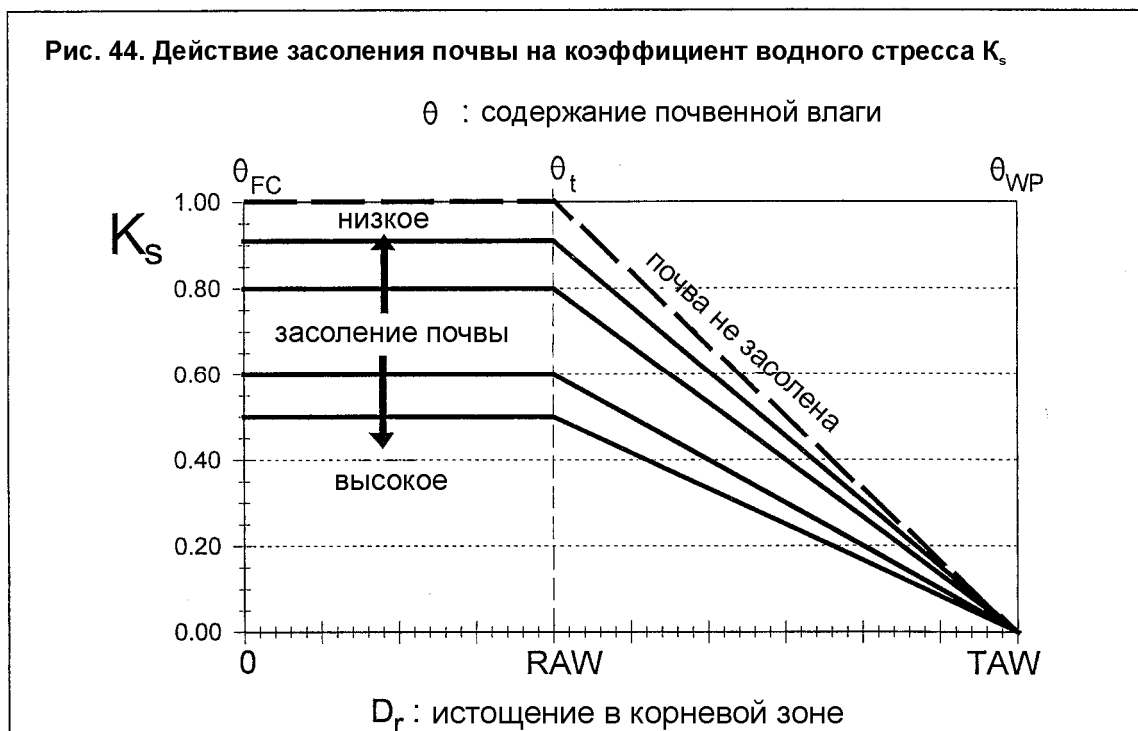
В условиях устойчивого состояния величина ЕС_e может быть определена как функция от ЕС оросительной воды (ЕС_{iw}) и доли выщелачивания с использованием стандартной формулы выщелачивания. Например, формула выщелачивания $LR = EC_{iw} / (5EC_e - EC_{iw})$ (ФАО-29) определяет потребность в промывке, когда до орошения процентное соотношение отбираемой воды от верхней до нижней четверти корневой зоны составляет приблизительно 40-30-20-10 %. ЕС_{iw} является электрической проводимостью оросительной воды. Из этого уравнения ЕС_e оценивается в виде:

$$EC_e = \frac{1 + LF}{LF} \frac{EC_{iw}}{5} \quad (93)$$

где LF - фактическая доля выщелачивания, используется вместо LR - потребности в промывке. Уравнение 93 определяет $EC_e = 1,5 EC_{iw}$ в условиях, когда используется 15-20 % доля выщелачивания. Исходя из местных характеристик, вместо уравнения из сборника ФАО № 29 могут быть использованы другие уравнения для доли выщелачивания. Уравнение 93 является верным только в том случае, когда качество оросительной воды и доля выщелачивания остаются постоянными в течение всего вегетационного сезона. Для достижения солевого равновесия в почве необходимо время. Если зимой идут дожди (и осадки с водой высокого качества) и часто проводится хорошая промывка, то солевой баланс почвы будет совершенно другим в начале сезона и средняя EC_e корневой зоны будет ниже величины, определенной из уравнения 93. В этих особых условиях желательна соответствующая местная калибровка уравнения 93.

ТАБЛИЦА 24
Функции сезонной зависимости урожайности (сборник ФАО № 33)

Сельхозкультура	K_v	Сельхозкультура	K_v
Люцерна	1,1	Картофель	1,1
Банан	1,2-1,35	Сафлор	0,8
Бобы	1,15	Сорго	0,9
Капуста	0,95	Соя	0,85
Цитрусовые	1.1 - 1,3	Яровая пшеница	1,15
Хлопок	0,85	Сахарная свекла	1,0
Виноград	0,85	Сахарный тростник	1,2
Земляной орех	0,70	Подсолнечник	0,95
Кукуруза	1,25	Томат	1,05
Лук	1,1	Арбуз	1,1
Горох	1,15	Озимая пшеница	1,05
Перец	1,1		



ПРИМЕР 39**Действие засоления почвы на эвапотранспирацию сельхозкультуры**

Бобы выращиваются на иловатых суглинках и орошаются в середине сезона с использованием воды, минерализация которой $EC_{iw} = 1$ дСм м⁻¹. Доля выщелачивания составляет 15 %. EC_e , порог и уклон из таблицы 23 составляет, соответственно, 1,0 дСм м⁻¹ и 19 %/(дСм м⁻¹). Сезонное K_y из сборника ФАО № 33 и таблицы 24 для бобов $K_y = 1,15$. Сравнить воздействие на эвапотранспирацию культуры для различных уровней истощения почвенной влаги в корневой зоне при засолении и его отсутствии. TAW и RAW для бобовых культур равны 110 и 44 мм (для $p = 0,4$).

Поскольку доля выщелачивания составляет 0,15, EC_e оценивается из уравнения 93 как $EC_e = 1,5 EC_w = 1,5 (1) = 1,5$ дСм м⁻¹. K_s при наличии стресса засоления и отсутствии стресса влажности:

$$K_s = \left(1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_c)\right) = \left(1 - \frac{19}{1.15(100)} (1.5 - 1.0)\right) = 0.92$$

K_s при наличии стресса влажности, но при отсутствии стресса засоления:

$$K_s = \left(\frac{TAW - D_r}{TAW - RAW}\right) = \left(\frac{110 - D_r}{100 - 44}\right) = \left(\frac{110 - D_r}{66}\right)$$

K_s при наличии стресса влажности и стресса засоления:

$$K_r = \left(1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_c)\right) \left(\frac{TAW - D_r}{TAW - RAW}\right) = 0.92 \left(\frac{110 - D_r}{66}\right)$$

Воздействие на эвапотранспирацию культуры для различных уровней истощения почвенной влаги в корневой зоне (D_r):

D_r (мм)	K_s почва незасолена		K_s почва засолена ($EC_e=1,5$ дСм м ⁻¹) (ур-е 92)		Дополнительное сокращение в потенциальной ET _c из-за засоления
	K_s	ET _c	K_s	ET _c	
0	1,00	ET _c не уменьшается	0,92	8 % сокращение в ET _c	8 %
35	1,00	ET _c не уменьшается	0,92	8 % сокращение в ET _c	8 %
40	1,00	ET _c не уменьшается	0,92	8 % сокращение	8 %
44	1,00	ET _c не уменьшается	0,92	8 % сокращение	8 %
50	0,91	9 % сокращение	0,83	17 % сокращение	8 %
60	0,76	24 % сокращение	0,69	31 % сокращение	7 %
70	0,61	39 % сокращение	0,56	44 % сокращение	5 %
80	0,45	55 % сокращение	0,42	58 % сокращение	3 %
90	0,30	70 % сокращение	0,28	72 % сокращение	2 %
100	0,15	85 % сокращение	0,14	86 % сокращение	1 %
110	0,00	ET _c = 0	0,00	ET _c = 0	-

Глава 9

ET_c для естественной, нетипичной растительности и растительности, отличной от первоначальной

Нетипичная растительность относится к видам или системам сельскохозяйственных культур, которые не перечислены или не описаны в таблицах 12 и 17. Растительность, отличная от первоначальной, определяется здесь как растительность, имеющая менее совершенные условия развития или показатели (т. е. относительно более слабая плотность, высота, листовая площадь, плодородие или жизнеспособность) по сравнению с "первоначальными" условиями.

Подход, с помощью которого сельхозкультура характеризуется через коэффициент сельхозкультуры K_c , а эвапотранспирация культуры получается через произведение K_c и эталонной эвапотранспирации ET_0 , обеспечивает простой и удобный путь определения эвапотранспирации для естественной вегетации и нетипичной практики культивирования. Эта глава представляет методики оценки значений K_c для естественной растительности и для сельхозкультур, у которых значения K_c не известны.

МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ

Как показано на рисунке 27 первым шагом в методе с использованием $K_c ET_0$ является оценка продолжительности стадий развития. Это также применяется к естественной и другим видам растительности. Следующим шагом является построение кривых коэффициента сельхозкультуры, которые показывают отношение ET_c к ET_0 во время различных стадий роста растительности.

Начальная стадия роста

Процедура оценки коэффициентов сельхозкультуры в начальной стадии роста для естественной, нетипичной и отличной от первоначальной растительности идентична процедуре, описанной в главе 6 (единичный коэффициент сельхозкультуры $K_{c\ ini}$) или главе 7 (двойной коэффициент сельхозкультуры $K_{cb\ ini} + K_c$). На данной стадии коэффициент сельхозкультуры главным образом определяется частотой увлажнения почвы.

Середина и конец сезона

K_c в середине сезона ($K_{c\ mid}$ и $K_{cb\ mid}$) и в меньшей степени в период окончания сезона отличается от описанных в предыдущих главах. Поскольку покрытие земли растительным покровом для естественной и отличной от первоначальной растительности зачастую снижено, на K_c в значительной степени влияют частота выпадения осадков и/или поливов, площадь листа и покрытия земли.

Метод двойного коэффициента сельхозкультуры

Определение K_c для естественной, нетипичной и отличной от первоначальной растительности должно придерживаться метода, описанного в главе 7, в котором используются отдельные коэффициенты транспирации (K_{cb}) и испарения (K_e). Действие испарения с поверхности почвы может оцениваться непосредственно.

В данном параграфе представлены две методики, которые могут быть использованы для коррекции основного коэффициента культур ($K_{cb \text{ mid adj}}$) для редкой растительности. В этих подходах $K_{cb \text{ mid adj}}$ оценивается либо из LAI (уравнение 97), либо из эффективного покрытия земли растительным покровом (уравнение 98). После определения $K_{cb \text{ mid adj}}$ для получения коэффициента сельхозкультуры в середине сезона должен быть определен коэффициент испарения с почвы K_e , т. е. $K_{c \text{ mid adj}} = K_{cb \text{ mid adj}} + K_e$. Методики вычисления K_e даны в главе 7.

Даже если величина $K_{cb \text{ mid adj}}$ небольшая, общий $K_{c \text{ adj}} (= K_{cb \text{ adj}} + K_e)$ после выпадения осадков может равняться или быть больше K_c для первоначальной растительности из-за поверхностного испарения с почвы среди редкой растительности.

Метод единичного коэффициента сельхозкультуры

При использовании единичного коэффициента сельхозкультуры K_c из главы 6 средние результаты увлажнения почвы объединяются в общее среднее значение K_c . В следующих параграфах дается руководство для оценки $K_{c \text{ adj}}$. Единичный коэффициент сельхозкультуры может быть также получен из скорректированного $K_{c \text{ adj}}$ при рассмотрении частоты увлажнения почвы, т. е. в середине сезона $K_{c \text{ adj}} = K_{cb \text{ adj}} + 0,05$ для частого увлажнения и $K_{cb \text{ adj}} + 0,10$, когда почва увлажняется один раз в неделю. Для более частого увлажнения следует использовать метод двойного коэффициента сельхозкультур.

Другой альтернативой является использование уравнений 97 и 98 для определения K_c вместо K_{cb} . Тогда $K_{c \text{ min}}$ в уравнениях 97 и 98 может приниматься равным $K_{c \text{ ini}}$, а $K_{c \text{ ini}}$ оцениваться из рисунка 29 или 30. Использование $K_{c \text{ ini}}$ объединяет действия испарения с почвы и, таким образом, служит в качестве нижней границы оценки $K_{c \text{ mid}}$.

Условия водного стресса

При небольшом объеме осадков или орошения может быть вызван водный стресс и эвапотранспирация падает ниже стандартного уровня ET_c . Уменьшение значения K_c в условиях дефицита почвенной влаги определяется с помощью коэффициента K_s , как описано в главе 8.

СЕРЕДИНА СЕЗОНА - КОРРЕКТИРОВКА ДЛЯ РЕДКОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Корректировка по результатам простых полевых наблюдений

В качестве грубого приближения K_c в середине сезона для культур, которые обычно почти полностью заслоняют от света почву при исходных условиях, но покров которых был снижен вследствие болезни, стресса, сельскохозяйственных вредителей или плотности посадки, значения $K_{c \text{ mid}}$ и $K_{cb \text{ mid}}$ могут быть уменьшены фактором, зависящим от фактического развития растительности:

$$K_{c \text{ adj}} = K_c - A_{cm} \quad (94)$$

где

K_c - K_c из таблицы 12 ($K_{c \text{ mid}}$) или 17 ($K_{cb \text{ mid}}$) после корректировки его с учетом климата (уравнение 62 или 70);

$K_{c \text{ adj}}$ - откорректированный K_c ($K_{c \text{ mid adj}}$ или $K_{cb \text{ mid adj}}$).

Корректировка K_c с использованием уравнения 94 не выполняется, когда культуры часто увлажняются и повышенное испарение с почвы компенсирует пониженное покрытие земли растительным покровом. В этих условиях уравнение 94 должно использоваться только для K_{cb} .

Коэффициент корректировки A_{cm} оценивается из уравнения:

$$A_{cm} = 1 - \left[\frac{LAI}{LAI_{dense}} \right]^{0.5} \quad (95)$$

где LAI является показателем фактической площади листа (бокс 17), а LAI_{dense} является показателем площади листа той же культуры при нормальной, стандартной практике управления сельхозкультурой. Значения LAI в данном уравнении могут быть заменены значениями доли покрытия земли растительным покровом (f_c):

$$A_{cm} = 1 - \left[\frac{f_c}{f_{cdense}} \right]^{0.5} \quad (96)$$

ПРИМЕР 40

Первое приближение коэффициента сельхозкультуры в середине сезона для редкой растительности

В 1980 году в Дэвисе, штат Калифорния (США) выращивали томаты и в середине сезона только 50 % земли было покрыто растительным покровом (Прутт и др., 1984). Высота томатов была равна 0,75 м. Типичное процентное отношение покрытия земли томатами при эффективном полном покрытии в Дэвисе составляет от 85 до 90% и соответствует $K_{cb \text{ mid}}$, данному в таблице 17 для томатов. Средние величины скорости ветра и минимальная относительная влажность воздуха в середине сезона составляли $u_2 = 1,1$ м/сек и $RH_{min} = 30$ %. Дэвис находится на $38,5^\circ$ с. ш. и средняя точка сезона приходится на 20 июля. Каково значение скорректированного $K_{cb \text{ mid}}$ для томатов, которое отражает 50 % покрытие земли растительным покровом.

Из таблиц 12 и 17, $K_{c \text{ mid}} = 1,2$ и $K_{cb \text{ mid}} = 1,15$.

После корректировки с учетом климатических условий (ур. 62 и 70), где $u_2 = 1,1$ м/сек, $RH_{min} = 30$ % и средняя высота культуры = 0,75 м,
 $K_c = K_{c, \text{табл}} + [0,04 (1,1 - 2) - 0,004 (30 - 45)] (0,75/3)^{0,30} = K_{c, \text{табл}} + 0,02$
 и $K_{c \text{ mid}} = 1,22$ и $K_{cb \text{ mid}} = 1,17$

Доля покрытия земли растительным покровом, подразумеваемая в табличных величинах для томатов, растущих в исходных условиях, составляет около 85 % ($f_{c \text{ dense}} = 0,85$). Для редких томатных культур при $f_c = 0,50$,
 из уравнения 96 $A_{cm} = 1 - (0,50/0,85)^{0,5} = 0,23$

$K_{cb \text{ mid adj}}$ и $K_{c \text{ mid adj}}$ для 50 % покрытия земли растительным покровом (из уравнения 94)
 $= 1,17 - 0,23 = 0,94$

$$K_{c \text{ mid adj}} = 1,22 - 0,23 = 0,99$$

Сравните результаты с примером 42, где получен более точный $K_{cb \text{ mid adj}}$

По первой оценке ожидается, что коэффициент сельхозкультуры будет на 20 % меньше значения, полученного в исходных условиях.

Оценка $K_{cb\ mid}$ из индекса площади листа (LAI)

Естественная растительность обычно имеет меньшую площадь листа или долю покрытия земли покровом, чем сельскохозяйственные культуры, которые были выведены специально, чтобы полностью покрывать землю растительным покровом и чтобы условия почвенной влаги благоприятствовали сильному росту. Это особенно верно в полуаридном и аридном климатах. Значение $K_{cb\ mid}$ для естественной и отличной от изначальной растительности должно быть уменьшено, когда плотность растения и/или площадь листьев меньше, чем при полном покрытии земли растительным покровом (обычно определяется, когда $LAI \geq 3$). Там, где LAI можно измерить или приблизительно оценить, максимальный $K_{cb\ mid}$ для естественной, нетипичной или отличной от исходной сельскохозяйственной растительности может быть определен аналогично методике Риччи:

$$K_{cb\ mid} = K_{c\ min} + (K_{cb\ full} - K_{c\ min})(1 - \exp[-0,7LAI]) \quad (97)$$

где

$K_{cb\ mid}$ - основной K_{cb} , оцененный в середине сезона, когда плотность растений и/или площадь листьев меньше, чем в условиях полного покрытия земли растительным покровом,

$K_{cb\ full}$ - основной K_{cb} , оцененный в середине сезона (при максимальном размере или высоте растения) для растительности, полностью покрывающей землю или $LAI > 3$ (уравнения 99 и 100),

$K_{c\ min}$ - минимальный K_c для голой почвы ($K_{c\ min} \approx 0,15 - 0,20$),

LAI - фактический индекс площади листа, определенный как отношение площади листьев к площади, лежащей под ними усредненной почвенной поверхности. Подсчитывается только одна сторона листьев [$m^2\ m^{-2}$].

Уравнение 97 рекомендуется использовать для однолетних видов растительности, которая является естественной или находится в состоянии, отличном от изначального, из-за низкой плотности листьев или воздействия некоторых окружающих факторов на ее рост.

Зависимость, выраженная в уравнении 97, дает результаты, идентичные результатам, предложенным Риччи (1974). Для $LAI > 3$ $K_{cb\ mid} \approx K_{cb\ full}$. LAI, используемое в уравнении 97, должно быть 'зеленым' LAI, представляющим только здоровые листья, активные в передаче пара.

Оценка $K_{cb\ mid}$ из эффективного покрытия земли растительным покровом ($f_{c\ eff}$)

Там, где известна только доля поверхности почвы, эффективно покрытой растительностью, может быть использовано следующее приближение $K_{cb\ mid\ adj}$:

$$K_{cb\ mid} = K_{c\ min} + (K_{cb\ full} - K_{c\ min}) \left(\min \left(1, 2 f_c, (f_{c\ eff})^{\left(\frac{1}{1+h} \right)} \right) \right) \quad (98)$$

где

$K_{cb\ mid}$ - подсчитанный основной K_{cb} в середине сезона, когда густота растения и/или площадь листьев меньше, чем при полном покрытии земли растительным покровом;

$K_{cb\ full}$ - подсчитанный основной K_{cb} в середине сезона (при максимальном размере или высоте растения) для растительности, полностью покрывающей землю или имеющей $LAI > 3$ (см. уравнения 99 и 100);

$K_{c\ min}$ - минимальный K_c для голой почвы (при наличии растительности) ($K_{c\ min} \approx 0,15 - 0,20$);

f_c - доля поверхности почвы, покрытая растительностью, наблюдаемая сверху [0,01-1];
 $f_{c\text{eff}}$ - эффективная доля поверхности почвы, покрытой или затененной растительностью [0,01 - 1] (см. бокс 18);
 h - высота растения [м].

Устьичная проводимость и транспортировка воды внутри растений может ограничить ET в условиях редкой, высокой растительности. При таких условиях $K_{cb\text{mid}}$ ограничивается членом “ $2f_c$ ” в уравнении 98. Уравнение 98 хорошо использовать для деревьев и кустарников.

БОКС 17

Измерение и оценка LAI

LAI может быть измерено непосредственно путем сбора всех зеленых здоровых листьев с измеряемой или требуемой площади, например, 1 м² или 10 м². Затем измеряются и суммируются площади отдельных листьев с использованием фотометрических методов или измеряются площади отобранных листьев, находится их среднее и затем умножается на общее число подсчитываемых листьев.

При отсутствии измерений, LAI для редкой, однолетней растительности может быть оценено в виде:

$$LAI = LAI_{dense} \left[\frac{Popul}{Popul_{dense}} \right]^a$$

где

LAI_{dense} - LAI для отдельного вида растений при нормальных, ‘плотных’ или изначальных условиях роста. LAI_{dense} может быть получено из различных физиологических источников и учебников по сельхозкультурам и растительности.

Population - число растений на единицу площади поверхности почвы при реальных (популяция) условиях роста [No. м⁻²].

Population_{dense} - число растений на единицу площади поверхности почвы при ‘плотных’ или изначальных условиях роста [No. м⁻²].

a - $a = 0,5$, когда популяция формируется из энергично растущих растений; $a = 1$ когда растения менее сильные.

Показатель степени $a = 0,5$ в уравнении демонстрирует тенденцию компенсации пониженной густоты стояния увеличением размера и общей площади листьев для отдельных растений. Поэтому LAI не входит в прямое отношение с числом растений. В условиях, когда размер растения не увеличивается при пониженной густоте стояния, показатель степени ‘ a ’ в уравнении должен быть равен 1 ($a = 1$). Эти условия могут возникнуть, когда почва низкоплодородна, или когда засоление почвы, стресс почвенной влаги или заболачивание сдерживают рост и влияют на густоту стояния, тем самым замедляя рост отдельных растений.

БОКС 18**Измерение и оценка $f_{c\text{ eff}}$**

$f_{c\text{ eff}}$ обычно представляет долю поверхности почвы, затененной растительностью. Эта величина обычно больше, чем f_c - фактическая доля поверхности почвы, которая покрыта растительностью, получаемая непосредственно через наблюдения сверху. Степень затенения представляет количество солнечной радиации, перехватываемой растениями для потенциального превращения в эвапотранспирацию. Общая доля затенения является функцией от солнечного угла, горизонтального размера и формы отдельных растений (или рядов) относительно их высоты.

$f_{c\text{ eff}}$ для кроны "прямоугольной" формы, как, например, у большинства рядов сельскохозяйственных растений, может иметь следующий вид:

$$f_{c\text{ eff}} = f_c \left[1 + \frac{HWR}{\tan(\eta)} \right] \leq 1$$

здесь,

f_c - доля поверхности почвы, покрытой растительностью, по наблюдениям сверху [0,01 - 1],
HWR - отношение высоты к ширине для отдельных растений или групп растений, осматриваемых с востока или запада,

$\tan(\eta)$ - тангенс среднего солнечного угла η над горизонтом в период максимальной эвапотранспирации (обычно между 11.00 и 15.00). Для большинства случаев η может вычисляться в солнечный полдень (12.00).

HWR вычисляется как:

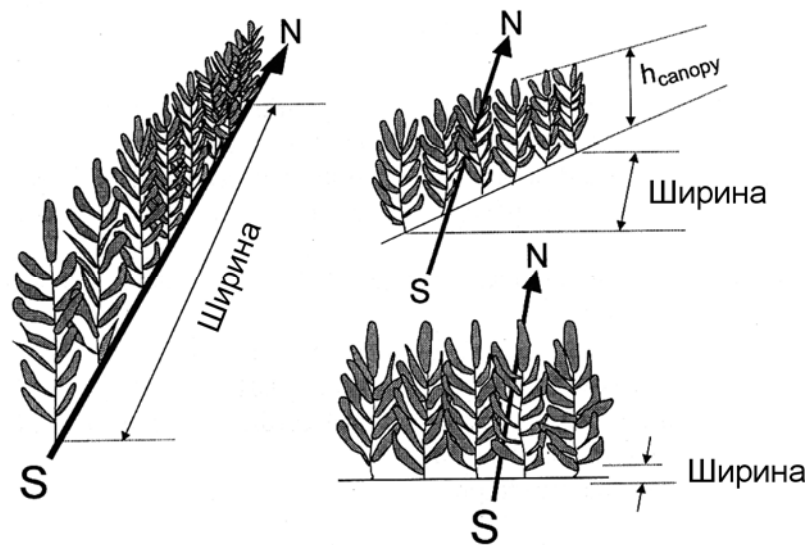
$$HWR = \frac{h_{\text{канопы}}(\cos(\Gamma))}{\text{Width}}$$

где

$h_{\text{канопы}}$ - средняя вертикальная высота кроны растения [м],

Width - средняя ширина кроны растения или группы растений (например, ряда) [м],

Γ - угол ряда растений с восточно-западного направления [рад] (для восточно-западных рядов $\Gamma = 0$); для северо-южных рядов $\Gamma = \pi/2$)



Для северо-южных рядов HWR будет нулевым, так как $\cos(\pi/2) = 0$. Это подразумевает, что ряды растений, которые идут с севера на юг будут иметь $f_{c\text{ eff}} \approx f_c$, поскольку вся почва находится

под воздействием солнца в различное время дня, а затененная площадь равна доле растительного покрова в полдень.

Для деревьев или растительности, которые не имеют крону, достигающую до земли, h_{canopy} не включает длину самого нижнего ствола, а только активную крону. В этих случаях $h_{\text{canopy}} < h$, где h - средняя высота растения.

Для кроны, имеющей круглую или сферическую форму, как у деревьев, $f_{c \text{ eff}}$ оценивается как

$$f_{c \text{ eff}} = \frac{f_c}{\sin(\eta)} \leq 1$$

где $\sin(\eta)$ - синус среднего угла солнца η над горизонтом в период максимальной эвапотранспирации (обычно между 11.00 и 15.00).

Средний угол солнца над горизонтом в период максимальной эвапотранспирации (η)

Синус η может быть вычислен для любого определенного времени дня в виде:

$$\sin(\eta) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega)$$

где

φ - широта [рад] (отрицательная для южных широт)

δ - солнечное наклонение [рад] (ур-е 24)

ω - угол солнечного времени [рад] (ур-е 31)

Обычно $f_{c \text{ eff}}$ может быть вычислено в солнечный полдень (12.00), так что $\omega = 0$ и данное уравнение принимает следующий вид:

$$\sin(\eta) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta)$$

Значение η может быть получено через арксинус вышеприведенного уравнения.

Оценка $K_{cb \text{ full}}$

Сельхозкультуры

Отличные от изначальных сельхозкультуры представлены культурами, которые не развиты полностью вследствие окружающих стрессов, вызванных дефицитом почвенной влаги, степенью плодородия, болезнями или сельхозвредителями, либо низкой плотностью растений. Значение для $K_{cb \text{ full}}$ в уравнениях 97 и 98 может быть взято как значение $K_{cb \text{ mid}}$, указанное для любой культуры с полным покрытием земли растительным покровом ($f_{c \text{ eff}} \sim 1$) в таблице 17 после его корректировки с учетом климата (ур-е 70):

$$K_{cb \text{ full}} = K_{cb \text{ mid, Table}} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\text{min}} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (99)$$

где

u_2 - среднее значение скорости ветра на высоте 2 м в середине сезона [м сек⁻¹]

RH_{min} - среднее значение минимальной суточной относительной влажности в середине сезона [%],

h - средняя максимальная высота растений [м].

Естественная растительность и культуры, не указанные в таблице 17

Для естественной растительности, культур, не полностью покрывающих землю растительным покровом, или для культур, не указанных в таблице 17, $K_{cb\ full}$ может быть аппроксимирован в виде функции климата и средней высоты растения для площадей, превышающих несколько гектаров:

$$K_{cb\ full} = K_{cb, h} + \left[0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45) \right] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \quad (100)$$

где

$K_{cb, h}$ - $K_{cb\ mid}$ для растительности, полностью покрывающей землю ($LAI > 3$), в условиях суб-влажности и спокойного ветра ($RH_{\min} = 45\%$ и $u_2 = 2\text{ м сек}^{-1}$), (ур-е 101);

u_2 - среднее значение скорости ветра на высоте 2 м в середине сезона [м сек^{-1}];

RH_{\min} - среднее значение минимальной суточной относительной влажности в середине сезона [%];

h - средняя максимальная высота растений [м].

$K_{cb, h}$ вычисляется следующим образом:

$$K_{cb, h} = 1,0 + 0,1 h \quad \text{для } h \leq 2 \text{ м} \quad (101)$$

где $K_{cb, h} \leq 1,20$, когда $h > 2$ м. Значение 1,2 представляет общий верхний предел $K_{cb\ mid}$ для высокой растительности, полностью покрывающей землю, и $LAI > 3$ в условиях суб-влажности и спокойного ветра. Этот предел - 1,2 - определяется для других климатических условий в уравнении 100. Уравнения 100 и 101 дают общее приближение для увеличения $K_{cb\ full}$ по высоте растений и климату. Форма этих уравнений соответствует тенденциям, представленным в уравнении 70.

Для мелких растений с редким стоянием значение $K_{cb\ full}$ должно быть больше значения, данного уравнением 99 или 100, как обсуждается в главе 10.

Заключение

Уравнения 97 и 98 могут быть использованы для оценки или уменьшения K_{cb} для отличной от первоначальной сельскохозяйственной растительности. Показатели степени в уравнениях 97 и 98 отражают действие микроадвекции (передачи) значительного тепла от сухой поверхности почвы между растениями к листьям, тем самым увеличивая ET на единицу площади листьев и воздействие увеличенной аэродинамической шероховатости по мере уменьшения значения LAI. В уравнении 98 предполагается, что по мере роста h увеличивается суммарная площадь листьев и эффективная шероховатость растительности, тем самым повышая коэффициент сельхозкультуры. Кроме того, по мере роста h появляется больше возможностей для микроадвекции тепла от почвы к кроне и увеличивается турбулентный обмен в кроне для того же объема покрытия земли растительным покровом. Все эти факторы воздействуют на относительную величину $K_{cb\ mid}$.

Уравнения 97 и 98 должны использоваться с осторожностью, поскольку они дают только оценку максимального K_{cb} , ожидаемого в период пикового роста растения при здоровых листьях с транспирацией и сухой поверхностью почвы. Там, где устьичный контроль выше, чем у типичной сельскохозяйственной растительности, K_{cb} должен быть уменьшен с использованием рекомендаций, изложенных в следующем параграфе (уравнение 102).

Пример 41
Оценка коэффициента сельхозкультуры для середины сезона

Оценить $K_{cb\ mid}$ и $K_{c\ mid}$ для растительности с прямоугольной кроной, высотой 2 м и такой же шириной, при 30 % покрытии земли растительным покровом ($f_c = 0,3$) на 19 июля (200 день года) на широте 40° с. ш., $RH_{min} = 55\%$ и $u_2 = 1,5$ м/с в середине сезона.

На день $J = 200$ при широте $\varphi = 40$ ($\pi/180$) = 0,70 радиан ($40^\circ N$) из уравнения 24 получаем наклонение солнца $\delta = 0,36$ радиан.

В солнечный полдень ($\omega=0$):

$$\sin(\eta) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) = 0,94$$

Взяв арксинус этой величины, получим $\eta = 1,24$ радиан и $\tan(\eta) = 2,8$. Если $f_c = 0,3$ и HWR для растительности равен 1, то $f_{c\ eff}$ из секции 18 получается: $0,3(1+1/2,8) = 0,41$.

Из уравнения 101 $K_{cb,h} = 1,0 + 0,1(2) = 1,20$ ($\leq 1,20$)

Из уравнения 100 $K_{cb\ full} = 1,20 + (0,04(1,5-2) - 0,004(55-45))(2/3)^{0,3} = 1,15$

Поэтому, $K_{cb\ mid}$, оцененное уравнением 98 для $K_{c\ min} = 0,15$

$$K_{cb\ mid} = K_{c\ min} + (K_{cb\ full} - K_{c\ min}) \min[1, 2f_c (f_{c\ eff})^{1/(1+h)}]$$

$$= 0,15 + (1,15 - 0,15) \min[1, 2(0,3); (0,4)^{1/(1+2)}] = 0,75$$

Эта величина не нуждается в корректировке по климату.

$K_{c\ mid}$ (где $K_{c\ mid}$ включает средние результаты увлажнения) может быть получен из $K_{cb\ mid}$ с помощью руководств, представленных в методиках вычисления в начале данной главы

$$K_{c\ mid} = K_{cb\ mid} + (0,05 \dots 0,10) = 0,80 \dots 0,85$$

в зависимости от частоты увлажнения почвы.

Рассчитанные коэффициенты сельхозкультур для середины сезона: $K_{cb\ mid} = 0,75$ и

$K_{c\ mid} = 0,80 - 0,85$

Пример 42
Оценка коэффициента сельхозкультур в середине сезона для сниженного покрытия земли растительным покровом

Более точная оценка $K_{cb\ mid}$ для томатов из примера 40, которые только на 50 % покрывают землю в Дэвисе, Калифорния, США, может быть получена, если знать, что томаты были посажены в ряды длиной 1,52 м с востока на запад, что высота их составила 0,75 м и отношение высоты к ширине может составлять около 1,0 для рядов, ориентированных с востока на запад. Широта $38,5^\circ$ с. ш. и пиковая точка середины сезона приходится на 20 июля.

Каково значение $K_{cb\ mid}$ для томатов, отражающее 50 % покрытие земли растительным покровом?

На день $J = 201$ (20 июля) при широте $\varphi = 38,5$ ($\pi/180$) = 0,67 радиан ($38,5^\circ$ с. ш.) из уравнения 24 получаем наклонение солнца $\delta = 0,36$ радиан. В солнечный полдень ($\omega=0$):

$$\sin(\eta) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) = 0,95$$

Взяв арксинус этой величины, получим $\eta = 1,26$ радиан. Поэтому для наблюдаемых HWR=1 и $f_c = 0,5$ эффективное покрытие почвы для рядов, ориентированных с востока на запад, может быть вычислено следующим образом (секция 18):

$$f_{c\ eff} = 0,5 [1+1/\tan(1,26)] = 0,66$$

$K_{cb \text{ mid}}$ в таблице 17, представляющее полное покрытие земли томатом, равно 1,15 и средняя h для полностью развитых томатов (этой разновидности) составляет около 0,75. Корректировка по климату (с помощью ур.99) имеет вид:

$$K_{cb \text{ full}} = 1,15 + [0,04 (1,1 - 2) - 0,004 (30 - 45)] (0,75/3)^{0,30} = 1,17$$

Из уравнения 98 и используя $K_{c \text{ min}} = 0,15$ скорректированный $K_{cb \text{ mid}}$ для 50 % покрытия земли растительным покровом принимает вид:

$$K_{cb \text{ mid adj}} = 0,15 + (1,17 - 0,15) \min(1,2 (0,5); 0,66^{1/(1+0,76)}) = 0,95$$

Результаты $K_{cb \text{ mid adj}} = 0,95$ для 50 % покрытия земли растительным покровом аналогичны первой оценке, полученной в примере 40 и сравнимы с измеренным $K_{cb \text{ mid}} \sim 0,90 \dots 1,00$, определенным лизиметром (Прутт и др., 1984).

СЕРЕДИНА СЕЗОНА - КОРРЕКТИРОВКА ПО УСТЬИЧНОМУ КОНТРОЛЮ

Возможно, в уравнениях 97 и 98 потребуется уменьшить величину $K_{cb \text{ full}}$ для растительности с высоким устьичным контролем. Для растительности, например, некоторых видов пустынных растений или деревьев, имеющих сопротивляемость листьев значительно большую, чем у большинства сельхозкультур, где r_1 обычно составляет 100 с м^{-1} , $K_{cb \text{ mid}}$, оцененный с использованием уравнений 97 и 98, может быть модифицирован умножением на фактор сопротивляемости F_r . Фактор сопротивляемости разработан на основе уравнения Пенмана-Монтейта:

$$F_r \approx \frac{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}{\Delta + \gamma\left(1 + 0,34u_2 \frac{r_1}{100}\right)} \quad (102)$$

где

r_1 - средняя сопротивляемость листа для рассматриваемой растительности [с м^{-1}].

Средняя сопротивляемость листа r_1 равна 100 с м^{-1} для эталонной ET_0 для травы и многих сельхозкультур. Значения r_1 для большинства сельхозкультур и других растений могут быть найдены у Кернера (1978) и Аллена (1996). Уравнение 102 отражает фиксированную аэродинамическую шероховатость травы, а не шероховатость определенной растительности, поскольку скорректированный K_c умножается на ET_0 травы, а K_c уже отражает действия аэродинамической шероховатости для определенной растительности.

ПРИМЕР 43

Оценка $K_{cb \text{ mid}}$ при покрытии земли растительным покровом с уменьшением устьичного контроля

Расстояние между деревьями в оливковой роще составляет 10 м. Горизонтальный диаметр кроны деревьев равен 5 м. Высота деревьев 5 м. Нижние 1,5 м деревьев не имеют листья. Покрытие земли растительностью между деревьями редкое. Средняя u_2 в середине сезона равна 2 м/сек и средняя $RH_{\text{min}} = 25\%$. Пиковая точка сезона приходится на 29 июня (т. е. 180-й день года). Широта - 30° с. ш.

Оценить $K_{cb \text{ mid}}$ с помощью уравнения 98 для расстояний 10x10 и 5x10.

В день $J = 180$ (29 июня) на широте $\varphi = 30$ ($\pi/180$) = 0,52 радиан (30° с. ш.) из уравнения 24 получаем наклонение солнца $\delta = 0,405$ радиан. В солнечный полдень ($\omega=0$):

$$\sin(\eta) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) = 0,99$$

Поскольку оливковые деревья имеют в некоторой степени круглую форму, эффективная доля покрытия земли растительным покровом (бюкс 18) может быть рассчитана как $f_{c \text{ eff}} = f_c / (\sin(\eta))$.

$$f_c = \text{площадь кроны} / \text{площадь между деревьями} = (\pi (5)^2 / 4) / (10)(10) = 0,196$$

$$f_{c \text{ eff}} = 0,196 / 0,99 = 0,20$$

Из уравнения 101: $K_{cb,h} = 1,0 + 0,1(5) > 1,2$ или $K_{cb,h} = 1,2$

Из уравнения 100: $K_{cb \text{ full}} = 1,2 + [0 - 0,004(25-45)](5/3)^{0,3} = 1,29$

Из уравнения 98 и с учетом $K_{c \text{ min}} = 0,15$:

$$K_{cb \text{ mid}} = 0,15 + (1,29 - 0,15) \min(1,2(0,196); (0,20)^{1/(1+5)}) = 0,60$$

В издании Кернера и др. (1979) указано, что у олив (*Olea europaea*) $r_1 = 420$ с/м. Поэтому, предполагая, что средняя $T_{\text{mean}} = 25^\circ\text{C}$ и что высота над уровнем моря для рощи равна 0 м, так что $\Delta = 0,189$ кПа (ур-е 13) и $\gamma = 0,0676$ кПа (ур-е 8), из ур-я 102 получаем F_r :

$$F_r \approx \frac{0,189 + 0,0676(1 + 0,34(2))}{0,189 + 0,0676\left(1 + 0,34(2)\left(\frac{420}{100}\right)\right)} = 0,67$$

Тогда с использованием F_r получаем $K_{cb \text{ mid}}$, откорректированное для повышенного устьичного контроля:

$$K_{cb \text{ mid adj}} = F_r K_{cb \text{ mid}} = 0,67 (0,60) = 0,40$$

Значение $K_{cb \text{ mid adj}} = 0,40$, рассчитанное для $f_c = 0,20$, меньше значения $K_{cb \text{ mid}}$ из таблицы 17 для $f_c = 0,40-0,67$ из-за различий в f_c . Значение из таблицы 17 равно 0,70, которое после корректировки по климату при использовании уравнения 70 получается равным 0,79.

Если оливы посажены с расстоянием 5x10, как распространено в Калифорнии, что отражено в значениях K_{cb} для олив из таблицы 17, то $f_c = 0,39$, $f_{c \text{ eff}} = 0,40$ и из ур-я 98 $K_{cb \text{ mid}} = 1,04$, так что $K_{cb \text{ mid adj}}$, откорректированное для устьичного контроля с использованием $F_r = 0,67$, получается равным $K_{cb \text{ mid adj}} = 0,67 (1,04) = 0,70$. Эта величина сравнима со значением 0,79, полученным из таблицы 17 для взрослых деревьев после корректировки по климату.

Основной коэффициент сельхозкультуры $K_{cb \text{ mid}}$, принимая во внимание низкую густоту, климатические условия и устьичный контроль, равен 0,40. Он увеличивается до 0,70 для интервала 5x10.

Это уравнение недооценивает F_r (переоценивает понижение K_{cb}), если будет использоваться с фактической шероховатостью растительности, когда $r_1 > 100 \text{ с м}^{-1}$, из-за отсутствия в уравнении 102 обратных эффектов, которые имеет пониженная ET_o на профиль дефицита температуры и давления пара по всей культуре. Эти параметры обычно увеличиваются при уменьшении ET_c и поэтому сдерживают понижение ET_c .

КОНЕЦ СЕЗОНА

В конце сезона K_{cb} начинает уменьшаться, пока не достигнет $K_{cb \text{ end}}$ в конце вегетационного периода. Значения $K_{cb \text{ end}}$ могут быть получены из $K_{cb \text{ mid}}$ пропорционально здоровью и состоянию листьев растительности в конце вегетационного периода и в соответствии с продолжительностью периода конца сезона (т. е. стареют ли листья медленно или гибнут от мороза). Значения $K_{cb \text{ end}}$ могут быть таким же образом получены из $K_{c \text{ mid}}$; однако на уменьшение $K_{c \text{ end}}$ действует частота поливов или выпадения осадков и $K_{c \text{ end}}$ может быть пропорционально меньше.

При использовании уравнений 97 и 98 $K_{cb \text{ end}}$ должен быть уменьшен, если следует представить значения K_c для растений с устьичным контролем, который больше, чем у сельскохозяйственных культур (где $r_1 \approx 100 \text{ с м}^{-1}$) или отразить действие старения на устьичный контроль. В этом случае значения $K_{cb \text{ end}}$ умножаются на F_r из уравнения 102. С другой стороны, они могут быть уменьшены на 10 % для каждого удваивания r_1 выше 100 с м^{-1} при среднесуточной температуре воздуха $T_{\text{mean}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ и на 20 % для каждого удваивания r_1 свыше 100 с м^{-1} при $T_{\text{mean}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Значение $K_{cb \text{ end}}$ может быть также уменьшено по отношению к вычисляемому значению $K_{cb \text{ mid}}$, пропорционально доле зеленых здоровых листьев, остающихся до позднего сезона, относительно доли этих листьев в середине сезона. Это нередко основано на визуальном обзоре поля и поэтому может быть субъективным наблюдением.

Параметры f_c и h возможно являются самыми простыми показателями для выполнения оценки в поле. Кроме того, уравнения 97 и 98 следует использовать только в качестве общих или предварительных оценок $K_{cb \text{ end}}$.

ОЦЕНКА $ET_{c \text{ adj}}$ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРОЖАЙНОСТИ КУЛЬТУР

Простая линейная функция сельхозкультура-вода была введена в сборнике ФАО № 33 для прогнозирования снижения урожайности, когда стресс сельхозкультур вызван недостатком почвенной влаги. Эта функция представлена ранее уравнением 90:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_{c \text{ adj}}}{ET_c}\right) \quad (90)$$

где

Y_a - фактическая урожайность сельхозкультуры [кг га^{-1}];

Y_m - максимальная (ожидаемая) урожайность при отсутствии водного или другого стресса;

K_y - коэффициент зависимости урожайности;

ET_c - потенциальная (ожидаемая) эвапотранспирация культур при отсутствии водного или другого стресса ($K_c ET_o$);

$ET_{c \text{ adj}}$ - фактическая (откорректированная) эвапотранспирация культур как результат водного или экологического стресса.

Значения K_y были даны в сборнике № 33 для большого ряда культур, с тем, чтобы прогнозировать действие водного стресса и связанного с ним уменьшения $ET_{c\ adj}$ на урожайность культур. Там же представлены факторы для прогнозирования снижения урожайности в случае, когда водный стресс возникает только во время одной стадии роста культуры или он распространяется на весь период роста. Функции зависимости урожайности по сезонам суммированы в таблице 24.

Ряд окружающих стрессов, таких как дефицит воды, засоление, низкое плодородие земель и болезни, влияет на урожайность через уменьшение величины $ET_{c\ adj}$ относительно потенциальной величины ET_c . Это же верно для случаев, когда урожайность снижается из-за низкой плотности растений. Поэтому для самых общих оценок $ET_{c\ adj}$ уравнение 90 можно решить в отношении фактора стресса K_s :

$$K_s = 1 - \frac{1}{K_y} \left(1 - \frac{Y_a}{Y_m} \right) \quad (103)$$

где K_s умножается на K_{cb} или на K_c в уравнениях 80 или 81, чтобы определить $ET_{c\ adj}$ при наличии водного или других экологических стрессов или при низкой плотности растений. $ET_{c\ adj}$, определенная с помощью K_s из уравнения 103, дает только самую общую и приблизительную оценку месячной или даже сезонной эвапотранспирации. Уравнение 103 лучше работает для кормовых или других смешанных культур, где величина K_y остается относительно постоянной в течение сезона.

Уравнение 103 обычно действительно только при определении фактической эвапотранспирации культур для использования в региональных исследованиях водного баланса, для изучения истощения и подпитки подземных вод или для оценки исторического водопользования. Данная методика недействительна для определения суточной или недельной ET_c вследствие общего характера коэффициента K_c и сезонного уровня урожайности культур. Вместо уравнения 103 рекомендуется использовать методики, представленные ранее для корректировки ET_c с использованием суточного водного баланса почвы, функций засоления или уменьшения K_c , исходя из листовой площади или доли покрытия земли растительностью.

ПРИМЕР 44 **Приблизительная оценка K_s из урожайности культуры**

На ирригационном массиве (проекте) выращиваются зрелые, съедобные бобы. Ожидается дефицит оросительной воды и соответствующее снижение урожайности. Сообщалось, что урожайность на массиве в среднем составила 1100 кг/га. Потенциальная урожайность для региона и разных сортов бобов при отсутствии водного или других экологических стрессов на плодородной почве равна 1800 кг/га.

Из сборника ФАО № 33 или таблицы 24 $K_y = 1,15$ для зрелых бобов, предполагается, что стрессы распределены равномерно по всему вегетационному сезону. Из уравнения 103 оцениваемый K_s для использования в уравнении 80 для вегетационного сезона имеет вид:

$$K_s = 1 - \frac{1}{1.15} \left(1 - \frac{1100}{1800} \right) = 0.66$$

Поэтому $ET_{c\ adj}$ для данного сезона будет равно лишь 0,66 от максимальной ET_c при начальных условиях роста.

Оцениваемая сезонная $ET_{c\ adj}$ будет равна 0,66 ET_c , где ET_c определяется как $ET_c = K_c ET_o$.

Глава 10

ET_c при различном управлении

В данной главе обсуждаются различные факторы, которые могут вызвать отклонение значений K_c и ET_c от стандартных норм, описанных в главах 6 и 7. Данные факторы относятся к действию поверхностной мульчи, междурядных культур, небольших растительных площадей и особой практики культивирования.

В данной главе затрагиваются ситуации, где практика культивирования отклоняется от принимаемых в таблицах 12 и 17, но где все еще требуются оценки K_c и ET_c . Эта глава никоим образом не является исчерпывающей. В ней ставилась цель показать некоторые из методик, которые могут быть использованы для коррекции K_c с учетом отклонений от стандартных условий.

ДЕЙСТВИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ МУЛЬЧИ

Мульча часто используется в растениеводстве для уменьшения испарения с поверхности почвы, ускорения развития культур в прохладном климате через увеличение температуры почвы, для уменьшения эрозии или борьбы с сорняками. Мульча может состоять из органических материалов или может быть синтетической, состоящей из пластиковых полос.

Пластиковая мульча

Пластиковая мульча обычно состоит из тонких полос полиэтилена или схожего материала, которые кладутся на поверхность почвы, особенно вдоль рядов растений. В пластиковой пленке делаются отверстия, чтобы через них могла пробиться растительность. Пластиковая мульча может быть прозрачной, белой или черной. Цвет влияет на альбедо в основном во время ранней стадии развития культуры. Однако, поскольку целью является использование простой методики для корректировки значений K_c для мульчируемых культур, то различия между различными видами пластиковой мульчи не делаются.

Пластиковые мульчи существенно сокращают испарение воды с поверхности почвы, особенно в условиях струйных систем орошения. Сокращению испарения сопутствует общее увеличение транспирации с растительности, вызванной передачей значительного радиационного тепла с поверхности пластиковой оболочки на прилегающую растительность. Даже если транспирация при мульчировании может увеличиться в среднем на 10-30 % в течение сезона по сравнению с практикой, когда мульчирование не используется, значения K_c понижаются в среднем на 10-30 % из-за 50-80 % сокращения испарения с почвы. Обзор наблюдаемого снижения K_c , испарения и увеличения транспирации в вегетационный сезон дан в таблице 25 для пяти садовых культур. Обычно скорость роста культуры и урожайность увеличиваются при использовании пластиковой мульчи.

ТАБЛИЦА 25

Приблизительное уменьшение K_c и поверхностного испарения и увеличение транспирации для различных садовых культур при использовании пластиковой мульчи, в сравнении с практикой без использования мульчи при струйном орошении

Культура	Уменьшение ¹ K_c (%)	Уменьшение ¹ испарения (%)	Увеличение ¹ транспирации (%)	Источник
Кабачок	5-15	40-70	10-30	Сафади (1991)
Огурец	15-20	40-60	15-30	Сафади (1991)
Мускусная дыня	5-10	80	35	Баттихи и Хилл (1988)
Арбуз	25-30	90	-10	Баттихи и Хилл (1986), Гави и Баттихи (1986)
Томат	35	не известно	не известно	Хаддадин и Гави (1983)
Среднее	10-30	50-80	10-30	

¹ относительно практики без использования мульчи

Единый коэффициент сельхозкультуры K_c

Если рассматривать действие пластиковой мульчи на ET_c , значения $K_{c\ mid}$ и $K_{c\ end}$ для садовых культур, перечисленные в таблице 12, могут быть уменьшены на 10-30 % в зависимости от частоты орошения (для частого струйного орошения использовать большее значение). Значение $K_{c\ ini}$ при мульчировании равно 0,10. Когда пластиковая мульча не полностью покрывает почву, увлажняемую капельницами, или когда выпадает большое количество осадков, то $K_{c\ mid}$ или $K_{c\ end}$ будет уменьшаться пропорционально доле увлажненной поверхности, покрытой мульчей.

Двойной коэффициент сельхозкультуры $K_{cb} + K_e$

При оценке основного K_{cb} для мульчируемых культур обычно требуется меньшая корректировка с кривой K_{cb} , порядка 5-15 % уменьшения K_{cb} , поскольку в общем понятно, что “основное” испарение воды с поверхности почвы меньше при использовании пластиковой мульчи, хотя транспирация увеличивается. Действие на K_{cb} может быть больше при некоторых видах культур с низкой плотностью. При использовании мульчи поощряется местная калибровка K_{cb} (и K_c).

При вычислении коэффициента испарения с почвы K_e с пластиковой мульчей, f_w должен представлять относительную эквивалентную долю поверхности почвы, которая способствует испарению через отверстия в пластиковой оболочке и с доли поверхности, которая увлажняется, но не покрывается мульчей. Эффективная площадь выходных отверстий обычно в 2-4 раза больше физической площади отверстий (или даже больше) для учета передачи пара из-под полосы.

Органическая мульча

Органическая мульча часто используется во фруктовых садах и для междурядных культур при небольшой обработке земли. Органическая мульча может состоять из остатков растений или инородного материала, ввозимого на поле, например соломы. Глубина органической мульчи и доля покрываемой поверхности варьируются. Эти два параметра влияют на степень уменьшения испарения с поверхности почвы.

ПРИМЕР 45**Действие поверхностной мульчи**

Огурцы покрываются пластиковой мульчей при капельном орошении. Мульча представляет собой прозрачный пластик, покрывающий все поле, с небольшими отверстиями для растений. Скорректировать среднее и основное значение K_c для данной культуры с учетом использования мульчи.

Из таблицы 12 $K_{c\ ini}$, $K_{c\ mid}$ и $K_{c\ end}$ для свежих огурцов равны, соответственно, 0,4, 1,0 и 0,75.

Так как пластиковая мульча цельная, с небольшими отверстиями для растений, K_c предполагается равным 0,10 (эта величина должна быть увеличена при выпадении осадков).

$K_{c\ mid}$ и $K_{c\ end}$ оцениваются как:

$$\begin{aligned} K_{c\ mid} &= 0,85 (1,0) = 0,85 \\ K_{c\ end} &= 0,85 (0,75) = 0,64 \end{aligned}$$

где множители 0,85 взяты из таблицы 25 и отражают предполагаемое 15 % сокращение E_T вследствие использования мульчи при одном поливе в неделю.

Из таблицы 17 значения, $K_{c\ ini}$, $K_{c\ mid}$ и $K_{c\ end}$ равны соответственно 0,15, 0,95 и 0,7 для тех же огурцов. $K_{cb\ ini}$ предполагается равной $K_{c\ ini}$ при мульчировании и поэтому принимается равной 0,10. Ожидается, что $K_{c\ mid}$ и $K_{c\ end}$ понизятся на 10 %, так что:

$$\begin{aligned} K_{c\ mid} &= 0,9 (0,95) = 0,86 \\ K_{c\ end} &= 0,9 (0,7) = 0,63 \end{aligned}$$

Эти основные величины аналогичны скорректированным значениям K_c , поскольку можно не учитывать испарение с поверхности, покрытой мульчей. Необходима дополнительная корректировка данных по величинам K_c с использованием уравнений 62 и 70 для учета климатических условий.

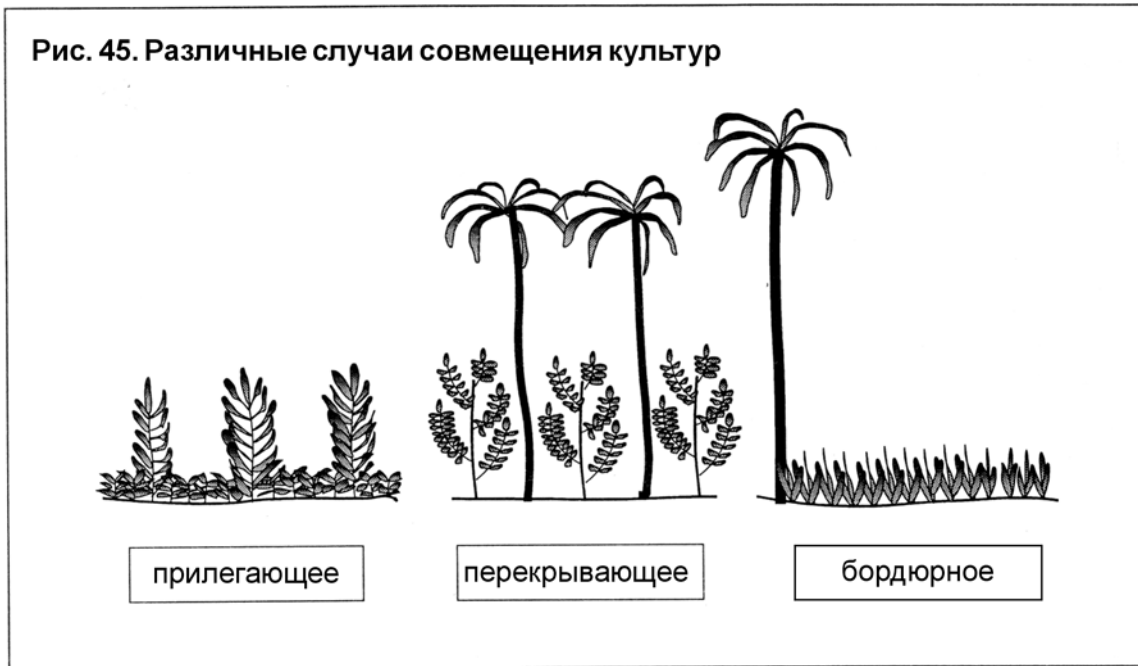
Средние значения K_c и K_{cb} равны значениям 0,10 для начальной стадии, 0,85 - для середины сезона и 0,64 - на конец сезона.

Единый коэффициент культуры K_c

При использовании K_c из таблицы 12 общим правилом является сокращение испарения почвенной влаги на 5 % для каждой 10 % поверхности, эффективно покрытых органической мульчей.

Например, если 50 % поверхности почвы были покрыты органической мульчей, состоящей из остатков культур, то испарение с почвы будет снижено на 25 %.

- $K_{c\ ini}$, который представляет большую часть испарения с почвы, можно в данном случае сократить на 25 %.
- $K_{c\ mid}$ и $K_{c\ end}$ можно сократить на 25 % от разности между $(K_{c\ mid} - K_{cb\ mid})$ и $(K_{c\ end} - K_{cb\ end})$ из таблиц 12 и 17. Обычно разница между значениями таблиц 12 и 17 составляет только 5-10 %, так что корректировка $K_{c\ mid}$ и $K_{c\ end}$ для учета органической мульчи может быть небольшой.



Двойной коэффициент сельхозкультуры, $K_{cb} + K_e$

При применении метода с отдельным водным балансом поверхностного слоя почвы величина элемента испарения ($K_e ET_0$) должна быть уменьшена на 5 % для каждых 10 % поверхности почвы, покрытой органической мульчей. K_{cb} не изменяется.

Эти рекомендации только приблизительные и они позволяют учитывать воздействие частичного отражения солнечной радиации от остатков растений, микроадвекции тепла с остатков в почву, движения почвенной влаги из-под остатков в открытую почву и обособленное действие органического покрытия. Поскольку эти параметры широко изменяются, для точной оценки требуется проведение местных наблюдений и измерений.

СОВМЕЩЕНИЕ КУЛЬТУР

Междурядное размещение относится к случаю, когда на одном поле выращиваются сразу две различные сельхозкультуры. Для оценки коэффициента сельхозкультуры различают следующие типы совмещения культур (рисунок 45):

- прилегающая растительность, когда кроны двух сельхозкультур перемешаны на некоторой высоте (например, совмещение зерна и бобов);
- частично перекрывающиеся культуры, когда кроны одной культуры значительно выше, чем у другой, так что растительный покров нельзя считать прилегающим (например, финиковые пальмы, перекрывающие гранат в оазисе);
- бордюрные культуры, когда высокие культуры, относящиеся к ветрозащитным посадкам, окаймляют более низкие культуры, или высокие деревья окаймляют полевые культуры.

Энергия, необходимая для испарения воды, имеет верхний предел. Она представляется через $K_{c \max}$ (уравнение 72, глава 7) для всех сельхозкультур на культивируемых полях, площадь которых больше 3-5 га:

$$K_{c \max} = \max \left\{ \left\{ 1.2 \div [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right\}, \{K_{cb} \div 0.05\} \right\} \quad (72)$$

где

h – высота более высокого растения. При всех условиях сочетания коэффициентов для составных культур K_c должен ограничиваться верхней границей ($K_c \leq K_{c_{\max}}$).

Непрерывная растительность

Там, где более высокие растения имеют листовую крону, которая расширяется книзу до того самого уровня, где заканчивается более низкое растение, крону можно рассматривать как непрерывную. Например, в Африке и Южной Америке кукуруза и бобы часто совмещаются в качестве непрерывной растительности, на одну грядку кукурузы приходится одна или более грядок бобов. Другим примером может служить обработка от пяти до семи грядок пшеницы, совмещенной с тремя грядками кукурузы на многих площадях в Китае.

Одинаковое покрытие поверхности

Там, где площадь листы или участок земли, покрытый растительностью одинаковы, f_c для каждой культуры с K_c в таблицах 12 и 17 для более высокого растения (если это K_c выше) может представлять собой K_c целого поля. Более высокое растение в какой-то степени будет играть роль «веревки для белья», так K_c (и ET_c) для более высокого растения на единицу площади превышает показатели, данные в таблицах 12 и 17. Однако, K_c (и ET_c) для низкого растения будет сокращен, так как высокое растение создает эффект ветролома. В результате K_c поля в целом может быть одинаковым со средне-взвешенным значением K_c для двух культур из таблиц 12 и 17, или общий K_c может быть приближенным к K_c , прогнозируемому для поля, засеянного полностью более высокой культурой ($K_{c \text{ field}} \approx K_{c \text{ taller crop}}$). Урожай низкой культуры может снизиться по отношению к монокультуре благодаря эффекту затенения более высокой культурой и борьбе за почвенную влагу.

Разное покрытие поверхности

Там, где участки земли, покрытые каждой культурой, различны, K_c для смешанного поля может оцениваться сравнением значений K_c для конкретных культур пропорционально участку площади, покрытому каждой культурой и высоте растения:

$$K_{c \text{ field}} = \frac{f_1 h_1 K_{c1} + f_2 h_2 K_{c2}}{f_1 h_1 + f_2 h_2} \quad (104)$$

где f_1 и f_2 – участки поверхности поля, засаженного культурами 1 и 2, h_1 и h_2 – высота культур 1 и 2, а K_{c1} и K_{c2} – значения K_c для культур 1 и 2.

Перекрывающаяся растительность

Там, где совмещение культур влечет за собой перекрытие расстояний между растениями, где одна крона растения сильно возвышается над другой. Примером такого случая может служить Южная Калифорния, где цитрусовые деревья посажены среди финиковых пальм. Там, где нормальное расстояние используется и для пальм, и для цитрусовых деревьев, K_c может возрасти вместе с увеличением плотности комбинированной растительности пропорционально росту в LAI (пример 47) с максимальным K_c , ограниченным либо $K_{c \text{ max}}$ (уравнение 72) или $K_{c \text{ full}}$ (уравнения 99 и 100), если общая площадь поля мала, то есть существует дополнительная "бельевая веревка" или эффект оазиса, описанный в следующем разделе.

ПРИМЕР 46**Совмещение кукурузы и бобов**

Определим типичный $K_{c \text{ mid}}$ для ситуации, где одна грядка кукурузы шириной 1 м приходится на каждые 2 м кабачков, где $RH_{\min} \approx 45\%$ и $u_2 \approx 2$ м/с.

Согласно данным таблицы 12, $K_{c \text{ mid}}$ и h для кукурузы составляют 1,20 и 2 м, а $K_{c \text{ mid}}$ и h для кабачка – 0,95 и 0,3, соответственно. Не нужно никаких корректировок в связи с климатом. $K_{c \text{ mid}}$ можно получить путем осреднения значений конкретного $K_{c \text{ mid}}$ с учетом участка поверхности поля, выделенного под каждую культуру ($f_1 \approx 0,3$ для кукурузы и $f_2 \approx 0,7$ для кабачка) и с учетом высоты растений как (ур-е 104):

$$K_{c \text{ mid}} = \frac{0.30(2)(1.20) + 0.70(0.95)}{0.30(2) + 0.70(0.3)} = 1.14$$

Значения для ежедневного K_c можно получить подобным путем, строя кривые конкретного K_c и затем взвешивая интерполированные значения из кривых определенного K_c в какой-нибудь конкретный день, используя ур-е 104.

Коэффициент культуры для середины сезона и всего поля составляет 1,14.

Бордюрные культуры

Там, где высокие культуры, такие, как ветроломы или финиковые пальмы, окаймляют поля более низких культур, верхняя часть высоких культур может прерывать чувствительную тепловую энергию воздушного потока. В этих условиях K_c осредняется с учетом площади для каждого растения. Тем не менее, прежде, чем осреднять K_c бордюрной культуры, если она выше (внутренних) культур в поле, необходимо откорректировать его с учетом потенциального эффекта "бельевой веревки" (следующий раздел).

МАЛЫЕ ПЛОЩАДИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Природная растительность и сельскохозяйственные культуры часто сосуществуют в виде малых групп или участков. Значение K_c для этих малых участков зависит от типа и условий растительности, которая окружает малый участок.

Площади, окруженные растительностью с одинаковыми условиями шероховатости и влаги

В большинстве случаев для естественной или культурной сельскохозяйственной растительности значение K_c должно сохраняться в пределах верхних границ: для K_c это приблизительно 1,20-1,40, если территориальное распространение растительного покрова превышает 2000 м². Это необходимо, так как ET с больших площадей растительного покрова подчиняется одномерным принципам обмена энергией и принципу сохранения энергии. ET с малых площадей (< 2000 м²) будет сохранять те же принципы и лимиты только там, где высота растительности, площадь листа и обеспеченность почвенной влагой одинаковы с таковыми окружающего растительного покрова.

ПРИМЕР 47

Перекрывающаяся растительность

В роще финиковых пальм в 20 га в Палм Дезерт, Калифорния, США, расстояние между деревьями составляет 6 м. Смешанные с рядами пальм маленькие апельсиновые деревья (50 % кроны) посажены на расстоянии 6 м. Пальмовые и цитрусовые деревья находятся друг от друга в рядах на расстоянии 3 м. Высота пальм 10 м, а высота цитрусового дерева – 3 м. Лиственная крона пальм находится намного выше цитрусовых, таким образом, крона не может считаться непрерывной. Средняя RH_{min} в середине сезона составляет 20 % и $u_2 = 2$ м/с. $K_{c\ mid}$ из таблицы 12 для финиковых пальм равен 0,95, учитывая влияние влажности и ветра и используя ур-е 62 $K_{c\ mid} = 1,09$. $K_{c\ mid}$ из таблицы 12 для цитрусовых деревьев, имея 50 % кроны без покрытия поверхности, равен 0,60, с поправкой на влажность и ветер и использованием уравнения 62 $K_{c\ mid} = 0,70$.

Совмещение цитрусовых деревьев с финиковыми пальмами увеличило общую площадь листа сада, таким образом, ET_c для комбинированной посадки (пальмы и цитрусовые вместе) будет больше, чем при раздельной посадке каждой культуры. Оцененный комбинированный $K_{c\ mid}$ будет оцениваться как функция роста в общем LAI. Сначала значения LAI отдельных растений оцениваются путем преобразования уравнения 97 для решения LAI:

$$LAI = -1.4 \ln \left[1 - \frac{K_{cb} - K_{c\ min}}{K_{cb\ full} - K_{c\ min}} \right]$$

где $K_{c\ min}$ - минимальный основной K_c для голой почвы ($\approx 0,15$ до $0,20$), а $K_{cb\ full}$ – максимальный K_c середины сезона, ожидаемый для культуры в случае полного покрытия поверхности и вычисляемый через уравнение 99, при $h = 10$ м для финиковых пальм и $h = 3$ м для цитрусовых, $K_{cb\ full} = 1.34$ для пальм и $K_{cb\ full} = 1,30$ для цитрусовых (используя $RH_{min} = 20$ % и $u_2 = 2$ м/с). Эти оценки даются без учета влияния любого уникального устьичного контроля. Следовательно, используя данное выше уравнение, значения эффективного LAI для финиковых пальм и цитрусовых оцениваются приблизительно следующим способом:

$$LAI_{palms} = -1,4 \ln[1 - (1,09 - 0,15)/(1,34 - 0,15)] = 2,2$$

$$LAI_{citrus} = -1,4 \ln[1 - (0,70 - 0,15)/(1,30 - 0,15)] = 0,9$$

Эффективный LAI для комбинирования финиковых пальм и цитрусовых рассчитывается приблизительно как:

$$LAI_{combined} = LAI_{palms} + LAI_{citrus} = 2,2 + 0,9 = 3,1$$

Рост $K_{c\ mid}$ для роши финиковых пальм, происходящий вследствие увеличения LAI из-за совмещения с цитрусовыми деревьями, рассчитывается при помощи соотношения функции, основанной на LAI и введенной в уравнение 97. В результате получается следующее соотношение:

$$K_{c\ mid} = K_{c\ mid, \sin\ glecrop} \left[\frac{1 - \exp(-0.7 LAI_{combined})}{1 - \exp(-0.7 LAI_{\sin\ glecrop})} \right]$$

где $LAI_{combined}$ – LAI для посадок двух совмещенных культур и $LAI_{\sin\ glecrop}$ – LAI для одной, более высокой культуры. $K_{c\ mid\ \sin\ glecrop}$ – K_c в середине сезона для одной, более высокой культуры (в данном случае – финиковой пальмы). В данном применении выше описанное уравнение решается так:

$$K_{c\ mid} = 1.09 \left[\frac{1 - \exp(-0.7(3.1))}{1 - \exp(-0.7(2.2))} \right] = 1.23$$

Следовательно, $K_{c\ mid}$, рассчитанный для комплекса финиковых пальм и цитрусовых вместе, равен 1,23. Эта величина сравнивается с максимальным ожидаемым K_c , основанным на ограничениях энергии, представленным как $K_{c\ max}$ уравнения 72, которое в данном случае для $h = 10$ является $K_{c\ max} = 1,34$. Поскольку $K_{c\ mid} < K_{c\ max}$ (т. е., $1,23 < 1,34$), $K_{c\ mid} = 1,23$ принят, как приблизительная оценка $K_{c\ mid}$ для совмещенной посадки.

Эффекты "бельевой веревки" и оазиса

При эффекте "бельевой веревки", когда высота растительного покрова больше, чем высота окружающей растительности (разные условия шероховатости), или при эффекте оазиса, когда растительность имеет большую обеспеченность почвенной влагой, чем окружающий растительный покров (различные условия увлажнения), значения пикового K_c могут превышать предел 1,20-1,40. Пользователь должен соблюдать осторожность при экстраполяции измерений ET, взятых из данных типов площадок или участков растительности, на более крупные площадки или регионы, так как может произойти завышение региональной ET.

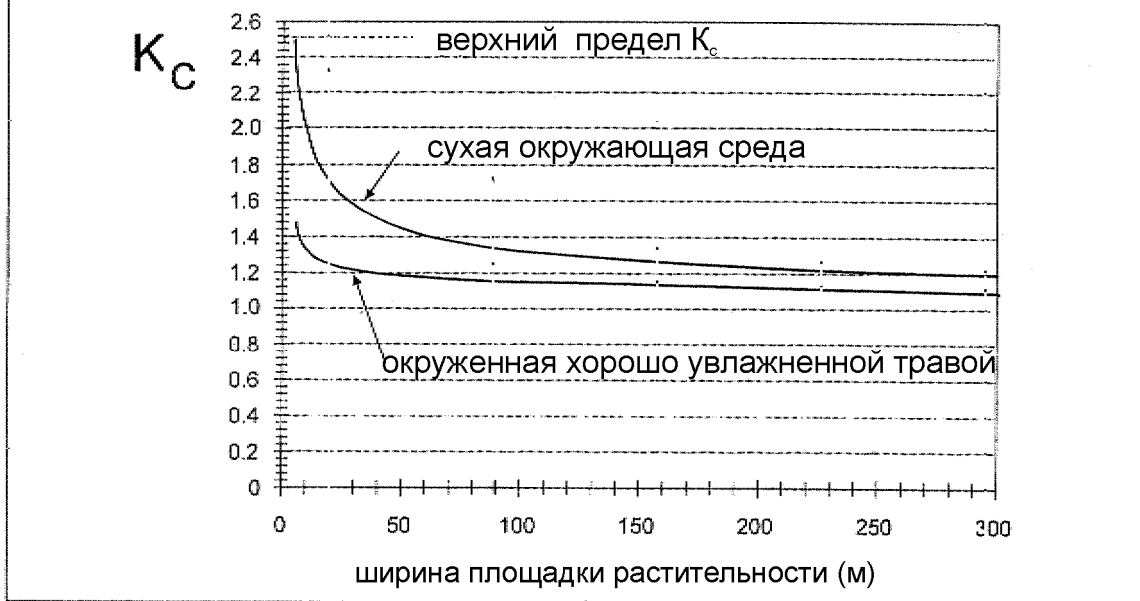
Малые пространства высокой растительности, которые окружены более низким покровом, могут продемонстрировать эффект "бельевой веревки". Это происходит, когда турбулентный приток чувствительного тепла в крону и поток пара из кроны увеличивается посредством "удара" ветра горизонтально в более высокую растительность. Кроме того, внутренний пограничный слой над растительностью может не быть в равновесии с новой поверхностью. Следовательно, ET с изолированных пространств, исходя из единицы площади, может быть значительно больше, чем соответствующая ET₀, рассчитанная для эталонной травы. Примерами эффектов "бельевой веревки" или оазиса могут быть ET с одного ряда деревьев, окруженных низкой растительностью или сухим, не засаженным полем, или ET с узкой полосы рогоза (гидрофитная растительность) вдоль русла. Значения K_c , равные 2 и более, описывают такие ситуации.

Там, где необходимы оценки ET для малых изолированных пространств растительности, окруженной низким растительным покровом (эффект "бельевой веревки") или сухой земли (эффект оазиса), K_c может превышать ET для эталонной травы на 100 % и более. Оценки K_c для пространств растительности должны включать параметры u_2 , RH_{min} и h для корректировки значений K_c и параметры, выражающие степень сухости окружающей площади, общую ширину площадки, покрытой растительностью и способность ветра проникать в растительность. Равенство должно также рассматривать LAI растительного покрова, чтобы учесть способность растительного покрова проводить и транспирировать количество воды, требуемое условием эффекта "бельевой веревки"/климата. Верхний предел 2,5 обычно устанавливается для K_c , отражающего верхний предел устьичной способности растительности, которая обеспечивает испарение потоком воздуха в условиях эффектов "бельевой веревки" или оазиса. Для растительности с большим сопротивлением листьев (некоторые виды деревьев), верхний предел должен быть умножен на корректирующий фактор сопротивления F_r, рассчитанный в главе 9, уравнение 102.

Рисунок 46 демонстрирует пример кривых K_c для малых площадей в зависимости от ширины площадки растительности для условий, где $u_2 = 2$ м/с, RH_{min} = 30 %, высота растительности = 2 м и LAI = 3. Верхняя кривая представляет условия, при которых конкретная растительность окружена сухостойной растительностью, сухой голой почвой, гравием или асфальтом. В этой ситуации большое количество ощутимого тепла аккумулируется на окружающей площади благодаря нехватке ET. Некоторое количество этого тепла направляется к наветренной стороне растительности. Нижняя кривая представляет условия, при которых растительность окружена хорошо увлажненной травой. В данной ситуации гораздо меньше ощутимого тепла исходит от окружающей территории, чтобы увеличить ET₀ (и K_c) наветренной стороны растительности. Влияние степени сухости окружающей среды на K_c для малого пространства очевидно. Две показанные кривые будут меняться с изменениями параметров u_2 , RH_{min}, h и LAI. Пользователя предупреждают, что рисунок 46 дает только общие оценки K_c в условиях эффектов «бельевой веревки» и оазиса. Эти оценки должны быть проверены, где это возможно, используя надежные местные измерения.

Оценки ET с больших или малых пространств растительности, окруженных другими видами растительности с одинаковыми условиями шероховатости и увлажнения, должны почти всегда быть меньше или равны 1,4 ET₀, даже в условиях засушливого климата.

Рис. 46. Кривые K_c для малых площадей растительности при эффекте оазиса как функции ширины пространства растительности для условий, где $RH_{\min} = 30\%$, $u_2 = 2$ м/с, высота растительности (h) = 2 м и $LAI = 3$.



Для высоких ветроломов (ряды деревьев) K_c приблизительно оценивается как:

$$K_c = \min\left(1.2 + \frac{F_r h_{canopy}}{Width}, 2.5\right) \quad (105)$$

где

F_r - фактор коррекции устьичного сопротивления (уравнение 102);

h_{canopy} - средняя вертикальная высота поверхности кроны [м];

$Width$ - ширина (горизонтальная толщина) ветролома [м].

$K_c = 2.5$ - предел, установленный в уравнении 105, представляющий приблизительный верхний порог ET_c деревьев на единицу площади. Тем не менее, это значение слабо обосновано. Поскольку обеспеченность почвенной влагой может ограничить эвапотранспирацию с ветроломов, необходимо провести баланс почвенной влаги и расчет фактора давления K_c .

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ СТРЕСС, ВЫЗВАННЫЙ УПРАВЛЕНИЕМ

Многим сельскохозяйственным культурам намеренно недодают воду в периоды роста, чтобы содействовать развитию особых свойств этой культуры. Водный стресс происходит в результате приостановки или сокращения поливов. В случае, если данный вид управления культурами применяется на практике, K_c должен быть снижен ввиду сокращения эвапотранспирации.

Экологическое давление, выражающееся в нехватке воды, низком плодородии или засолении почвы, может вызвать ускорение репродуктивного цикла некоторых видов культур. В таких случаях длина вегетационного сезона может быть укорочена, особенно в период середины сезона. Стресс в период развития может увеличить длину этого периода. Следовательно, продолжительность середины сезона L_{mid} изменяется и, возможно, нужно будет корректировать продолжительность сезона развития и позднего сезона растительности, которая подверглась

экологическому стрессу или ей был нанесен ущерб. Местное исследование и наблюдение являются решающими в определении размеров и рамок этой корректировки. Несколько примеров модификаций K_c и продолжительности вегетационных периодов описаны ниже.

Семена люцерны

Некоторые кормовые культуры, такие как люцерна, которые выращиваются для производства семян, намеренно подвергаются водному стрессу с целью сокращения количества растительности и увеличения производства цветов и семян. На территориях, подверженных холодным ветрам, снижение K_c для культур с глубокими корнями, например, люцерны, зависит от количества влаги в результате выпадения осадков в течение зимнего сезона и от количества дождей и ограниченного орошения в вегетационный период. Поэтому воздействие намеренного стресса на значения K_c должно моделироваться посредством основной процедуры выращивания культур, представленной в главе 7 и процедуры коэффициента K_s и водного баланса, описанной в главе 8.

Хлопок

При выращивании хлопка воздействие водным стрессом может быть начато в период развития для того, чтобы задержать развитие цветов и содействовать распусканию семенной коробочки. Такая практика замедляет рост хлопка и отодвигает дату полного раскрытия на более позднее время. Достижение полного раскрытия и начало середины сезона выращивания хлопка обычно наблюдаются, когда LAI достигает приблизительно 3. Если водный стресс и торможение роста применяются на практике, полное раскрытие может произойти после того, как началось цветение. Влияние стресса на ET_c в период развития может быть отражено в кривой K_c через продление периода развития в середине сезона. Продолжительность всего сезона в целом остается прежней.

Сахарная свекла

Сахарную свеклу часто удается подвергнуть мягкому водному стрессу во время позднего сезона, чтобы обезводить корни и сконцентрировать сахар. Последнее орошение может быть проведено перед самым сбором урожая для того, чтобы помочь извлечению корней. Когда применяется подобный тип стресса, значение $K_{c\text{ end}}$ снижается с 1,0 до 0,6 (таблица 12, сноска 5).

Кофе

Кофейные деревья часто специально подвергают водному стрессу с целью замедления роста растения и поощрения развития ягод. В этих условиях значения K_c из таблицы 12 должны быть снижены. Кроме того, поля кофе можно окаймлять деревьями, которые будут играть роль ветроломов. Эффект ветроломов должен сократить K_c кофейных деревьев, благодаря снижению скорости ветра и количества солнечной радиации, попадающей на растения. Снижение K_c может быть существенным, если ветроломы высокие, и расположены близко друг от друга. Однако K_c полной площади поля увеличивается при посадке деревьев-ветроломов, по сравнению со значениями K_c кофе, показанными в таблице 12, благодаря увеличенной общей площади листовой комбинации кофейного дерева и увеличенной аэродинамической шероховатости.

Чай

Возникновение и развитие новых чайных листьев обычно наблюдается сразу после начала сезона дождей. В период засушливого сезона зарождение новых листьев происходит медленно, либо совсем отсутствует. Транспирация старых листьев медленнее, чем транспирация новых, благодаря влиянию возраста листа на устьичную проводимость. Следовательно, если листья стареют (более 2-3 месяцев), то K_c будет на 20-30 % ниже, чем в таблицах 12 и 17. Подобно кофейным, чайные поля можно окаймлять деревьями-ветроломами. Эффект ветроломов снижает K_c чайных культур, однако потенциально увеличивает K_c всей плантации, как описано для кофе.

Оливы

Садовники могут увеличить расстояния между оливковыми деревьями в условиях бо-гарного орошения на территориях, где выпадает мало дождей. Это делается для того, чтобы увеличить площадь на одно дерево, что способствует использованию дождя на транспирацию дерева. Например, в Тунисе расстояние между оливами изменяется от севера к югу, пропорционально годовым осадкам. Расстояние между деревьями влияет на K_c культуры (пример 43).

Глава 11

ET_c в невегетационные периоды

Эта глава описывает процедуры определения ET_c в невегетационные периоды. Невегетационные периоды определяются как периоды, когда не посажены никакие сельскохозяйственные культуры. В умеренном климате невегетационные периоды могут включать периоды заморозков и постоянные морозы.

ТИПЫ УСЛОВИЙ ПОВЕРХНОСТИ

Тип и условие земной поверхности в невегетационные периоды диктуют, какое место должна занимать ET_c. Там, где поверхность состоит из голой почвы, K_c будет одинаковым с K_{c ini}, предсказанным в главе 6. Там где поверхность покрыта сухостоем или каким-либо видом органической мульчи или остатками растений, K_c будет равен коэффициенту культуры в сельском хозяйстве, которое использует поверхностную мульчу. Там, где поверхность покрыта сорняками или самосевными растениями, K_c будет изменяться в зависимости от площади листьев или участка земли, покрытого растительностью и обеспеченного почвенной влагой. Когда поверхность покрыта снегом или заморожена, K_c трудно предсказуем, и величина ET_c может быть принята постоянной.

Голая почва*Единый коэффициент культуры*

Там, где земля осталась после сбора урожая почти голой, K_c попадет под сильное влияние частоты и количества осадков. K_c голой почвы можно рассчитать как $K_c = K_{c ini}$, где K_{c ini} рассчитывается с помощью применения процедуры из главы 6.

Двойной коэффициент культуры

Там, где можно применять ежедневный водный баланс почвы, пользователь может выбрать подход двойного K_c из главы 7. В данной ситуации верхний слой почвы может высохнуть из-за низкого содержания влаги в периоды без осадков. Следовательно, значения K_{cb} и K_{c min} в уравнениях 71 и 76 должны быть равны нулю. Это дает возможность прогнозировать ET_c = 0 во время долгих засушливых периодов. Необходимо сохранять водный баланс испаряющего слоя и корневой зоны в целом. Расчет ежедневного водного баланса, учитывая K_{cb} = 0, обеспечит наиболее точные оценки ET_c в невегетационные периоды.

Поверхность, покрытая сухостоем

Единый коэффициент культуры

Там, где на поверхности земли присутствуют пожнивные остатки или другое покрытие из сухой органической мульчи, или там, где часть несобранного урожая частично остается на поверхности в сухом или стареющем состоянии, поверхность будет соответствовать случаю покрытия мульчей. В данном случае K_c может равняться $K_{c\text{ ini}}$, как можно видеть из рисунков 29 и 30, но значение $K_{c\text{ ini}}$ может быть снижено на 5 % для каждых 10 % поверхности почвы, которая эффективно покрыта органической мульчей.

Двойной коэффициент культуры

Испарение с сухостойной, влажной растительности может быть существенным в течение нескольких дней после дождя. Следовательно, при методе двойного K_c значение f_c должно быть равно нулю, чтобы отразить недостаток зеленой растительности и f_w должно равняться 1,0 для отражения степени увлажнения осадками почвы и покрытия из мульчи.

Сухая мульча или растительность высохнет намного быстрее, чем лежащая под ними почва, если она будет открыта. Кроме того, почва будет защищена от испарения сухой мульчей или растительным покровом. Следовательно, общие потери на испарение будут меньше, чем TEW согласно уравнению 73. Это можно объяснить сокращением значения TEW на 5 % для каждых 10 % поверхности почвы, которая эффективно покрыта органической мульчей. Значение REW должно быть меньше или равным значению TEW.

Поверхность, покрытая живой растительностью

Во время отсутствия заморозков, следующих за сбором урожая, могут образоваться и расти сорняки. Эта растительность питается влагой из запасов в профиле почвы или в результате выпадения осадков. Кроме того, семена культур, потерянные во время сбора урожая, могут прорасти после выпадения осадков и дополнить растительный покров. Площадь земной поверхности, покрытой растительностью, будет зависеть от степени воздействия инвазии сорняков; плотности самосевных культур; частоты и объема обработки почвы; обеспеченности почвенной или дождевой влагой; ущербом от заморозков.

Значение K_{cb} в невегетационный период может быть спрогнозировано во времени по количеству растительности, покрывающей поверхность. Это можно сделать путем оценки LAI, используя уравнение 97 или оценки доли земного покрова f_c , используя уравнение 98.

Единый коэффициент культуры

При подходе, использующем единый коэффициент культуры, значение K_{cb} , определенное посредством процедур, описанных в главе 9, может быть преобразовано в эквивалент K_c прибавлением от 0,05 до 0,15 в соответствии с частотой дождей и увлажнением поверхности.

Важно, что K_c растительности в невегетационный период может быть ограничен в соответствии с количеством почвенной влаги для обеспечения эвапотранспирации. Другими словами, закон сохранения массы будет нарушен. При всех этих условиях сочетание $K_c ET_0$ после невегетационного периода не может превышать сумму осадков, выпавших за этот период, и остаточной влаги в корневой зоне после сбора урожая, которая будет использована в последующую вегетацию. Корневая зона в данном случае является корневой зоной сорняков и самосевных культур. Ежедневный водный баланс почвы предусматривает наилучшую оценку водного стресса и связанного с ним сокращения K_c и ET_c .

Двойной коэффициент культуры

При подходе с использованием коэффициента культуры K_{cb} может прогнозироваться с учетом площади поверхности, покрытой растительностью, через уравнение 97 или 98. Тогда может применяться полный ежедневный водный баланс верхнего слоя почвы вместе с полным ежедневным водным балансом корневой зоны, как описано в главе 7. Водные балансы почвы автоматически подчиняются закону сохранения массы, таким образом, общая ET_c с сорняков или самосеивной растительности не будет завышена. С другой стороны, поскольку верхний слой почвы может высохнуть до степени увядания растений в условиях редкого выпадения осадков, значения K_{cb} и $K_{c\ min}$, используемые в уравнениях 71 и 76, должны равняться нулю. Таким образом, ежедневный водный баланс почвы с расчетами двойного K_c может прогрессировать в невегетационный период и принести хорошие результаты.

Мерзлая или заснеженная поверхность

Там где поверхность земли мерзлая или покрыта снегом, любая растительность почти совершенно не будет способна отражать и способствовать ET_c , а значение ET_c будет тесно связано с наличием свободной воды на поверхности и ее отражательной способностью.

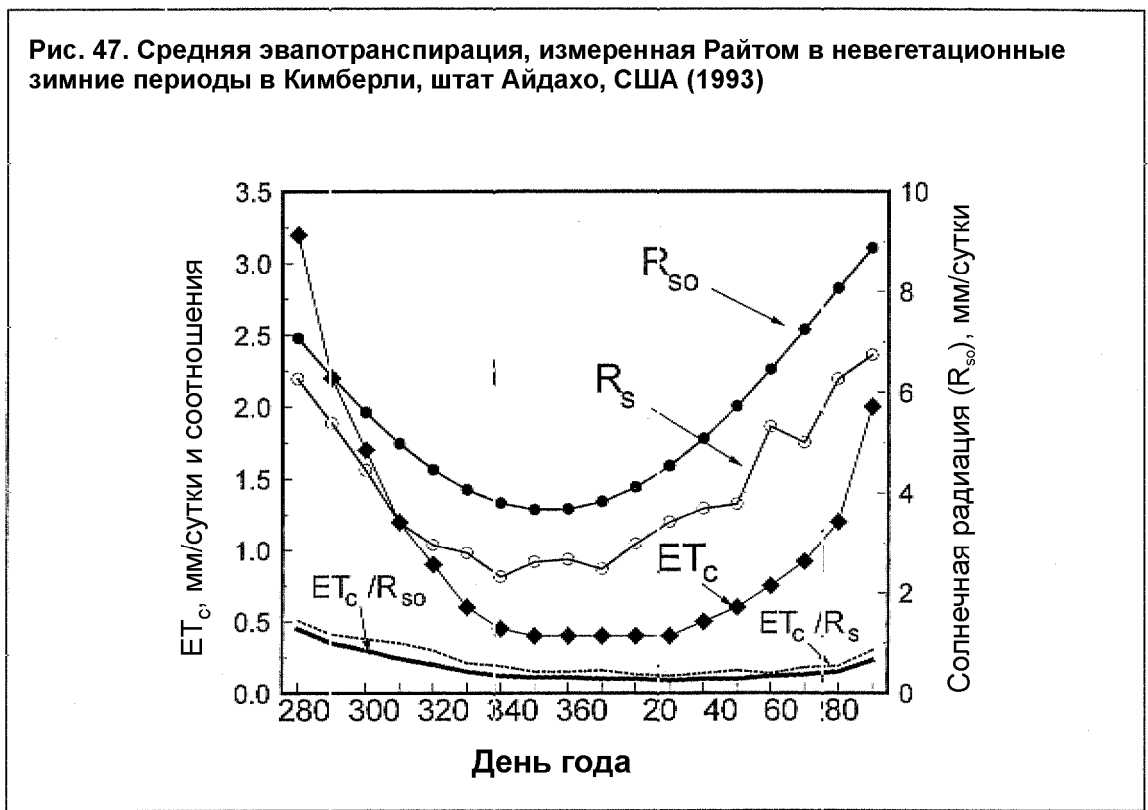
Отражательная способность поверхностей, покрытых снегом, может варьировать от 0,40 для старого грязного снежного покрова до 0,90 для свежего сухого снега. Следовательно, ET_c снежного покрова будет меньше, чем ET_0 травы, так как наличие коротковолновой энергии снижается на 25-28 %. Кроме того, некоторое количество энергии должно использоваться на то, чтобы растопить снег перед эвапотранспирацией.

Использование ET_0 в таких условиях ограничено, так как допущение о сохранении покрова из зеленой травы нарушено. В некоторые зимние дни, когда длинноволновая радиация с поверхности велика и дефицит давления пара мал, возможны даже отрицательные значения ET_0 . При таких условиях возможна чистая конденсация воды из атмосферы, что будет равносильно отрицательному испарению.

Учитывая ограниченное значение ET_0 (или даже ET_p) в условиях мерзлой или покрытой снегом поверхности, для прогноза лучше всего может быть использовано среднее значение ET_c . Райт (1993) обнаружил, что ET_c усреднялось до 1 мм/сут в зимние периоды в Кимберли, Айдахо, США, длившиеся 6 месяцев (с 1 октября по 30 марта). Кимберли находится на широте 42° с. ш. и высоте 1200 м. За шестилетний период исследования 25 % времени - с 1 октября по 30 марта почва на 50 % была покрыта снегом. Почва без снега оставалась мерзлой 50 % от всего периода. K_c усреднялся до 0,25 в периоды, когда почва не была мерзлой, но случались заморозки (октябрь и начало ноября). При снежном покрове в 50 % и более случаев, ET_c усреднялась до 0,4 мм/сут. Райт обнаружил, что в течение шести лет в невегетационные периоды общая совокупная ET_c превысила осадки на 50 мм.

Рисунок 47 показывает среднюю измеренную ET_0 в период исследований 1985-1991 гг. Измерения близко соответствуют общему объему коротковолновой радиационной энергии, излучаемой в ясный день R_{so} , оцененную как 0,75 R_Q . Наблюдается некоторое отставание между ET_c/R_{so} и R_s , вызванное более низкими температурами в январе-марте в сравнении с периодом с октября по декабрь. Соотношение ET_c/R_{so} усреднялось до 0,17 за шестимесячный период, а также до 0,11 с 1 декабря по 10 марта. Соотношение ET_c/R_s усреднялось до 0,23 за шестимесячный период и до 0,15 с 1 декабря по 10 марта.

Подобное исследование, проведенное в Логане, штат Юта, США ($41,6^{\circ}$ с. ш., высота 1350 м) за восьмилетний период, показало, что ET_c изменялась в широких пределах в зависимости от влажности поверхности почвы и температуры воздуха в зимние месяцы. "Средний" K_c с ноября по март составил 0,5 в бесснежные дни. В дни, когда снег покрывал землю, " ET_c " изменялась от 0 до 1,5 мм/сут. K_c также составлял около 0,4 для озимой пшеницы в периоды заморозков в регионе северного Китая (широта приблизительно 39° с. ш.).



Единый коэффициент культуры

Вышеописанная процедура может обеспечить оценку единого K_c в невегетационные периоды со снежным покровом и в условиях заморозков. Однако известно, что фактическое значение K_c варьирует в широких пределах и будет тем ниже, чем меньше влаги содержится в поверхностном слое почвы.

Двойной коэффициент культуры

При использовании суточного водного баланса почвы для точной оценки ET_c в условиях заморозков и снежного покрытия необходим метод двойного коэффициента культуры. В этом методе суточный водный баланс составляется для верхнего слоя почвы и оценка K_c может быть снижена в соответствии с наличием влаги. Тем не менее, кроме ограниченной обоснованности концепции ET_0 в условиях заморозков и снежного покрова, коэффициент испарения K_c может снизиться, если заморожен грунт, т.к. вода в замерзшем состоянии присутствует в меньшем объеме.

В литературе существуют более сложные модели оценки ET_c в условиях невегетационного сезона, снежного покрова и заморозков; они должны рекомендоваться и, возможно, применяться, когда необходимы точные оценки ET_0 . Некоторые из них описаны в разделе К справоч.

Приложение 1

ЕДИНИЦЫ И СИМВОЛЫ

ПРИСТАВКИ

Единицы измерения могут использоваться как в данном виде, так и во множественном числе:

Тера (Т) составляет	10^{12}	Санты (с)	10^{-2}
Гига (Г)	10^9	Милли (м)	10^{-3}
Мега (М)	10^6	Микро (μ)	10^{-6}
Кило (к)	10^3	Нано (н)	10^{-9}
Гекто (г)	10^2	Пико (р)	10^{-12}
Дека (да)	10^1	Фемто (ф)	10^{-15}
Деци (д)	10^{-1}	Атто (а)	10^{-18}

ТЕМПЕРАТУРА

Стандартная единица измерения: по Цельсию ($^{\circ}\text{C}$)

по Фаренгейту ($^{\circ}\text{F}$) $(^{\circ}\text{C}) = (^{\circ}\text{F} - 32) 5/9$
 по Кельвину (К) $1 \text{ K} = (^{\circ}\text{C}) + 273.16$

ДАВЛЕНИЕ

(давление воздуха, давление пара)

Стандартная единица измерения: килопаскаль (кПа)

миллибар (мбар)	$1 \text{ мбар} = 0,1 \text{ кПа}$
бар	$1 \text{ бар} = 100 \text{ кПа}$
сантиметр воды (см)	$1 \text{ см воды} = 0,09807 \text{ кПа}$
миллиметр ртутя (ммHg)	$1 \text{ ммHg} = 0,1333 \text{ кПа}$
атмосфера (атм)	$1 \text{ атм} = 101,325 \text{ кПа}$
фунт на 1 кв. дюйм (пси)	$1 \text{ пси} = 6,896 \text{ кПа}$

СКОРОСТЬ ВЕТРА

Стандартная единица измерения: метр в секунду (м с^{-1})
 километр в сутки (км сут^{-1}) $1 \text{ км сут}^{-1} = 0,01157 \text{ м с}^{-1}$
 морская миля в час (узел) $1 \text{ узел} = 0,5144 \text{ м с}^{-1}$
 фут в секунду (фт с^{-1}) $1 \text{ фт/с} = 0,3048 \text{ м с}^{-1}$

РАДИАЦИЯ

**Стандартная единица измерения: мегаджоуль на 1 кв. м (МДж м⁻² сут⁻¹)
или в качестве эквивалентного испарения в мм в сутки (мм сут⁻¹)**

эквивалентное испарение (мм/сут)	1 мм сут ⁻¹ = 2,45 МДж м ⁻² сут ⁻¹
Джоуль на см ² в сутки (Дж см ⁻² сут ⁻¹)	1 Дж см ⁻² сут ⁻¹ = 0,01 МДж м ⁻² сут ⁻¹
калория на см ² в сутки (кал см ⁻² сут ⁻¹)	1 кал = 4,1868 Дж = 4,1868 · 10 ⁻⁶ МДж
	1 кал см ⁻² сут ⁻¹ = 4,1868 · 10 ⁻² МДж м ⁻² сут ⁻¹
	Ватт на м ² (Вт м ⁻²) 1 Вт = 1 Дж с ⁻¹
	1 Вт м ⁻² = 0,0864 МДж м ⁻² сут ⁻¹

ЭВАПОТРАНСПИРАЦИЯ

Стандартная единица измерения: миллиметр в сутки (мм сут⁻¹)

м ³ на гектар в сутки (м ³ га ⁻¹ сут ⁻¹)	1 м ³ га ⁻¹ сутки ⁻¹ = 0,1 мм сут ⁻¹
литр в секунду на гектар (л с ⁻¹ га ⁻¹)	1 л с ⁻¹ га ⁻¹ = 8,640 мм сут ⁻¹
эквивалентная радиация в мегаджоулях на кв.м в сутки (МДж м ⁻² сут ⁻¹)	1 МДж ⁻² сут ⁻¹ = 0,408 мм сут ⁻¹

Приложение 2

Метеорологические таблицы

- 2.1. Атмосферное давление (P) для различных высот над уровнем моря (z)
- 2.2. Психометрическая константа (γ) для различных высот над уровнем моря (z)
- 2.3. Давление пара насыщения (e⁰(T)) для различных температур (T)
- 2.4. Градиент кривой давления пара (Δ) для различных температур (T)
- 2.5. Количество дней в году (J)
- 2.6. Суточная внеземная радиация (R_a) для различных широт
- 2.7. Среднее количество дневных часов (N) для различных широт
- 2.8. σ_{T_K}⁴ (Закон Стефана-Больцмана) при различных температурах (T)
- 2.9. Факторы преобразования скорости ветра, измеряемой на данной высоте, в скорость ветра, измеряемую на стандартной высоте 2 м от поверхности земли

ТАБЛИЦА 2.1
Атмосферное давление (P) для различных широт (z)

$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (7)$							
z (м)	P (кПа)	z (м)	P (кПа)	z (м)	P (кПа)	z (м)	P (кПа)
0	101,3	1000	90,0	2000	79,8	3000	70,5
50	100,7	1050	89,5	2050	79,3	3050	70,1
100	100,1	1100	89,0	2100	78,8	3100	69,6
150	99,5	1150	88,4	2150	78,3	3150	69,2
200	99,0	1200	87,9	2200	77,9	3200	68,8
250	98,4	1250	87,4	2250	77,4	3250	68,3
300	97,8	1300	86,8	2300	76,9	3300	67,9
350	97,2	1350	86,3	2350	76,4	3350	67,5
400	96,7	1400	85,8	2400	76,0	3400	67,1
450	96,1	1450	85,3	2450	75,5	3450	66,6
500	95,5	1500	84,8	2500	75,0	3500	66,2
550	95,0	1550	84,3	2550	74,6	3550	65,8
600	94,4	1600	83,8	2600	74,1	3600	65,4
650	93,8	1650	83,3	2650	73,7	3650	65,0
700	93,3	1700	82,8	2700	73,2	3700	64,6
750	92,7	1750	82,3	2750	72,7	3750	64,1
800	92,2	1800	81,8	2800	72,3	3800	63,7
850	91,6	1850	81,3	2850	71,8	3850	63,3
900	91,1	1900	80,8	2900	71,4	3900	62,9
950	90,6	1950	80,3	2950	71,0	3950	62,5
1000	90,0	2000	79,8	3000	70,5	4000	62,1

ТАБЛИЦА 2.2

Психометрическая константа (γ) для различных широт (z)

$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \gamma} = 0.665 \times 10^{-3} P \quad (8)$							
z (м)	γ кПа/°С	z (м)	γ кПа/°С	z (м)	γ кПа/°С	z (м)	γ кПа/°С
0	0,067	1000	0,060	2000	0,053	3000	0,047
100	0,067	1100	0,059	2100	0,052	3100	0,046
200	0,066	1200	0,058	2200	0,052	3200	0,046
300	0,065	1300	0,058	2300	0,051	3300	0,045
400	0,064	1400	0,057	2400	0,051	3400	0,045
500	0,064	1500	0,056	2500	0,050	3500	0,044
600	0,063	1600	0,056	2600	0,049	3600	0,043
700	0,062	1700	0,055	2700	0,049	3700	0,043
800	0,061	1800	0,054	2800	0,048	3800	0,042
900	0,061	1900	0,054	2900	0,047	3900	0,042
1000	0,060	2000	0,053	3000	0,047	4000	0,041

На основе $\gamma = 2,45 \text{ МДж кг}^{-1}$ при 20°С .

ТАБЛИЦА 2.3
Давление пара насыщения ($e^0(T)$) для различных температур (Т)

$e^0(T) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27T}{T + 237.3} \right] \quad (11)$							
Т °С	e_s кПа	Т °С	$e^0(T)$ кПа	Т °С	$e^0(T)$ кПа	Т °С	e_s кПа
1,0	0,657	13,0	1,498	25,0	3,168	37,0	6,275
1,5	0,681	13,5	1,547	25,5	3,263	37,5	6,448
2,0	0,706	14,0	1,599	26,0	3,361	38,0	6,625
2,5	0,731	14,5	1,651	26,5	3,462	38,5	6,806
3,0	0,758	15,0	1,705	27,0	3,565	39,0	6,991
3,5	0,785	15,5	1,761	27,5	3,671	39,5	7,181
4,0	0,813	16,0	1,818	28,0	3,780	40,0	7,376
4,5	0,842	16,5	1,877	28,5	3,891	40,5	7,574
5,0	0,872	17,0	1,938	29,0	4,006	41,0	7,778
5,5	0,903	17,5	2,000	29,5	4,123	41,5	7,986
6,0	0,935	18,0	2,064	30,0	4,243	42,0	8,199
6,5	0,968	18,5	2,130	30,5	4,366	42,5	8,417
7,0	1,002	19,0	2,197	31,0	4,493	43,0	8,640
7,5	1,037	19,5	2,267	31,5	4,622	43,5	8,867
8,0	1,073	20,0	2,338	32,0	4,755	44,0	9,101
8,5	1,110	20,5	2,412	32,5	4,891	44,5	9,339
9,0	1,148	21,0	2,487	33,0	5,030	45,0	9,582
9,5	1,187	21,5	2,564	33,5	5,173	45,5	9,832
10,0	1,228	22,0	2,644	34,0	5,319	46,0	10,086
10,0	1,270	22,5	2,726	34,5	5,469	46,5	10,374
11,0	1,313	23,0	2,809	35,0	5,623	47,0	10,613
11,5	1,357	23,5	2,896	35,5	5,780	47,5	10,885
12,0	1,403	24,0	2,984	36,0	5,941	48,0	11,163
12,5	1,449	24,5	3,075	36,5	6,106	48,5	11,447

ТАБЛИЦА 2.4

Градиент кривой давления пара (Δ) для различных температур (Т)

$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (13)$							
Т °С	Δ кПа/°С	Т °С	Δ кПа/°С	Т °С	Δ кПа/°С	Т °С	Δ кПа/°С
1,0	0,047	13,0	0,098	25,0	0,189	37,0	0,342
1,5	0,049	13,5	0,101	25,5	0,194	37,5	0,350
2,0	0,050	14,0	0,104	26,0	0,199	38,0	0,358
2,5	0,052	14,5	0,107	26,5	0,204	38,5	0,367
3,0	0,054	15,0	0,110	27,0	0,209	39,0	0,375
3,5	0,055	15,5	0,113	27,5	0,215	39,5	0,384
4,0	0,057	16,0	0,116	28,0	0,220	40,0	0,393
4,5	0,059	16,5	0,119	28,5	0,226	40,5	0,402
5,0	0,061	17,0	0,123	29,0	0,231	41,0	0,412
5,5	0,063	17,5	0,126	29,5	0,237	41,5	0,421
6,0	0,065	18,0	0,130	30,0	0,243	42,0	0,431
6,5	0,067	18,5	0,133	30,5	0,249	42,5	0,441
7,0	0,069	19,0	0,137	31,0	0,256	43,0	0,451
7,5	0,071	19,5	0,141	31,5	0,262	43,5	0,461
8,0	0,073	20,0	0,145	32,0	0,269	44,0	0,471
8,5	0,075	20,5	0,149	32,5	0,275	44,5	0,482
9,0	0,078	21,0	0,153	33,0	0,282	45,0	0,493
9,5	0,080	21,5	0,157	33,5	0,289	45,5	0,504
10,0	0,082	22,0	0,161	34,0	0,296	46,0	0,515
10,5	0,085	22,5	0,165	34,5	0,303	46,5	0,526
11,0	0,087	23,0	0,170	35,0	0,311	47,0	0,538
11,5	0,090	23,5	0,174	35,5	0,318	47,5	0,550
12,0	0,092	24,0	0,179	36,0	0,326	48,0	0,562
12,5	0,095	24,5	0,184	36,5	0,334	48,5	0,574

ТАБЛИЦА 2.5
Количество дней в году (J)

День	Январь	Февраль	Март*	Апрель*	Май*	Июнь*
1	1	32	60	91	121	152
2	2	33	61	92	122	153
3	3	34	62	93	123	154
4	4	35	63	94	124	155
5	5	36	64	95	125	156
6	6	37	65	96	126	157
7	7	38	66	97	127	158
8	8	39	67	98	128	159
9	9	40	68	99	129	160
10	10	41	69	100	130	161
11	11	42	70	101	131	162
12	12	43	71	102	132	163
13	13	44	72	103	133	164
14	14	45	73	104	134	165
15	15	46	74	105	135	166
16	16	47	75	106	136	167
17	17	48	76	107	137	168
18	18	49	77	108	138	169
19	19	50	78	109	139	170
20	20	51	79	110	140	171
21	21	52	80	111	141	172
22	22	53	81	112	142	173
23	23	54	82	113	143	174
24	24	55	83	114	144	175
25	25	56	84	115	145	176
26	26	57	85	116	146	177
27	27	58	86	117	147	178
28	28	59	87	118	148	179
29	29	(60)	88	119	149	180
30	30	-	89	120	150	181
31	31	-	90	-	151	-

* добавить 1, если год високосный

J можно определить для каждого дня (D) месяца (M) следующим путем:

$J = \text{INTEGER} (275 M/9 - 30 + D) - 2$

IF (M < 3) **THEN** J = J + 2

also, **IF** (високосный год и (M > 2)) **THEN** J = J + 1

Для 10-дневных расчетов, рассчитать J для дня D = 5, 15 и 25

Для расчетов на месяц, J в середине месяца приблизительно дается:

$J = \text{INTEGER} (30.4 M - 15)$

ТАБЛИЦА 2.5 (продолжение)
Количество дней в году (J)

День	Июль*	Август*	Сентябрь*	Октябрь*	Ноябрь*	Декабрь*
1	182	213	244	274	305	335
2	183	214	245	275	306	336
3	184	215	246	276	307	337
4	185	216	247	277	308	338
5	186	217	248	278	309	339
6	187	218	249	279	310	340
7	188	219	250	280	311	341
8	189	220	251	281	312	342
9	190	221	252	282	313	343
10	191	222	253	283	314	344
11	192	223	254	284	315	345
12	193	224	255	285	316	346
13	194	225	256	286	317	347
14	195	226	257	287	318	348
15	196	227	258	288	319	349
16	197	228	259	289	320	350
17	198	229	260	290	321	351
18	199	230	261	291	322	352
19	200	231	262	292	323	353
20	201	232	263	293	324	354
21	202	233	264	294	325	355
22	203	234	265	295	326	356
23	204	235	266	296	327	357
24	205	236	267	297	328	358
25	206	237	268	298	329	359
26	207	238	269	299	330	360
27	208	239	270	300	331	361
28	209	240	271	301	332	362
29	210	241	272	302	333	363
30	211	242	273	303	334	364
31	212	243	-	304	-	365

ТАБЛИЦА 2.6 Суточная внеземная радиация (R_a) для различных широт для 15-го дня месяца¹

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (21)$$

(значения в МДж м⁻² сут⁻¹)²

Северное полушарие												Град. шир.	Южное полушарие											
Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авгус	Сен.	Окт.	Нояб	Дек.		Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авгус	Сен.	Окт.	Нояб	Дек.
0,0	2,6	10,4	23,0	35,2	42,5	39,4	28,0	14,9	4,9	0,1	0,0	70	41,4	28,6	15,8	4,9	0,2	0,0	0,0	2,2	10,7	23,5	37,3	45,3
0,1	3,7	11,7	23,9	35,3	42,0	38,9	28,6	16,1	6,0	0,7	0,0	68	41,0	29,3	16,9	6,0	0,8	0,0	0,0	3,2	11,9	24,4	37,4	44,7
0,6	4,8	12,9	24,8	35,6	41,4	38,8	29,3	17,3	7,2	1,5	0,1	68	40,9	30,0	18,1	7,2	1,5	0,1	0,5	4,2	13,1	25,4	37,6	44,1
1,4	5,9	14,1	25,8	35,9	41,2	38,8	30,0	18,4	8,5	2,4	0,6	64	41,0	30,8	19,3	8,4	2,4	0,6	1,2	5,3	14,4	26,3	38,0	43,9
2,3	7,1	15,4	26,6	36,3	41,2	39,0	30,6	19,5	9,7	3,4	1,3	62	41,2	31,5	20,4	9,6	3,4	1,2	2,0	6,4	15,5	27,2	38,3	43,9
3,3	8,3	16,6	27,5	36,6	41,2	39,2	31,3	20,6	10,9	4,4	2,2	60	41,5	32,3	21,5	10,8	4,4	2,0	2,9	7,6	16,7	28,1	38,7	43,9
4,3	9,6	17,7	28,4	37,0	41,3	39,4	32,0	21,7	12,1	5,5	3,1	58	41,7	33,0	22,6	12,0	5,5	2,9	3,9	8,7	17,9	28,9	39,1	44,0
5,4	10,8	18,9	29,2	37,4	41,4	39,6	32,6	22,7	13,3	6,7	4,2	58	42,0	33,7	23,6	13,2	8,6	3,9	4,9	9,9	19,0	29,8	39,5	44,1
6,5	12,0	20,0	30,0	37,8	41,5	39,8	33,2	23,7	14,5	7,8	5,2	54	42,2	34,3	24,6	14,4	7,7	4,9	6,0	11,1	20,1	30,6	39,9	44,3
7,7	13,2	21,1	30,8	38,2	41,6	40,1	33,8	24,7	15,7	9,0	6,4	52	42,5	35,0	25,6	15,6	8,8	6,0	7,1	12,2	21,2	31,4	40,2	44,4
8,9	14,4	22,2	31,5	38,5	41,7	40,2	34,4	25,7	16,9	10,2	7,5	50	42,7	35,6	26,6	16,7	10,0	7,1	8,2	13,4	22,2	32,1	40,6	44,5
10,1	15,7	23,3	32,2	38,8	41,8	40,4	34,9	26,6	18,1	11,4	8,7	48	42,9	36,2	27,5	17,9	11,1	8,2	9,3	14,6	23,3	32,8	40,9	44,5
11,3	16,9	24,3	32,9	39,1	41,9	40,6	35,4	27,5	19,2	12,6	9,9	48	43,0	36,7	28,4	19,0	12,3	9,3	10,4	15,7	24,3	33,5	41,1	44,6
12,5	18,0	25,3	33,5	39,3	41,9	40,7	35,9	28,4	20,3	13,9	11,1	44	43,2	37,2	29,3	20,1	13,5	10,5	11,6	16,8	25,2	34,1	41,4	44,6
13,8	19,2	26,3	34,1	39,5	41,9	40,8	36,3	29,2	21,4	15,1	12,4	42	43,3	37,7	30,1	21,2	14,6	11,6	12,8	18,0	26,2	34,7	41,6	44,6
15,0	20,4	27,2	34,7	39,7	41,9	40,8	36,7	30,0	22,5	16,3	13,6	40	43,4	38,1	30,9	22,3	15,8	12,8	13,9	19,1	27,1	35,3	41,8	44,6
16,2	21,5	28,1	35,2	39,9	41,8	40,8	37,0	30,7	23,6	17,5	14,8	38	43,4	38,5	31,7	23,3	16,9	13,9	15,1	20,2	28,0	35,8	41,9	44,5
17,5	22,6	29,0	35,7	40,0	41,7	40,8	37,4	31,5	24,6	18,7	16,1	38	43,4	38,9	32,4	24,3	18,1	15,1	16,2	21,2	28,8	36,3	42,0	44,4
18,7	23,7	29,9	36,1	40,0	41,6	40,8	37,6	32,1	25,6	19,9	17,3	34	43,4	39,2	33,0	25,3	19,2	16,2	17,4	22,3	29,6	36,7	42,0	44,3
19,9	24,8	30,7	36,5	40,0	41,4	40,7	37,9	32,8	26,6	21,1	18,5	32	43,3	39,4	33,7	26,3	20,3	17,4	18,5	23,3	30,4	37,1	42,0	44,1
21,1	25,8	31,4	36,8	40,0	41,2	40,6	38,0	33,4	27,6	22,2	19,8	30	43,1	39,6	34,3	27,2	21,4	18,5	19,6	24,3	31,1	37,5	42,0	43,9
22,3	26,8	32,2	37,1	40,0	40,9	40,4	38,2	33,9	28,5	23,3	21,0	28	43,0	39,8	34,8	28,1	22,5	19,7	20,7	25,3	31,8	37,8	41,9	43,6
23,4	27,8	32,8	37,4	39,9	40,6	40,2	38,3	34,5	29,3	24,5	22,2	28	42,8	39,9	35,3	29,0	23,5	20,8	21,8	26,3	32,5	38,0	41,8	43,3
24,6	28,8	33,5	37,6	39,7	40,3	39,9	38,3	34,9	30,2	25,5	23,3	24	42,5	40,0	35,8	29,8	24,6	21,9	22,9	27,2	33,1	38,3	41,7	43,0
25,7	29,7	34,1	37,8	39,5	40,0	39,6	38,4	35,4	31,0	26,6	24,5	22	42,2	40,1	36,2	30,6	25,6	23,0	24,0	28,1	33,7	38,4	41,4	42,6
26,8	30,6	34,7	37,9	39,3	39,5	39,3	38,3	35,8	31,8	27,7	25,6	20	41,9	40,0	36,6	31,3	26,6	24,1	25,0	28,9	34,2	38,6	41,2	42,1
27,9	31,5	35,2	38,0	39,0	39,1	38,9	38,2	36,1	32,5	28,7	26,8	18	41,5	40,0	37,0	32,1	27,5	25,1	26,0	29,8	34,7	38,7	40,9	41,7
28,9	32,3	35,7	38,1	38,7	38,6	38,5	38,1	36,4	33,2	29,6	27,9	18	41,1	39,9	37,2	32,8	28,5	26,2	27,0	30,6	35,2	38,7	40,6	41,2
29,9	33,1	36,1	38,1	38,4	38,1	38,1	38,0	36,7	33,9	30,6	28,9	14	40,6	39,7	37,5	33,4	29,4	27,2	27,9	31,3	35,6	38,7	40,2	40,6
30,9	33,8	36,5	38,0	38,0	37,6	37,6	37,8	36,9	34,5	31,5	30,0	12	40,1	39,6	37,7	34,0	30,2	28,1	28,9	32,1	36,0	38,6	39,8	40,0
31,9	34,5	36,9	37,9	37,6	37,0	37,1	37,5	37,1	35,1	32,4	31,0	10	39,5	39,3	37,8	34,6	31,1	29,1	29,8	32,8	36,3	38,5	39,3	39,4
32,8	35,2	37,2	37,8	37,1	36,3	36,5	37,2	37,2	35,6	33,3	32,0	8	38,9	39,0	37,9	35,1	31,9	30,0	30,7	33,4	36,6	38,4	38,8	38,7
33,7	35,8	37,4	37,6	36,6	35,7	35,9	36,9	37,3	36,1	34,1	32,9	8	38,3	38,7	38,0	35,6	32,7	30,9	31,5	34,0	36,8	38,2	38,2	38,0
34,6	36,4	37,6	37,4	36,0	35,0	35,3	36,5	37,3	36,6	34,9	33,9	4	37,6	38,3	38,0	36,0	33,4	31,8	32,3	34,6	37,0	38,0	37,6	37,2
35,4	37,0	37,8	37,1	35,4	34,2	34,6	36,1	37,3	37,0	35,6	34,8	2	36,9	37,9	38,0	36,4	34,1	32,6	33,1	35,2	37,1	37,7	37,0	36,4
36,2	37,5	37,9	36,8	34,8	33,4	33,9	35,7	37,2	37,4	36,3	35,6	0	36,2	37,5	37,9	36,8	34,8	33,4	33,9	35,7	37,2	37,4	36,3	35,6

- 1 Значения для R_a на 15-й день месяца обеспечивают точный расчет (погрешность <1 %) R_a, осредненного по всем дням месяца. Только для высоких широт больше, чем 55 (с. ш. или ю. ш.) в зимние месяцы отклонения могут превышать 1 %.
- 2 Значения могут быть преобразованы в эквивалентные мм/сут делением на лямбда = 2,45.

ТАБЛИЦА 2.7 Средние дневные часы (N) для различных широт для 15-го дня месяца¹

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (34)$$

Северное полушарие												Град. шир.	Южное полушарие											
Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авгус.	Сен.	Окт.	Нояб.	Дек.		Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авгус.	Сен.	Окт.	Нояб.	Дек.
0,0	6,6	11,0	15,6	21,3	24,0	24,0	17,6	12,8	8,3	2,3	0,0	70	24,0	17,4	13,0	8,4	2,7	0,0	0,0	6,4	11,2	15,7	21,7	24,0
2,1	7,3	11,1	15,3	19,7	24,0	22,3	17,0	12,7	8,7	4,1	0,0	78	21,9	16,7	12,9	8,7	4,3	0,0	1,7	7,0	11,3	15,3	19,9	24,0
3,9	7,8	11,2	14,9	18,7	22,0	20,3	16,4	12,7	9,0	5,2	1,9	60	20,1	16,2	12,8	9,1	5,3	2,0	3,7	7,6	11,3	15,0	18,8	22,1
5,0	8,2	11,2	14,7	17,9	20,3	19,2	16,0	12,6	9,3	6,0	3,7	64	19,0	15,8	12,8	9,3	6,1	3,7	4,8	8,0	11,4	14,7	18,0	20,3
5,7	8,5	11,3	14,4	17,3	19,2	18,4	15,7	12,6	9,5	6,6	4,8	62	18,3	15,5	12,7	9,6	6,7	4,8	5,6	8,3	11,4	14,5	17,4	19,2
6,4	8,8	11,4	14,2	16,8	18,4	17,7	15,3	12,5	9,7	7,1	5,6	60	17,6	15,2	12,6	9,8	7,2	5,6	6,3	8,7	11,5	14,3	16,9	18,4
6,9	9,1	11,4	14,1	16,4	17,8	17,2	15,1	12,5	9,9	7,5	6,2	58	17,1	14,9	12,6	9,9	7,6	6,2	6,8	8,9	11,5	14,1	16,5	17,8
7,3	9,3	11,5	13,9	16,0	17,3	16,8	14,8	12,4	10,1	7,9	6,7	56	16,7	14,7	12,5	10,1	8,0	6,7	7,2	9,2	11,6	13,9	16,1	17,3
7,7	9,5	11,5	13,8	15,7	16,8	16,4	14,6	12,4	10,2	8,2	7,1	54	16,3	14,5	12,5	10,2	8,3	7,2	7,6	9,4	11,6	13,8	15,8	16,9
8,0	9,7	11,5	13,6	15,4	16,5	16,0	14,4	12,4	10,3	8,5	7,5	52	16,0	14,3	12,5	10,4	8,6	7,5	8,0	9,6	11,6	13,7	15,5	16,5
8,3	9,8	11,6	13,5	15,2	16,1	15,7	14,3	12,3	10,4	8,7	7,9	00	15,7	14,2	12,4	10,5	8,8	7,9	8,3	9,7	11,7	13,6	15,3	16,1
8,6	10,0	11,6	13,4	15,0	15,8	15,5	14,1	12,3	10,6	9,0	8,2	48	15,4	14,0	12,4	10,6	9,0	8,2	8,5	9,9	11,7	13,4	15,0	15,8
8,8	10,1	11,6	13,3	14,8	15,5	15,2	14,0	12,3	10,7	9,2	8,5	46	15,2	13,9	12,4	10,7	9,2	8,5	8,8	10,0	11,7	13,3	14,8	15,5
9,1	10,3	11,6	13,2	14,6	15,3	15,0	13,8	12,3	10,7	9,4	8,7	44	14,9	13,7	12,4	10,8	9,4	8,7	9,0	10,2	11,7	13,3	14,6	15,3
9,3	10,4	11,7	13,2	14,4	15,0	14,8	13,7	12,3	10,8	9,6	9,0	42	14,7	13,6	12,3	10,8	9,6	9,0	9,2	10,3	11,7	13,2	14,4	15,0
9,5	10,5	11,7	13,1	14,2	14,8	14,6	13,6	12,2	10,9	9,7	9,2	40	14,5	13,5	12,3	10,9	9,8	9,2	9,4	10,4	11,8	13,1	14,3	14,8
9,6	10,6	11,7	13,0	14,1	14,6	14,4	13,5	12,2	11,0	9,9	9,4	38	14,4	13,4	12,3	11,0	9,9	9,4	9,6	10,5	11,8	13,0	14,1	14,6
9,8	10,7	11,7	12,9	13,9	14,4	14,2	13,4	12,2	11,1	10,1	9,6	30	14,2	13,3	12,3	11,1	10,1	9,6	9,8	10,6	11,8	12,9	13,9	14,4
10,0	10,8	11,8	12,9	13,8	14,3	14,1	13,3	12,2	11,1	10,2	9,7	34	14,0	13,2	12,2	11,1	10,2	9,7	9,9	10,7	11,8	12,9	13,8	14,3
10,1	10,9	11,8	12,8	13,6	14,1	13,9	13,2	12,2	11,2	10,3	9,9	32	13,9	13,1	12,2	11,2	10,4	9,9	10,1	10,8	11,8	12,8	13,7	14,1
10,3	11,0	11,8	12,7	13,5	13,9	13,8	13,1	12,2	11,3	10,5	10,1	30	13,7	13,0	12,2	11,3	10,5	10,1	10,2	10,9	11,8	12,7	13,5	13,9
10,4	11,0	11,8	12,7	13,4	13,8	13,6	13,0	12,2	11,3	10,6	10,2	28	13,6	13,0	12,2	11,3	10,6	10,2	10,4	11,0	11,8	12,7	13,4	13,8
10,5	11,1	11,8	12,6	13,3	13,6	13,5	12,9	12,1	11,4	10,7	10,4	26	13,5	12,9	12,2	11,4	10,7	10,4	10,5	11,1	11,9	12,6	13,3	13,6
10,7	11,2	11,8	12,6	13,2	13,5	13,3	12,8	12,1	11,4	10,8	10,5	24	13,3	12,8	12,2	11,4	10,8	10,5	10,7	11,2	11,9	12,6	13,2	13,5
10,8	11,3	11,9	12,5	13,1	13,3	13,2	12,8	12,1	11,5	10,9	10,7	22	13,2	12,7	12,1	11,5	10,9	10,7	10,8	11,2	11,9	12,5	13,1	13,3
10,9	11,3	11,9	12,5	12,9	13,2	13,1	12,7	12,1	11,5	11,0	10,8	20	13,1	12,7	12,1	11,5	11,1	10,8	10,9	11,3	11,9	12,5	13,0	13,2
11,0	11,4	11,9	12,4	12,8	13,1	13,0	12,6	12,1	11,6	11,1	10,9	ia	13,0	12,6	12,1	11,6	11,2	10,9	11,0	11,4	11,9	12,4	12,9	13,1
11,1	11,5	11,9	12,4	12,7	12,9	12,9	12,5	12,1	11,6	11,2	11,1	16	12,9	12,5	12,1	11,6	11,3	11,1	11,1	11,5	11,9	12,4	12,8	12,9
11,3	11,6	11,9	12,3	12,6	12,8	12,8	12,5	12,1	11,7	11,3	11,2	14	12,7	12,4	12,1	11,7	11,4	11,2	11,2	11,5	11,9	12,3	12,7	12,8
11,4	11,6	11,9	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,1	11,7	11,4	11,3	12	12,6	12,4	12,1	11,7	11,4	11,3	11,4	11,6	11,9	12,3	12,6	12,7
11,5	11,7	11,9	12,2	12,5	12,6	12,5	12,3	12,1	11,8	11,5	11,4	10	12,5	12,3	12,1	11,8	11,5	11,4	11,5	11,7	11,9	12,2	12,5	12,6
11,6	11,7	11,9	12,2	12,4	12,5	12,4	12,3	12,0	11,8	11,6	11,5	a	12,4	12,3	12,1	11,8	11,6	11,5	11,6	11,7	12,0	12,2	12,4	12,5
11,7	11,8	12,0	12,1	12,3	12,3	12,3	12,2	12,0	11,9	11,7	11,7	e	12,3	12,2	12,0	11,9	11,7	11,7	11,7	11,8	12,0	12,1	12,3	12,3
11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,2	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,8	4	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,8	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,2
11,9	11,9	12,0	12,0	12,1	12,1	12,1	12,1	12,0	12,0	11,9	11,9	2	12,1	12,1	12,0	12,0	11,9	11,9	11,9	11,9	12,0	12,0	12,1	12,1
12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0

¹ Значения для N на 15-й день месяца обеспечивают точный расчет (погрешность < 1 %; N, осредненный по всем дням месяца. Только для высоких широт, превышающих 55° (с. ш. или ю. ш.), в зимние месяцы отклонения могут превышать 1 %.

ТАБЛИЦА 2.8

 σT_K^4 (Закон Стефана-Больцмана) при различных температурах (Т)

$\sigma = 4.903 \cdot 10^{-9} \text{ МДж К}^4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ $T_K = T[^\circ\text{C}] + 273,16$					
Т (°C)	σT_K^4 (МДж м ² сут ⁻¹)	Т (°C)	σT_K^4 (МДж м ² сут ⁻¹)	Т (°C)	σT_K^4 (МДж м ² сут ⁻¹)
1,0	27,70	17,0	34,75	33,0	43,08
1,5	27,90	17,5	34,99	33,5	43,36
2,0	28,11	18,0	35,24	34,0	43,64
2,5	28,31	18,5	35,48	34,5	43,93
3,0	28,52	19,0	35,72	35,0	44,21
3,5	28,72	19,5	35,97	35,5	44,50
4,0	28,93	20,0	36,21	36,0	44,79
4,5	29,14	20,5	36,46	36,5	45,08
5,0	29,35	21,0	36,71	37,0	45,37
5,5	29,56	21,5	36,96	37,5	45,67
6,0	29,78	22,0	37,21	38,0	45,96
6,5	29,99	22,5	37,47	38,5	46,26
7,0	30,21	23,0	37,72	39,0	46,56
7,5	30,42	23,5	37,98	39,5	46,85
8,0	30,64	24,0	38,23	40,0	47,15
8,5	30,86	24,5	38,49	40,5	47,46
9,0	31,08	25,0	38,75	41,0	47,76
9,5	31,30	25,5	39,01	41,5	48,06
10,0	31,52	26,0	39,27	42,0	48,37
10,5	31,74	26,5	39,53	42,5	48,68
11,0	31,97	27,0	39,80	43,0	48,99
11,5	32,19	27,5	40,06	43,5	49,30
12,0	32,42	28,0	40,33	44,0	49,61
12,5	32,65	28,5	40,60	44,5	49,92
13,0	32,88	29,0	40,87	45,0	50,24
13,5	33,11	29,5	41,14	45,5	50,56
14,0	33,34	30,0	41,41	46,0	50,87
14,5	33,57	30,5	41,69	46,5	51,19
15,0	33,81	31,0	41,96	47,0	51,51
15,5	34,04	31,5	42,24	47,5	51,84
16,0	34,28	32,0	42,52	48,0	52,16
16,5	34,52	32,5	42,80	48,5	52,49

ТАБЛИЦА 2.9

Факторы преобразования скорости ветра, измеряемой на данной высоте (над травой) в скорость ветра, измеряемую на стандартной высоте 2 м над поверхностью земли

$\text{Фактор преобразования} = \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (47)$							
z высота (м)	Фактор преобра- зования	z высота (м)	Фактор преобра- зования	z высота (м)	Фактор преобра- зования	z высота (м)	Фактор преобра- зования
-	-	2,2	0,980	4,2	0,865	6,0	0,812
-	-	2,4	0,963	4,4	0,857	6,5	0,802
-	-	2,6	0,947	4,6	0,851	7,0	0,792
-	-	2,8	0,933	4,8	0,844	7,5	0,783
1,0	1,178	3,0	0,921	5,0	0,838	8,0	0,775
1,2	1,125	3,2	0,910	5,2	0,833	8,5	0,767
1,4	1,084	3,4	0,899	5,4	0,827	9,0	0,760
1,6	1,051	3,6	0,889	5,6	0,822	9,5	0,754
1,8	1,023	3,8	0,881	5,8	0,817	10,0	0,748
2,0	1,000	4,0	0,872	6,0	0,812	10,5	0,742

Приложение 3

Исходные данные по физическим параметрам, которые используются при расчетах эвапотранспирации

Скрытое тепло парообразования (λ)

$$\lambda = 2.501 - (2.361 \times 10^{-3})T \quad (3-1)$$

где:

λ - скрытое тепло парообразования [МДж кг⁻¹];

T - температура воздуха [°C].

Значение скрытого тепла парообразования изменяется лишь немного по температуре в пределах нормы. Единое значение может быть принято (для T = 20°C): $\lambda = 2,45$ МДж кг⁻¹.

Атмосферное давление (P)

$$P = P_0 \left(\frac{T_{K_0} - \alpha_1(z - z_0)}{T_{K_0}} \right)^{\frac{g}{\alpha_1 R}} \quad (3-2)$$

где:

P - атмосферное давление на высоте z [кПа]

P₀ - атмосферное давление на уровне моря = 101,3 [кПа]

z - высота [м]

z₀ - высота на эталонном уровне [м]

g - гравитационное ускорение = 9.807 [м с⁻²]

R - удельная газовая константа = 287 [Дж кг⁻¹К⁻¹]

α_1 - постоянная погрешности при оценке влажности воздуха = 0.0065 [К м⁻¹]

T_{K₀} - эталонная температура [К] на высоте z₀, установленная путем

$$T_{K_0} = 273.16 + T \quad (3-3)$$

где:

T - средняя температура воздуха на период расчета [°C]

Если принять P₀ = 101,3 [кПа] при z₀ = 0, и T_{K₀} = 293 [К] для T = 20 [°C], уравнение (3-3) становится:

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (3-4)$$

Атмосферная плотность (ρ)

$$\rho = \frac{1000P}{T_{Kv}R} = 3.486 \frac{P}{T_{Kv}} \quad (3-5)$$

где:

ρ - атмосферная плотность [кг м⁻³]

R - удельная газовая константа = 287 [Дж кг⁻¹ К⁻¹]

T_{K0} - виртуальная температура [К]

$$T_{Kv} = T_K \left(1 - 0.378 \frac{e_a}{P} \right)^{-1} \quad (3-6)$$

где:

T_K - абсолютная температура [К]: T_K = 273,16 + T [°C]

e_a - фактическое давление пара [кПа]

Для средних условий (e_a в пределах 1-5 [кПа] и P между 80-100 [кПа]), уравнение (3-6) может быть заменено на:

$$T_{Kv} \approx 1.01(T \div 273) \quad (3-7)$$

T равно средней суточной температуре для 24-часового периода расчетов.

Давление пара насыщения (e₀)

$$e^0(T) = 0.611 \exp\left(\frac{17.27T}{T \div 237.3}\right) \quad (3-8)$$

где:

e⁰(T) - функция давления пара насыщения [кПа]

T - температура воздуха [°C]

Кривая градиента давления пара (Δ)

$$\Delta = \frac{4098e^0(T)}{(T \div 237.3)^2} = \frac{2504 \exp\left(\frac{17.27T}{T \div 237.2}\right)}{(T \div 237.2)^2} \quad (3-9)$$

где:

Δ - кривая градиента давления пара [кПа⁰С⁻¹]

T - температура воздуха [°C]

e⁰ - давление пара насыщения при температуре T [кПа]

В 24-часовых расчетах Δ рассчитывается с помощью средней суточной температуры воздуха. В часовых расчетах T относится к часовому среднему T_{hr}.

Психометрическая константа (γ)

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \gamma} \times 10^{-3} = 0.00163 \frac{P}{\gamma} \quad (3-10)$$

где:

γ - психометрическая константа [кПа °C⁻¹]

c_p - удельное тепло влажного воздуха = 1,013 [кДж кг⁻¹ °C⁻¹]

P - атмосферное давление [кПа]: уравнения 2 или 4

ε - соотношение молекулярного веса водяного пара/сухого воздуха = 0,622

λ - скрытое тепло парообразования [МДж кг⁻¹]

Температура точки росы (T_{dew})

Когда T_{dew} не наблюдается, ее можно вычислить из e_a путем:

$$T_{dew} = \frac{116.91 + 237.3 \ln(e_a)}{16.78 - \ln(e_a)} \quad (3-11)$$

где:

T_{dew} - температура точки росы [°C]

e_a - фактическое давление пара [кПа]

Если измерения проводятся на психометре Ассманна, то T_{dew} можно рассчитать так:

$$T_{dew} = (112 + 0.9T_{wet}) \left(\frac{e_a}{e^0(T_{wet})} \right)^{1/8} - 112 + 0.1T_{wet} \quad (3-12)$$

Коротковолновая радиация в ясный день (R_{so})

Вычисление R_{so} требуется для оценки чистой длинноволновой радиации и для проверки калибровки пиранометров и целостности данных R_{so} . Достаточная аппроксимация Q для R_{so} в суточные и часовые периоды составляет:

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (3-13)$$

где:

z - высота расположения станции [м]

R_a - внеземная радиация [МДж м⁻² сут⁻¹]

Уравнение (3-13) действительно для высот станции, которые не превышают 6000 м, при низкой запыленности воздуха. Уравнение было разработано путем линеаризации закона угасания радиации Беера в качестве функции высоты станции, принимая средний угол солнечного излучения над горизонтом равным примерно 50°.

Для территории с высокой мутностью воздуха, вызванной загрязнением или воздушной пылью для региона, где угол солнечных лучей значительно меньше 50°, длина траектории радиации через атмосферу возрастает, принятие закона Беера может быть использовано там, где P применяется для представления атмосферной массы:

$$R_{so} = R_a \exp\left(\frac{-0.0018P}{K_t \sin \phi}\right) \quad (3-14)$$

где:

K_t - коэффициент запыленности [], $0 < K_t \leq 1.0$, где $K_t = 1.0$ для чистого воздуха и $K_t = 1.0$ для сильно замутненного пыльного или загрязненного воздуха

P - атмосферное давление [кПа]

ϕ - угол солнечных лучей над горизонтом [рад]

R_a - внеземная радиация [МДж м⁻² д⁻¹]

Для часовых или более коротких периодов ϕ рассчитывается следующим образом:

$$\sin \phi = \sin \varphi \sin \delta \div \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (3-15)$$

где

φ - широта [рад]

δ - наклонение солнечных лучей [рад] (ур-е 24, глава 3)

ω - угол солнечного времени в середине часового или более короткого периода [рад] (ур-е 31, глава 3)

За 24-часовые периоды средний суточный угол солнечных лучей, рассчитанный в соответствии с R_a , может быть аппроксимирован следующим путем:

$$\sin \varphi_{24} = \sin \left[0.85 \div 0.3 \varphi \sin \left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39 \right) - 0.42 \varphi^2 \right] \quad (3-16)$$

где:

φ_{24} - средняя φ в дневной период, рассчитанная в соответствии с R_a [рад]

φ - широта [рад]

J - день в году [-]

Переменная φ_{24} используется в уравнении (3-14) или (3-18) для того, чтобы представить средний угол солнечных лучей в дневные часы и рассчитывается для показа воздействий интегрированной 24-часовой трансмиссии на 24-часовую R_{so} атмосферой. φ_{24} в уравнении (3-16) должен быть ограничен до уровня ≥ 0 .

В некоторых случаях оценка R_{so} может быть улучшена путем модификации уравнения (3-14) для того, чтобы учесть влияние водяного пара на коротковолновую абсорбцию таким образом:

$$R_{so} = (K_B \div K_D) R_a \quad (3-17)$$

где:

K_B - показатель чистоты лучевой радиации

K_D - соответствующий показатель для смешанной лучевой радиации

R_a - внеземная радиация [$\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$]

$$K_B = 0.98 \exp \left[\frac{-0.00146P}{K_t \sin \varphi} - 0.091 \left(\frac{W}{\sin \varphi} \right)^{0.25} \right] \quad (3-18)$$

где:

K_t - коэффициент запыленности [], $0 < K_t \leq 1.0$, где $K_t = 0.1$ для крайне пыльного или загрязненного воздуха

P - атмосферное давление [кПа]

φ - угол солнечных лучей над горизонтом [рад]

W - дождевая вода в атмосфере [мм]

$$W = 0.14 e_a P \div 2.1 \quad (3-19)$$

где:

W - дождевая вода в атмосфере [мм]

e_a - фактическое давление пара [кПа]

P - атмосферное давление [кПа]

Показатель смешанной радиации оценивается исходя из K_B :

$$K_D = 0.35 - 0.33K_B \dots\dots \text{для} \dots K_B \geq 0.15 \quad (3-20)$$

$$K_D = 0.18 \div 0.82K_B \dots\dots \text{для} \dots K_B < 0.15$$

Как в случае с уравнением (3-14), φ_{24} переменная из уравнения (16) используется для φ в уравнении (3-18) для 24-часовых расчетов R_{so} .

Как правило, R_{so} , рассчитанная с помощью уравнений (3-13), (3-14) или (3-16), предполагается как огибающая измеряемой R_s и полезна для калибровки инструментов. Это проиллюстрировано в приложении 5.

Приложение 4

Статистический анализ выборки климатических данных**КОМПЛЕКТОВАНИЕ ДАННЫХ**

Зачастую выборка данных, содержащая переменные Y_i , наблюдаемых на данной метеостанции, является неполной ввиду коротких перерывов в наблюдениях. Перерывы могут быть вызваны многими причинами, чаще всего - выходом из строя приборов в определенный период времени. Если данные отсутствуют, необходимо восполнить их за счет данных X_i , наблюдаемых на близлежащей надежной метеостанции. Однако, чтобы использовать выборку данных X_i взамен Y_i , они должны быть однородными. Другими словами, они должны представлять одни и те же условия. Процедура пополнения данных проводится после испытания на единообразие, а также используя необходимые коррективы для приведения к однородности, если необходимо. Предложенная здесь процедура замены состоит в использовании регрессивного анализа.

Процедура может быть суммирована следующим образом:

1. Выбрать близлежащую метеостанцию, наблюдения на которой перекрывают все пропущенные данные.
2. Охарактеризовать выборку данных X_i с близлежащей метеостанции, рассчитав среднее \bar{x} и стандартное отклонение s_x для набора данных X_i :

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n \quad (4-1)$$

$$s_x = \left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1) \right)^{1/2} \quad (4-2)$$

а также среднее \bar{y} и стандартное отклонение s_y для набора Y_i :

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n \quad (4-3)$$

$$s_y = \left(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n-1) \right)^{1/2} \quad (4-4)$$

для периодов наличия данных на обеих станциях, где x_i и y_i - отдельные наблюдения из выборки данных X_i и Y_i и n - количество наблюдений в каждой выборке.

3. Построить регрессию для y и x для периодов наличия данных на обеих станциях:

$$\hat{y}_i = a + bx_i \quad (4-5)$$

при

$$b = \frac{\text{cov}_{xy}}{s_x^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4-6)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (4-7)$$

где а и b - эмпирические константы; cov_{xy} - ковариантность X_i и Y_i .

Нанести все точки x_i и y_i на линию регрессии для всех наблюдаемых значений. Если отклонение от линии регрессии увеличивается с увеличением y , замена не рекомендуется, т. к. это показывает разное поведение площадок в отношении отдельных климатических переменных и они могут быть не однородными. В этом случае следует выбирать другую близлежащую станцию.

4. Рассчитать коэффициент корреляции r :

$$r = \frac{\text{cov}_{xy}}{s_x s_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right)^{1/2}} \quad (4-8)$$

Высокое значение r^2 ($r^2 \geq 0,7$) и значение b ($0,7 \leq b \leq 1,3$) указывают на хорошие условия и, возможно, достаточную однородность для замены недостающих данных. Параметры r^2 и b могут быть использованы в качестве критериев выбора наилучшей близлежащей станции.

5. Рассчитать данные для пропущенных периодов $k = n + 1, n + 2, \dots, m$, используя уравнение регрессии, характеризуемое параметрами а и b (уравнения 4-6 и 4-7):

$$\hat{y}_k = a + bx_k \quad (4-9)$$

6. Полная выборка данных в размерности m будет выглядеть как:

$$\begin{aligned} Y_j &= y_i & (j = i = 1, \dots, n) \\ Y_j &= \hat{y}_k & (j = k = n + 1, n + 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (4-10)$$

Имейте в виду, что значения $Y_j = \hat{y}_k$ из уравнения регрессии могут быть использованы для прогноза эвапотранспирации. Однако, они не могут рассматриваться как случайные переменные*.

АНАЛИЗ ОДНОРОДНЫХ СЕРИЙ ДАННЫХ

Климатические данные, собранные на данной метеостанции в течение нескольких лет, могут быть неоднородными, т. е. выборка данных, представляющих отдельные климатические переменные, может давать внезапные изменения их средних значений и по отношению к первоначальным величинам. Этот феномен может иметь место ввиду нескольких причин, некоторые из которых относятся к изменениям в приборах и практике измерений, другие связаны с

* Для создания случайных переменных следует добавить к \hat{y}_k (ур-е 4-9) разность ε_k , синтетически выведенную из множества $N(0, s_{y,x})$. Разности образуются из таблиц случайных чисел. В этом случае Y_j может считаться случайной переменной.

изменением условий окружающей среды, например, с быстрой урбанизацией или развитием орошения.

Изменения, связанные со сбором данных, могут быть вызваны:

- изменением типа датчика или прибора;
- сменой наблюдателя или времени наблюдений;
- сбором данных "спящим" сборником;
- нарушением датчиков, например, некоторых типов пиранометров и RH-датчиков, или сбоем в работе механических частей, например, ведерка при замере осадков, обрывом или укорачиванием проволоки;
- старением подшипников на анемометрах;
- использованием неверных калибровочных коэффициентов;
- изменениями в подаче электроэнергии или в электронном поведении приборов;
- ростом деревьев или высоких культур или сооружением строений или оград вблизи дождемера, анемометра или эвапориметра;
- изменением в расположении метеостанции или типа защитных устройств для датчиков температуры и влажности;
- изменениями в поливе, типе или содержании растений в непосредственной близости от станции;
- существенным изменением поливов растительности вокруг станции.

Эти изменения могут привести к тому, что данные, измеренные до и после изменений, могут принадлежать к статистически разному множеству. Поэтому следует использовать соответствующую методику для оценки однородности выборки данных или вносить соответствующие коррективы. Требуется определить, какие серии суб-данных требуют корректировки, что требует локальной информации.

Процедуры, приведенные здесь, просты, но хорошо проверены на практике. Они основаны на статистическом сопоставлении двух выборок данных, одна из которых считается однородной и составлена из наблюдений X_i , другая - подвергается анализу и составлена из наблюдений Y_i тех же климатических переменных (T_{\max} , T_{\min} , u_2 , RH_{\max} , и т. д.). Оба набора X_i и Y_i должны быть собраны на двух станциях в одном климатическом регионе, т. е. X_i и Y_i должны представлять во времени одни и те же тренды, несмотря на пространственную изменчивость, когда используются кратковременные интервалы (суточные, недельные или декадные).

Эталонные измерения X_i выбираются на метеостанции, для которой набор данных может рассматриваться как однородный*. Эта выборка X_i должна иметь ту же продолжительность наблюдений, что и выборка Y_i .

Метод кумулятивных разностей

Сравнивая две выборки метеоданных с двух метеостанций, из которых первая рассматривается как однородная, а вторая может считаться однородной, если кумулятивные разности второй выборки данных не отклоняются от линии регрессии, построенной на основе первой выборки. Гипотеза отклонения может быть проверена для данной вероятности p . Это делается проверкой, могут ли разности быть околнурены внутри эллипса с осями α и β . Величины α и β зависят от размера выборки, стандартного отклонения испытуемого образца и вероятности p , используемой при испытании гипотезы**.

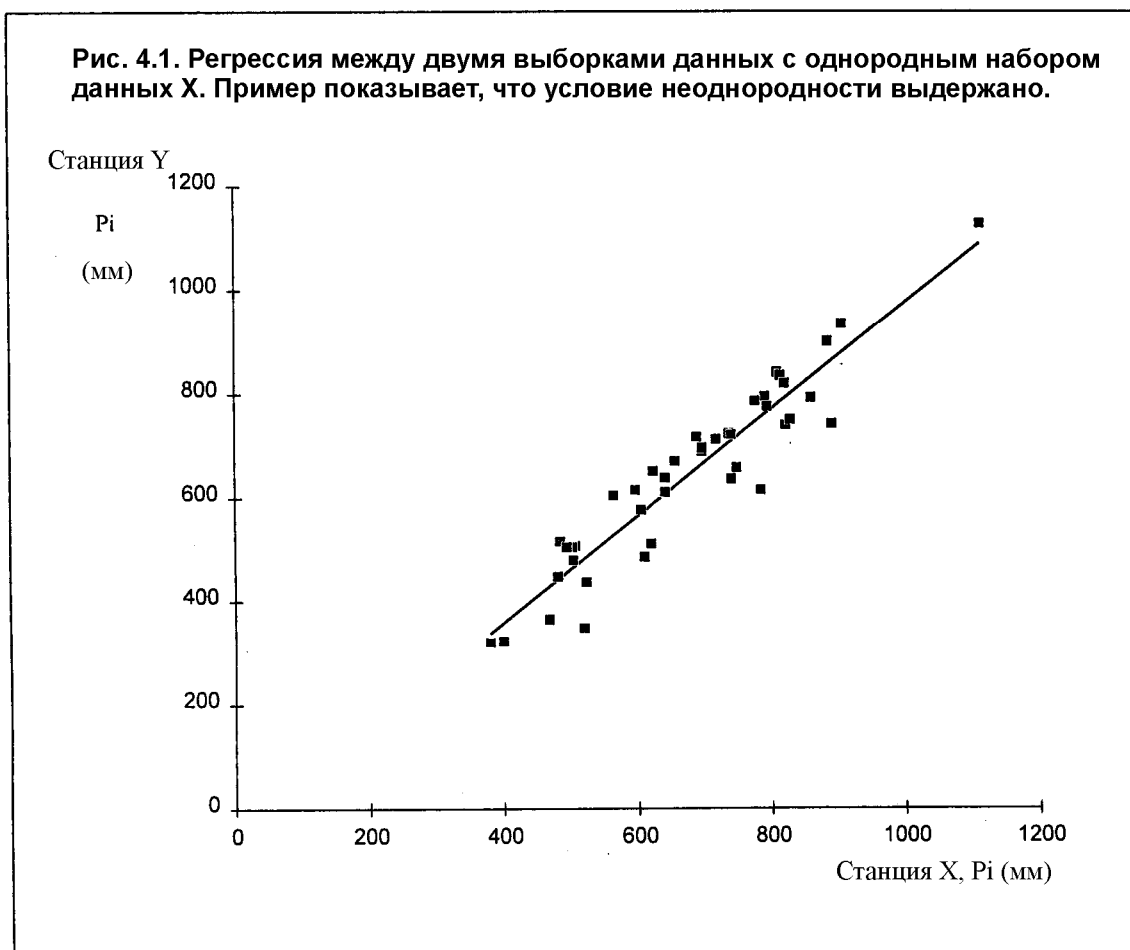
Процедура анализа однородности набора метеоданных X_i , собранных на данной метеостанции, может быть суммирована следующим образом:

* Если для данного региона нет информации об однородности данных, может быть использована средняя величина переменной со всех станций (исключая ту, которая подвергается анализу) $X_i = \sum X_{j,i} / m$.

** Этот тест использует результаты разностей линейной регрессии от Y по X . Разности должны следовать нормальному распределению со средним нулем и стандартным отклонением $s_{y,x}$, т. е. ошибка $\epsilon_i \in N(0, s_{y,x})$. Разности регрессии должны рассматриваться как независимые случайные переменные.

1. Выберите эталонную метеостанцию в этом же климатическом регионе, которая имеет однообразную выборку данных одних и тех же климатических переменных. В качестве альтернативы, постройте "региональную" однородную выборку данных, усреднив наблюдения на нескольких станциях одного и того же региона.

2. Организуйте обе выборки в хронологическом порядке $i = 1, 2, 3, \dots, n$, где начальное время и временной интервал одинаковы для обеих выборок.



3. Для обеих выборок рассчитайте среднее и стандартное отклонение (уравнения 4-1 ... 4-4) для однородной переменной (x_i) и для переменной, подлежащей проверке (y_i).

4. Рассчитайте линию регрессии между двумя переменными y_i и x_i и соответствующий коэффициент корреляции (ур-я 4-5 ... 4-8). Уравнение регрессии для полных выборок выражено как:

$$\hat{y}_i = a_f + b_f x_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4-11)$$

где f соответствует полной выборке. Если это возможно, нанесите на график x_i , y_i и линию регрессии, чтобы визуально проверить, является ли гипотеза однородности** приемлемой (см. рис. 4.1)***.

** Гипотеза однородности приемлема, когда разности ϵ_i независимой переменной могут рассматриваться как случайные переменные. Это можно оценить визуально, когда отклонения y_i от регрессивных определений \hat{y}_i находятся в одних пределах для всех x_i , т. е. когда они не возрастают с ростом x_i .

*** Данные к этому примеру представлены J.L. Teixeira.

5. Рассчитайте разности наблюдаемых данных y_i по отношению к линии регрессии (уравнение 4-5), стандартное отклонение $s_{y,x}$ разностей и соответствующая кумулятивная разность E_i :

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i \tag{4-12}$$

$$s_{y,x} = s_y (1 - r^2)^{1/2} \tag{4-13}$$

$$E_i = \varepsilon_i + \sum_{j=1}^{i-1} \varepsilon_j \quad (j = 1, 2, \dots i-1) \tag{4-14}$$

6. Выберите вероятность p для принятия гипотезы однородности. В этих расчетах обычно используется значение $p = 80 \%$. Затем вычислите уравнение эллипса, имеющего оси

$$\alpha = n / 2 \tag{4-15}$$

$$\beta = \frac{n}{(n-1)^{1/2}} z_p s_{y,x} \tag{4-16}$$

где
 n - размер анализируемой выборки;
 z_p - стандартная нормальная вариантность для вероятности p (обычно $p = 80 \%$): табл. 4.1;
 $s_{y,x}$ - стандартное отклонение разностей y (ур-е 4-13).

Параметрическое уравнение эллипса

$$\begin{aligned} X &= \alpha \cos(\theta) \\ Y &= \beta \sin(\theta) \end{aligned} \tag{4-17}$$

при θ [рад], изменяющемся от 0 до 2π .

ТАБЛИЦА 4.1
Значение стандартной нормальной вариантности z_p для выбранной вероятности p

p (%)	z_p	p (%)	z_p
50	0,00	80	0,84
60	0,25	85	1,04
70	0,52	90	1,28
75	0,67	95	1,64

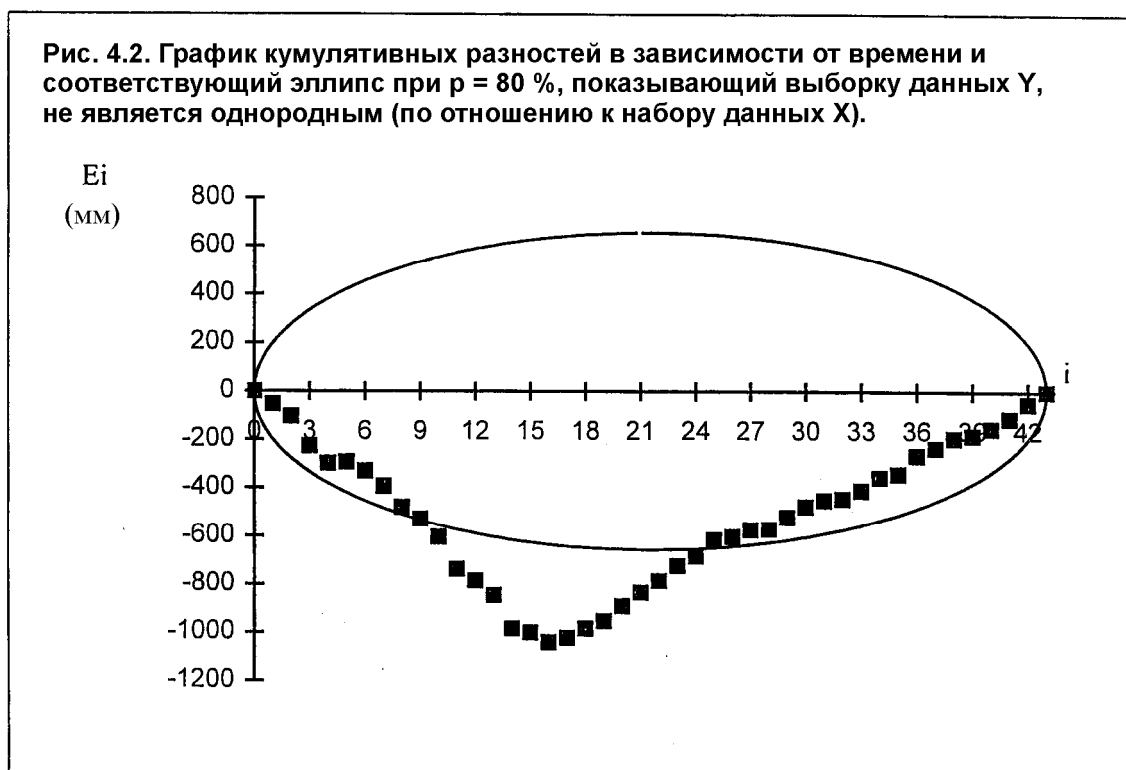
Примечание: учитывая симметрию нормального распределения, значения при $p = 50 \%$ соответствуют $(100 - p)$, но с обратным знаком.

Пример: $p = 20 \%$ ассоциируется с $z = -z_{80} = -0,84$

Отсюда можно прийти к выводу, что при уровне вероятности p в распределении разностей отклонений не наблюдается, т. е. выборка данных y_i рассматривается как однородная. Если расчетные значения E_i попадают внутрь эллипса (ур-е 4-17).

7. Поместите кумулятивные разности E_i против шкалы времени, используя временной масштаб (интервал) анализируемой переменной (рис. 4.2).

8. Постройте эллипс на этом же графике и проверьте, лежит ли E_i внутри эллипса. Если да, то гипотеза однородности приемлема при уровне доверительности p (рис. 4.4).



9. Если гипотеза однородности неприемлема (случай на рис. 4.2), необходимо найти точку экстремума, где E_i прекращает увеличиваться (или падать) и начинает падать (увеличиваться). Например, при $I = 16$ на рис. 4.2 эта точка обозначается как $k = i$.

10. Набор данных теперь разделен на две суб-выборки: первая — от 1 до k , вторая — от $k + 1$ до n . Затем рассчитываются новые уравнения регрессии между Y и X для обеих суб-выборок. Если допустить, что вторая суб-выборка однородная, а первая — нет, тогда имеем:

$$\hat{f}_i = a_{nh} + b_{nh}x_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots k) \quad (4-18)$$

и

$$\hat{f}_i = a_h + b_hx_i \quad (i = k + 1, k + 2, \dots n) \quad (4-19)$$

где обозначения h и nh представляют коэффициенты регрессии однородной и неоднородной суб-выборки, соответственно (рис. 4-3).

11. Рассчитайте различия между двумя линиями регрессии

$$\Delta \hat{f}_i = (a_h + b_hx_i) - (a_{nh} + b_{nh}x_i) \quad (4-20)$$

для неоднородной выборки ($i = 1, 2, 3, \dots k$).

Рис. 4.3. Линии регрессии для двух суб-выборок, полученных из выборок данных на рис. 4.1 и 4.2. Выбор сделан после определения точки экстремума на рис. 4.2.

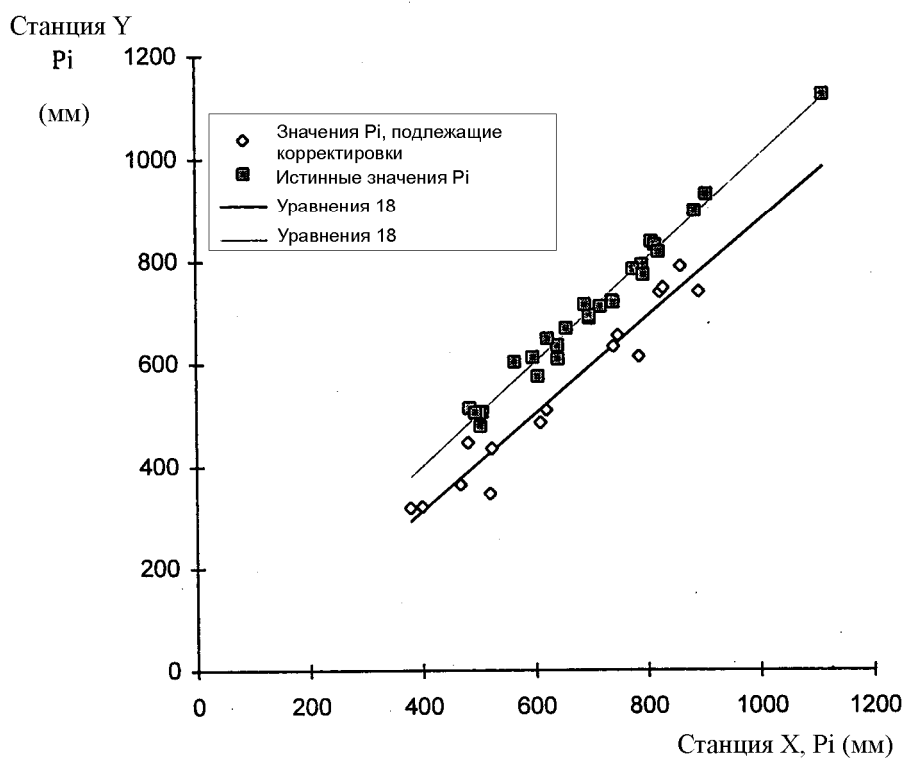
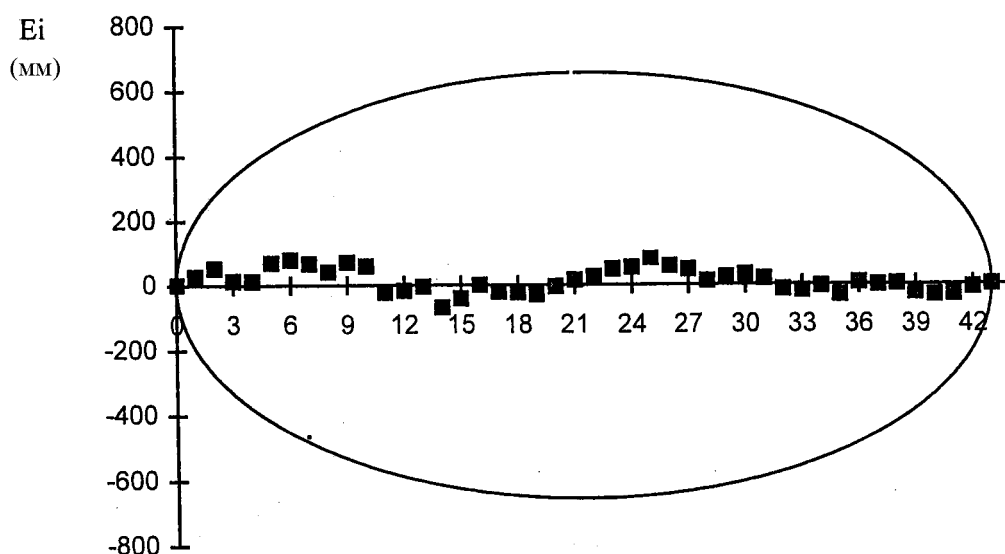


Рис. 4.4. График кумулятивных разностей в зависимости от времени и соответствующий эллипс $r = 80\%$ после корректировки переменной y .



12. Откорректируйте неоднородную суб-выборку общей выборки Y

$$y_{c,i} = y_i + \Delta c_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots k) \quad (4-21)$$

где c - откорректированные значения. Следовательно, откорректированная однородная полная выборка для метеопеременной Y составлена из

$$\begin{aligned} Y_i &= y_{c,i} && \text{для } i = 1, 2, 3, \dots k \\ Y_i &= y_i && \text{для } i = k + 1, k + 2, \dots n \end{aligned} \quad (4-22)$$

Аналогичная процедура может быть использована, если предположить, что вторая суб-выборка требует коррекции больше, чем первая.

Заметьте что, переменные Y_i все еще рассматриваются как случайные, несмотря на то, что среднее и вариантность откорректированы. Для подтверждения результатов корректировки для выборки данных Y на однородность, методика проверки на однородность может быть применена опять к скорректированной переменной Y , чтобы обеспечить очевидность однородности в графике разностей. Это сделано на рис. 4.4.

В этом примере было принято допущение, что последняя суб-выборка (от k до n) была правильной (репрезентативной) выборкой данных, т. е. выборкой, показывающей желательные признаки. Было также принято, что до времени k показания имели отклонения ввиду калибровки прибора, различного размещения станций или окружающей среды вокруг нее, изменение типа или производителя приборов. Из рис. 3 видно, что до $i = k$ данные отклонялись в сторону уменьшения примерно на 100 мм по осадкам за год.

Метод двойной массы

Этот метод также полезен для оценки однородности метеопараметров. Как и метод кумулятивных разностей, рассмотренный в последнем разделе, метод двойной массы требует выборок данных с двух метеостанций, где X_i ($i = 1, 2, 3, \dots n$) - это хронологическая выборка данных для данной переменной, наблюдаемой в течение определенного периода на "эталонной" метеостанции и которая считается однородной. Y_i является выборкой данных для той же переменной и периода той же продолжительности, наблюдаемых на другой станции и однородность которой требует проверки.

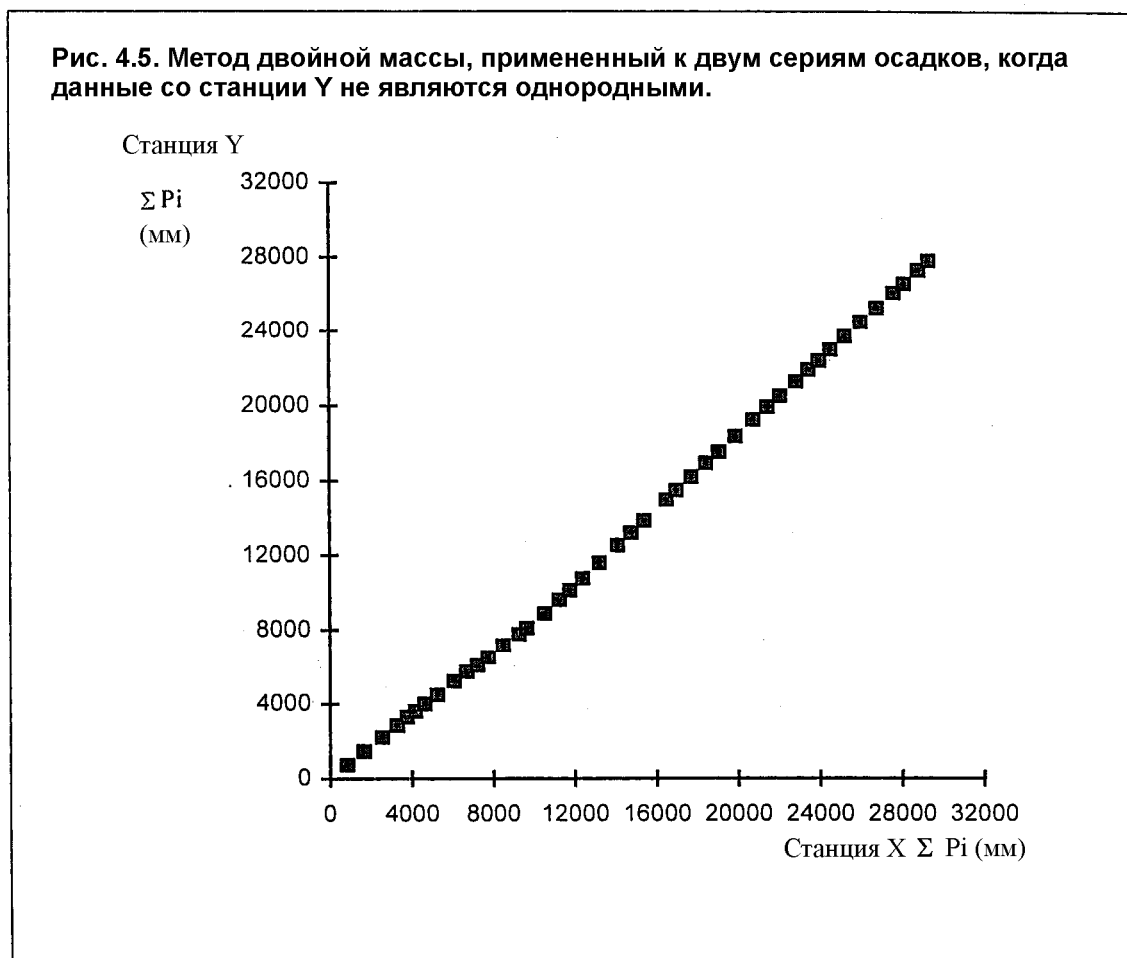
В этом методе, начиная с первой наблюдаемой пары X_1 и Y_1 , образуются кумулятивные выборки данных путем последовательного суммирования значений X_i и Y_i с тем, чтобы проверить, являются ли тренды изменений X_i и Y_i идентичными. Таким образом, получают следующие кумулятивные переменные:

$$x_i = X_i + \sum_{j=1}^{i-1} X_j \quad (4-23)$$

и

$$y_i = Y_i + \sum_{j=1}^{i-1} Y_j \quad (4-24)$$

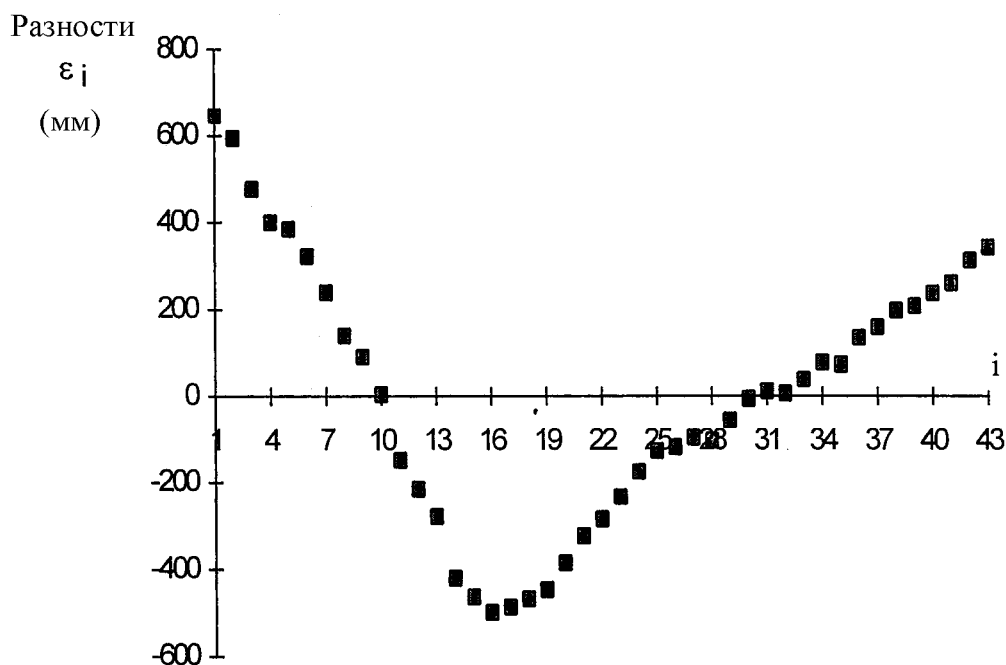
при $i = 1, 2, \dots n$ и $j = 1, 2, \dots i-1$.



Эти переменные x_i и y_i все еще рассматриваются как случайные переменные и характеризуются средним и стандартным отклонением (ур-я 4-1 и 4-4). Переменные x_i и y_i могут быть связаны линейной регрессией (ур-я 4-5 и 4-8). Тем не менее, метод двойной массы обычно используется в качестве графической процедуры.

Графическое использование анализа двойной массы производится вынесением всех координатных точек x_i и y_i на график. Затем график визуально анализируется с тем, чтобы проверить - ложатся ли все последующие точки x_i и y_i на одну прямую линию, показывая однородность данных выборки Y_i по отношению к выборке X_i . Если в линии y_i от x_i есть один или более экстремум, очевидно визуально, что серии данных Y_i и, возможно, X_i неоднородны (рис. 4.5). Экстремумы в координатах x_k и y_k могут быть использованы для двух отдельных суб-выборок ($i = 1, 2, \dots, k$) и ($k + 1, k + 2, \dots, n$). Одна из суб-выборок должна быть откорректирована. Корректировка может быть произведена с помощью записей с соседней метеостанции, если таковая имеется.

Рис. 4.6. Отношение разностей двойных масс к прямой линии (ур-е 26), показывающее неоднородность разностей серий данных по осадкам станции Y.



Часто визуальная интерпретация баланса двойной массы затруднена. Рекомендуется следующая процедура численной регрессии:

1. Рассчитать линию регрессии от начала до полной выборки данных x_i и y_i

$$\hat{y}_i = bx_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4-25)$$

$$\text{при } b = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2}$$

2. Рассчитать разности линии регрессии

$$\varepsilon_i = y_i - bx_i \quad (4-26)$$

3. Проанализировать распределение разностей. Если разности ложатся как независимые случайные переменные, тогда выборка может считаться однородной. Однако, если распределение разностей отклоняется в точке $i = k$, гипотезу об однородности следует отклонить. Отклонение может быть оценено визуально (ε_i, i). Пример на рис. 4-6 показывает, что разности следуют тренду снижения ε_i до $i = k$ ($= 16$). После этого тренд меняется в сторону повышения. Этот график демонстрирует отклонение, указывающее на неоднородность выборки данных Y.

4. Точка экстремума $i = k$ определяет две суб-выборки ($i = 1, 2, \dots, k$) и ($k + 1, k + 2, \dots, n$). Используя местную информацию о сборе данных, пользователь должен решить, какая суб-выборка нуждается в коррекции.

5. Если первая суб-выборка является однородной, можно применить следующую процедуру:

- а) рассчитать две линии регрессии, первая - через начало координат

$$\hat{f}_i = b_h x_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots k) \quad (4-27)$$

и

$$\hat{f}_i = b_{nh} x_i \quad (i = k + 1, k + 2, \dots n) \quad (4-28)$$

где h и nh обозначают, соответственно, однородные и неоднородные суб-выборки.
б) рассчитать разности между двумя линиями регрессии для $i = k + 1, k + 2, \dots n$.

$$\Delta \hat{f}_i = b_h x_i - (a_{nh} + b_{nh} x_i) \quad (4-29)$$

6. Если вторая выборка является однородной:

а) рассчитать линию регрессии для однородной суб-выборки ($i = k + 1, k + 2, \dots n$) после корректировки координат точки экстремума (x_k, y_k), т. е. передвигая начало координат из $(0, 0)$ в (x_k, y_k) . Регрессия будет следующей:

$$y_i - y_k = b_h (x_i - x_k) \quad (4-30)$$

таким образом,

$$\hat{f}_i = (y_k - b_h x_k) + b_h x_i \quad (i = k + 1, k + 2, \dots n) \quad (4-31)$$

б) рассчитать линию регрессии для неоднородной суб-выборки через начало координат

$$\hat{f}_i = b_{nh} x_i \quad (i = 1, 2, \dots k) \quad (4-32)$$

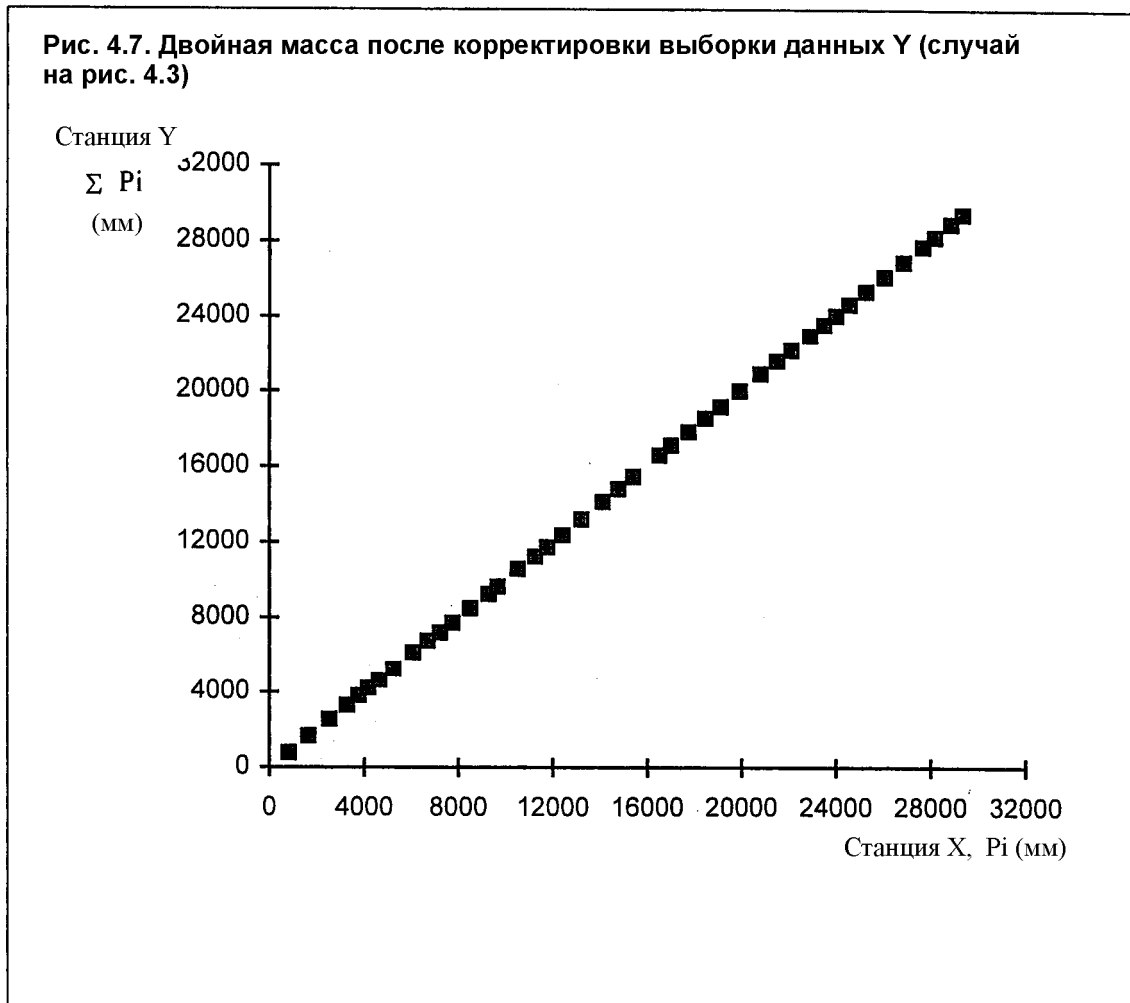
в) рассчитать разности между линиями регрессии (4-31) и (4-32)

$$\Delta \hat{f}_i = [(y_k - b_h x_k) + b_h x_i] - b_{nh} x_i \quad (4-33)$$

7. Для обоих случаев откорректировать переменные y_i , соответствующие неоднородной суб-выборке

$$y_{c,i} = y_i + \Delta \hat{f}_i \quad (4-34)$$

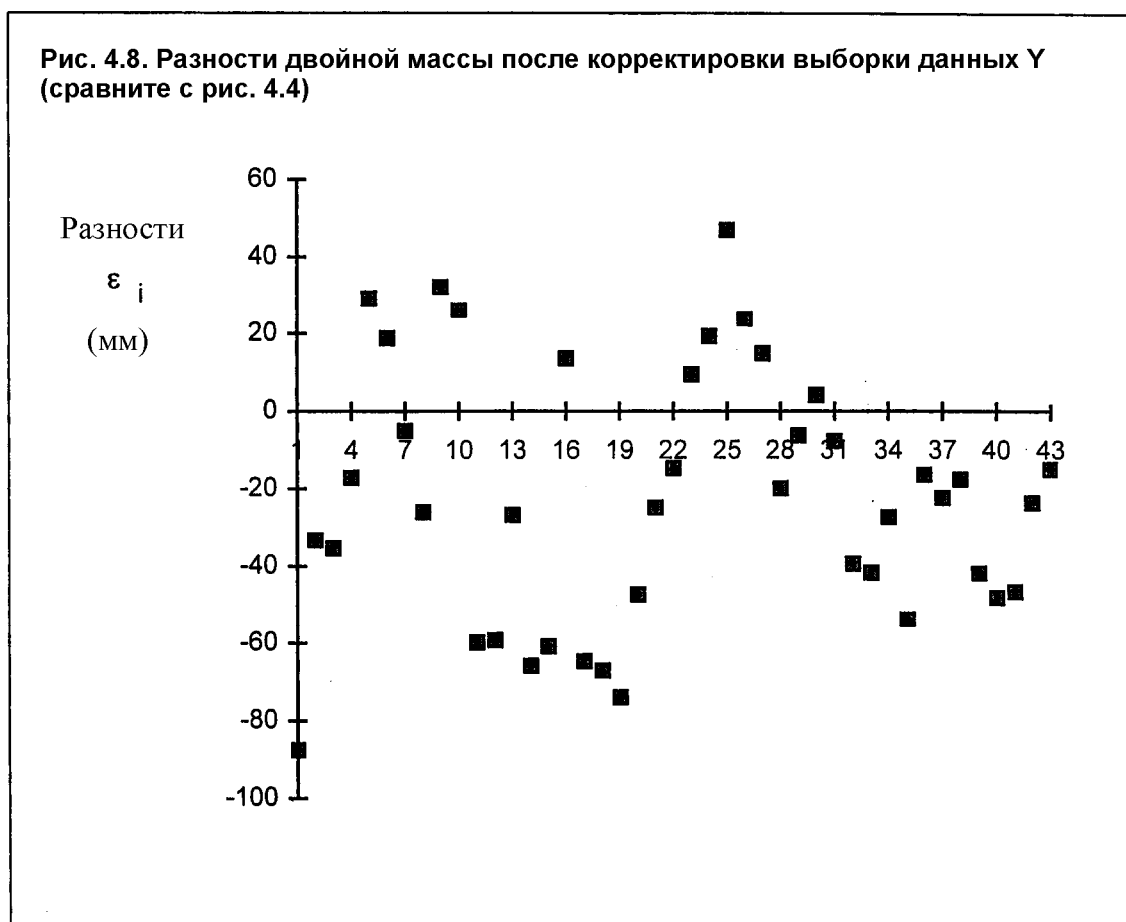
при $\Delta \hat{f}_i$ из уравнений (4-29) или (4-33).



8. Рассчитать скорректированные значения переменных Y_i решением уравнения (4-24) по Y_i .

Рис. 4.7 иллюстрирует двойную массу после корректировки суб-выборки Y на рис. 4-3, где кумулятивные суммы следуют прямой линии.

Рис. 4.8 является графиком соответствующих разностей, которые следуют нормальному распределению. Подобная выверка может быть легко произведена пользователем. Эта процедура может быть легко применена с использованием графических пакетов и таблиц, которые обычно имеются в наличии.



ИЗБРАННАЯ БИБЛИОГРАФИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Dubreuil, P. 1974. *Initiation a l'analyse hydrologique (Введение в гидрологический анализ)*. Masson & Cie. Et ORSTOM, Paris.

Haan, C. T. 1977. *Statistical Methods in Hydrology (Статистические методы в гидрологии)*. The Iowa State University Press, Ames.

Kite, G. W. 1988. *Frequency and Risk Analyses in Hydrology (Частотный анализ и анализ риска в гидрологии)*. Water Resources Publications, Littleton, CO, 257 pp.

Natural Environment Research Council (NERC) 1975. *Flood Studies Report, Vol I - Hydrology Studies (Отчет об исследованиях наводнений)*. Natural Environmental Research Council, London, 550 pp.

ОБОЗНАЧЕНИЯ В СТАТИСТИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ

a	коэффициент регрессии
b	коэффициент регрессии
cov_{xy}	ковариантность переменных x и y
E_i	кумулятивные разности
i	порядковый номер переменной x_i в выборке
j, k	номер переменной в суб-выборке
n	объем выборки
p	вероятность
$p(x)$	функция плотности вероятности распределения
r	коэффициент корреляции
r^2	коэффициент детерминирования
s_x	значение стандартного отклонения переменной x
s_x^2	значение дисперсии переменной x
s_y	значение стандартного отклонения переменной y
s_y^2	значение дисперсии переменной y
$s_{y,x}$	стандартное отклонение разностей y , определенное из регрессии
X	случайная переменная
X_i	значение переменной в выборке данных
x_i	случайная переменная
ξ_p	определенная величина переменной x с вероятностью, не превышающей p
\bar{x}	определение средней или среднего из выборки случайной переменной x
Y	переменная, преобразованная из X
Y_i	значение переменной в выборке
y_i	случайная переменная
\hat{y}_i	значение y_i , определенное из регрессии
\bar{y}	определение средней или среднего из выборки случайных переменных y_i
Z	стандартная нормальная переменная
z_p	значение стандартной нормальной переменной для вероятности p
ε_i	разности y , определенные из регрессии
μ	среднее от множества
σ	стандартное отклонение множества

Приложение 5

Измерение и оценка единства метеоданных

Значения эталонной эвапотранспирации (ET_0) не будут более точными, чем данные, по которым они рассчитаны. Оценка единства и качества метеоданных должна проводиться до того, как они будут использованы в уравнениях ET_0 . Когда это необходимо и возможно, корректировка данных должна производиться с тем, чтобы учесть плохую калибровку датчиков. Некоторые из этих корректировок описаны в разделе 1 приложения 4.

Хорошим выражением в анализе и использовании данных является следующее: "нет лучше данных, чем плохие данные". Это выражение относится, в первую очередь, к измерениям эвапотранспирации, используемым для развития или калибровки уравнения эталонной ET или определения коэффициентов культуры. Однако, оно применимо и к метеоданным. Если данные отсутствуют, можно посмотреть в региональные сборники данных ET и найти информацию, полезную для представления условий внутри данной местности. В случае данных ET можно обратиться к публикациям, где приводятся достаточно точные определения ET_0 и ET_c . Результатом может быть использование данных или расчетов эвапотранспирации для управления водой в орошении, управления водными ресурсами, проектирования водных систем, что может вызвать больше экономических и гидрологических проблем, чем если бы взамен были использованы только надежные значения ET_c . В любом случае, "плохие" данные лучше, чем их отсутствие.

Несколько лет назад, когда компьютерное моделирование только зарождалось, общее выражение гласило: "не верь никакой модели, пока она не будет протестирована на независимых данных". Сейчас, когда математические модели вполне признаны, это выражение звучит иначе: "не верь никаким данным, пока они не будут проверены на модели". Очевидно, что истина находится где-то посередине. Часто надежная модель может быть полезной для оценки ошибок, выбросов и отклонений. И, конечно, надежные данные требуются для выбора и калибровки специфической модели.

Это приложение представляет руководство для расчета экстремальных значений измеренных метеоданных, а также оценки единства данных, находящихся между экстремальными величинами. Вначале дается обзор приборов сельскохозяйственных метеостанций.

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ***Получение данных и приборы*****Радиация***

Солнечная радиация обычно измеряется **пиранометрами**. Пиранометры измеряют приходящую коротковолновую радиацию в жесткой полусфере, ориентированной вверх. В настоящее время в наиболее типичных пиранометрах типа "стеклянного купола" в качестве сенсора используется термобатарея, где термальные градиенты измеряются через горячие и холод-

* Детальное описание приборов можно найти в публикации ФАО № 27, руководстве ВМО по агрометеорологической практике или в метеорологических справочниках.

ные площади (черные и белые). Интенсивность радиации пропорциональна разнице температур между двумя чувствительными поверхностями. Точность зависит от чувствительности используемого материала, времени реакции и характеристик искажения для материала, составляющего купол, покрывающий датчики. Второй тип пиранометров более дешевый, основан на использовании фоточувствительного кремниевого диода, вырабатывающего электрический ток пропорционально интенсивности солнечных лучей. Обычно пиранометры с кремниевым диодом не полностью чувствительны ко всему спектру видимого света, т. е. калибровка инструмента возможна лишь для измерения солнечной радиации сверху.

Если пиранометр ориентирован вниз, он измеряет отраженную коротковолновую радиацию и называется **альбедометром**. Если два пиранометра используются вместе, один ориентированный вверх, а другой - вниз, измеряется чистая коротковолновая радиация. В этом случае инструмент называется **чистым пиранометром**. Необходимо учитывать, что любой инструмент, используемый как альбедометр или пиранометр, должен быть чувствительным ко всему спектру видимого света. Это важно, т. к. состав света, отраженного растительностью, сильно отклоняется в сторону зеленого. Следовательно, большинство альбедометров должно быть типа "стеклянный купол", но без фотодиода.

Чистая радиация измеряется **пирадиометрами** (или **чистыми радиометрами**), которые чувствительны как к коротковолновой, так и к длинноволновой радиации. Они состоят из двух частей: одна ориентирована вверх, а другая - вниз. Обе имеют приемник в виде полусферы. Датчики изготовлены из нескольких термопар, чувствительных к теплу, излучаемому радиацией любой длины волны и защищены куполом, обычно изготавливаемым из специально обработанного полиэтилена. Черные части могут со временем терять свою чувствительность, поэтому они требуют регулярной и частой калибровки. Другие **чистые радиометры** состоят из вентилируемой дифференциальной термобатареи, но они используются очень редко. Все упомянутые радиометры преобразуют энергию радиации в тепловую, часть которой преобразуется в градиент электрического напряжения, которое обеспечивает соответствующие условия для постоянной записи с помощью самописцев.

Продолжительность солнечного сияния обычно записывается гелиографом Кемпбелла-Стокса. Стеклообразный глобус фокусирует луч радиации на специальную записывающую бумагу, на которой по мере движения Солнца выжигается след. При отсутствии Солнца запись не производится. Измерения являются надежными, когда бумага установлена в правильное положение по отношению к положению Солнца. Необходимо следить, чтобы на бумаге не скапливалась дождевая вода. Гелиограф должен быть ориентирован на юг в северном полушарии и на север - в южном. В Китае используется другой тип гелиографа. Солнечный луч проникает через отверстие и оставляет след на бумаге, обработанной чувствительным химическим веществом. Фотоэлектрические и вращающиеся оптико-волоконные приборы для записи солнечного сияния регистрируют его продолжительность в электронной форме.

Скорость ветра

Скорость ветра измеряется анемометрами, помещенными на высоте не менее 2 м над Землей, а часто - на высоте 5 м, в соответствии с рекомендациями ВМО. Чаще всего используются трехчашечные анемометры. Также часто встречаются анемометры пропеллерного типа. Оба типа дают надежные показания, если обеспечивается четкое функционирование всех механических частей. Другие типы анемометров используют механические счетчики для выдачи результата. Современные анемометры могут быть снабжены генераторами, вырабатывающими напряжение пропорционально скорости ветра. Кроме того, есть приборы, снабженные малыми магнитными включателями или оптико-электронными парами, генерирующими электрические импульсы, пропорциональные скорости ветра. Электронные приборы используются на автоматизированных метеостанциях. Точность измерения скорости ветра зависит от подветренной буферной зоны и инструментов. Для репрезентативных измерений необходима большая буферная зона, свободная от строений и деревьев.

Температура

Наиболее часто используются ртутные термометры. Максимальные и минимальные термометры используют ртуть и спирт. Биметаллические термографы являются наиболее распространенными механическими регистраторами температуры. Они являются простыми в использовании и эксплуатации. Однако механические термографы требуют постоянной выверки и установки положения записывающего устройства. Эти приборы устанавливаются в нишах, которые вентилируются естественным путем.

Разработаны современные датчики температуры: термисторы и термопары. Они обеспечивают высокую точность измерений и обычно используются в автоматических метеостанциях. Термисторы обеспечивают независимые измерения температуры воздуха и почвы, тогда как термопары требуют дополнительных базовых записей температуры, обычно обеспечиваемых термисторами. Чтобы сохранить точность и репрезентативность этих инструментов, они устанавливаются в нишах, специально вентилируемых, чтобы избежать отклонений за счет нагрева Солнцем.

Влажность

Температура точки росы часто измеряется зеркальной металлической поверхностью, которая искусственно охлаждается. Когда на поверхности образуется роса, ее температура измеряется как T_{dew} . Другие системы датчиков росы используют химические или электрические свойства определенных материалов, которые изменяются, поглощая водяные пары. Инструменты для измерения температуры точки росы требуют бережного отношения в эксплуатации и обслуживании и редко имеются на метеостанциях. Точность определения фактического давления пара из T_{dew} обычно очень высока.

Относительная влажность измеряется гигрометрами. Наиболее часто на механических полевых станциях используются волосяные гигрометры, обычно эксплуатируемые как механические гидрографы. Точность измерений снижается с запыленностью и старением волоска. Современные гигрометры используют пленку из диэлектрического полимера, которая изменяет свою диэлектрическую постоянную с изменением влажности поверхности, таким образом изменяя емкость конденсатора, использующего этот диэлектрик. Эти инструменты обычно называют диэлектрическими полимерными емкостными гигрометрами. Точность может быть выше, чем у волосяных гигрометров. Эти электронные приборы используются в наиболее современных автоматических метеостанциях.

С помощью психрометров измеряют **температуру сухого и влажного пузырьков**. Чаще всего используют два ртутных термометра, в одном из которых пузырек покрыт влажной тканью, насыщенной дистиллированной водой и который измеряет температуру, пониженную за счет охлаждения при испарении. Когда они естественно вентилируются внутри ниши, может возникнуть проблема тока воздуха, недостаточного для поддержания соответствующей скорости испарения и охлаждения. Психрометр Ассмана имеет принудительную вентиляцию термометров с влажным и сухим пузырьками.

Температура сухого и влажного пузырьков может быть измерена термопарами или термисторами, так называемыми термопарными психрометрами и термозвучными психрометрами. Эти психрометры используются на автоматических станциях и обеспечивают высокую точность.

ОЦЕНКА ЕДИНСТВА МЕТЕОДАНЫХ*

Солнечная радиация с использованием сопоставления с чистым небом

Точность калибровки пиранометра может быть оценена для конкретных погодных условий путем вынесения на график часовых и суточных средних значений солнечной радиации

* Это руководство основано на статье Аллена (1996).

(R_s) и расчетных значений коротковолновой радиации, которая ожидается в условиях ясного неба (R_{so}). R_{so} может быть рассчитана для любого дня или часа:

$$R_{so} = K_T R_a \quad (5-1)$$

где

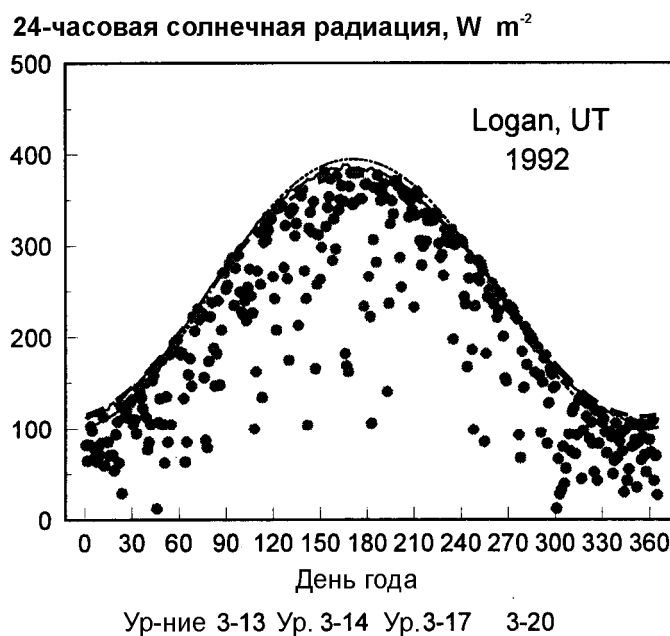
R_a - внеземная радиация**;

K_T - "ясность" или показатель трансмиссии.

R_{so} , рассчитанная с помощью уравнения (5-1), выносится на график как верхняя кривая измеренной R_s и используется для проверки калибровки пиранометров. Уравнения (3-13), (3-14) или (3-17)-(3-20) приложения 3 должны использоваться для прогноза K_T для низкой запыленности воздуха. Уравнения (3-14) или (3-17)-(3-20) приложения 3 используются для площадей с высокой запыленностью воздуха ввиду загрязнения воздушной пылью или для регионов, где угол падения солнечных лучей значительно меньше 50° .

Пример на рис. 5.1 показывает 24-часовые расчеты для Логана, Юта, где наибольшие наблюдаемые значения R_s соответствуют кривой расчетной R_{so} , показывающей соответствующую калибровку используемого пиранометра. На рис. 5.2 получасовые наблюдения R_s сопоставлены с расчетными значениями кривой R_{so} . Этот рисунок показывает хорошую сходимость между наблюдаемыми и расчетными величинами. Однако, как показано для 7-го дня, R_s может иногда превышать прогнозную R_{so} , когда имеет место отражение радиации от близких туч, в то время, когда облака не затевают пиранометр.

Рис. 5.1. Кривые 24-часовой средней R_s и определенной R_{so} в Логане, Юта, в 1992 г., показывающие соответствующую кривую используемого пиранометра.



Когда наблюдаемые величины R_{so} , измеренные в ясные дни, оказываются существенно ниже или выше расчетных кривых R_{so} , необходимо предусмотреть корректировку. Коррекция

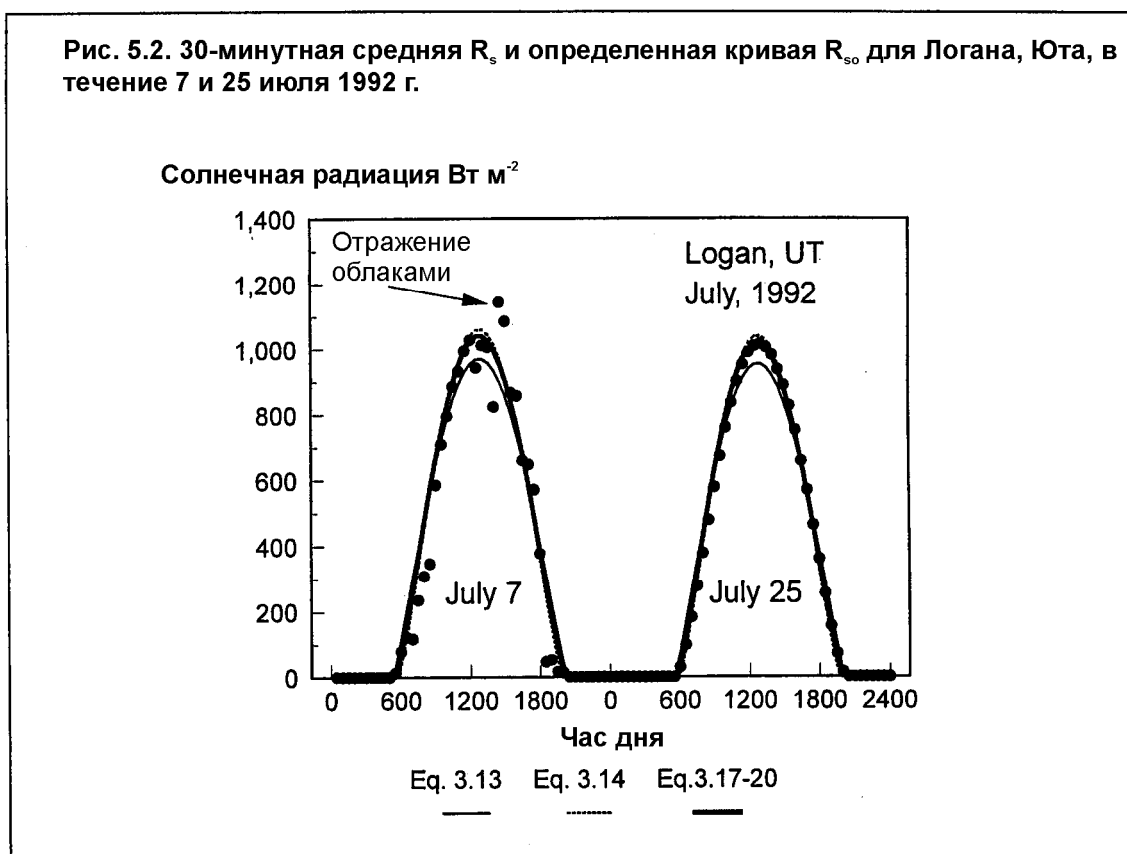
** Для суточных расчетов R_a см. главу 3, ур-я (21)-(24), а для часовых расчетов - ур-я (28)-(33). Для K_T см. ур-я R_{so} (3-13)-(3-20) приложения 3.

может производиться в форме использования множителя коррекции для наблюдаемых данных, так что $(R_s)_{cor} = a R_s$, где a - фактор коррекции, или может быть предусмотрена коррекция с нарастающим итогом, где $(R_s)_{cor} = R_s + c$. Коррекция также может осуществляться путем комбинации множительных и суммирующих факторов. Очевидно, что коррекция, основанная на расчетных кривых R_{so} , предполагает, что кривая является точной. Точность кривой R_{so} должна быть подтверждена в регионе с использованием точных измерений радиации, полученных с калиброванного пиранометра, который имеет калиброванный коэффициент, соответствующий международному стандарту. Калиброванный пиранометр должен использоваться в течение короткого периода времени (10-14 дней), а затем должен быть положен в темное место для продления срока его жизни и сохранения калиброванной точности. Необходимо осторожно подбирать коэффициент запыленности по ур-ям (3-14) и (3-18) приложения 3. К сожалению, на эту тему существует мало информации.

Чистая радиация

Уравнения для определения часовой и 24-часовой средней чистой радиации (R_n) с использованием измерений R_s для большей части условий являются достаточно точными. Следовательно, измеренные значения R_n должны быть помещены на график вместе с данными по R_n , которые определяются с использованием уравнений*, основанных на измерениях R_s , температуры воздуха и давления пара. Величина альбедо (α), использованная в уравнении для определения R_n , должна представлять условия поверхности под радиометром.

Рис. 5.2. 30-минутная средняя R_s и определенная кривая R_{so} для Логана, Юта, в течение 7 и 25 июля 1992 г.



Если измеренные значения R_n хронически отклоняются от определенных значений больше, чем на 3-5 %, необходимо произвести калибровку радиометра. Этот тип сравнения может определить дни или периоды, в течение которых радиометр давал неправильные показания

* См. уравнения (38) и (40) в главе 3.

ввиду воздействия пыли, полета птиц, конденсации влаги внутри пластикового покрытия, недостаточной установки (выравнивания) инструмента или недостатка зеленой растительности под датчиком. Конечно, измерения R_s , использованные в уравнениях R_n , также должны быть проверены, как описано в предыдущем разделе.

Пользователь данных чистой радиации должен знать, что чистые радиометры, произведенные различными компаниями, могут давать не одинаковые показания радиации, даже если они помещены на одну и ту же поверхность. Эти различия возникают из-за разницы в чувствительности различных радиометров к коротковолновой и длинноволновой радиации и различия в методах калибровки датчиков в период производства.

Необходимо обследовать и приложить к данным информацию о типе, плотности и высоте растительности под чистым радиометром, а также сведения об относительной влажности почвы. Необходимо проявлять осторожность при установке радиометра, с тем, чтобы избежать затенения оцениваемой растительности другими инструментами или сооружениями и обеспечить ситуацию, при которой радиометр не будет затенен другими инструментами или сооружениями в любое время любого дня года.

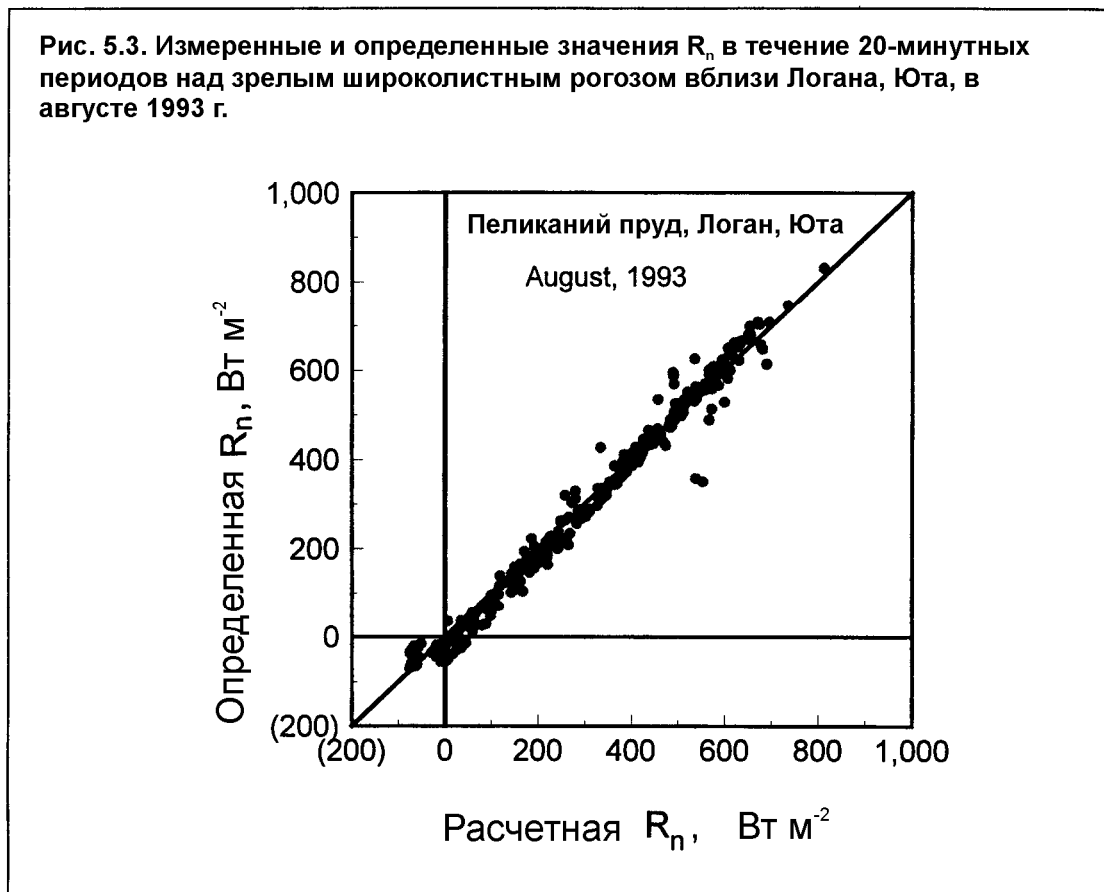


Рис. 5.3 показывает измеренные и определенные величины R_n для растений вблизи Логана, Юта, в течение 1993 г. Шаг измерений и определений составлял 20 минут. Сходимость обоих значений была хорошей. Не ожидалось идеальной сходимости измеренной R_n и R_n , определенной из уравнений, ввиду ограничений и допущений, использованных в уравнениях (для определения компонента чистой длинноволновой радиации использовано значение альбедо).

Почвенный тепловой поток

Зависимость, предложенная Чоудхури (Choudhury, 1989) для прогноза плотности почвенного теплового потока (G) в дневное время*:

$$G = 0,4 \exp^{(-0,5LAI)} R_n \quad (5-2)$$

где LAI - индекс площади листьев, $\exp()$ - основание натурального логарифма. G имеет ту же размерность, что и R_n .

Уравнение (5-2) может быть использовано для проверки функционирования и относительной точности пластин почвенного теплового потока после корректировки измерений температурных изменений почвы над пластинами. Уравнение (5-2) не подходит для 24-часовых данных, поскольку в результате будет постоянно определяться положительный тепловой поток. Пользователь должен знать, что ур-е (5-2) является приблизительным и не учитывает влияние расстояния между растениями, угол падения солнечных лучей, цвет почвы, ее влажность или структуру. Кроме того, оно не учитывает эффект влияния чувствительного теплового баланса на поверхности на соотношение G/R_n . Обычно используются несколько пластин ввиду пространственной изменчивости почвы, влажности почвы и растительности.

Скорость ветра

Точность измерений скорости ветра трудно оценить, не используя одновременно два прибора. Следует всегда учитывать наличие очень низких скоростей ветра. Для электронных приборов эти записи могут представлять численное отклонение в уравнении калибровки анемометра. Присутствие этих постоянных отклонений в выборке данных указывает либо на исключительно спокойные условия (скорость ветра менее 0,5 м/с в течение всего периода наблюдений, что бывает очень редко), либо на неправильную работу датчика ввиду отсутствия электроэнергии или износа подшипников. Эти проблемы могут быть не замечены оператором станции.

Если возможно, следует один раз в году минимум на 3-4 дня установить второй анемометр той же конструкции*, но с новыми подшипниками и сравнить его показания с показаниями постоянно работающего прибора. Отклонения в показаниях служат сигналом необходимости ремонта.

Относительная влажность и давление пара

Трудно точно измерить давление пара в воздухе. Некоторые старые электронные датчики влажности страдали от гистерезиса, нелинейности и ошибок калибровки. Некоторые из ошибок присущи самой конструкции приборов, другие вызваны пылью, влагой, насекомыми, загрязнением и старением.

Дублирование приборов определения относительной влажности

На электронных метеостанциях настоятельно рекомендуется использовать параллельно два датчика относительной влажности и температуры воздуха, по меньшей мере, на определенный период в течение года. Если два датчика дают идентичные показания, это означает, что оба

* Данное уравнение прогнозирует $G = 0,1 R_n$ для LAI = 2,8 - типичном для подстриженной травы. (ур-е (45) в главе 3). Почвенный тепловой поток для фуражной травы в течение ночного времени примерно равнялся $0,5 R_n$. Прутт (1995, персональное сообщение) обследовал $G = 0,3 R_n$ в ночные часы для подстриженной травы в Дэвисе, Калифорния.

* Если для записи показаний временного анемометра используется второе запоминающее устройство, следует синхронизировать их часовые механизмы. Следует также учитывать возможность взаимного влияния потоков воздуха от анемометров.

датчика работают нормально и для калибровки были использованы соответствующие уравнения. Тем не менее, если даже показания датчиков идентичны, это не означает, что измерения свободны от ошибок калибровки и отклонений ввиду нелинейности и т. п.

Тенденции изменения температуры точки росы во времени

Когда влажность воздуха измеряется датчиками RH, фактическое давление пара (e_a) рассчитывается как:

$$e_a = \frac{RH}{100} e^0(T) \quad (5-3)$$

где $e^0(T)$ - давление пара насыщения при температуре T и RH, измеренной в %. RH и T должны быть взяты для одного и того же периода времени, желательно ≤ 1 часа.

Часовые (или более короткие) измерения RH, температуры точки росы (T_{dew}) или давления пара (e_a) должны быть предварительно оценены, поместив почасовые измерения расчетной T_{dew} или e_a на временную шкалу. Относительная влажность будет существенно изменяться в течение дня и в обратной связи с температурой воздуха, как показано на рис. 12 главы 3. Тем не менее, как T_{dew} , так и e_a , измеренные напрямую или рассчитанные с использованием измеренных RH и T , должны оставаться постоянными в течение 24-часового периода, когда воздушные массы стабильные и адвекция воздушных масс из-за пределов площади не имеет места. В течение этих стабильных периодов следует ожидать некоторого повышения T_{dew} и e_a в дневное время, когда потоки ET увлажняют пограничный равновесный слой. Тем не менее, этот подъем обычно не превышает 10-20 %. Изменения T_{dew} существенно увеличиваются при прохождении погодного фронта. Поскольку e_a рассчитывается как продукт RH и давления пара насыщения при температуре воздуха, любая ошибка в калибровке RH вызывает ложные изменения T_{dew} и e_a с изменением температуры.

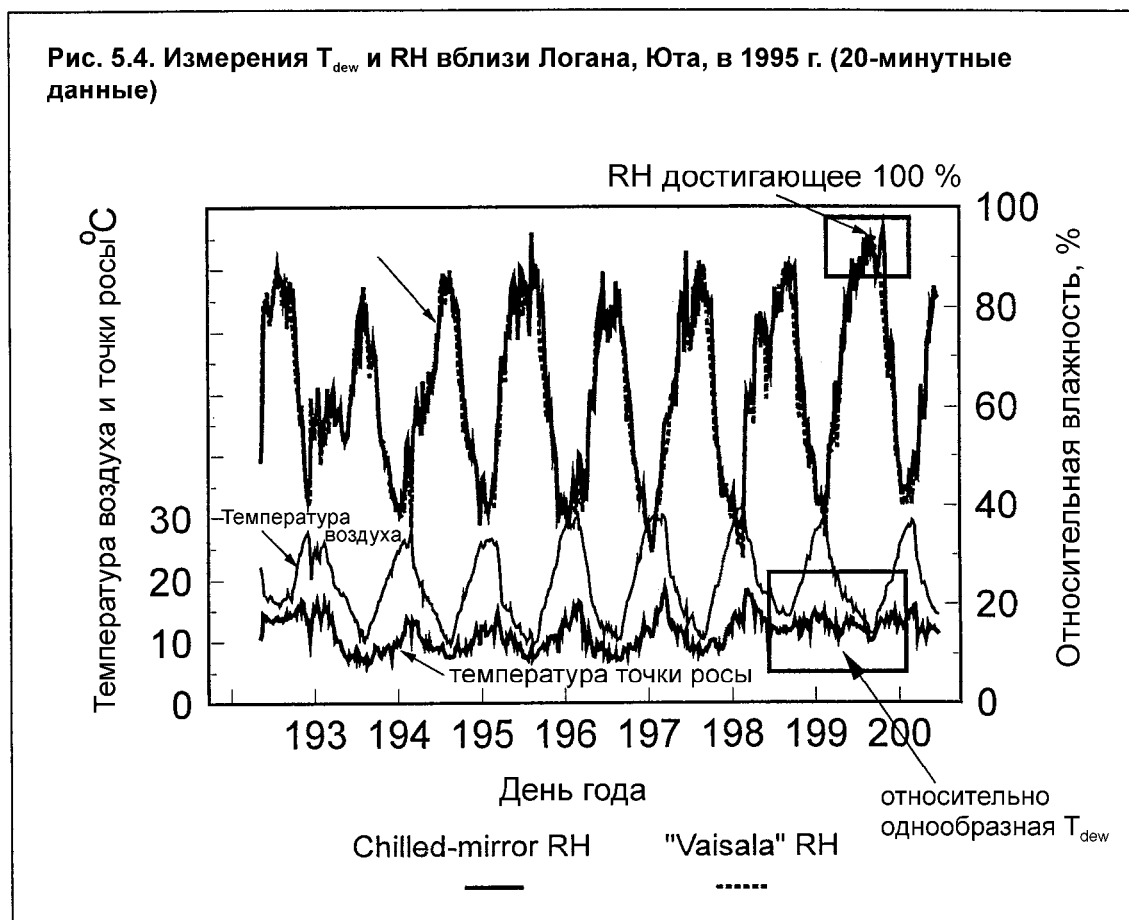
Рис. 5.4 показывает T_{dew} , рассчитанную по изменениям RH и температуры воздуха на метеостанции в центре ветланда вблизи Логана, Юта, (20-минутные данные). Обычно T_{dew} изменялась в течение часа ввиду нестабильности воздушных масс и возростала в течение большинства дней этого периода, когда испарение с растительности ветланда увеличивало влажность воздуха. Последовательность данных показывает некоторые периоды относительно постоянных измерений (расчетов) T_{dew} в течение 24-часового периода (например, для 199-го дня года), даже если температура воздуха значительно варьировала. Это хороший знак, показывающий, что датчик RH возможно работал нормально и калибровка инструмента была полноценной.

Рис. 5.4 также показывает для той же метеостанции сравнение измерений RH двумя различными и независимыми датчиками влажности. Два датчика, один измеряющий напрямую RH, другой - измеряющий напрямую температуру воздуха, показывали хорошую сходимость в течение 8 дней. Использование одного прибора вызвало бы вопросы к точности замеров.

Из рис. 5.4 можно заметить, что RH приближается к 100 % на 200-й день, в который ожидается хорошее увлажнение. Разница между минимальной суточной температурой и T_{dew} для большинства дней была обычно 1-2 °C. Это ожидается в сухую погоду, как показано в главе 3 и приложении 6.

Наблюдения в периоды выпадения росы и дождя

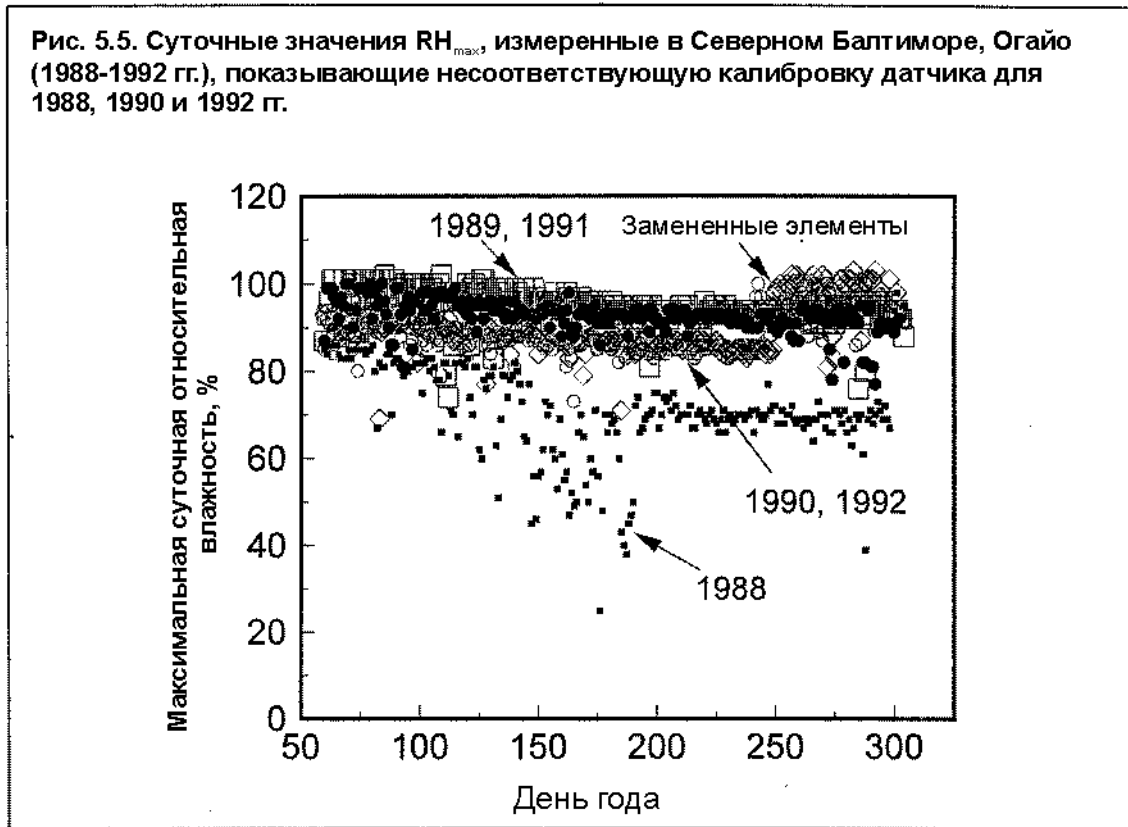
В различном климате, особенно там, где ночью выпадает роса, T_{dew} в течение раннего утра до восхода Солнца должна быть близкой к T_{min} и RH - приближаться к 100 %. Для автоматических метеостанций, где используются дождемеры, следует ожидать значения RH во время дождя, превышающие 95 %. Записи относительной влажности, превышающей 100 % на 3-4 % в ранние утренние часы или в момент дождя, показывают необходимость перекалибровки и численной подгонки собранных данных.



Максимальная суточная относительная влажность

Когда влажность измеряется на эталонном участке, RH ранним утром часто достигает 100 % даже в полуаридных регионах, если измерения проводятся в пределах орошаемой территории. Значения максимальной относительной влажности (RH_{max}), которые падают до 80-90 %, указывают на проблемы с калибровкой RH или сухость площадки измерения и отклонение от эталонных условий.

Рис. 5.5 показывает суточные замеры RH_{max} на электронной метеостанции вблизи Северного Балтимора, Огайо, за 5-летний период. В этом суб-гумидном районе можно ожидать RH_{max} до 100 %. Тем не менее, из рис. 5.5 очевидно, что датчик RH занижает величину RH_{max} в течение нескольких лет с тенденцией понижения RH_{max} в эти годы. Это указывает на функционирование датчика RH в электронном режиме, за исключением первой половины 1988 г. Между тем, в 1988, 1990 и 1992 гг. калибровка прибора не проводилась. Элементы датчика обычно заменялись в сентябре каждого года. Данные по RH для 1990 и 1992 гг. потенциально могут быть скорректированы умножением замеров RH на корректирующий коэффициент или добавлением отклонения.



Вид построения графиков, представленный на рис. 5.4 и 5.5, показывает простые типы оценки единства (интегральности) данных, которые могут быть использованы в определении эвапотранспирации и должны быть одобрены операторами сельскохозяйственной метеорологической сети.

Приложение 6

Корректировка метеоданных, полученных на не-эталонных метеостанциях, для расчета ET_0

Концепция, на которой основывается метод Пенмана-Монтейта для расчета ET_0 , требует, чтобы метеоданные были измерены в таких условиях окружающей среды, которые соответствуют определению эталонной эвапотранспирации. Другими словами, метеоданные должны измеряться на обширном травяном покрове, активно эвапотранспирирующем, или в среде со здоровой растительностью и без дефицита воды*. В таких эталонных условиях энергия, находящаяся у поверхности ($R_n - G$) разделяется между ощутимым и скрытым теплом (H и λE , соответственно) таким образом, что, в общем, соотношение $\beta = H / \lambda E_{ref} \leq 0,5$. Обозначение *ref* указывает на эталонные условия.

Природные условия аридных земель, которые окружают не-эталонные метеостанции, не позволяют достичь эталонной скорости эвапотранспирации. Обычно это вызвано отсутствием условий хорошего увлажнения. Таким образом, $\lambda E_{n/ref} < \lambda E_{ref}$ (обозначение *n/ref* для не-эталонных условий). Если энергия ($R_n - G$) та же самая, тогда распределение энергии между ощутимым и скрытым теплом изменяется, при $H_{n/ref} > H_{ref}$ и часто $\beta_{n/ref} > 0,5$. Следовательно, поскольку температура возрастает с увеличением H , температура воздуха, измеренная на не-эталонной площадке, будет выше, чем температура, измеренная в эталонных условиях, т. е. $T_{n/ref} > T_{ref}$. И наоборот, влажность, измеренная на не-эталонной площадке, будет ниже, чем измеренная в эталонных условиях, таким образом, $e_{a\ n/ref} < e_{a\ ref}$ и $VPD_{n/ref} > VPD_{ref}$.

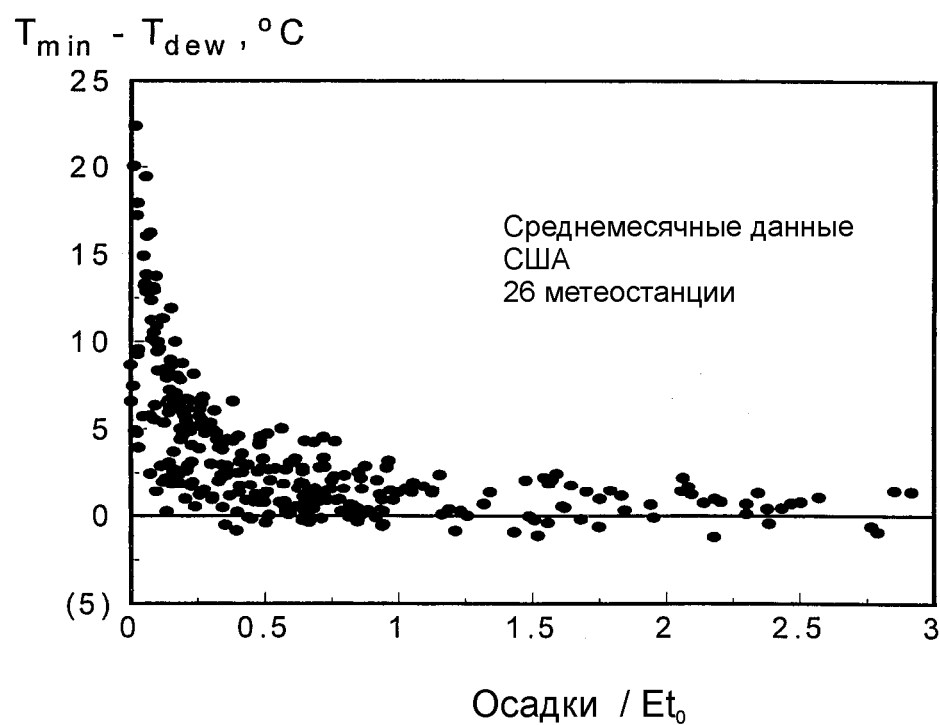
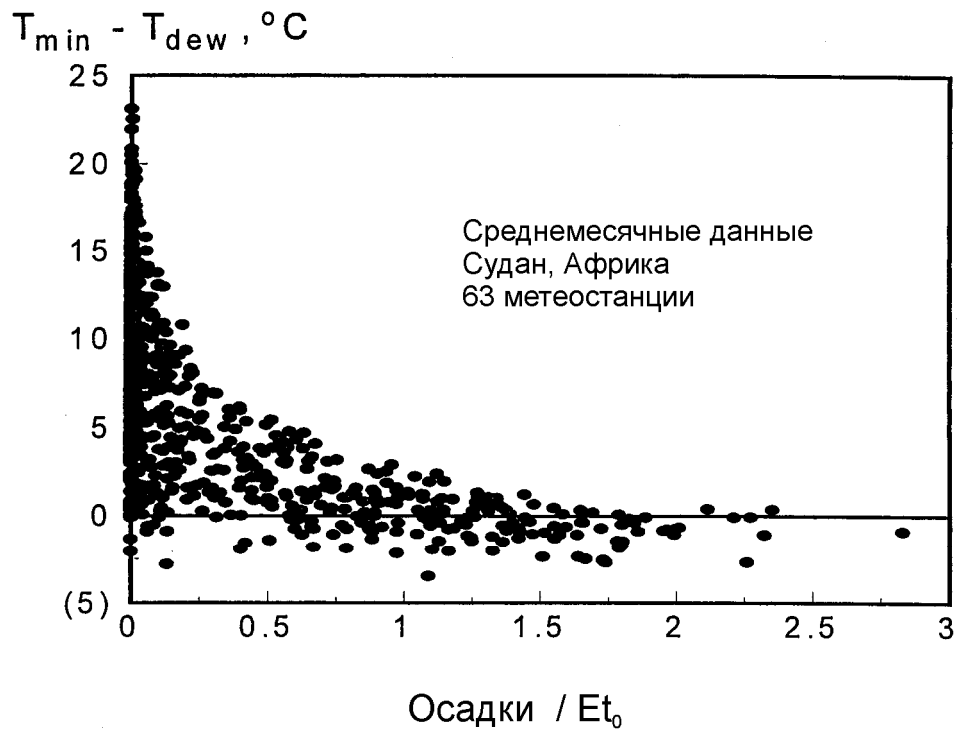
Рассчитывая ET_0 с использованием стандартных величин $R_n - G$, r_a и r_s , ET_0 будет завышена по сравнению с использованием $T_{n/ref}$ и $VPD_{n/ref}$. Следовательно, чтобы приблизить значения температуры и влажности к эталонным условиям, требуется корректировка.

В условиях здоровой растительности и достаточного увлажнения (эталонные условия) минимальная температура воздуха T_{min} обычно достигает температуры точки росы T_{dew} (см. рис. 6.2 для Кимберли, Айдахо)**. Это в особенности имеет место, когда ветер утихает ранним утром и влажность почвы высока (что иллюстрируется соотношением осадки/ ET_0 на рис. 6.1). Температура воздуха понижается в ночное время из-за остывания поверхности, вызванного коротковолновой эмиссией и испарением при положительном VPD. Когда на поверхности температура достигает T_{dew} , дальнейшее снижение температуры предотвращается конденсацией из воздуха водяных паров и соответствующим эффектом нагрева за счет высвобождения скрытого тепла. Таким образом, для эталонных условий отношение $(T_{min})_{ref} = (T_{dew})_{ref}$ обычно сохраняется.

* Более детальное обсуждение этой проблемы можно найти у Аллена (Allen, 1996).

** Температура воздуха может не понизиться до температуры точки росы, если большое количество тепла и сухой воздух транспортируются на поверхность ветром.

Рис. 6.1. Сопоставление различий между месячными значениями минимальной температуры и температуры точки росы ($T_{min} - T_{dew}$), соответствующих месячным значениям отношений осадки/ ET_0 , Судан, Африка и США.



Для не-эталонных площадок влажность почвы и/или ограниченная растительность делают $\lambda ET_{n/ref} < \lambda ET_{ref}$ или $ET_{n/ref} < ET_{ref}$. Таким образом, T_{min} может оставаться выше T_{dew} . Одной из причин такого явления может быть большой "запас" ощутимого тепла, образованного в дневное время в атмосфере ($H_{n/ref} > H_{ref}$, как предполагалось ранее), которое передается на поверхность в течение ночи, снижая эффект похолодания за счет длинноволновой радиации. Еще одной причиной может быть дефицит почвенной влаги для охлаждения за счет испарения в ночное время.

Это явление можно наблюдать на рис. 6.1, где месячные значения $T_{min} - T_{dew}$, помещенные на график, получены на государственных метеостанциях, совместно эксплуатируемых Суданом и США. Данные помещены на график с отношением осадки/ ET_0 . Отношение P/ET_0 указывает на наличие соответствующей почвенной влаги для поддержания эталонных (хорошее увлажнение) условий в отсутствие орошения. Как показывают данные, T_{min} достигает значения T_{dew} почти на всех станциях, когда отношение P/ET_0 достигает и превышает 1. Когда $P/ET_0 < 1$, аридность станции вызывает превышение T_{min} над T_{dew} . Исключением являются те станции, которые имеют $P/ET_0 < 1$, но площадки вокруг них орошаются или имеют достаточные запасы влаги с предыдущего месяца. Идентичность данных Судана и США указывает, что это явление носит общий характер.

Дополнительное сравнение приведено на рис. 6.2, где $T_{min} - T_{dew}$ сопоставляются для двух полуаридных зон в Айдахо, США, находящихся на расстоянии 200 км. Одна из зон - Кимберли - является эталонной площадкой, расположенной вблизи аэропорта и окруженной смесью орошаемых и неорошаемых земель. Очевидно, что T_{min} часто достигает T_{dew} для орошаемой площадки в Кимберли, с исключениями во время сухого сезона (низкое отношение P/ET_0). И, наоборот, T_{min} было на $10^{\circ}C$ выше T_{dew} для не-эталонной станции Бойс. Из графического сравнения можно прийти к заключению, что данные со станции Бойс следует откорректировать перед их использованием для расчета ET_0 по методу Пенмана-Монтейта. Необходимо избежать завышенной оценки ET_0 за счет завышения температуры воздуха и VPD.

Приведение величин T_{max} , T_{min} и T_{dew}

Эмпирический метод, описанный здесь, предполагает корректировку наблюдаемых температур T_{max} и T_{min} пропорционально разнице ($T_{min} - T_{dew}$), которая служит показателем завышения ($T_{n/ref} - T_{ref}$). Поскольку T_{dew} определяет фактическое давление пара ($e_a = e^0(T_{dew})$), корректировка T_{dew} также обеспечивает приведение VPD.

Предлагаемая методика заключается в следующем:

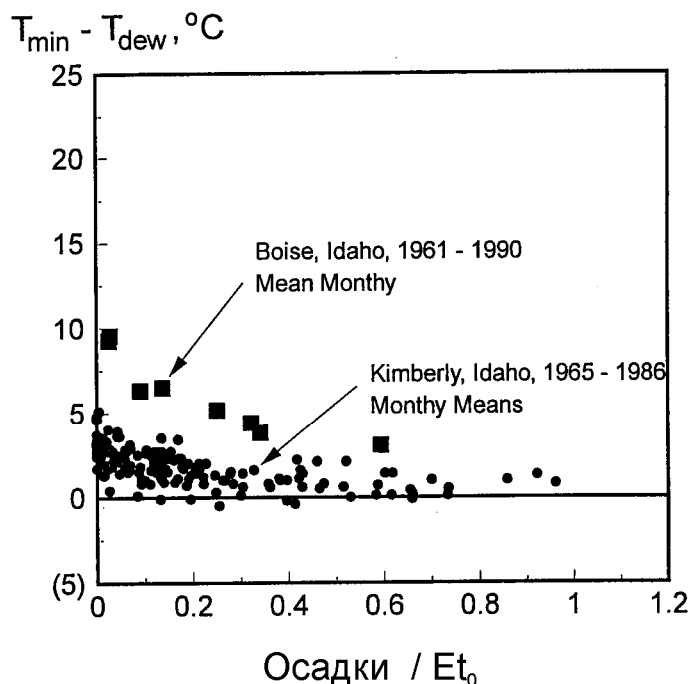
1. Сравните $T_{min} - T_{dew}$ (T_{dew} измерено или рассчитано из e_a с использованием уравнений (11) или (12), приложение 3) с не-эталонной площадки с эталонной, используя графическую процедуру, подобную приведенной на рис. 6.2 и используя месячные отношения P/ET_0 в качестве абсциссы. Для расчета $T_{min} - T_{dew}$ могут использоваться суточные или месячные данные.

2. Когда разности $T_{min} - T_{dew}$ для не-эталонной площадки систематически на $2^{\circ}C$ выше, чем разности с эталонной площадки, рассчитайте средние разности

$$\Delta T = T_{min} - T_{dew} \tag{6-1}$$

для месяцев, которые требуют корректировки (обычно это имеет место, когда месячное отношение P/ET_0 не превышает 0,5).

Рис. 6.2. Сравнение разностей между среднемесячными значениями минимальной температуры и температуры точки росы ($T_{min} - T_{dew}$), соответствующих среднемесячному отношению P/ET_0 для эталонной площадки (Кимберли, Айдахо, США) и для не-эталонной площадки (Бойз, Айдахо, США) в одном и том же регионе.



Либо, сравнивая $T_{min} - T_{dew}$ для не-эталонной площадки с $T_{min} - T_{dew}$ для эталонной, рассчитайте ΔT :

$$\Delta T = (T_{min} - T_{dew})_{n/ref} - (T_{min} - T_{dew})_{ref} \quad (6-2)$$

3. Откорректируйте температуру для каждого месяца (дня):

$$(T_{max})_{cor} = (T_{max})_{obs} - \left(\frac{\Delta T - K_o}{2} \right) \quad (6-3)$$

$$(T_{min})_{cor} = (T_{min})_{obs} - \left(\frac{\Delta T - K_o}{2} \right) \quad (6-4)$$

для $\Delta T > K_o$, где обозначения *cor* и *obs* соответствуют откорректированным и наблюдаемым величинам, соответственно. K_o - "консервативный" фактор, равный 2°C , когда не-эталонная станция не сопоставляется с эталонной (ΔT из ур-я (1)). $K_o = 0$, когда ΔT получено из уравнения (6-2).

4. Откорректируйте T_{dew} для тех же месяцев и дней:

$$(T_{dew})_{cor} = (T_{dew})_{obs} + \left(\frac{\Delta T - K_o}{2} \right) \quad (6-5)$$

где K_o имеет то же значение, что и для ур-й (6-3) и (6-4), используя наблюдаемые и расчетные величины T_{dew} (ур-я (3-11) или (3-12) приложения 3). Пользователь должен также убедиться, что $(T_{min})_{cor} \geq (T_{dew})_{cor}$.

5. Рассчитайте ET_o с использованием откорректированных величин T_{max} , T_{min} и T_{dew} .

Приведение только величины T_{dew}

Когда данные RH, e_a или T_{dew} ненадежны или "корректировка" T_{max} и T_{min} , описанная в предыдущем разделе, нежелательна, возможно еще одно средство "корректировки" выборки климатических данных с учетом аридности станции. Согласно этому методу в расчете ET_o

$$T_{dew} = T_{min} - K_o \quad (6-6)$$

где $K_o = 0$ °C для гумидного и суб-гумидного климата и $K_o = 2$ °C для аридного и полу-аридного климата. В результате этой процедуры T_{dew} увеличивается и отражает более высокую влажность, ожидаемую в эталонных условиях. Отмечается, что в не-эталонных условиях измененная величина T_{min} может быть слишком высокой по сравнению с T_{min} в эталонных условиях, так что ур-е (6-6) может дать завышенную величину T_{dew} даже для эталонных условий. Однако, поскольку в расчете дефицита давления пара VPD в уравнении ET_o , где $VPD = 0,5(e^{\circ}(T_{max}) + e^{\circ}(T_{min})) - e^{\circ}(T_{dew})$, используются значения температуры воздуха и точки росы, которые обе могут быть слишком высокими, отклонение в верхнюю сторону во всех температурных параметрах будет стремиться к нулю, показывая VPD, который представляет эталонные условия.

Показатель аридности станции

Для не-эталонных площадок при наличии данных по влажности, можно рассчитать **показатель отклонения аридности** A_{bi} (в масштабе месяца)

$$A_{bi} = \frac{(ET_o)_{obs}}{(ET_o)_{T_{dew}=T_{min}}} - 1 \quad (6-7)$$

между ET_o , рассчитанной по наблюдаемым (не откорректированным) данным (обозначение *obs*) и, для того же периода, используя T_{min} как определение T_{dew} . Если разница между T_{min} и T_{dew} велика, $A_{bi} \sim 0$. Когда $\Delta T = T_{min} - T_{dew}$ велико (т. е. для не-эталонных условий), показатель отклонения аридности A_{bi} становится больше нуля.

Пользователь должен сопоставить показатели для сухих и влажных месяцев и решить, возникают ли более высокие значения A_{bi} в результате аридности или по другим причинам. Когда A_{bi} постоянно превышает 0,05, может потребоваться корректировка. Корректировка данных по влажности и температуре может быть сделана так, как показано в предыдущих разделах.

Для пользователя важно представлять себе, что эти корректировки производятся только для улучшения расчетов ET_o , поскольку ET_o определяется для хорошо увлажненной среды. Для гидрологических исследований, где требуется фактическая ET_o , температуры воздуха и точки росы не подвергаются приведению, поскольку $ET_{o, n/ref}$ характеризует природную потребность в испарении для климата.

Любые откорректированные данные для T_{max} , T_{min} , T_{dew} не могут быть заново вставлены в первоначальную выборку данных. Пользователь должен учитывать, что все представленные здесь процедуры корректировки - это лишь попытки приблизить расчеты ET_o к "реальной" ET_o , которая отражает хорошо увлажненную среду. Любые ошибки и неопределенности, внесенные этими приведениями для конкретной площадки, будут оставаться, в основном, неизвестными. Следовательно, пользователь должен использовать их осторожно.

Приложение 7

База и расчеты K_c для начальной стадии однолетних культур

ЕТ на начальной стадии роста однолетних культур преимущественно существует в виде испарения. Следовательно, точные оценки $K_{c\ ini}$ должны учитывать частоту, с которой поверхность почвы увлажняется в течение начального периода. Начальный период определен в главе 6 для однолетних культур как период между датой посадки и датой приблизительно 10 % покрытия земли.

Глава 6 предоставляет базу и рисунки для прогноза $K_{c\ ini}$ как функции эталонной эвапотранспирации (ET_0), текстуры почвы, а также частоты и глубины увлажнения. Дополнительные предпосылки и уравнения даны в главе 7. Это приложение обеспечивает дальнейшую базу для разработки кривых $K_{c\ ini}$, представленных на рисунках 29 и 30 главы 6. Уравнения, представленные здесь, могут быть использованы вместо рисунков при работе на компьютере.

ВВЕДЕНИЕ

Испарение с обнаженной почвы (E_s) можно охарактеризовать как проходящее в 2-х определенных фазах. Фаза 1 называется фазой «ограниченной энергии». В этой фазе влага переносится к поверхности почвы со скоростью, достаточной для того, чтобы обеспечить потенциальную скорость испарения (E_{s0}), которое, в свою очередь, управляется энергией на поверхности почвы. В этой процедуре E_{s0} рассчитывается через:

$$E_{s0} = 1,15 ET_0 \quad (7-1)$$

где E_{s0} – потенциальная скорость испарения [мм сут^{-1}] и ET_0 является среднtq ET_0 в начальный период [мм сут^{-1}]. Значение 1,15 представляет возросший потенциал испарения благодаря низкому альбедо влажной почвы и теплу, накопленному в поверхностном слое в предыдущие сухие периоды.

Фаза 2 называется фазой «ограниченной почвы», в которой гидравлическая транспортировка подземной воды к поверхности почвы не способна подавать воду с потенциальной скоростью испарения. В этой фазе поверхность почвы частично сухая и частично испарение происходит из-под поверхности почвы. Энергия, необходимая для подземного испарения, подается посредством транспортировки тепла с поверхности почвы в ее профиль. Скорость испарения в фазе 2 высыхания снижается, когда уменьшается содержание почвенной влаги, как показано на рисунке 7.1 (см. рис. 38 главы 7). Следовательно, скорость испарения может быть выражена пропорционально влаге, остающейся в слое испарения, соответствующей максимальной глубине воды, которая может испариться с того же самого почвенного слоя во время фазы 2 высыхания.

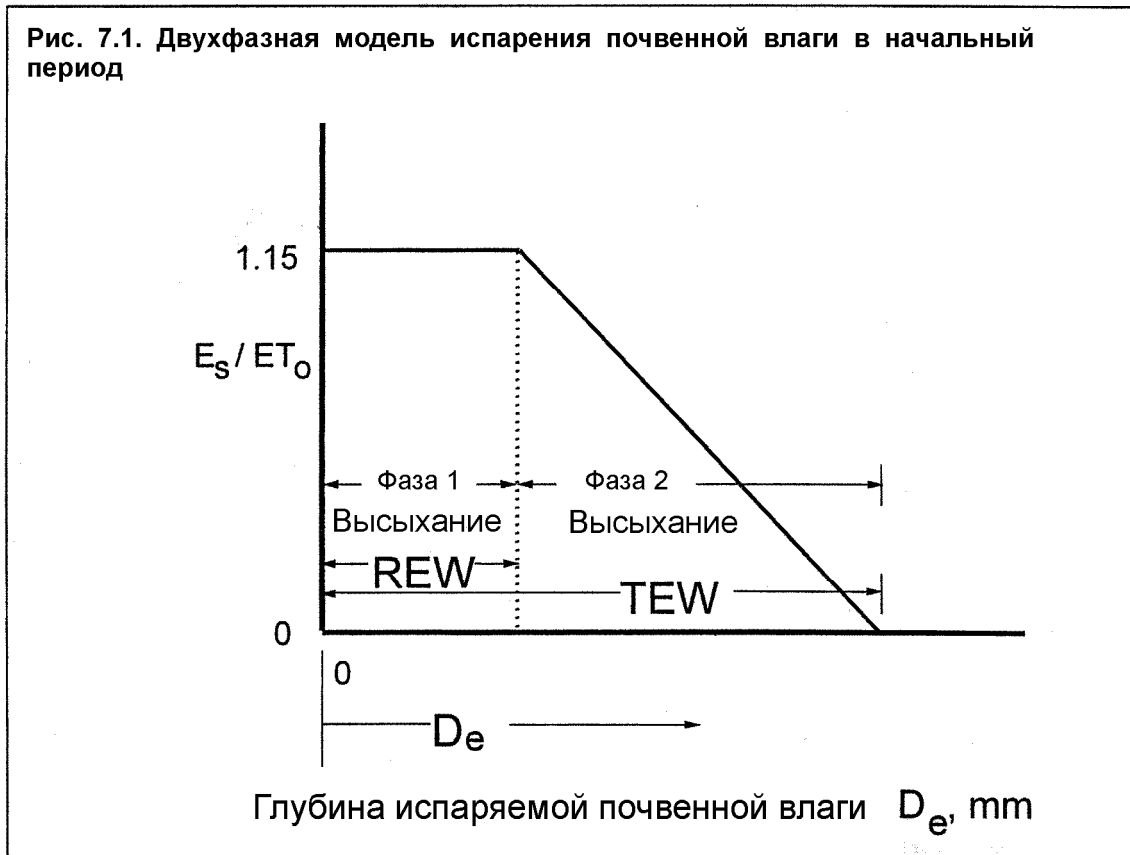
Максимальная общая глубина воды, которая может испариться с поверхностного слоя почвы, называется «общим количеством испаряемой воды» или TEW. В свою очередь, максимальная общая глубина воды, которая может испариться в фазе 1, называется «быстро испаряющаяся вода» или REW.

Если скорость испарения в фазе 2 высыхания принимается как линейно пропорциональная эквивалентной глубине воды, остающейся в слое испарения, как показано на рисунке

7.1, то средняя скорость испарения почвенной влаги в фазе 2 может оцениваться подобно уравнению 7.4 главы 7:

$$E_s = E_{so} \left[\frac{TEW - D_e}{TEW - REW} \right] \quad (7-2)$$

когда $D_e > REW$, где E_s – фактическая скорость испарения [мм сут^{-1}] в любое конкретное время, когда истощение поверхностного слоя почвы равно D_e . D_e – это истощение верхнего слоя почвы [мм], а REW – быстро испаряемая вода в верхнем слое [мм]. Продолжительность периода, необходимого для завершения фазы 1 высыхания (t_1) равна $t_1 = REW/E_{so}$.



Общее уравнение для $K_{c\ ini}$

Уравнение 7-2 может быть интегрировано по ряду от REW до TEW , результатом чего будет основное уравнение $K_{c\ ini}$ в фазе 2:

$$K_{c\ ini} = \frac{TEW - (TEW - REW) \exp \left(\frac{-(t_w - t_1) E_{so} \left(1 + \frac{REW}{TEW - REW} \right)}{TEW} \right)}{t_w \cdot ET_0} \quad (7-3)$$

для $t_w > t_1$, где $K_{c\ ini} = E_s/ET_0$, t_w – это средний интервал между поливами (днями) и t_1 – это период, когда фаза 1 высыхания завершена ($t_1 = REW/E_{so}$) [сут]. Параметр «exp» представ-

ляет собой экспоненту значения, заключенного в круглые скобки. K_{cini} , вычисленный по уравнению 7-3, ограничен до $K_{cini} \leq 1,15$.

Когда $t_w < t_1$, т. е. весь процесс происходит в фазе 1 следующим образом:

$$K_{cini} = \frac{E_{so}}{ET_0} = 1.15 \quad (\text{для } t_w < t_1) \quad (7-4)$$

Там, где практикуется бороздковое или струйное орошение и увлажнена только часть поверхности почвы, значение, рассчитанное для K_{cini} , в уравнениях 7-3 и 7-4, должно быть сокращено пропорционально средней части увлажненной поверхности, f_w [0,1]. Показательные значения для f_w даны в таблице 20 главы 7. Уравнение 60 главы 6 используется для внесения поправок:

$$K_{cini} = f_w K_{cini} (f_w = 1)$$

где f_w – часть увлажненной орошением или осадками поверхности [0-1], а $K_{cini} (f_w = 1)$ – значение K_{cini} для $f_w = 1$ из уравнения 7-3 или 7-4.

Соответственно, значение глубины инфильтрации от орошения (I_w) должно быть откорректировано с помощью уравнения 61 главы 6:

$$I_w = \frac{I}{f_w}$$

где I_w – глубина орошения, которое инфильтруется на увлажненной части почвы [мм] и I – глубина воды, инфильтрующейся после орошения, выражаемая как одномерная глубина по всей поверхности [мм].

ОБЩИЙ ОБЪЕМ ИСПАРЯЕМОЙ ВЛАГИ

Значение TEW – максимальная глубина воды, которая может испариться из почвы после увлажнения. Значение TEW управляется глубиной профиля почвы, внося свой вклад в испарение почвенной влаги и удерживающими свойствами почвенной влаги в испаряющемся слое. Кроме того, значение TEW подвергается воздействию ненасыщенной гидравлической проводимости, присутствия гидравлически лимитирующего слоя, находящегося под испаряющимся слоем, а также транспорта физического тепла в почву для того, чтобы подавать энергию для подземного испарения. Приближенность максимального значения TEW для начальных периодов с $ET_0 \geq 5$ мм сут⁻¹ следующая:

$$TEW = 1000(\theta_{FC} - 0.5\theta_{WP})Z_e \quad (7-5)$$

где TEW имеет единицы измерения в мм, θ_{FC} – концентрация влаги в почве при полевой влагоемкости [м³ м⁻³], θ_{WP} – концентрация влаги в почве при точке увядания [м³ м⁻³], а Z_e – глубина верхнего слоя почвы, который подвержен высыханию через испарение [0,10 до 0,15 м]. Если она неизвестна, то рекомендуется использовать значение $Z_e = 0,15$ м. Характерные значения θ_{FC} и θ_{WP} даны в таблице 19 главы 7.

В зимние и другие прохладные месяцы в поверхность почвы проникает меньше радиационной энергии для того, чтобы при высыхании почвы испарялась влага и TEW может быть меньше. Следовательно, когда $ET_0 < 5$ мм сут⁻¹, TEW для использования в уравнении 7-3 рассчитывается следующим образом:

$$TEW = 1000(\theta_{FC} - 0.5\theta_{WP})Z_e \sqrt{\frac{ET_0}{5}} \quad (7-6)$$

где ET_0 – эталонная ET в мм/сут. Уравнение 7-6 корректирует TEW для использования на начальной стадии, когда почва обнажена. Этот показатель не предназначен для использования в процедуре с двойным $K_{c\ ini}$ главы 7. REW ограничена, так что $REW \leq TEW$.

Число поливов или осадков и средняя глубина

Оценка количества поливов и соответствующего интервала времени между поливами в начальный период описана в главе 6. Число поливов или осадков в начальный период определяется с учетом того, что увлажнение, происходящее два дня подряд, считается как одно, а определенные поливы или осадки меньше, чем $0.2 ET_0$, могут быть проигнорированы.

Средний интервал между выпадением осадков в начальный период (t_w) описывается как:

$$t_w = \frac{L_{ini}}{n_w \div 0.5} \quad (7-7)$$

где t_w выражается в сутках, L_{ini} – это длительность начального периода [сут], а n_w – количество осадков в начальный период.

Средняя глубина воды, добавленной к испаряющему слою при каждом выпадении осадков, определяется делением суммы количества осадков и инфильтрации от орошения, происходящего во время выпадения всех осадков, на число дней выпадения осадков:

$$P_{mean} = \frac{(\sum P_n \div \sum I_w)}{n_w} \quad (7-8)$$

где P_{mean} – средняя глубина инфильтрации воды на одно выпадение осадков [мм], P_n – глубина инфильтрации осадков в начальный период, а I_w – глубина инфильтрации орошения для части увлажненной поверхности [мм] (уравнение 61). Каждое конкретное значение P_n и I_w должны быть ограничено в уравнении 7-8 так, чтобы $P_n \leq TEW$ и $I_w \leq TEW$, где TEW взято из уравнений 7-5 или 7-6.

Ограничения TEW и REW

В случае, если глубина увлажнения (P_{mean}) меньше, чем TEW, процесс испарения, включая фазу I высыхания, может завершиться быстрее, чем ожидалось. Фактические значения TEW и REW должны быть откорректированы в соответствии с P_{mean} . Следовательно, TEW и REW рассчитываются в соответствии со средним общим объемом воды в течение цикла высыхания:

$$TEW_{cor} = \min\left(TEW, \dots, P_{mean} \div \frac{W_{ini}}{n_w}\right) \quad (7-9)$$

и

$$REW_{cor} = REW \left[\min\left(\frac{P_{mean} \div \frac{W_{ini}}{n_w}}{TEW}, \dots, 1\right) \right] \quad (7-10)$$

где «min ()» является функцией для отбора минимальных значений, заключенных в скобки, которые отделены запятой и где TEW взято из уравнений 7-5 или 7-6. W_{ini} – эквивалентная глубина воды [мм] в слое испарения (толщиной Z_e) при посадке (первая половина начального периода). W_{ini} имеет максимальное значение TEW, когда первоначальная концентрация почвенной влаги в испаряющем слое находится на уровне полевой влагоемкости. Значения

для TEW_{cor} и REW_{cor} из уравнений 7-9 и 7-10 используются на месте TEW и REW в уравнении 7-3.

УРАВНЕНИЯ К РИСУНКАМ 29 И 30 ГЛАВЫ 6

Рисунки 29 и 30 главы 6 могут быть воспроизведены в цифрах посредством применения уравнения 7-3 при соблюдении следующих условий. Для всех случаев использования:

$$t_1 = REW_{cor} / E_{so} \quad \text{и} \quad E_{so} = 1,15 ET_0 \quad (\text{уравнение 1}).$$

Если $t_1 < t_w$, тогда $K_{c\ ini} = 1,15$ (уравнение 4), а уравнение 7-3 не используется.

Другими словами, применять уравнение 3, используя следующие параметры (TEW_{cor} и REW_{cor} используются на месте TEW и REW в уравнении 3):

Для рисунка 29 (почвы любой текстуры, обладающие неглубокой инфильтрацией (< 10 мм)):

$$TEW_{cor} = 10 \text{ мм}$$

$$REW_{cor} = \min(\max(2,5; 6 / (ET_0)^{0,5}), 7)$$

Для рисунка 30а (почвы грубой текстуры с неглубокой инфильтрацией (≥ 40 мм)):

$$TEW_{cor} = \min(15; 7 (ET)^{0,5})$$

$$REW_{cor} = \min(6; TEW_{cor} - 0,01)$$

Для рисунка 30б (почвы средней и тонкой текстуры с большой глубиной инфильтрации (≥ 40 мм)):

$$TEW_{cor} = \min(28; 13 (ET)^{0,5})$$

$$REW_{cor} = \min(9; TEW_{cor} - 0,01)$$

Функции $\max()$ и $\min()$ указывают выбор максимального или минимального значения параметров, которые разделяются запятыми. Большинство языков программирования и программ электронных таблиц включают эти функции.

Цифровое применение уравнения 7-3 с использованием параметров и ограничений, перечисленных здесь, полностью воспроизведут рисунки 29 и 30а и б, за исключением того, что расчеты, сделанные в области $ET_0 = 5 \text{ мм сут}^{-1}$, могут отклоняться от кривых на рисунках 30а и б, тогда как кривые в области $ET_0 = 0,5 \text{ мм сут}^{-1}$ были сглажены перед построением. Сглаживание вызвало незначительные различия между рисунками и цифровой процедурой. Параметры, упомянутые выше, сокращены в уравнениях (5)-(10) с использованием типовых величин θ_{FC} и θ_{WP} .

В случаях, когда полив или осадки неравномерно распределяются в начальный период, двойной K_c из главы 7 наряду с суточным водным балансом почвы, может обеспечить более точные результаты.

ПРИМЕР 7-1**Применение уравнения 7-3 к примеру 25**

Как в примере 25 раздела Б, малые овощи выращиваются на засушливых территориях на почве грубой текстуры и получают 20 мм воды дважды в неделю с помощью системы дождевания. Среднее ET_0 на начальной стадии составляет 5 мм/сут.

Для:	$t_w = 7/2 =$ $ET_0 =$ $E_{so} = 1,15 ET_0 = 1,15 (5) =$	3,5 5 5,75	Суточный интервал мм/сут мм/сут
Для рис. 29:	$TEW_{cor} =$ $REW_{cor} = \min(\max(2,5, 6/(5^{0,5}), 7) =$ $t_1 = REW/E_{so} = 2,7/5,75 =$ т. к. $t_w > t_1$, используем ур-е 7-3: $K_{c\ ini}$ (рис. 29) = $(10 - (10 - 2,7)$ $\exp[-(3,5 - 0,47)(5,75)(1 + 2,7/(10 - 2,7))/10]) / (3,5(5)) =$	10 2,7 0,47 0,57	мм мм сут -
Для рис. 30а	$TEW_{cor} = \min(15; 7(5^{0,5})) =$ $REW_{cor} = \min(6; 15 - 0,001) =$ $t_1 = REW/E_{so} = 6/5,75 =$ т.к. $t_w > t_1$, используем ур-е 7-3: $K_{c\ ini}$ (рис. 30а) = $(15 - (15 - 6)$ $\exp[-(3,5 - 1,04)(5,75)(1 + 6/(15 - 6))/15]) / (3,5(5)) =$	15 6 1,04 0,75	мм мм сут -
Для: Из ур-я 59: Из ур-я 58:	$I =$ $K_{c\ ini} = 0,57 + [(20 - 10)/(40 - 10)](0,75 - 0,57) =$ $= 0,57 + 0,33(0,12) =$ $ET_c = 0,63 (5) =$	20 0,63 3,2	мм - мм/сут
Средняя эвапотранспирация культур на начальной стадии роста мелких овощей составляет 3,2 мм/сут. Значения в этом примере относительно близки к значениям, полученным из примера 25.			

Приложение 8

Пример расчета для применения процедуры двойного K_c в планировании орошения

Это приложение описывает более подробно применение различных уравнений для расчета K_{cb} , K_e и ET_c с использованием метода двойного K_c главы 7. Пример дан в форме компьютерной электронной таблицы и применим к сухой съедобной бобовой культуре, которая использовалась в примерах 15 и 16 глав 6 и 7. Электронная таблица показана на рис. 8.1, где график орошения определен с помощью процедуры суточного водного баланса почвы, описанной в главе 8. Временной график поливов основан на истощении, допускаемом управлением водой (MAD), которая может накапливаться в корневой зоне. График поливов и соответствующее оцененное испарение влажной почвы различны по фактическим значениям, показанным в примере 16 главы 7, поскольку пример 16 представляет фактический график поливов, использованный в Кимберли в 1974 г. Фактический график несколько разнится с теоретическим графиком рисунка 8.1.

Формулы электронных таблиц, использованные при расчетах и ссылки на уравнения в тексте указаны в примере 8.1. Переменные значения параметров следуют тем же обозначениям, что и в главах 1-9. Переменные значения определены в Перечне основных символов и акронимов во введении к этому разделу. Несколько исключений определено в таблице 8.1.

Электронная таблица на рисунке 8.1 включает колонки для переменных значений T_{max} , u_2 и T_{dew} . Колонки T_{max} и T_{dew} используются для расчета суточного RH_{min} . Колонки u_2 и RH_{min} используются для корректировки $K_{cb\ mid}$ и $K_{cb\ end}$ с помощью уравнения 70 главы 7 и для расчета $K_{c\ max}$ с помощью уравнения 72 на суточной основе. Данные в первых 7 рядах рисунка 8.1, который находится внутри боксов, представляют информацию о конкретной культуре и почвах, которая вводится пользователем для особой комбинации культуры и почвы. Остальная информация (за рамками) автоматически рассчитана с помощью программы построения электронных таблиц. Колонки с заглавиями, подчеркнутыми двойной линией, представляют данные, которые вводятся пользователем в электронную таблицу.

Расчеты на рисунке 8.1 могут использоваться для проверки компьютерных программ или расчетов электронных таблиц для K_e , K_c и ET_c . В зависимости от вариантов временного графика орошения могут появиться небольшие различия. Электронная таблица рисунка 8.1 предполагает, что все поливы и выпадение осадков происходят рано утром. Планирование и размеры поливов базируются на истощении почвенной влаги в конце предыдущего дня. Она также предполагает, что дренаж из корневой зоны при обильных осадках наблюдается в день их выпадения. Это означает, что естественный сток после осадков равен нулю. Если необходимо, процедуры прогнозирования стока вследствие осадков могут быть введены в электронную таблицу с помощью процедур, описанных в большинстве учебников по гидрологии. Это значит, что чистая глубина орошения, которая сохраняется в корневой зоне культур, точно равна глубине истощения предыдущего дня. Это предполагает абсолютное знание ирригатора об истощении почвенной влаги или что все поливы адекватны или излишни. Это предположение не привязано к каким-то определенным условиям орошения и может изменяться таким образом, как это необходимо пользователю.

Формулы электронной таблицы для создания электронной таблицы рисунка 8.1 даны в примере 8.1 для Microsoft Excel (версии 5 и выше). Формулы для других типов электронной таблицы будут похожими. Формула для Corel Quattro-Pro (версии 5 и выше) может быть загружена со странички ФАО в Internet.

РИСУНОК 8.1 Пример электронной таблицы для расчета $ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_0$ и графика поливов⁽¹⁾

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Пример электронной таблицы для расчета $ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_0$ и графика поливов													
2											Для новой культуры, изменение значений в рамках			
3	Культура:	Сухие, съедобные бобы				Табл. 11			Табл. 17					
4					L_{ini}	25		$K_{cb\ ini}$	0,15	0,15		$K_c\ min$	0,15	
5	Посадка:	Месяц	5		L_{dev}	25		$K_{cb\ mid}$	1,10	1,13		$Max.Ht.$	0,4	M
6		День	22		L_{mid}	30		$K_{cb\ end}$	0,25	0,23				
7					L_{late}	20								
8											Ср. скорость ветра в сер. сезона: 1,98 м/с		<---Рассчитана автоматически из Lookip в столбце AO	
9	Дважды подчеркнутые колонки (ниже) введены пользователем										Ср. RH_{min} сер. сезона: 29 %		<---Рассчитана автоматически из Lookip в столбце AP	
10	Колонки, подчеркнутые одной линией, рассчитаны эл. таблицей										<---использовано для поправки K_{cb} -->			
11					Ветер									
12					T_{max}	@ 2М	T_{dew}	ET_0	$e^o(T_{dew})$	$e^o(T_{max})$	RH _{min}	P - RO		
13	Месяц	День	Год	J	°C	м/с	°C	мм/сут	кПа	кПа	%	мм		
14	5	15	74	135	10,0	5,8	0,0	3,4	0,61	1,23	50			
15	5	16	74	136	13,3	2,2	-5,0	4,1	0,42	1,53	28			
16	5	17	74	137	13,3	3,8	-1,1	3,7	0,56	1,53	37			
17	5	18	74	138	13,3	3,1	-2,8	3,8	0,50	1,53	33			
18	5	19	74	139	13,3	4,5	-0,6	3,1	0,58	1,53	38	2,5		
19	5	20	74	140	12,8	8,4	3,3	2,8	0,77	1,48	52	0,8		
20	5	21	74	141	17,2	3,5	-0,6	4,8	0,58	1,96	30			
21	5	22	74	142	22,8	2,2	1,7	4,9	0,69	2,78	25			
22	5	23	74	143	24,4	2,5	5,6	5,2	0,91	3,06	30			
23	5	24	74	144	24,4	2,7	6,7	5,4	0,98	3,06	32			
24	5	25	74	145	25,6	2,2	8,3	5,2	1,09	3,28	33			
25	5	26	74	146	27,8	1,9	10,0	5,4	1,23	3,74	33			
26	5	27	74	147	24,4	3,6	10,6	5,3	1,28	3,06	42			

РИСУНОК 8.1 продолжение

	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP
1												
2												
3	Root_{min}	0,20	М	MAD в течение нач. ста-			70	%				
4	Root_{max}	0,80	М	дии								
5	Avail.Water	160	ММ/М	MAD после нач. стадии			45	%				
6												
7												
8												
9	(Необходимое орошение должно применяться в начале следующего дня)											
10	<-----Планирование орошения----->											
11	Глубина		Конечн.	Необх.	(от осадков)		($K_s K_{cb} + K_e$)	Откорректир.			(Применяется при рас-	
12	корней	RAW	истожен.	орошен.	Дренаж	K_s	Исправл.	конечное			скор.	мин. отн.
13	М	ММ	ММ	нетто	(DP)		K_c	истощение			ветра	влажн.
14							(K_{c adj})	ММ			м/с	%
15	0,20	22,4	19,6			1,00	0,46	19,6			5,8	49,7
16	0,20	22,4	21,1			1,00	0,37	21,1			8,0	77,3
17	0,20	22,4	22,2			1,00	0,30	22,2			11,8	114,2
18	0,20	22,4	23,2			0,92	0,25	23,2			14,9	146,7
19	0,20	22,4	21,9			1,00	0,42	21,9			19,4	185,0
20	0,20	22,4	22,4			1,00	0,42	22,4			27,9	237,4
21	0,20	22,4	24,1			0,83	0,33	23,9			31,4	267,1
22	0,20	22,4	25,3	25,3		0,70	0,23	25,1			33,6	292,0
23	0,20	22,4	3,7			1,00	0,76	3,7			36,1	321,8
24	0,20	22,4	7,8			1,00	0,76	7,8			38,9	353,9
25	0,20	22,4	11,8			1,00	0,76	11,8			41,1	387,2
26	0,20	22,4	13,7			1,00	0,36	13,7			42,9	420,1
27	0,20	22,4	14,7			1,00	0,19	14,7			46,6	461,9

⁽¹⁾ Электронная таблица Excel была построена так, чтобы показывать значения нуля (0) в виде пробелов.

РИСУНОК 8.1 продолжение

	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD
1	(Все значения, не взятые в рамку, будут пересчитываться автоматически)															
2	Вычисленные данные для стадий:															
3	J_{Plant} 142								f_w (орошен.): 0,5							
4	J_{Dev} 167								REW: 8		мм					
5	J_{Mid} 192								TEW: 22		мм					
6	J_{Late} 222								начальн. D_e : 18		мм					
7	J_{Harv} 242								начальн. f_w : 1							
8																
9	<-----Вычисление эвапорации ----->															
10	орош															
11	·															
12	нетто/ f_w (← из оросит. граф. предыдущ. дня) $D_{e,i}$ нач. E DP_e $D_{e,i}$ конеч. ET_c															
13	Высота															
13	K_{cb}	M	K_c max	мм	f_c	f_w	f_{ew}	мм	K_r	K_e	мм/сут	мм/сут	мм	K_c	мм/сут	
14	0,15	0,05	1,23		0,01	1,00	0,99	18,0	0,29	0,31	1,05		19,06	0,46	1,56	
15	0,15	0,05	1,22		0,01	1,00	0,99	19,1	0,21	0,22	0,92		19,99	0,37	1,54	
16	0,15	0,05	1,23		0,01	1,00	0,99	20,0	0,14	0,15	0,57		20,57	0,30	1,13	
17	0,15	0,05	1,22		0,01	1,00	0,99	20,6	0,10	0,11	0,42		20,99	0,26	0,99	
18	0,15	0,05	1,23		0,01	1,00	0,99	18,5	0,25	0,27	0,85		19,31	0,42	1,32	
19	0,15	0,05	1,26		0,01	1,00	0,99	18,5	0,25	0,27	0,76		19,32	0,42	1,18	
20	0,15	0,05	1,23		0,01	1,00	0,99	19,3	0,19	0,21	0,99		20,33	0,36	1,71	
21	0,15	0,05	1,22		0,01	1,00	0,99	20,3	0,12	0,13	0,63		20,96	0,28	1,36	
22	0,15	0,05	1,22	50,6	0,01	0,50	0,50	0,0	1,00	0,61	3,17	29,67	6,35	0,76	3,95	
23	0,15	0,05	1,22		0,01	0,50	0,50	6,3	1,00	0,61	3,30		12,94	0,76	4,11	
24	0,15	0,05	1,21		0,01	0,50	0,50	12,9	0,65	0,61	3,16		19,25	0,76	3,94	
25	0,15	0,05	1,21		0,01	0,50	0,50	19,3	0,20	0,21	1,12		21,50	0,36	1,93	
26	0,15	0,05	1,22		0,01	0,50	0,50	21,5	0,04	0,04	0,20		21,90	0,19	1,00	

БОКС 8.1. Развернутые формулы и соответствующие уравнения для развернутых программ Excel**Формулы для строк 1-15 рис. 8.1 (MS Excel, версия 5/95 и позднее)***Подчеркнутые численные значения, вставленные пользователем***Уравнение
в тексте****или сноске****Ячейка****Текст, значение или формула**

	A1:	Пример таблицы расчета $ET_c = (K_{cb} + K_e)ET_o$ и графика орошения
	P2:	Расчетные данные по стадиям:
	A3:	Культура:
	B3:	<u>Сухие, съедобные бобовые:</u>
	F3:	Таблица 11:
	I3:	Таблица 12:
	J3:	Последующее приведение:
Таблица 2.5	P3:	J_{Plant}
	Q3:	$=TRUNC(275*C5/9-30+C6)+IF(C5>2,-2,0)+IF(MOD(C14,4)=0,+1,0)$
	V3:	f_w (irrig.):
	X3:	<u>0,5</u>
	AE3:	$Root_{min}$
	AF3:	<u>0,2</u>
	AG3:	м
	AH3:	MAD в течение начальной стадии
	AK3:	<u>70</u>
	AL3:	%
	E4:	L_{ini}
	F4:	<u>25</u>
	H4:	$K_{cb\ ini}$
	I4:	<u>0,15</u>
	J4:	$=I4$
	L4:	$K_{c\ min}$
	M4:	$=J4$
	P4:	J_{Dev}
	Q4:	$=Q3+F4$
	V4:	REW:
	X4:	<u>8</u>
	Y4:	мм
	AE4:	$Root_{max}$
	AF4:	<u>0,8</u>
	AG4:	м
	AH4:	MAD после начальной стадии
	AK4:	<u>45</u>
	AL4:	%
	A5:	Посадка:
	B5:	Месяц
	C5:	<u>5</u>
	E5:	L_{dew}
	F5:	<u>25</u>
	H5:	$K_{cb\ mid}$
	I5:	<u>1,1</u>
Ур-е 70	J5:	$=I5+(0,04*(\$K\$8-2)-0,004*(\$K\$9-45))*(\$M\$5/3)^{0,3}$
	L5:	Max.Ht.:
	M5:	<u>0,4</u>

	N5:	M
	P5:	J_{Mid}
	Q5:	$=Q4+F5$
	V5:	TEW:
	X5:	<u>22</u>
	Y5:	мм
БОКС 8.1, продолжение		
	AE5:	Avail. Water (Наличная влага)
	AF5:	<u>160</u>
	AG5:	мм/м
	B6:	День
	C6:	<u>22</u>
	E6:	L_{mid}
	F6:	<u>30</u>
	H6:	$K_{cb\ end}$
	I6:	<u>0,25</u>
Ур-е 70	J6:	$=IF(I6<0,45,I6,I6+(0,04*(\$K\$8-2)-0,004*(\$K\$9-45))*(\$M\$5/3)^{0,3})$
	P6:	J_{late}
	Q6:	$=Q5+F6$
	V6:	начальная D_e :
	X6:	<u>18</u>
	Y6:	мм
	E7:	L_{late}
	F7:	<u>20</u>
	P7:	J_{Harv}
	Q7:	$=Q6+F7$
	V7:	начальная f_w :
	X7:	<u>1</u>
(1)	H8:	Середина сезона. Скорость ветра:
	K8:	$= (VLOOKUP(Q6,D14:AP183,38) - VLOOKUP(Q5,D14:AP183,38)) / (Q6 - Q5)$
	L8:	м/с
	M8:	←----- Рассчитанные автоматически из Lookup по столбцу AO
	AN8:	(требуемое отношение, предполагаемое на начало следующего дня)
(1)	H9:	Середина сезона RH_{min} :
	K9:	$= (VLOOKUP(Q6,D14:AP183,38) - VLOOKUP(Q5,D14:AP183,38)) / (Q6 - Q5)$
	L9:	%
	M9:	←----- Рассчитанные автоматически из Lookup по столбцу AP
Первая строка формул (строка 14)		
<u>Примечание: некоторые формулы в строке 14 (первый день) отличаются от формул в строке 15. См. строку 15 для примерных расчетов для всех последующих дней.</u>		
	A14:	<u>5</u>
	B14:	<u>15</u>
	C14:	<u>74</u>
Таблица 2.5	D14:	$=TRUNC(275*A14/9-30+B14)+IF(A14>2,-2,0)+IF(MOD(C14,4)=0,+1,0)$

	E14:	<u>10</u>
	F14:	<u>5,7655</u>
	G14:	<u>0</u>
	H14:	<u>3,4</u>
Ур-е 14	I14:	=0,6108*EXP((17,27*G14)/(G14+237,3))
Ур-е 11	J14:	=0,6108*EXP((17,27*E14)/(E14+237,3))
Ур-е 63	K14:	=I14/J14*100
	L14:	<u>0</u>
Ур-е 66 ⁽²⁾	O14:	=IF(D14<\$Q\$4,\$J\$4,IF(D14<\$Q\$5,\$J\$4+(D14-\$Q\$4)/\$F\$5*(\$J\$5-\$J\$4),IF(D14<\$Q\$6,\$J\$5,IF(D14<\$Q\$7,\$J\$5+(D14-\$Q\$6)/\$F\$7*(\$J\$6-\$J\$5), \$J\$4))))
(3)	P14:	=MAX(O14/\$J\$5*\$M\$5,P13)
Ур-е 72	Q14:	=MAX(1,2+0,04*(F14*0,9-2)-0,004*(K14-45))*(P14/3)^0,3, O14+0,05)
(4)	R14:	0
Ур-е 76	S14:	=MAX(((O14-M\$4)/(Q14-M\$4))^(1+0,5*P14),0,01)
(5)	T14:	=IF(R14>0,X\$3,IF(L14>0,1,X7))
БОКС 8.1, продолжение		
Ур-е 75	U14:	=MIN(1-S14,T14)
(6)	V14:	=X6
Ур-е 74	W14:	=MAX(IF(V14<X\$4,1,(X\$4,1,(X\$5-V14)/(X\$5-X\$4)),0)
Ур-е 71	X14:	=MIN(+W14*(Q14-O14),U14*Q14)
	Y14:	=X14*H14
Ур-е 79	Z14:	=MAX(L14+R14,0)
Ур-е 77 ⁽⁶⁾	AA14:	=V14-L14-R14+Y14/U14+Z14
(7)	AB14:	=O14+X14
Ур-е 69 ⁽⁷⁾	AC14:	=AB14*H14
Ур-е 8.1 ⁽⁸⁾	AE14:	=MAX((O14-\$J\$4)/(\$J\$5-\$J\$4)*(\$AF\$4-\$AF\$3)+\$AF\$3,AE13)
Ур-е 82	AF14:	=MAX((IF(D14<Q\$4,AK\$3,AK\$4)/100*AE14*\$AF\$5,AF13)
Ур-е 85 ⁽⁹⁾	AG14:	=\$X\$6-L14+AC14
(10)	AH14:	=IF(D14>=Q\$3,IF(D14<(Q\$6+Q\$7)/2,IF(AG14>AF14,AG14,0), 0), 0)
Ур-е 88	AI14:	=MAX(+L14-AC14-\$X\$6,0)
Ур-е 84 ⁽¹¹⁾	AJ14:	=IF(AG14>AF14,(AE14*AF\$5-AG14)/(AE14*AF\$5-AF14),1)
Ур-е 80	AK14:	=X14+O14*AJ14
Ур-е 85 ⁽⁹⁾	AL14:	=+\$X\$6-L14+AK14*H14+AI14
(12)	AO14:	=F14
(12)	AP14:	=K14
Вторая строка формул		
Все строки ниже строки 15 идентичны.		
	A15:	<u>5</u>
	B15:	<u>16</u>
	C15:	<u>74</u>
Таблица 2.5	D15:	=TRUNC(275*A15/9-30+B15)+IF(A15>2,-2,0)+IF(MOD(C15,4)=0,+1,0)
	E15:	<u>13,3</u>
	F15:	<u>2,2175</u>
	G15:	<u>-5</u>
	H15:	<u>4,1</u>
Ур-е 14	I15:	=0,6108*EXP((17,27*G15)/(G15+237,3))
Ур-е 11	J15:	=0,6108*EXP((17,27*E15)/(E15+237,3))
Ур-е 63	K15:	=I15/J15*100
	L14:	<u>0</u>

Ур-е 66 ⁽²⁾	O15:	=IF(D15<\$Q\$4,\$J\$4,IF(D15<\$Q\$5,\$J\$4+(D15-\$Q\$4)/\$F\$5*(\$J\$5-\$J\$4),IF(D15<\$Q\$6,\$J\$5,IF(D15<\$Q\$7,\$J\$5+(D15-\$Q\$6)/\$F\$7*(\$J\$6-\$J\$5),\$J\$4)))
(3)	P15:	=MAX(O15/\$J\$5*\$M\$5,P14)
Ур-е 72	Q15:	=MAX(1,2+0,04*(F15*0,9-2)-0,004*(K15-45))*(P15/3)^0,3, O15+0,05)
(4)	R15:	=IF(AH14>0,AH14/\$X\$3,0)
Ур-е 76	S15:	=MAX(((O15-M\$4)/(Q15-M\$4))^(1+0,5*P15),0,01)
(5)	T15:	=IF(R15>0,X\$3,IF(L15>0,1,T14))
Ур-е 75	U15:	=MIN(1-S15,T15)
(6)	V15:	=MAX(AA14-L15-R15,0)
Ур-е 74	W15:	=MAX(IF(V15<X\$4,1,(X\$4,1,(X\$5-V15)/(X\$5-X\$4)),0)
Ур-е 71	X15:	=MIN(+W15*(Q15-O15),U15*Q15)
	Y15:	=X15*H15
Ур-е 79	Z15:	=MAX(L15+R15-AA14,0)
Ур-е 77 ⁽⁶⁾	AA15:	=AA14-L15-R15+Y15/U15+Z15
(7)	AB15:	=O15+X15
Ур-е 69 ⁽⁷⁾	AC15:	=AB15*H15
Ур-е 8.1 ⁽⁸⁾	AE15:	=MAX((O15-\$J\$4)/(\$J\$5-\$J\$4)*(\$AF\$4-\$AF\$3)+\$AF\$3,AE13)
Ур-е 82	AF15:	=MAX((IF(D15<Q\$4,AK\$3,AK\$4)/100*AE15*\$AF\$5,AF13)
Ур-е 85 ⁽⁹⁾	AG15:	=AK14-L15-AC14+AC15
(10)	AH15:	=IF(D15>=Q\$3,IF(D15<(Q\$6+Q\$7)/2,IF(AG15>AF15,AG15,0),0),0)
Ур-е 88	AI15:	=MAX(+L15+AH14-AC15-AK14,0)
Ур-е 84 ⁽¹¹⁾	AJ14:	=IF(AG15>AF15,(AE15*AF\$5-AG15)/(AE15*AF\$5-AF15),1)
Ур-е 80	AK14:	=X15+O15*AJ15
Ур-е 85 ⁽⁹⁾	AL15:	=+AL14-L15-AH14+AK15*H15+AI15

БОКС 8.1, продолжение

(12)	AO15:	=AO14+F15
(12)	AP15:	=AP14+K15

Сноски:

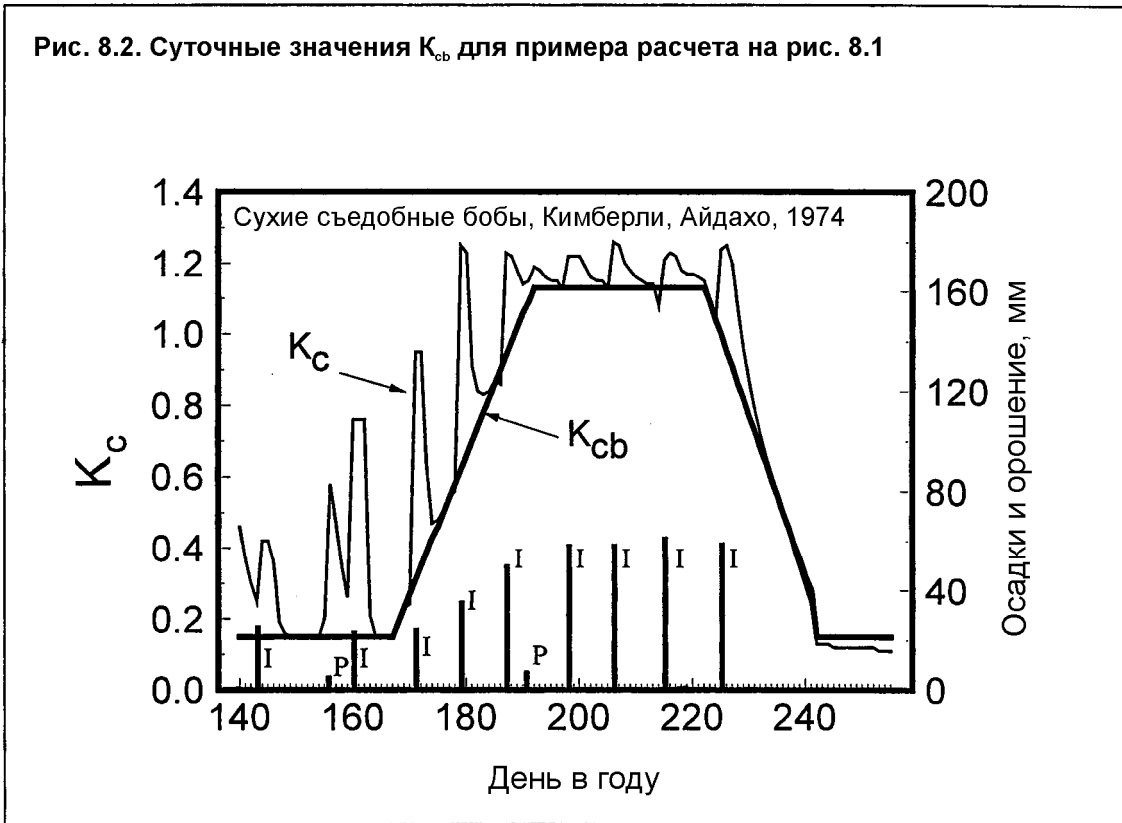
- (1) Ячейки K8 и K9 используют вертикальную функцию для автоматического расчета средней скорости ветра и среднесуточной относительной влажности в середине сезона. Эта функция использует кумулятивные суммы скорости ветра и RH_{min}, рассчитанные в столбцах АО и АР.
- (2) Формула для расчета K_{cb} по каждому дню использует серии утверждений IF для определения порядкового номера дня вегетационного периода. Если день находится в периоде развития или конца вегетации, используется линейная интерполяция.
- (3) Высота культуры на любой день рассчитывается пропорционально отношению величины K_{cb} на этот день к величине K_{cb mid}, умноженной на максимальную высоту растения, находящуюся в ячейке M5. Значение высоты культуры не может быть уменьшено со временем. Следовательно, используется функция MAX() в сравнении с величиной предыдущего дня.
- (4) Величина водоподачи (поделенная на f_w с тем, чтобы отразить высоту столба воды над увлажняемой поверхностью) может быть лишь в начале дня. Это значение основано на решении, принятом в конце предыдущего дня (столбец АН), основанном на том, превзошло ли конечное истощение влаги в предыдущий день имеющуюся доступную влагу (RAW). Водоподача первого дня принимается нулевой.
- (5) Значение f_w определяется в соответствии с последним дождем или поливом, как описано в главе 7.
- (6) Истощение испаряющего слоя (верхний слой почвы) в начале дня принимается равным истощению к концу предыдущего дня, уменьшенному на осадки или орошение, которые принимаются имевшими место в начале дня. Значение D_{e,i} ≥ 0.

(7)	Величина K_c рассчитывается как $K_c = K_{cb} + K_e$ и значение ET_c рассчитывается как $K_c \times ET_o$.
(8)	Глубина эффективной корневой зоны на любой день рассчитывается пропорционально отношению K_{cb} на этот день (выше $K_{c\ min}$) к $K_{cb\ mid} - K_{c\ min}$, как описано в уравнении 1 этого приложения. Глубина корневой зоны не может быть уменьшена со временем. Следовательно, функция $MAX()$ используется в том случае, когда сравнивается величина за предыдущий день.
(9)	"Первое" определение конечного истощения корневой зоны ($D_{r,i}$) определяется из уравнения 85 при допущении отсутствия дренажа и ET_c в отсутствие стресса. Величина $D_{r,i}$ затем пересчитывается в столбце АК, после определения потерь на дренаж и понижения ET_c , чтобы учесть низкое содержание влаги в почве. Значение $D_{r,i}$ в столбце АК представляет истощение корневой зоны к концу дня.
(10)	Водоподача нетто должна базироваться на значении истощения почвенной влаги к концу дня. Предполагается, что полив будет производиться в начале следующего дня. Формула в столбце АН удостоверяет факт, что данный день находится в пределах вегетационного периода. Формула допускает, что в течение второй половины конечного периода вегетационного сезона полив не потребуются. Допущение может быть модифицировано и для других культур. Значение допустимого истощения может иметь различные (обычно более высокие) величины в течение начального периода в сравнении с концом сезона.
(11)	Коэффициент стресса K_s представляет K_s при существующих условиях влажности почвы. Значение K_s снижено ниже 1,0 с использованием уравнения 84, если истощение корневой зоны (после полива или осадков в начале дня) обычно выше водоотдачи (RAW). Считается доказанным, что точка стресса "p" является той же, что принята в MAD.
(12)	Столбцы АО и AP содержат кумулятивные суммы суточной скорости ветра и суточной минимальной относительной влажности. Эти столбцы используются для расчета средних значений u_2 и RH_{min} в течение середины сезона (сноска 1).

ТАБЛИЦА 8.1

Перечень переменных, не включенных в список основных обозначений и сокращений во вступительной части книги

Avail. Water (Наличная влага)	Вода, доступная для растений (полевая влагоемкость - точка завядания) [мм/м]
J_{Plant}	Номер дня в году во время посадки растений [-]
J_{Dev}	Номер дня в году на начальный период развития [-]
J_{Mid}	Номер дня в году на начало середины сезона [-]
J_{Late}	Номер дня в году на начало конечного периода [-]
J_{Harv}	Номер дня в году момент сбора урожая или гибели растения [-]
Max.Ht.	Средняя высота растений в середине периода [м]
MAD в течение начальной стадии	Допустимое осушение в начальный период [-]
MAD после начальной стадии	Допустимое осушение после начального периода (все остальные периоды) [-]
$Root_{min}$	Средняя глубина "эффективной" корневой зоны в начальный период (описываемой как $Z_{r\ min}$) [м]
$Root_{max}$	Максимальная глубина "эффективной" корневой зоны в начальный период (описываемой как $Z_{r\ max}$) [м]



Расчетные суточные значения K_{cb} и K_c показаны на рис. 8.2. Суточное осушение почвы в конце каждого дня рассчитывается в табличном виде и показано на графике рис. 8.3. Рис. 8.3 демонстрирует эффект увеличения корневой зоны по допустимому истощению. Допустимое истощение является тем же, что и доступная влага (RAW), когда принимается допущение, что $MAD = p$, фактору истощения эвапотранспирации. Глубина эффективной корневой зоны рассчитывается для каждого дня как:

$$Z_{r,i} = Z_{r \min} + (Z_{r \max} - Z_{r \min}) \frac{K_{cbi} - K_{cbini}}{K_{cbmid} - K_{cbini}} \quad \text{для } J < J_{mid} \quad (8-1)$$

и

$$Z_{r,i} = Z_{r \max} \quad \text{для } J \geq J_{mid} \quad (8-2)$$

где

$Z_{r,i}$ - эффективная глубина корневой зоны [м];

$Z_{r \min}$ - начальная эффективная глубина корневой зоны (в начале начального периода (посадка));

$Z_{r \max}$ - максимальная эффективная глубина корневой зоны в течение средней части периода (из табл. 22 главы 8);

J - день года [от 1 до 366].

$Z_{r \min}$ - это та же самая переменная $Root_{\min}$, которая используется в уравнении 8.1, а $Z_{r \max}$ - это та же самая $Root_{\max}$. Уравнения 8-1 и 8-2 допускают, что развитие корневой зоны возрастет пропорционально повышению K_{cb} . Это подразумевает, что максимальная эффективная глубина корневой зоны достигается к началу средней части сезона. Могут быть использованы и другие подходы определения Z_r , включая интерполяцию по времени сезона, например:

$$Z_{r,i} = Z_{r \min} + (Z_{r \max} - Z_{r \min}) \frac{J - J_{start}}{J_{max} - J_{start}} \quad \text{для } J_{start} \leq J \leq J_{max} \quad (8-3)$$

и

$$Z_{r,i} = Z_{r,\min} \text{ когда } J < J_{\text{start}} \text{ и } Z_{r,i} = Z_{r,\max} \text{ когда } J \geq J_{\max} \quad (8-4)$$

где

 $Z_{r,i}$ - эффективная глубина корневой зоны [м]; J_{start} - день года, в который начинается повышение $Z_{r,i}$ за пределами $Z_{r,\min}$; J_{\max} - день года, в который достигается максимальная глубина корневой системы.

$Z_{r,\min}$ для однолетних растений должна представлять глубину посева семян плюс дополнительную глубину почвы, которая может поставлять семенам воду по мере роста корней вниз после прорастания.

Величина MAD может быть больше в начальный период, учитывая способность корней некоторых культур извлекать воду при сравнительно низкой влажности в период прорастания и в начальный период с невысоким эффектом стресса. В этом случае принято, что $p = \text{MAD}$.

Период орошения для бобовых принято считать начинающимся в момент посадки и заканчивающимся в середине конечного периода. Следовательно, последняя дата полива приходится на 225-й день. После 225-го дня бобовые демонстрируют лишь очень малый стресс, так как K_c снижается. Коэффициент стресса K_s рассчитывается в столбце AJ таблицы.

Этот пример призван продемонстрировать, как использовать уравнения испарения с почвы в момент планирования поливов. Процедура, используемая для определения графика орошения и используемые допущения, могут не всегда соответствовать требованиям. Читатель может модифицировать процедуру планирования поливов для адаптации к местным условиям.

