

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГЛАВНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ им. А. И. ВОЕЙКОВА

06

Т 78

ТРУДЫ

ВЫПУСК 229

ВЛИЯНИЕ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ
ФАКТОРОВ
НА ФОТОСИНТЕЗ
И ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ
РАСТИТЕЛЬНОГО
ПОКРОВА

Под редакцией
чл.-корр. АН СССР
М. И. БУДЫКО

БИБЛИОТЕКА
Ленинского
Гидрометеорологического
Института



ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

ЛЕНИНГРАД • 1968

557.504.7 + 557.5.132 + 65

УДК 519.25:551.513(061.6)

В сборнике представлены результаты экспедиционных полевых исследований влияния метеорологических факторов на режим растительного покрова и фотосинтез, проведенных летом в 1966 г. Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова при участии специалистов Ленинградского гидрометеорологического и Агрофизического институтов. В сборник включены статьи, в которых излагается методика измерений и расчета, использованная в исследованиях.

Сборник рассчитан на специалистов по метеорологии, физиологии растений, агроклиматологии и по родственным отраслям науки, а также на студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние годы в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, Агрофизическом и Ленинградском гидрометеорологическом институтах выполнялось комплексное исследование влияния метеорологических факторов на продуктивность сельскохозяйственных растений. В ходе этого исследования были проведены наблюдения за режимом фотосинтеза, теплообмена и влагообмена в растительном покрове. Наряду с экспериментальными работами значительное внимание уделялось также теоретическому изучению влияния метеорологических условий на фотосинтез и физическое состояние растительного покрова.

В сборнике публикуются статьи, содержащие материалы экспериментальных исследований, выполненных в 1965—1966 гг.; а также результаты теоретических расчетов взаимодействия растений с окружающей средой.

Работы, вошедшие в сборник, отражают происходящую сейчас перестройку агрометеорологических исследований в направлении более широкого использования в них материалов и методов физической метеорологии.

Н. А. ЕФИМОВА

ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Экспедиционные наблюдения, результаты которых представлены в настоящем сборнике, были проведены для изучения влияния метеорологических факторов на фотосинтетическую продуктивность сельскохозяйственных культур.

Основной задачей экспедиций являлось определение тепло- и влагообмена, режима радиации и интенсивности ассимиляции углекислоты в слое растительного покрова.

Необходимо было также получить ряд метеорологических параметров и характеристик растительного покрова, используемых в расчетах продуктивности фотосинтеза по теоретическому методу, разработанному М. И. Будыко, что позволило бы испытать этот метод на материале непосредственных наблюдений.

Контролем для сравнения результатов определения фотосинтетической продуктивности как по потокам углекислоты, так и по теоретическому методу должны были явиться данные непосредственных изменений прироста биомассы растительного покрова через определенные промежутки времени. Таким образом в комплекс наблюдений были включены:

1) градиентные наблюдения над температурой и влажностью воздуха, а также скоростью ветра на пяти-шести уровнях внутри травостоя и над ним. Наблюдения над температурой и влажностью почвы, необходимые для расчета потока тепла в почву;

2) актинометрические наблюдения над составляющими радиационного баланса по стандартной методике и специальные наблюдения над изменением потоков суммарной радиации, радиационного баланса и фотосинтетически активной радиации внутри травостоя;

3) наблюдения над температурой отдельных элементов растений и растительного покрова в целом;

4) измерения концентрации углекислоты на нескольких уровнях внутри травостоя и над ним с помощью колориметрического и оптико-акустического методов, причем газоанализатор регистрировал непосредственно градиент углекислоты над посевом при одновременном измерении коэффициента турбулентного обмена по теплобалансографу системы АФИ;

5) биометрические наблюдения за фазами развития растений, высотой, густотой стояния растений на единице площади, отборы проб через пять дней для определения распределения площади листьев, стеблей

и колосьев растений по высоте, а также прироста биомассы в сыром и сухом виде.

В 1965 г. наблюдения проводились с 30 июня по 21 июля на поле озимой пшеницы колхоза им. Ленина, Гатчинского района, Ленинградской области. В 1966 г. наблюдения проводились в том же районе в Белогорке на поле озимой ржи Научно-исследовательского института сельского хозяйства северо-западной зоны с 8 июня по 8 июля.

Для установки приборов были выбраны участки с наиболее ровным по высоте и густоте травостоем на расстоянии 200 м от ближайшего края поля. Поле озимой пшеницы имело площадь около 80 га, поле озимой ржи — около 10 га. Озимая пшеница (сорт Приекульская 481) в период наблюдений прошла фазы цветения, налива зерна, молочной спелости; озимая рожь (сорт Вятка) — фазы колошения, цветения, начала налива зерна. Травостой посевов был хорошо развит: высота пшеницы составляла в начале наблюдений 80 см, в конце 120 см, высота ржи — соответственно 80 и 175 см. Рядки озимой пшеницы были ориентированы с юго-юго-запада на северо-северо-восток, озимой ржи — с юго-востока на северо-запад.

Измерения температуры и влажности воздуха производились аспирационными психрометрами с электрическим заводом, которые были подвешены в горизонтальном положении на четырех уровнях (двух внутри и двух над травостоем) в 1965 г. и на шести уровнях (четыре внутри и двух над травостоем) в 1966 г. в двух повторностях на каждой высоте.

Скорость ветра регистрировалась контактными анемометрами на высотах 0,25, 0,50, 1,00, 2,00 и 4,00 м, также в двух повторностях.

Температура поверхности почвы измерялась с помощью шестнадцатиспайного «термопаука» системы АФИ, а на глубинах 5, 10, 15, 20 см — коленчатыми термометрами.

Температура листьев и стеблей определялась с помощью термопауков, а всего растительного покрова — радиометрами с германиевыми фильтрами.

Потоки прямой, рассеянной, отраженной коротковолновой радиации и радиационного баланса измерялись на высоте 1 м над травостоем по стандартной методике.

Измерение суммарной радиации, радиационного баланса и фотосинтетически активной радиации внутри травостоя производились на четырех уровнях в 1965 г. (0,20, 0,45, 0,70 и 0,95 м) и на пяти уровнях в 1966 г. (0,20, 0,45, 0,65, 1,00 и 1,45 м). При этом термоэлектрические пиранометр, балансомер и фотоинтегратор (системы Б. И. Гуляева) были укреплены на переносной рейке, которую при наблюдениях перемещали внутри травостоя, производя на фиксированных уровнях отсчеты, причем на каждом уровне рейку вручную передвигали горизонтально на 1,0—1,5 м вдоль рядка.

Наблюдения над концентрацией CO_2 в 1966 г. производились по колориметрическому методу¹, причем воздух просасывался одновременно с трех уровней; градиент углекислоты над травостоем регистрировался непрерывно при помощи оптико-акустического газоанализатора².

В экспедиции проводились испытания теплобалансографа системы АФИ, усовершенствованного вида, ряда датчиков и регистраторов для дистанционного измерения градиентов температуры и влажности воз-

¹ Ю. Е. Гиршович и К. И. Кобак. Исследование фотосинтетической деятельности агрофитоценоза (см. наст. сб.).

² Ю. Е. Гиршович. Методика исследования углекислотного газообмена растительных сообществ (см. наст. сб.).

духа, а также скорости и пульсаций скорости ветра. Кроме того, был испытан фотопиранометр системы Б. П. Козырева для измерений фото синтетически активной радиации.

Наблюдения проводились ежедневно 10-минутными сериями, приуроченными к началу каждого часа с 8 до 18—19 час. В течение каждой серии производились восемь отсчетов по психрометрам на каждой высоте, анемометры включались на 10 мин., отсчеты температуры почвы производились в начале и конце серии.

В 1965 г. выполнено 156 серий наблюдений с круглосуточным циклом 18—19 июня, в 1966 г. — 263 серии, включая круглосуточные наблюдения 12—13 и 15—16 июня.

Погодные условия в июле 1965 г. отличались большой неустойчивостью — невысокая температура в дневные часы (15—18°), скорость ветра 3—5 м/сек. и значительная облачность. Только последние дни (19—21 июля) были жаркими и малооблачными. Влажность почвы, особенно в верхнем двадцатисантиметровом слое, была низкой (5—10%). Данные наблюдений за июль 1965 г. были осреднены в соответствии с тремя типами погодных условий: прохладная пасмурная погода, температура воздуха в дневные часы 15—17°, облачность 8—10 баллов (за 6, 9, 11, 14, 16, 18 июля); теплая погода с переменной облачностью, температура воздуха 17—20°, облачность 2—7 баллов (за 30 июня, 4, 5, 8, 12, 13, 15, 17 июля); жаркая погода, температура воздуха до 24°, малооблачная (за 19—21 июля).

В 1966 г. период наблюдений по погодным условиям подразделялся также на три типа: прохладная (16—20° в дневные часы) малооблачная погода (с 10 по 17 июня); жаркая (24—26°) засушливая с переменной облачностью в послеполуденные часы погода (с 18 по 26 июня) и теплая (20—22°) со значительной облачностью влажная погода (с 27 июня по 8 июля). Скорость ветра в течение всего периода составляла 2—3 м/сек., только 13 июня был сильный ветер, до 5—7 м/сек. Влажность почвы в период с 15 по 28 июня в верхнем слое (0—20 см) составляла 5—10%.

В экспериментальных работах участвовали сотрудники отдела климатологии ГГО Н. А. Ефимова (начальник экспедиций), В. В. Мухенберг, К. И. Кобак, О. Д. Охотина, Е. И. Багрова, Е. М. Полинская, Л. Н. Гвоздева, Г. В. Менжулин, аспирантка ГГО Г. С. Купченко, сотрудники Агрофизического института Ю. Е. Гиршович, М. Г. Саноян, Л. П. Бобин и сотрудники Ленинградского гидрометеорологического института Ю. А. Курпаков, Н. Д. Азимова, Е. В. Зарубин.

В приложении приведены данные градиентных наблюдений на поле озимой ржи по температуре, влажности воздуха, скорости ветра, температуре почвы.

Г. С. КУПЧЕНКО

НЕКОТОРЫЕ БИОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЗИМЫХ КУЛЬТУР

В комплексе факторов, обуславливающих продуктивность фотосинтеза, наряду с внешними условиями среды и физиологической активностью фотосинтезирующего аппарата большое значение имеет и структура посева, которая в значительной степени определяется площадью листьев на гектар или квадратный метр посева и их распределением по вертикали. От структуры посева зависят величина поглощения солнечной радиации внутри посева и турбулентный обмен, которые оказывают влияние на режим тепла, влаги и углекислоты в растительном покрове. От величины фотосинтезирующей поверхности листьев зависят также интенсивность транспирации, количество ассимилируемой углекислоты и в конечном итоге величина урожая.

Поэтому при решении проблемы повышения продуктивности фотосинтеза большое значение имеет детальное изучение структуры посева и ее взаимосвязи с метеорологическим режимом внутри посева.

В работах, посвященных вопросам агротехники и селекции посевов, приводятся различные биометрические характеристики, но обычно отсутствуют параллельные данные по метеорологическому режиму внутри растительного покрова.

До недавнего времени в большинстве агрометеорологических работ, в которых изучаются связи метеорологических условий с продуктивностью растений, в основном рассматривались такие биометрические характеристики, как фаза развития, высота, густота стояния и хозяйственный урожай. При этом значения метеорологических элементов измерялись в основном на уровне психрометрической будки, что ограничивает возможности выявления связи биологических процессов с условиями среды, в которых непосредственно находятся растения.

Среди наиболее существенных исследований по этому вопросу можно отметить работу А. А. Скворцова [22], который при изучении микроклимата хлопкового поля определял объем, занимаемый растением, и часть площади, которая затеняется растением. Для зерновых он предлагал в отдельных слоях измерять часть растительного покрова, в которой развиваются листья, и часть, занимаемую стеблями и колосьями.

В работах Л. А. Голубевой [4] и Г. В. Белухиной [2] при исследовании связи метеорологических элементов в психрометрической будке и у верхнего края растений в связи с изучением влияния суховея на

продуктивность растений, кроме высоты, густоты стояния и прироста сухой биомассы, визуальнo определялась также облиственность растений.

Е. А. Цубербиллер [26, 27] и О. М. Поповская [18], изучая связь метеорологических элементов с приростом картофеля, вели наблюдения за метеорологическими элементами на картофельном поле. При этом определялась площадь листьев, густота стояния, прирост клубней и ботвы картофеля.

Изучение биометрических характеристик посева получило широкое распространение со времени появления первой количественной теории фотосинтеза, развитой японскими учеными Монси и Саеки [31].

Ю. И. Чирков [28, 29], изучая фитоклимат кукурузного поля, определял густоту стояния, прирост сухой биомассы, площадь листьев и динамику ее нарастания.

Наиболее полные биометрические характеристики кукурузного поля приводятся в работе Ю. К. Росса и М. П. Власовой [20]; в ней содержатся данные о вертикальном распределении площади поверхности и сухой биомассы всех органов растений и их изменений со временем, а также об угле наклона листьев.

Как видно из обзора упомянутых работ, данных измерений биометрических характеристик растительного покрова пока еще недостаточно. Поэтому необходимо проводить дальнейшие экспериментальные исследования на полях сельскохозяйственных культур в различных почвенно-климатических условиях.

В данной работе приводятся некоторые биометрические характеристики посевов озимой пшеницы и озимой ржи и динамики их изменения. В 1965 г. биометрические измерения проводились на производственном посеве озимой пшеницы (сорт Приекульская 481) колхоза им. Ленина, Гатчинского района. Ширина междурядий составляла 15 см. Густота стояния 1000—1200 стеблей на 1 м² посева. В 1966 г. работы проводились на производственном поле озимой ржи (сорт Вятка) Северо-западного института сельского хозяйства, Гатчинского района, Ленинградской области в Белогорке. Посев проведен с шириной междурядий 7,5 см. Густота стояния составляла 530 стеблей на 1 м² поля. Травостой посевов отличался большой однородностью и хорошим развитием.

Статистические характеристики посева

Для определения высоты посева была взята исходная статистическая совокупность из 40 растений, по которым через день определялись высота от поверхности почвы до кончика стебля h_c (вместе с колосом) и высота от почвы до верхушки верхнего листа, находящегося в естественном положении h_L .

Для каждой характеристики были вычислены: средняя величина \bar{h} , стандартное отклонение σ , коэффициент вариации v и построена кривая распределения в виде гистограммы.

Анализ полученных гистограмм показал, что статистические характеристики в основном подчиняются закону нормального распределения. В качестве примера на рис. 1 приведены гистограммы распределения высоты роста h_c для озимой пшеницы и озимой ржи. Для этой же совокупности, состоящей из 40 растений, вычислен объем выборки N_b , при которой ошибка в определении средней величины роста с вероятностью 0,99 не будет превышать 5% [25].

Из статистических данных, приведенных в табл. 1, можно сделать следующие выводы:

1. В связи с тем что в более поздние фазы развития стандартные отклонения σ уменьшаются, а среднее значение продолжает расти, коэффициенты вариации v и объем выборок N_B также уменьшаются, т. е. однородность посева по мере его развития увеличивается. Со времени прекращения роста растений стандартные отклонения, коэффициенты вариации и объемы выборок остаются постоянными.

2. Высота листьев пшеницы h_L по мере развития растений меняется меньше, чем у ржи. Изменчивость высоты листьев у озимой ржи связана с более поздним разворачиванием самого верхнего листа.

3. Объемы выборок N_B зависят от фазы развития и характеристик однородности посева. Выбранную совокупность, равную 40 растениям, можно считать достаточной для получения средних при однородном посеве.

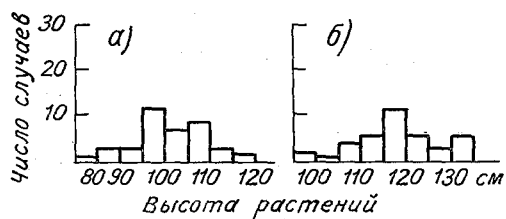


Рис. 1. Гистограмма распределения высоты роста озимой пшеницы (а) и озимой ржи (б).

Таблица 1

Оценка параметров выборочных данных высоты роста стеблей и листьев

Дата	Озимая пшеница, 1965 г.							
	h_c				h_L			
	\bar{h}_c	σ	v	N_B	\bar{h}_L	σ	v	N_B
30 VI	86	7,0	8,1	17	89	4,8	4,5	7
5 VII	102	7,7	7,8	17	95	4,3	4,6	7
10 VII	114	6,3	5,5	7	95	4,7	5,0	7
15 VII	117	5,2	4,4	5	95	3,9	4,1	5
20 VII	117	5,1	4,4	5	95	3,3	3,6	5
Дата	Озимая рожь, 1966 г.							
	h_c				h_L			
	\bar{h}_c	σ	v	N_B	\bar{h}_L	σ	v	N_B
10 VI	105	6,7	6,4	10	108	6,2	5,7	10
12 VI	122	9,8	8,0	17	115	7,5	6,5	13
15 VI	137	8,1	5,9	10	118	11,6	9,8	27
20 VI	165	13,8	8,3	17	128	17,0	13,2	45
25 VI	174	12,3	7,0	13	132	13,2	10,0	27
29 VI	174	12,0	6,8	13	132	14,0	10,6	33

Примечание. x_i — среднее значение случайной величины x_i , где $x_i = h_c, h_L$; σ — стандартное отклонение x_i ; где $i = h_1, h_2$ и др.; $v = \frac{\sigma}{x_i}$ — коэффициент вариации x_i , выраженный в %; N_{B_i} — достаточно большой объем выборки x_i .

Для сравнения статистических характеристик посева одного из участков биометрических измерений и участка проведения актинометрических наблюдений были проведены измерения высоты роста 50 растений на каждом участке. Статистическая обработка результатов, приведенных в табл. 2, показывает, что место, на котором проводились наблюдения,

было относительно однородно, средняя высота растений на нем менялась от 84 до 89 см.

Таблица 2

Оценка данных высоты роста в различных участках поля озимой ржи, 1966 г.

	\bar{h}_c	σ	γ	$h_{c, \text{ макс}}$
Участок 1 (Актинометрические измерения)	89	11,1	12,5	117
Участок 2 (Биометрические измерения)	84	8,3	10,0	103

Вертикальное распределение поверхности элементов растений и биомассы в посевах

Для определения хода нарастания поверхности элементов растений и сухой биомассы бралась совокупность 175 стеблей озимой пшеницы и 76 стеблей озимой ржи. Отбор проб производился в нескольких местах участка. При этом соблюдалось следующее условие. В местах отбора проб на 1 пог. м ряда количество стеблей должно быть одинаковым. Для более детального изучения распределения растительной поверхности и сухой биомассы в посевах срез листьев и стеблей производился через 10—20 см по высоте. Таким образом было получено распределение величин поверхности растений и веса сырой и сухой биомассы в отдельных слоях. В каждом слое рассматривались четыре группы элементов растений: зеленые листья, желтые и сухие листья, стебли и колосья.

На основе полученных данных были построены вертикальные профили общей и фотосинтезирующей листовой поверхности и сухой биомассы, пересчитанные на квадратный метр посева.

Озимая пшеница. Из анализа данных о вертикальном распределении площади всех элементов растений (рис. 2а) следует, что существенного перераспределения поверхности растительного покрова за период наблюдений не происходит. Максимум поверхности элементов растений в течение всего периода наблюдений находится в слое 20—40 см, выше этого слоя площадь поверхности растений уменьшается с высотой почти линейно. Увеличение площади поверхности в отдельных слоях со временем отмечается до фазы налива зерна; при дальнейшем развитии растений площадь их остается без изменения или несколько уменьшается, что связано с высыханием листьев.

В самом нижнем слое (0—20 см) увеличение площади поверхности происходило в основном вследствие утолщения стеблей.

Вертикальное распределение фотосинтезирующей площади листьев представлено на рис. 2б, из которого видно, что максимум площади листьев до фазы налива зерна находится в слое 30—50 см.

В фазу молочной спелости в связи с уменьшением фотосинтезирующей поверхности в слое 20—70 см максимум смещается на высоту 40—80 см. Вверх и вниз от этого слоя площадь листьев уменьшается почти симметрично.

Если проследим за изменением фотосинтезирующей поверхности листьев в течение вегетации, то увидим, что в фазу начала цветения, площадь листьев на единицу посева достигает наибольшего значения

(2,5). После цветения начинается постепенное уменьшение ассимиляционной поверхности. Это может быть обусловлено, с одной стороны, естественным отмиранием листьев (по данным Н. А. Кочергиной, четыре нижних листа у яровой пшеницы существуют 28—36 дней), а с другой, влиянием метеорологических условий. В период налива зерна (молочная спелость) установилась жаркая сухая погода, в связи с чем запасы

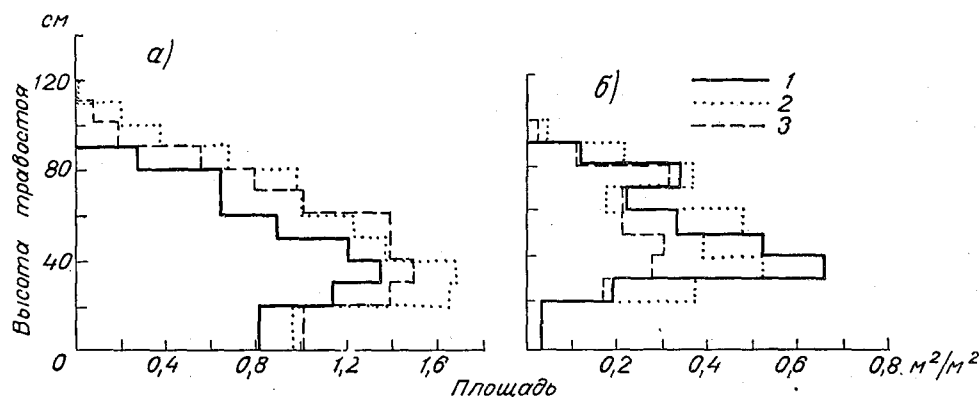


Рис. 2. Вертикальное распределение общей площади элементов растений (а) и фотосинтезирующей площади листьев (б).
1 — 5 VII, 2 — 15 VII, 3 — 20 VII.

влаги в почве значительно уменьшились (табл. 3), что также повлияло на величину фотосинтезирующей поверхности.

Таблица 3

Запасы влаги в слое почвы 0—20 см (в %)

Глубина, см	Озимая пшеница, 1965 г.					Озимая рожь, 1966 г.		
	30 VI	5 VII	10 VII	15 VII	20 VII	11 VI	17 VI	28 VI
0	8,0	10,1	12,1	6,8	2,4	13,6	4,1	12,1
5	7,3	9,2	11,1	7,0	5,9	14,2	7,4	11,3
10	5,4	9,0	9,5	7,3	6,0	15,0	10,2	8,6
15	4,2	8,8	7,4	6,6	5,8	14,9	11,0	5,6
20	4,7	6,7	6,0	6,7	5,5	15,8	11,9	5,9

Перейдем к рассмотрению вертикального распределения биомассы озимой пшеницы в посеве. Из рис. 3 видно, что вертикальные профили сырой и сухой биомассы сходны, т. е. с высотой биомасса постепенно убывает, но на уровне расположения колосьев она несколько увеличивается. Сухая биомасса увеличивалась почти равномерно в каждом слое до фазы цветения, в последующие фазы развития сухое вещество несколько больше увеличивается в репродуктивных органах.

В табл. 4 представлены данные, характеризующие вертикальное распределение процентного содержания сухого вещества в отдельных слоях в каждом элементе растения, из которых следует, что в зеленых листьях, стеблях и колосьях процент сухого вещества с высотой увеличивается, тогда как в желтых листьях процентное содержание сухого вещества с высотой несколько уменьшается. При этом в стеблях содержится 75—78%, а в зеленых листьях от 13 до 5% сухого вещества от

Продернтое содержание сухого вещества в различных частях растений озимой пшеницы

Слой, см	5 VII				10 VII				15 VII				20 VII			
	зеленые листья	желтые листья	стебли	колосья	зеленые листья	желтые листья	стебли	колосья	зеленые листья	желтые листья	стебли	колосья	зеленые листья	желтые листья	стебли	колосья
130—120								36,6				34,6				42,0
120—110							31,0	35,6				47,0			34,0	40,0
110—100				35,0	34,6	33,3	33,9	37,6				34,0			43,0	34,8
100—90			45,0	35,0		43,8	37,6	30,0				34,0			46,2	32,2
90—80	59,5		41,0	32,3	44,5	35,8	31,6	32,8				34,0			48,2	41,5
80—70	40,0		35,0	31,0	33,7	28,3	34,0	34,1				33,4			47,0	37,0
70—60	25,0		28,0	27,3	39,5	27,0	34,6	36,8				33,4			35,5	40,5
60—50	25,0		27,8	27,8	34,1	33,7	34,0	30,0				33,4			36,0	40,5
60—40	26,6		28,2	27,6	34,2	34,6	35,6	31,0				40,0			36,0	39,0
40—30	30,9		28,0		33,7	34,2	35,6	33,0				37,6			36,6	36,6
30—20	33,3		30,5		32,0	33,3	32,8	34,8				33,8			47,0	43,0
20—0	34,8		33,7		32,6	30,8	33,9	33,9				35,0				

общего веса сухой надземной биомассы (фазы цветение—молочная спелость).

Озимая рожь. Вертикальное распределение суммарной площади всех частей растения представлено на рис. 4 а. В течение всего периода

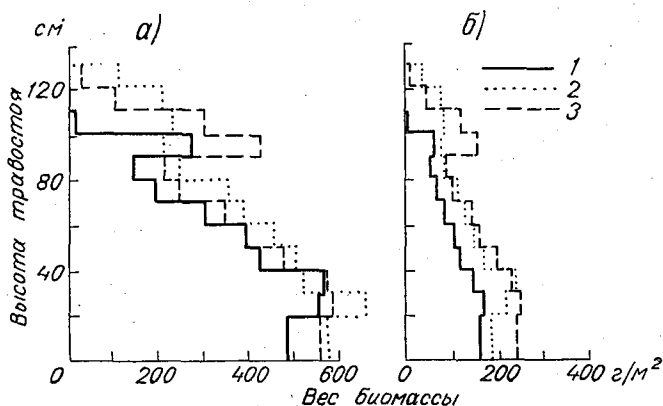


Рис. 3. Вертикальное распределение сырой (а) и сухой (б) надземной биомассы озимой пшеницы.
1 — 5 VII, 2 — 15 VII, 3 — 20 VII.

наблюдений максимальная площадь листьев и стеблей отмечалась в слое 30—50 см, выше этого слоя общая площадь с высотой уменьшалась почти линейно. Если рассматривать изменение общей площади

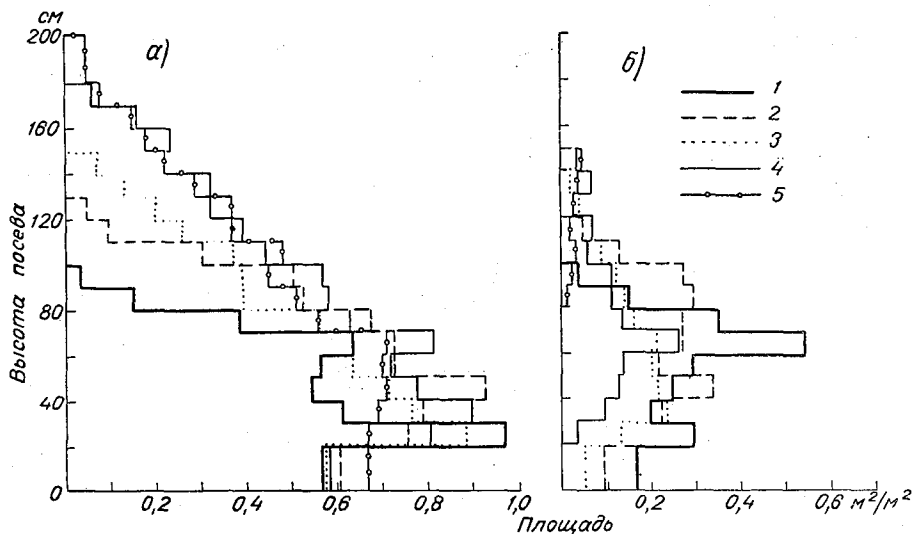


Рис. 4. Вертикальное распределение общей площади элементов растений (а) и фотосинтезирующей площади листьев (б) озимой ржи.
1 — 6 VI, 2 — 10 VI, 3 — 15 VI, 4 — 20 VI, 5 — 1 VII.

растений в каждом слое в течение вегетации, то увидим, что общая площадь увеличивается до цветения; в последующем развитии в связи с подсыханием листьев наблюдается некоторое уменьшение ее.

Вертикальное распределение площади фотосинтезирующих листьев дано на рис. 4 б. Положение максимума площади листьев меняется от 30 до 110 см. От слоя максимума площадь листьев уменьшается почти

симметрично. Нарастание фотосинтезирующей площади листьев наблюдалось до фазы колошения, когда наибольшая относительная площадь достигала 2,4, в фазу колошения она оставалась без изменения и затем постепенно уменьшалась до фазы налива зерна (0,1 м² на 1 м²).

Площадь поверхности элементов растения меняется в течение вегетации. На рис. 5 представлены вертикальные площади всех элементов растения. В период колошения площадь листьев и стеблей почти равна, к концу вегетации основную площадь растительной массы составляют стебли.

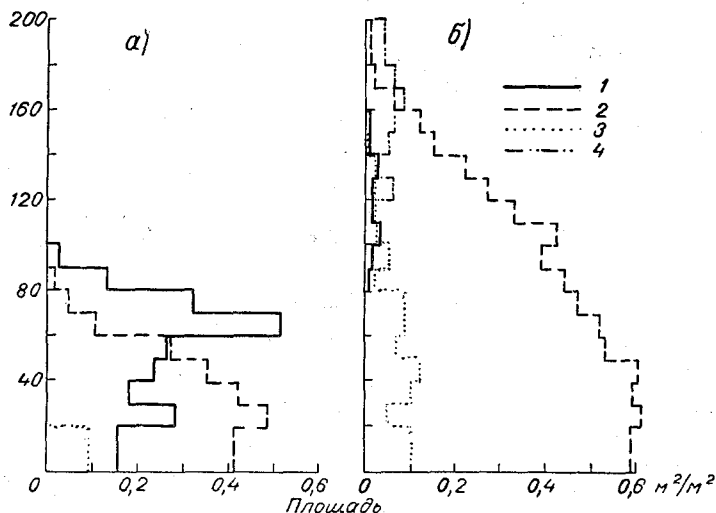


Рис. 5. Вертикальное распределение площадей отдельных элементов растений озимой ржи.

а) 6 VI, б) 1 VII; 1 — зеленые листья, 2 — стебли, 3 — желтые и сухие листья, 4 — колосья.

Рассмотрим каким образом распределяется биомасса озимой ржи по высоте. В табл. 5, 6 приведены данные о распределении суммарной биомассы по слоям, из которых следует, что сухая биомасса с высотой постепенно уменьшалась до фазы колошения. В последующие фазы развития сухая масса с высотой уменьшается, но на высоте колосьев она снова возрастает.

Таблица 5

Вертикальное распределение биомассы сухого вещества озимой пшеницы (г/м²) 1965 г.

Слой, см	5 VII	10 VII	15 VII	20 VII
130—120		3,6	37,4	11,1
120—110		27,7	75,0	44,6
110—100	5,2	71,5	82,1	125,2
100—90	61,3	63,9	73,9	155,4
90—80	48,5	67,1	82,3	98,5
80—70	65,9	76,5	115,1	103,7
70—60	83,7	157,6	128,3	145,3
60—50	106,7	220,7	156,0	159,2
50—40	116,1	161,6	172,0	200,6
40—30	147,4	192,0	238,4	236,0
30—20	170,0	214,3	219,1	242,9
20—0	320,3	374,4	386,2	476,4
Сумма	1125,1	1630,9	1765,8	1998,9

Таблица 6

Вертикальное распределение биомассы сухого вещества озимой ржи ($\text{г}/\text{м}^2$) 1966 г.

Слой, см	6 VI	10 VI	15 VI	20 VI	25 VI	1 VII
200—180				5,5	14,7	35,7
180—170				29,3	29,1	38,2
170—160				27,1	27,1	40,8
160—150			2,2	38,2	33,6	35,4
150—140			19,7	27,3	21,1	37,6
140—130			21,1	32,2	45,2	34,2
130—120		6,2	30,7	35,3	33,4	35,4
120—110		17,2	27,3	37,1	40,5	45,2
110—100		29,6	30,5	38,4	41,6	46,6
100—90	3,2	25,6	32,4	47,1	49,6	49,6
90—80	10,2	44,5	39,2	50,5	54,0	51,2
80—70	23,3	46,2	44,8	55,4	64,9	58,6
70—60	41,0	49,0	43,5	67,0	73,0	68,3
60—50	40,3	47,6	48,4	70,0	73,8	69,6
50—40	42,8	53,2	57,8	76,4	80,6	73,6
40—30	47,5	55,1	61,0	87,0	82,7	76,9
30—20	60,0	61,2	72,3	92,1	94,5	87,9
20—0	136,4	131,2	153,3	200,6	185,3	175,8
Сумма	404,7	566,6	684,2	1016,5	1044,7	1060,6

Если проследить за увеличением веса сухой биомассы в динамике по слоям, то увидим, что после цветения сухое вещество больше накапливается в репродуктивных органах, чем в листьях и стеблях.

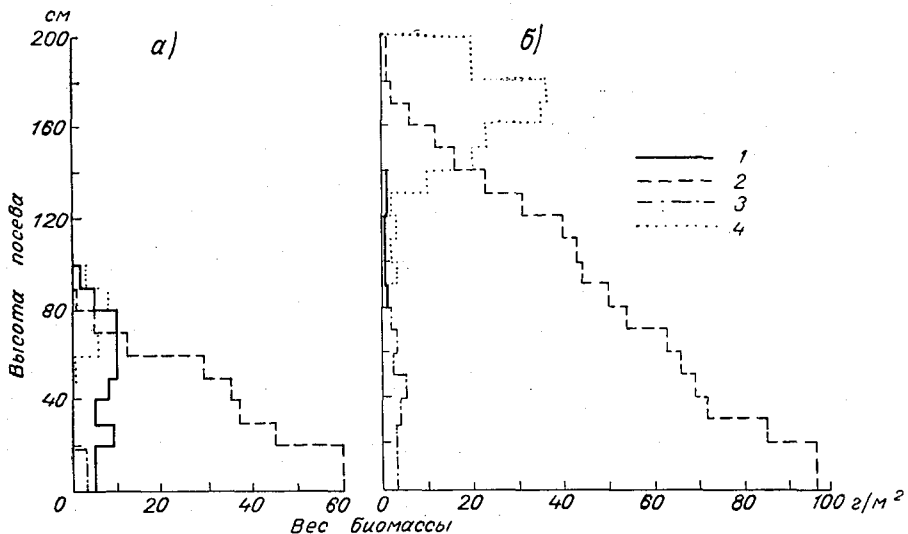


Рис. 6. Вертикальное распределение сухой биомассы элементов растения озимой ржи.

а) 6 VI, б) 1 VII; 1 — зеленые листья, 2 — стебли, 3 — желтые и сухие листья, 4 — колосья.

Вертикальное распределение сухой биомассы всех элементов растений озимой ржи в разные периоды вегетации представлено на рис. 6. Из рис. 6 видно, что вес стеблей составляет большую часть (от 70 до 84%) веса сухой надземной биомассы. Значительно изменился вес

зеленых листьев за период наблюдений (от 20 до 1%); относительный же вес колосьев почти не менялся.

Вертикальное распределение процента сухого вещества в отдельных органах растения приводится в табл. 7, из которой следует, что процент сухого вещества в стеблях, зеленых листьях и колосьях с высотой увеличивается, в желтых и сухих листьях, наоборот, процент сухого вещества с высотой уменьшается. Отметим также, что процент содержания сухого вещества в колосьях несколько ниже, чем в листьях и стеблях и наблюдалось это различие до конца вегетации.

В результате анализа вертикального распределения площади листьев и стеблей и сухой биомассы озимой пшеницы и озимой ржи выявился ряд общих закономерностей: максимум поверхности растительного покрова у обеих культур располагается на высоте 30—50 см, выше этого слоя поверхность уменьшается почти линейно с высотой.

Высота расположения максимума фотосинтезирующей поверхности меняется в течение вегетации. Уменьшение листовой поверхности от слоя с максимумом происходит почти симметрично в обе стороны, эта закономерность более четко выражена у озимой ржи.

Индекс общей площади листьев и стеблей в период налива зерна у озимой пшеницы составлял 11,1, а у озимой ржи 8,6.

Близкие по величине индексы общей площади при разной густоте стояния означают, что части объема, занимаемые растительной поверхностью в приземном слое, были почти равными.

Относительная площадь зеленых листьев (фаза колошения) равна 2,5 для озимой пшеницы и 2,4 для озимой ржи.

Отношение площади листьев к площади стеблей зависит от фазы развития, так от колошения до конца цветения оно изменилось от 0,7 до 0,3 у озимой пшеницы и от 0,6 до 0,2 у озимой ржи.

Сухая биомасса с высотой убывает до фазы колошения, в последующие фазы развития на уровне расположения колосьев она несколько увеличивается (табл. 5, 6). Процентное содержание сухого вещества (от сырого веса) с высотой возрастает (табл. 4, 7).

Динамика развития и продуктивность посевов озимой пшеницы и озимой ржи

На основе проведенных биометрических измерений были построены графики связи между высотой роста и площадью листьев, высотой роста и сухой биомассой.

Данные табл. 8 показывают, что рост листьев и стеблей зависит от фазы развития. Интенсивный рост листьев наблюдался до цветения, рост стеблей в фазу цветения еще продолжался, но скорость роста несколько уменьшилась по сравнению с предыдущими фазами развития.

Из рис. 7 видно, что с начала периода интенсивного роста листьев озимой ржи и до момента его прекращения, в который относительная площадь листьев имела наибольшее значение (2,4), нарастание их площади во времени шло почти линейно, причем нарастание суммарной ассимиляционной поверхности листьев и стеблей было пропорционально увеличению высоты роста. Наибольшая общая площадь ассимиляционной поверхности наблюдалась в фазу цветения, т. е. в момент прекращения роста стеблей.

Так как для процесса роста характерно увеличение размеров растения и количества органического вещества [12], [3], попытаемся определить связь между ними. Как показывает рис. 8, зависимость между изменением высоты роста и количеством сухой надземной биомассы до цветения, т. е. в первую половину вегетации, почти линейная.

219633

Динамика высоты роста озимой пшеницы и озимой ржи по фазам развития (см)

	колосение		Цветение								Налив зерна								Молочная спелость			
	28 VI	30 VI	2 VII	4 VII	5 VII	6 VII	7 VII	8 VII	9 VII	10 VII	11 VII	12 VII	13 VII	14 VII	15 VII	16 VII	17 VII	18 VII	19 VII	20 VII	21 VII	
Озимая пшеница, 1965 г.																						
Средняя высота, см:	88	89	92	93	94	95	95	95	95	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94
листьев																						
стеблей	78	86	91	98	102	107	109	111	112	113	115	116	116	117	117	117	117	117	117	117	117	117
Максимальная высота, см:	85	100	107	113	118	130	123	126	127	128	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130
стеблей																						
Озимая рожь, 1966 г.																						
Средняя высота, см:	35	83	102	108	115	119	119	119	119	123	123	123	128	132	132	132	132	132	132	132	132	132
листьев																						
стеблей		80	94	105	119	127	130	137	146	146	153	163	172	174	175	175	175	175	175	175	175	175
Максимальная высота, см:		100	111	121	135	144	144	144	144	161	166	185	196	199	199	199	199	199	199	199	199	199
стеблей																						

Выход в трубку

Колосение

Цветение

Налив зерна

24 V

6 VI

8 VI

10 VI

12 VI

13 VI

14 VI

15 VI

17 VI

18 VI

20 VI

23 VI

25 VI

26 VI

29 VI

3 VII

Можно предполагать, что найденная зависимость (для данной культуры) будет сохраняться для почвенно-климатической зоны при такой же густоте стояния стеблей на единице площади посева. Наличие

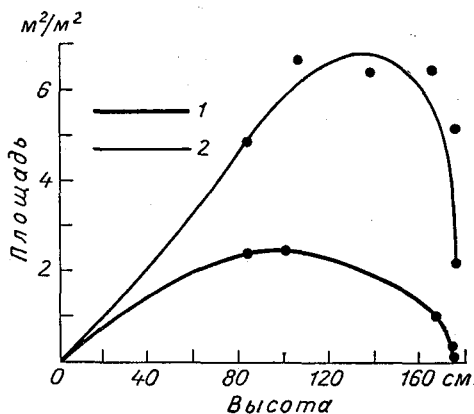


Рис. 7. Зависимость между высотой роста и нарастанием фотосинтезирующей площади листьев (1) и суммарной фотосинтезирующей площадью листьев и стеблей (2) озимой ржи.

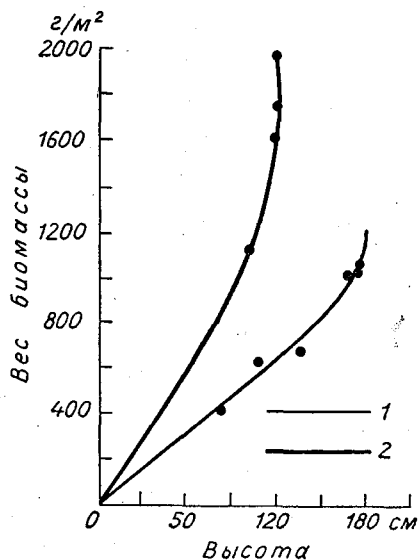


Рис. 8. Связь высоты роста с сухой надземной биомассой озимой пшеницы (1) и озимой ржи (2).

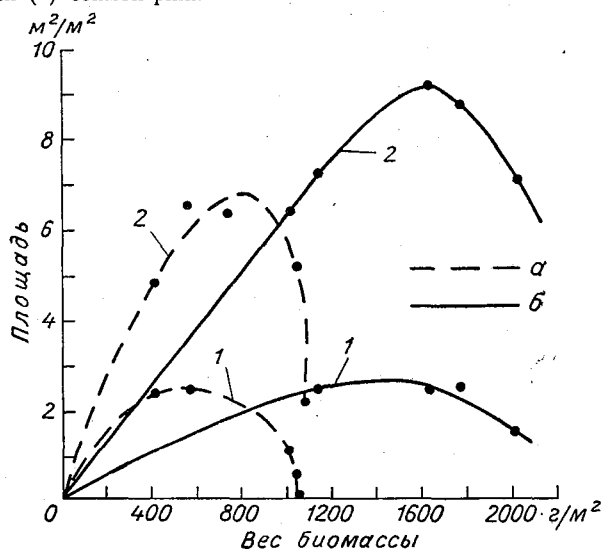


Рис. 9. Зависимость между фотосинтезирующей площадью листьев и стеблей и сухой надземной биомассой озимой ржи (а) и озимой пшеницы (б). 1 — фотосинтезирующая площадь листьев, 2 — фотосинтезирующая площадь листьев и стеблей.

прямой связи между величиной площади листьев и урожаем отмечалось во многих работах [1, 14, 15, 16, 24].

На рис. 9 показана зависимость между площадью листьев, суммарной площадью листьев и стеблей и сухой надземной биомассой.

Можно отметить, что прирост сухой биомассы тесно связан с изменением как площади листьев, так и суммарной площади листьев и стеблей.

Для определения чистой продуктивности фотосинтеза озимой пшеницы, кроме надземной биомассы, учитывался также вес стеблей, остающихся около корней при срезании надземной массы, и корней. Для фазы цветения получены следующие величины: вес надземной сухой биомассы составляет 79,9%, вес стеблей у корней 9,6% и вес корней 10,5% общего веса сухой биомассы.

Учитывая полученные данные по озимой пшенице и данные Н. А. Кочергиной и А. И. Коровина для яровой пшеницы, приведенные в табл. 9 и 10, был рассчитан общий вес сухой биомассы для озимой ржи.

Таблица 9

Отношение (%) веса корней к весу надземной части растения яровой пшеницы в динамике (по Н. А. Кочергиной)

Вариант опыта	Всходы	Кущение	Начало выхода в трубку	Полный выход в трубку	Колошение	Спелость	
						молочная	восковая
Контроль	100	57,1	11,2	15,6	8,6	6,2	7,5

Таблица 10

Урожай в его распределение между зерном, соломой и корнями пшеницы на песчаной и глинистой почвах (по А. И. Коровину)

Почва		Общая масса	В том числе		
			зерно	солома	корни
Песчаная	Воздушно-сухой вес, г/сосуд . .	36,2	13,4	18,8	4,0
	% от общей массы	100	37	52	11
Глинистая	Воздушно-сухой вес, г/сосуд . .	37,3	12,9	20,3	4,1
	% от общей массы	100	34,6	54,5	10

Из данных табл. 11 и 12 видно, что величина чистой продуктивности фотосинтеза в течение вегетации у озимой ржи колебалась от 9,6 до 26,7 г/м² за сутки. В ходе изменения чистой продуктивности фотосинтеза у обеих культур в фазу цветения отмечалось снижение продуктивности. Подобное явление наблюдалось и у других культур (Катунский, 9).

Повышение чистой продуктивности фотосинтеза после цветения связано как с интенсификацией образования репродуктивных органов, а также с уменьшением площади листьев.

Большие приросты у озимой пшеницы отчасти являются результатом того, что активная площадь листьев у пшеницы сохранялась до фазы молочной спелости, в то время как у озимой ржи она быстро уменьшалась после колошения.

На основании проведенного анализа получен ряд связей и закономерностей между различными биометрическими характеристиками.

Таблица 11

Динамика продуктивности сухого вещества озимой пшеницы
1965 г. (г/м²)

Дата	Общий вес	Прирост, г/м ²	Чистая продуктив- ность фотосинтеза, г/м ² ·сутки
5 VII	150,2		
10 VII	1905,4	238,4	17,6
15 VII	2343,0	437,6	32,4
20 VII	2500,9	157,9	14,9

Таблица 12

Динамика продуктивности сухого вещества озимой ржи
1966 г. (г/м²)

Дата	Общий вес	Прирост, г/м ²	Чистая продуктив- ность фотосинтеза, г/м ² ·сутки
6 VI	506,7		
10 VI	684,6	177,9	18,6
20 VI	1165,5	480,9	26,7
25 VI	1208,7	43,2	9,6
1 VI	1226,6	17,9	12,0

Выявление подобных закономерностей с учетом фаз развития для различных почвенно-климатических зон и областей даст возможность перейти к определению площади листьев и прироста сухого вещества по данным высоты роста и густоты стояния, широко определяемым на агрометстанциях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бегишев А. Н. Работа листьев разных сельскохозяйственных растений в полевых условиях. Труды Института физиологии растений им. К. А. Тимирязева. АН СССР, т. 8, вып. 1, 1953.
2. Белухина Г. В. Связь между значениями метеорологических элементов в психрометрической будке и у верхнего края растений в дни с суховеями. Труды ЦИП, вып. 42 (68), 1955.
3. Генкель П. А. Физиология растений с основами микробиологии. Учпедгиз, М., 1962.
4. Голубева Л. А. Особенности фитолимата орошаемой и неорошаемой яровой пшеницы. Метеорология и гидрология, № 12, 1951.
5. Будыко М. И., Гандин Л. С. Об учете закономерностей физики атмосферы в агроклиматических исследованиях. Метеорология и гидрология № 11, 1964.
6. Будыко М. И., Гандин Л. С. К теории фотосинтеза в слое растительного покрова. Докл. АН СССР, т. 164, № 2, 1965.
7. Будыко М. И., Гандин Л. С., Ефимова Н. А. Применение физических методов для агроклиматических показателей. Метеорология и гидрология № 5, 1966.
8. Дорохов Л. М. Жизнь сельскохозяйственных растений. Изд. «Штинца», 1962.
9. Катунский В. М. Интенсивность фотосинтеза как основной показатель углеродного питания растений. Сб. работ по физиол. растений, посвящ. памяти К. А. Тимирязева, М.—Л., Изд. АН СССР, 1941.

10. Коровин А. И. Регулирование длины вегетационного периода и повышение урожайности сельскохозяйственных культур на Севере. Физиологические основы северного растениеводства. 1965.
11. Кочергина Н. А. Развитие корневой системы и листового аппарата у сортов яровой пшеницы в зависимости от различных условий выращивания. Автореферат. СХИ, 1959.
12. Любименко В. Н. К теории приспособления в растительном мире. Природа, 5—6, 1933.
13. Наставление Гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 11, 1957.
14. Ничипорович А. А. Световое и углеродное питание растений (фотосинтез). Изд. АН СССР, М., 1955.
15. Ничипорович А. А. и др. Фотосинтетическая деятельность растений в посевах. 1961.
16. Ничипорович А. А. О путях повышения продуктивности фотосинтеза в посевах. Сб. «Фотосинтез и вопросы продуктивности растений». Изд. АН СССР, 1963.
17. Ничипорович А. А. Задачи работ по изучению фотосинтетической деятельности растений как фактора продуктивности. Сб. «Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности». Изд. «Наука», М., 1966.
18. Поповская О. М. К методике оценки условий произрастания картофеля в центральных областях территории СССР. Труды ЦИП, вып. 53, 1957.
19. Рубин С. С., Ильченко В. А. Некоторые вопросы биологии корневой системы озимой пшеницы. Сельскохозяйственная биология, № 2, 1966.
20. Росс Ю. К., Власова М. П. Биометрическая характеристика и динамика развития посева кукурузы. Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности. Изд. «Наука», М., 1966.
21. Савина С. С. Определение площади листьев зерновых культур по материалам наблюдений сети агрометстанций. Метеорология и гидрология, № 5, 1966.
22. Скворцов А. А. Орошение сельскохозяйственных полей и микроклимат. Гидрометеоздат, 1964.
23. Строгонова Л. Е. Основные элементы фотосинтетической продуктивности картофеля. Сб. «Проблемы фотосинтеза». Изд. АН СССР, 1959.
24. Устенко Г. П. и Гайдуков Г. Ф. Формирование и работа фотосинтетического аппарата растений кукурузы в посевах. Сб. «Проблема фотосинтеза». Изд. АН СССР, 1959.
25. Урбах В. Ю. Биометрические методы. Изд. «Наука», 1964.
26. Цубербиллер Е. А., Власова В. А. К методике агрометеорологического обоснования агротехники возделывания картофеля в подмосковье. Труды ЦИП, вып. 53, 1965.
27. Цубербиллер Е. А. К вопросу о формировании агроклимата на картофельном поле. Труды ЦИП, вып. 72, 1958.
28. Чирков Ю. И. Формирование фитолимата на посевах кукурузы. Труды Московской ГМО, вып. 1, 1960.
29. Чирков Ю. И. Основы долгосрочного агрометеорологического прогноза урожая зерна кукурузы. Метеорология и гидрология, № 9, 1965.
30. Grouwer R. Distribution of dry matter in the plant. Netherlands Journal of Agricultural Science. Vol. 10, No. 5. Special Issue. 1962.
31. Monsi M., Saeki T. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. Japan J. Bot., 14, 1953, 22—52.

Н. А. ЕФИМОВА

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА НА ПОЛЯХ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ И ОЗИМОЙ РЖИ

Режим основных метеорологических элементов в слое растительного покрова зависит от высоты и густоты травостоя, а также от распределения по высоте элементов растений — листьев, стеблей, колосьев — в единице объема. В то же время обусловленный особенностями травостоя режим радиации, турбулентного обмена и углекислоты в значительной степени определяет фотосинтетическую продуктивность и биологический урожай сельскохозяйственных культур.

В последнее время опубликован ряд работ [5, 14, 15], в которых рассматривается зависимость продуктивности сельскохозяйственных культур от метеорологических условий. Для успешного решения этой проблемы представляется целесообразным для определения зависимости продуктивности сельскохозяйственных растений от метеорологических факторов провести изучение суточного хода процесса фотосинтеза, его зависимости от фаз развития растений, погодных условий и особенностей структуры посевов. При этом определение ассимиляции углекислоты может производиться также метеорологическим методом — на основании расчета потоков углекислоты (по данным градиентных наблюдений над концентрацией CO_2 внутри травостоя и над ним) по уравнению турбулентной диффузии.

Таким образом, основные метеорологические характеристики в растительном покрове, а именно: градиенты температуры, влажности воздуха, составляющие теплового баланса, на основании которых рассчитывается коэффициент турбулентного обмена, определяющий потоки углекислоты, оказываются самым тесным образом связанными с интенсивностью ассимиляции углекислоты в слое растительного покрова.

В вводной статье¹ была дана характеристика района, погодных условий и методики экспедиционных наблюдений метеорологического режима на полях озимой пшеницы (июль 1965 г.) и озимой ржи (июнь—июль 1966 г.) В статье Г. С. Купченко² приведены биометрические характеристики травостоя этих культур.

Рассмотрим режим температуры, влажности воздуха и скорости ветра в травостое озимой пшеницы и озимой ржи. В соответствии

¹ Н. А. Ефимова. Полевые исследования метеорологического режима растительного покрова (см. наст. сб.).

² Г. С. Купченко. Некоторые биометрические характеристики озимых культур (см. наст. сб.).

с выделенными типами погоды было произведено осреднение материала наблюдений в дневные, утренние и вечерние часы за периоды прохладной облачной погоды (6, 9, 11, 14, 16, 18 июля), теплой с переменной облачностью (4, 5, 8, 12, 13, 15, 17 июля) и жаркой малооблачной погоды (19, 20, 21 июля) в 1965 г. и для периодов с прохладной малооблачной (10—17 июня), жаркой малооблачной (18—26 июня) и теплой облачной (28 июня—8 июля) погодой в 1966 г.

На рис. 1 представлены вертикальные профили метеорологических элементов в дневные часы по наблюдениям на поле озимой ржи. Вне

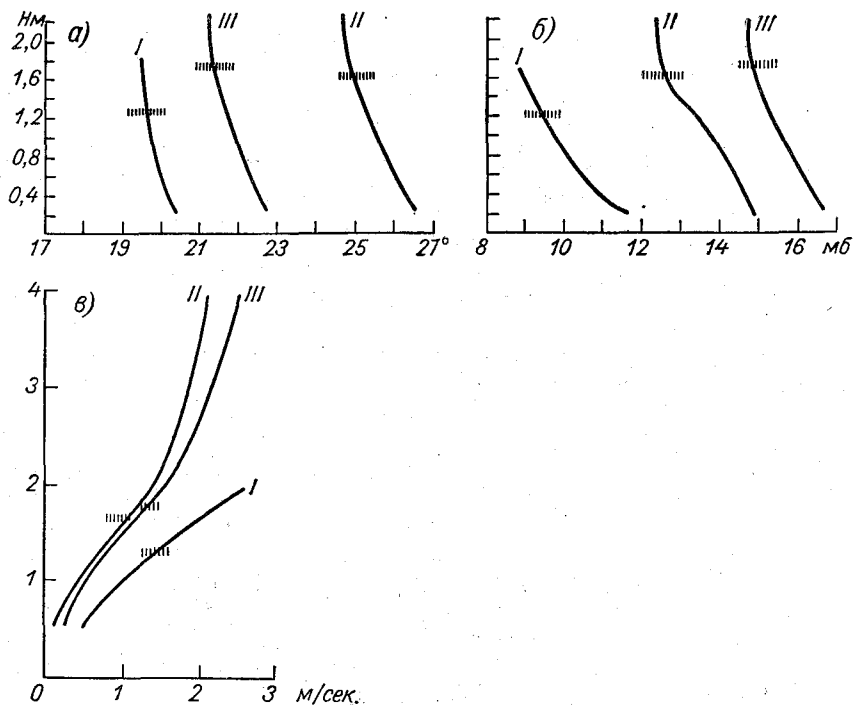


Рис. 1. Вертикальные профили температуры воздуха (а), упругости водяного пара (б) и скорости ветра (в) на поле озимой ржи в дневные часы (11—15 час.), осредненные за периоды: 10—17 VI (I), 18—26 VI (II), 28 VI—8 VII (III).

зависимости от типа погодных условий отмечается плавное изменение температуры, влажности воздуха и скорости ветра с высотой в слое растительного покрова. При этом самые высокие значения температуры, и влажности воздуха отмечаются вблизи поверхности почвы. Градиенты температуры и влажности воздуха закономерно изменяются в зависимости от типа погодных условий и фаз развития растений. Так, по наблюдениям на поле озимой ржи в 1966 г. в первый период — при прохладной солнечной погоде — в фазу колошения при наиболее интенсивном росте и развитии растений и достаточном увлажнении почвы градиенты температуры малы, а влажности воздуха велики, что объясняется большими затратами тепла на транспирацию. В период же жаркой засушливой погоды в фазы цветения и начала налива зерна при значительном уменьшении запасов влаги в почве транспирация уменьшается, вследствие чего увеличиваются градиенты температуры и уменьшаются градиенты влажности воздуха.

Такой плавный, близкий к линейному, характер изменения метеорологических элементов с высотой обусловлен соответствующим распределением элементов растительного покрова в единице объема, занимаемой этими растениями. Характерной особенностью травостоя озимой пшеницы и озимой ржи в фазы колошения, цветения и налива зерна является равномерное уменьшение с высотой площади поверхности листьев и стеблей, причем наибольшая площадь листьев и стеблей располагается на уровне нижней трети высоты растений¹. Таким образом, структура посева, а именно распределение поверхности листьев и стеблей по вертикали, в значительной степени определяет режим основных метеорологических элементов в травостое сельскохозяйственных культур.

На основании наблюдений на поле озимой пшеницы в 1965 г. проводились сравнения результатов измерений градиентов температуры и влажности воздуха с помощью аспирационных психрометров и полупроводниковых датчиков теплобалансографа системы АФИ [8]. Результаты этого сравнения более подробно изложены в работе [3], где показано удовлетворительное согласование градиентов температуры воздуха, определенных этими двумя методами, и меньшая согласованность градиентов влажности в дневные часы; в ночные часы оба метода дают одинаковые значения градиентов как температуры, так и влажности воздуха. В табл. 1 приведены значения градиентов температуры и влажности воздуха и всех составляющих теплового баланса, определенных по стандартной методике и по данным теплобалансографа на основании круглосуточных наблюдений 18—19 июня 1965 г.

Как видно из таблицы, четко выраженный суточный ход градиентов и составляющих теплового баланса по данным теплобалансографа удовлетворительно согласуется с данными, полученными по стандартной методике. При этом хорошо совпадает время изменения направления потоков тепла и влаги между подстилающей поверхностью и атмосферой. Некоторые расхождения обусловлены, очевидно, влиянием переменной облачности, при которой случайные ошибки измерений возрастают.

Таким образом, испытания теплобалансографа подтвердили целесообразность применения дистанционных приборов при проведении теплобалансовых наблюдений в травостое сельскохозяйственных культур. В то же время, они подтвердили выводы, сделанные в работах [6, 7], о возможности применения стандартной методики для наблюдений на сельскохозяйственных полях.

Результаты испытаний дистанционных датчиков для регистрации градиентов температуры и влажности воздуха, сконструированных сотрудниками ЛГМИ, представлены в настоящем сборнике².

Данные градиентных наблюдений были использованы для расчетов теплового баланса на полях озимой пшеницы и озимой ржи, выполненных по общепринятой методике [11].

На рис. 2 представлен суточный ход радиационного баланса R , потока тепла в почву B , затраты тепла на испарение LE и турбулентного потока тепла P (определенного по замыканию уравнения теплового баланса) на поле озимой ржи в июне—июле 1966 г. при разных типах погодных условий. Суточный ход радиационного баланса и потока

¹ Г. С. Купченко. Некоторые биометрические характеристики озимых культур (см. наст. сб.).

² Н. Д. Азимова, Е. В. Зарубин и Л. Г. Качурин. Определение структурных и градиентных характеристик внутри растительного покрова (см. наст. сб.).

Таблица 1
 Значения градиентов температуры и влажности воздуха и составляющих теплового баланса по данным серийных наблюдений 18—19 июля 1965 г.

Время	По стандартным приборам						По теплобалансографу					
	Δε мб	ΔT°	R	B	LE	P	Δε мб	ΔT°	R	B	LE	P
9 00—9 10	0,4	0,5	0,26	0,04	0,12	0,10	0,2	0,4	0,25	0,03	0,10	0,12
10 00—10 10	0,2	0,5	0,35	0,04	0,13	0,19	0,2	0,4	0,28	0,03	0,11	0,14
11 00—11 10	0,6	0,6	0,41	0,04	0,23	0,14	0,3	0,4	0,43	0,03	0,22	0,18
12 00—12 10	0,0	0,2	0,26	0,03	0,14	0,09	0,1	0,3	0,29	0,03	0,09	0,17
13 00—13 10	0,3	0,5	0,30	0,02	0,11	0,17	0,3	0,6	0,20	0,02	0,08	0,10
14 30—14 40	0,5	0,3	0,40	0,00	0,18	0,11	0,4	0,5	0,42	0,01	0,22	0,18
15 00—15 10	0,2	0,5	0,60	0,00	0,23	0,37	0,2	0,5	0,48	0,01	0,18	0,29
16 00—16 10	0,4	0,6	0,41	0,00	0,21	0,20	0,3	0,6	0,38	0,01	0,16	0,21
17 00—17 10	0,6	0,2	0,05	-0,02	0,05	0,01	0,3	0,2	0,06	0,00	0,04	0,02
18 00—18 10	0,6	0,5	0,36	-0,01	0,22	0,15	0,3	0,1	0,20	-0,01	0,17	0,04
20 35—20 45	0,6	-0,1	-0,02	-0,05	0,02	0,01	0,4	-0,1	-0,01	-0,04	0,02	0,01
22 00—22 10	0,3	-0,6	-0,08	-0,06	—	—	0,3	-0,6	-0,08	-0,05	—	—
0 00—0 10	0,3	-0,5	-0,08	-0,03	—	—	0,2	-0,7	-0,08	-0,04	—	—
2 00—2 10	-0,3	-0,6	-0,08	-0,03	-0,03	-0,02	-0,3	-0,7	-0,08	-0,03	-0,02	-0,03
4 00—4 10	-0,4	-0,9	-0,05	-0,02	-0,01	-0,02	-0,4	-0,9	-0,03	-0,03	-0,01	0,01
6 00—6 10	0,1	0,2	0,04	0,04	0,00	0,00	0,1	0,2	0,06	0,03	0,01	0,02
8 00—8 10	0,9	0,2	0,23	0,05	0,16	0,02	0,4	0,2	0,24	0,04	0,17	0,05

тепла в почву в основном определяется условиями облачности, в зависимости от изменения этих составляющих изменяются затраты тепла на испарение и поток тепла в воздух. Наиболее плавный суточный ход характерен для условий погоды 10—17 июня.

Расход тепла на испарение — транспирацию — зависит не только от энергетических ресурсов и запасов влаги в почве, но и от фазы развития растений. По данным наших наблюдений в фазы колошения и

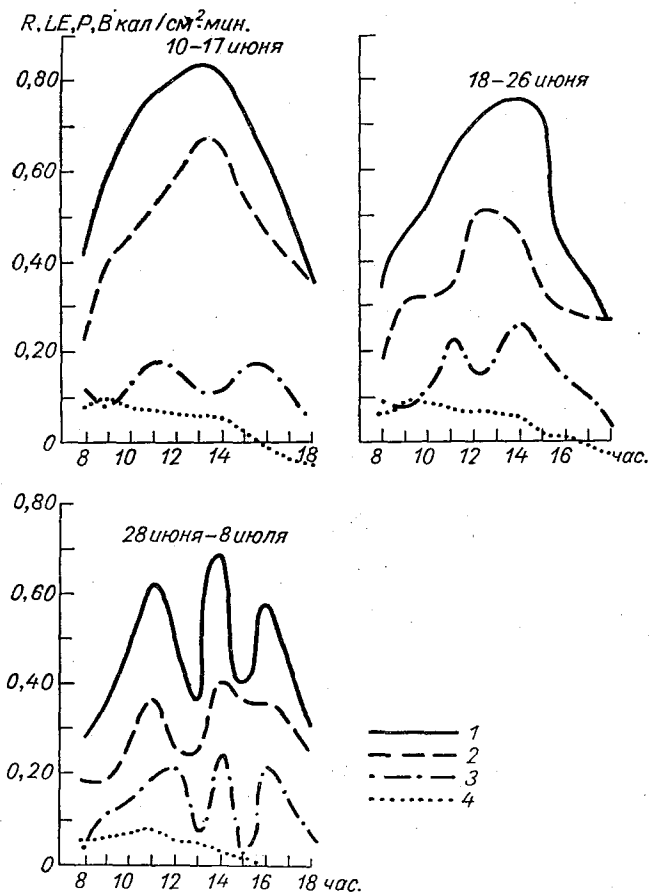


Рис. 2. Суточный ход составляющих теплового баланса при разных типах погодных условий.

1) R — радиационный баланс, 2) LE — затраты тепла на испарение, 3) P — турбулентный теплообмен, 4) B — поток тепла через поверхность почвы.

цветения затраты тепла на испарение составляет 70—80% радиационного баланса. В последующие периоды при переходе растений озимой пшеницы и озимой ржи в фазы налива зерна и молочной спелости площадь фотосинтезирующей поверхности листьев резко уменьшается и при продолжающемся дефиците влаги в почве затраты тепла на испарение составляют 50—60% радиационного баланса. В табл. 2 приведены значения составляющих теплового баланса на полях озимой пшеницы и озимой ржи за каждый срок наблюдений (с 8 до 18 час.), осредненные для периодов с различными погодными условиями.

Значения коэффициента турбулентного обмена над посевом и на разных уровнях внутри травостоя были рассчитаны по данным гра-

Таблица 2

Суточный ход составляющих теплового баланса (кал/см²-мин.) на полях озимой пшеницы и озимой ржи.
Ленинградская область, Гатчинский район

Составляющие теплового баланса	Часы										
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

Озимая пшеница, 1965 г.

6, 9, 11, 14, 16, 18, VII (прохладная облачная погода)

<i>R</i>	0,21	0,26	0,26	0,26	0,24	0,32	0,33	0,27	0,29	0,23	0,19
<i>LE</i>	0,14	0,15	0,19	0,21	0,16	—	0,20	0,13	0,21	0,12	0,13
<i>B</i>	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,00	0,01	-0,02	-0,01
<i>P</i>	0,03	0,07	0,04	0,02	0,05	—	0,09	0,14	0,07	0,13	0,07

30 VI, 4, 5, 8, 12, 13, 15, 17 VII

(теплая погода с переменной облачностью)

<i>R</i>	0,43	0,56	0,59	0,68	0,42	0,67	0,97	0,70	0,36	0,42	0,23
<i>LE</i>	0,25	0,47	0,48	0,56	0,31	0,54	0,71	0,61	0,34	0,38	0,19
<i>B</i>	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,06	0,03	0,01	0,00	-0,01	-0,01
<i>P</i>	0,14	0,04	0,06	0,06	0,06	0,07	0,23	0,08	0,02	0,05	0,05

19, 20, 21, VII (жаркая малооблачная погода)

<i>R</i>	—	0,48	0,60	0,79	0,87	0,92	0,91	—	0,76	0,53	0,35
<i>LE</i>	—	0,29	0,45	0,38	0,47	0,44	0,35	—	0,43	0,46	0,46
<i>B</i>	—	0,05	0,10	0,12	0,07	0,09	0,07	—	0,00	-0,02	-0,03
<i>P</i>	—	0,14	0,05	0,29	0,33	0,39	0,49	—	0,33	0,09	-0,08

Озимая рожь, 1966 г.

10—17 VI (теплая малооблачная погода)

<i>R</i>	0,42	0,57	0,68	0,77	0,80	0,84	0,82	0,73	0,63	0,51	0,35
<i>LE</i>	0,23	0,40	—	0,52	0,58	0,67	0,66	0,55	0,47	—	0,37
<i>B</i>	0,08	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,02	-0,01	-0,03	-0,05
<i>P</i>	0,11	0,08	—	0,18	0,16	0,11	0,11	0,16	0,17	—	0,03

18—26 VI (жаркая погода с переменной облачностью)

<i>R</i>	0,33	0,46	0,51	0,63	0,71	—	0,76	0,71	0,42	0,36	0,27
<i>LE</i>	0,18	0,31	0,31	0,34	0,50	—	0,45	0,32	0,28	0,27	0,27
<i>B</i>	0,06	0,08	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,01	0,00	-0,01	-0,03
<i>P</i>	0,09	0,07	0,12	0,22	0,15	—	0,26	0,38	0,14	0,10	0,03

28 VI—8 VII (теплая облачная погода)

<i>R</i>	0,28	0,36	0,48	0,63	0,54	0,36	0,69	0,40	0,58	0,45	0,30
<i>LE</i>	0,18	0,18	0,27	0,36	0,26	0,24	0,41	0,36	0,36	0,31	0,25
<i>B</i>	0,06	0,06	0,07	0,08	0,06	0,05	0,04	0,02	0,00	-0,01	-0,02
<i>P</i>	0,04	0,12	0,14	0,19	0,22	0,07	0,24	0,02	0,22	0,15	0,07

диентных наблюдений над температурой, влажностью воздуха и радиационным балансом, измеренным также на разных уровнях внутри травостоя, по методу теплового баланса [1] (причем B принималось постоянным для всех слоев, так как теплообменом самой растительной массы мы пренебрегаем вследствие его малой величины [7]).

$$k = \frac{(R - B) \ln \frac{z_2}{z_1} z}{\rho [c_p (\theta_1 - \theta_2) + L (q_1 - q_2)]}$$

В табл. 3 представлены значения коэффициента турбулентного обмена на разных уровнях внутри травостоя и над посевом при разных погодных условиях. Осреднение было произведено за сроки, когда коэффициент турбулентного обмена над травостоем превышал $0,2 \text{ м}^2/\text{сек.}$, что наблюдается в основном в дневные часы, и за сроки со значениями K меньше $0,2 \text{ м}^2/\text{сек.}$, что характерно для утренних и вечерних часов, а при некоторых погодных условиях также и для дневных часов.

Таблица 3

Средние значения коэффициентов турбулентного обмена ($\text{м}^2/\text{сек.}$) на разных уровнях внутри травостоя озимой ржи при разных типах погодных условий в различные периоды

Высота, м	10—14 VI		15—18 VI		19—26 VI		28 VI—8 VII	
	дневные часы	утро и вечер	дневные часы	утро и вечер	дневные часы	утро и вечер	дневные часы	утро и вечер
0,35	0,039	0,027	0,053	0,024	0,032	0,023	0,034	0,026
0,65	0,083	0,055	0,064	0,032	0,050	0,037	0,054	0,035
1,00	0,145	0,072	0,094	0,042	0,070	0,047	0,089	0,052
1,45	0,333	0,124	0,136	0,057	0,118	0,061	0,139	0,081
1,95			0,253	0,136	0,287	0,135	0,281	0,131
Высота растений, м	1,2		1,5		1,68		1,75	

Изменение коэффициента турбулентного обмена внутри травостоя оказалось также близким к линейному, что опять-таки связано с равномерным уменьшением площади листьев и стеблей растений с высотой.

Обращает на себя внимание тот факт, что значения коэффициента турбулентного обмена на поле озимой ржи, осредненные за весь период наблюдений (июнь—июль 1966 г.), почти совпали с величинами коэффициента турбулентности на поле озимой пшеницы, осредненными также за весь период наблюдений (июль 1965 г.)

В табл. 4 и на рис. 3 представлены эти осредненные за весь период наблюдений значения коэффициента турбулентного обмена.

На основании этих данных можно сделать вывод о том, что в летний период осредненные за месяц значения коэффициента турбулентного обмена являются достаточно надежной, мало изменчивой характеристикой, что, вероятно, можно объяснить сходными погодными условиями в июне—июле 1965 и 1966 г. С другой стороны, можно предположить, что особенности структуры посевов озимой пшеницы и озимой ржи способствовали созданию аналогичных условий воздухообмена.

Действительно, в структуре посевов пшеницы и ржи обнаруживается некоторое подобие. С одной стороны, густота стояния озимой пшеницы

Таблица 4

Значение коэффициента турбулентного обмена ($\text{м}^2/\text{сек.}$) на полях озимой пшеницы (1965 г.) и озимой ржи (1966 г.) в среднем за весь период наблюдений

Уровень	Дневные часы		Утренние и вечерние часы	
	1965 г. пшеница	1966 г. рожь	1965 г. пшеница	1966 г. рожь
20 см над травостоем	0,293	0,279	0,133	0,134
0,8 высоты травостоя	0,123	0,132	0,066	0,069
0,6 высоты травостоя	0,085	0,085	0,044	0,048
0,3 высоты травостоя	0,046	0,046	0,032	0,030

на 1 м^2 поверхности почвы вдвое больше, чем ржи, но при этом между-рядье у пшеницы также вдвое шире, с другой стороны, высота озимой

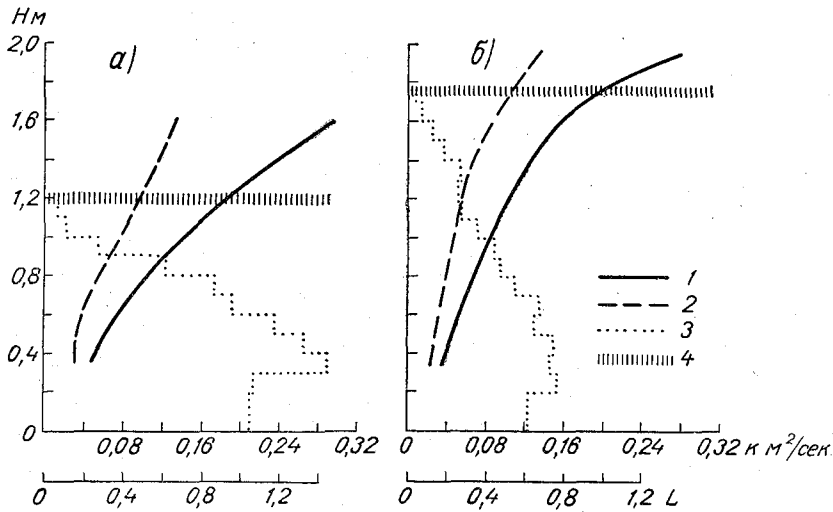


Рис. 3. Изменение коэффициента турбулентного обмена с высотой в среднем за весь период наблюдений на поле озимой пшеницы (а) и озимой ржи (б).

1 — в дневные часы, 2 — в утренние и вечерние часы, 3 — вертикальное распределение общей поверхности растений (в относительных единицах L), 4 — высота травостоя.

ржи почти на треть превышала высоту озимой пшеницы и поэтому общая площадь листьев и стеблей у обоих посевов оказалась почти равной (около 9 м^2 у ржи и около 10 м^2 у пшеницы на 1 м^2 поверхности почвы). Это привело к тому, что характер аэродинамической решетки из редко расположенных рядков с более густым и низким травостоем пшеницы оказался подобным конструкции из более частых рядков, но с менее густым и более высоким травостоем ржи, при близких значениях общей площади поверхности элементов растений. Это еще раз подтверждает универсальность такой характеристики, как индекс общей поверхности листьев и стеблей, и позволяет сделать вывод о том, что общая поверхность элементов растений на единице поверхности почвы и характер ее распределения по высоте являются определяющими для режима турбулентности в травостое. Сама же структура посева — ширина междурядий и густота растений в рядке — имеет второстепенное значение.

Представленные данные подтверждают отмеченную ранее [4] закономерность близкого к линейному изменения коэффициента турбулентного обмена с высотой в травостое зерновых культур (озимая пшеница, озимая рожь), для которых характерно равномерное убывание с высотой общей площади элементов растений с максимумом в нижней трети высоты растений (см. рис. 3).

Рассчитанные за все сроки наблюдений значения коэффициентов турбулентного обмена на поле озимой ржи были использованы при расчете потоков углекислоты.

Рассмотрим результаты специальных наблюдений, выполненных с целью определения особенностей радиационного режима в травостое озимых.

Измерения интенсивности радиационного баланса, суммарной и фотосинтетически активной радиации производились на уровнях 0,20, 0,45, 0,70 и 0,95 м внутри травостоя и на 0,50 м над травостоем озимой пшеницы, высота которой была равна 1,20 м (1965 г.), и на уровнях 0,20, 0,45, 0,65, 1,00, 1,45 м внутри травостоя и на 0,50 м над травостоем озимой ржи, высота которой составляла 1,75 м (1966 г.).

Потоки радиации измерялись с помощью обычных термоэлектрических балансомера, пиранометра и фотоинтегратора с фильтрами системы Б. И. Гуляева [2], укрепленных на переносной рейке. При наблюдениях рейку с приборами перемещали по высоте снизу вверх, производя на фиксированных уровнях по три—пять отсчетов по балансомеру и пиранометру (каждый отсчет производился через 10 сек. после перемещения рейки с приборами по горизонтали), при этом на 30—60 сек. включался фотоинтегратор, регистрирующий фотосинтетически активную радиацию. Потоки радиации измерялись либо при отсутствии облачности вблизи диска солнца, либо при полном закрытии его облаками. При переменной облачности наблюдения по принятой методике не производились.

Следует полагать, что основными факторами, влияющими на изменение величины потоков радиации внутри травостоя, кроме геометрической структуры и оптических свойств самого травостоя, являются высота солнца и ориентация рядков посева, определяющие путь прохождения солнечных лучей сквозь толщу растительного покрова, а также степень покрытия неба облачностью.

Попытаемся оценить влияние этих факторов на режим радиации внутри травостоя озимых культур.

Влияние высоты солнца на изменение потоков радиации внутри травостоя наиболее полно выявляется при анализе круглосуточных серий наблюдений, когда высота солнца изменялась от 0 до $53,8^\circ$, в то время как ежедневные наблюдения начинались и заканчивались при высотах солнца около 28° (в 8 и 18 час.).

Анализ материалов наблюдений позволяет сделать следующие выводы по зависимости проникновения радиации в глубь травостоя от высоты солнца. Близкая к линейной связь между количеством проходящей в глубину травостоя радиации (для измеряемых нами потоков радиационного баланса, суммарной и фотосинтетически активной радиации) и высотой солнца наблюдается при высотах больше $25—30^\circ$.

При высотах солнца меньше 25° изменение высоты солнца уже не оказывает заметного влияния на величины потоков радиации внутри травостоя.

На рис. 4 представлена зависимость потоков суммарной 1 и фотосинтетически активной радиации 2 от высоты солнца по данным

наблюдений на уровне 20 см над почвой внутри травостоя на поле озимой ржи (при высоте растений около 140 см).

Чтобы учесть влияние высоты солнца на закономерности проникновения радиации в глубь травостоя, материал ежедневных наблюдений над потоками радиации был осреднен за утренние (8—9) и вечерние (17—18) часы при высотах солнца около 30—35° и за дневные (10—16) часы, когда высота солнца была равна 40—50°. При этом изменение высоты солнца на 10—15° меняет на 10—15% величину радиации, проникающей сквозь всю толщу травостоя на высоту 20 см над поверхностью почвы.

Влияние направления рядков посева на проникновение радиации в глубь травостоя сказывается особенно сильно в периоды, когда ази-

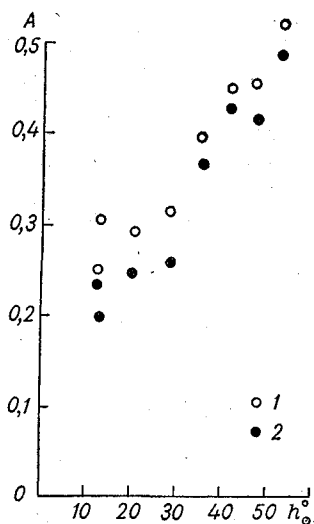


Рис. 4. Влияние высоты солнца h_{\odot} на проникновение суммарной (1) и фотосинтетически активной (2) радиации в глубь посева. Озимая рожь, 15—16 VI 1966 г.

А — отношение радиации, измеренной на уровне 20 см от поверхности почвы, к радиации, приходящей на верхний уровень травостоя.

мут солнца совпадает с направлением рядков. Так, по наблюдениям на поле озимой ржи при направлении рядков с юго-востока на северо-запад солнце вдоль рядков светило в 11 час. утра. В этот срок наблюдалось максимальное проникновение радиации внутрь посева, превышающее проникновение радиации в полуденные часы при большей высоте солнца.

На поле озимой пшеницы направление рядков с юго-юго-запада на северо-северо-восток совпадало с направлением потока солнечных лучей вдоль рядков в 14 час. дня, в момент наибольшей высоты солнца. В это время до поверхности почвы между рядками доходила почти вся падающая на поверхность травостоя радиация. В табл. 5 приведены типичные случаи распределения радиации внутри посева в разные часы дня, дающие четкое представление о влиянии как высоты солнца, так и направления рядков на поглощение радиации в травостое посевов.

В вечерние часы при направлении лучей солнца вдоль рядков увеличение проникновения радиации в глубь посева очень незначительно, так как в это время преобладающее влияние на ослабление радиации в травостое оказывает малая высота солнца.

Рассмотрим влияние посевов на приход радиации на разные уровни внутри растительного покрова в зависимости от вертикального распределения общей площади поверхности растений, при этом значения потоков радиации на каждом уровне, на котором они измерялись, сопоставим с площадью листьев и стеблей слоя, через который они проходят. Подобное сопоставление было выполнено для периодов с разным типом погодных условий и с учетом различных высот солнца.

На рис. 5 представлен типичный характер зависимости коэффициентов пропускания фотосинтетически активной радиации от относительной площади поверхности растений слоя, через который проходит радиация. При этом относительная площадь L представляет собой отношение площади всех элементов растений к единице поверхности почвы, на которой произрастают эти растения, а коэффициент пропускания — отношение приходящей на разные уровни травостоя радиации к падающей на верхнюю границу травостоя.

Таблица 5

Проникновение радиации в глубь травостоя на высоту 45 см от поверхности почвы в долях от радиации, падающей на верхний уровень травостоя в разные часы дня

Часы										
8	9	10	11*	12	13	14**	15	16	17	18

Высота солнца, град.

29	35	42	48	53	53,8	52	48	42	35	27
----	----	----	----	----	------	----	----	----	----	----

Озимая рожь (высота растений 130 см) в среднем за 10—17 июня 1966 г.

Радиационный баланс	0,32	0,37	0,56	0,64	0,58	0,58	0,50	0,43	0,43	0,36	0,26
Суммарная радиация	0,50	0,50	0,70	0,73	0,70	0,66	0,60	0,52	0,52	0,48	0,38
Фотосинтетически активная радиация	0,48	—	0,63	0,63	0,63	0,61	0,61	0,61	0,51	0,46	0,37

Высота солнца, град

28	33	40	46	50	52	50	47	41	34	26
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Озимая пшеница (высота растений 110 см) в среднем за 9—15 июля 1965 г.

Радиационный баланс	0,42	0,43	0,56	0,59	0,63	0,68	0,74	0,67	—	—	0,45
Суммарная радиация	0,49	0,59	0,65	0,68	0,69	0,69	0,82	0,76	—	—	—

Примечание. Срок наблюдений, когда азимут солнца совпадает с направлением рядков: * — для озимой ржи, ** — для озимой пшеницы.

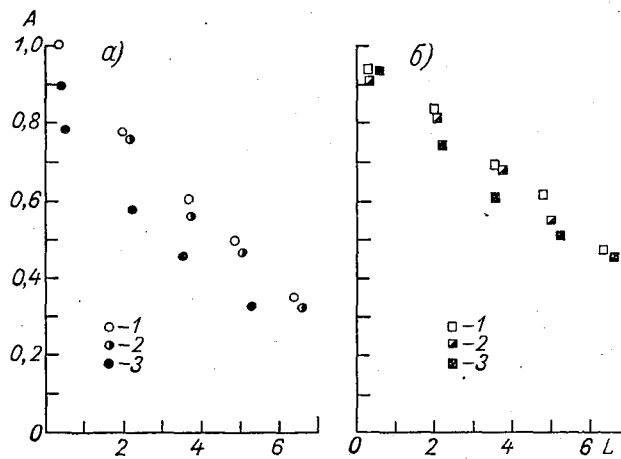


Рис. 5. Зависимость проникновения фотосинтетически активной радиации в глубь травостоя от относительной площади общей поверхности растений *L*. Белогорка, 1966 г.

Высота солнца: а) 30—35°, б) 40—50°. 1) в период 10—17 VI, 2) 18—26 VI, 3) 28 VI—8 VII.

Полученные материалы позволяют сделать вывод о том, что внутри травостоя происходит близкое к линейному изменение фотосинтетически активной радиации в соответствии с равномерным изменением общей площади поверхности растений с высотой. Несколько большее поглощение радиации растениями в первый период наблюдений (10—17 июня) можно объяснить, вероятно, тем, что в этот период площадь листьев имела относительно больший вклад в общей поверхности растений и что различно ориентированные листовые пластинки перехватывали радиацию более полно. В более поздние фазы развития основной вклад в общую поверхность растений вносили вертикально стоящие стебли, через которые радиация проникала в глубь травостоя более свободно.

При сравнении полученных нами результатов с опубликованными данными наблюдений над изменением потоков радиации внутри травостоя сельскохозяйственных культур [9, 12, 13] выявляются некоторые существенные особенности. По данным наших наблюдений в посевах озимой ржи и пшеницы, несмотря на большую общую поверхность растений (более $8 \text{ м}^2/\text{м}^2$), в нижние слои посева (на уровне 20 см над поверхностью почвы) доходит довольно большая часть радиации, а именно до 30—40% (в зависимости от высоты солнца). Причина этого, очевидно, заключается в том, что основную часть общей поверхности элементов растений составляют стебли, в то время как площадь листовой поверхности составляет только одну треть от общей поверхности, и поэтому через вертикально расположенные стебли в нижние слои травостоя радиация проникает в значительно большей степени, чем через различно ориентированные и расположенные под разными углами к горизонту листовые пластинки.

Особенно резко режим радиации в травостое озимых отличается от режима радиации в посевах кукурузы, а также в растительном покрове некоторых бобовых культур и кормовых трав. По данным, приведенным в работе [10], наибольшая поверхность растительной массы у этих культур располагается в слое верхней трети высоты растений. В этом слое происходит основное поглощение радиации и до поверхности почвы при большом индексе площади листовой поверхности доходит только около 10—12% фотосинтетически активной радиации. У зерновых озимых культур при том же индексе общей поверхности растений наибольшая площадь элементов растений располагается вблизи поверхности почвы и состоит из стеблей, индекс же листовой поверхности сравнительно невелик — одна треть общей поверхности растений, которая равномерно уменьшается с высотой. Поэтому до почвы в этих посевах доходит почти в 2 раза больше радиации, чем на кукурузном поле.

В связи с этим при анализе метеорологического режима в травостое сельскохозяйственных культур нам представляется необходимым и возможным все виды травостоя посевов разделить на несколько типов в зависимости от уровня расположения наибольшей площади элементов растений (типа вертикального профиля общей поверхности растений) и от соотношения площадей листьев и стеблей у разных сельскохозяйственных растений.

По имеющимся в настоящее время данным кукуруза и озимые культуры пшеницы и ржи наиболее резко отличаются как по структуре травостоя, так и по особенностям метеорологического режима. В посевах кукурузы в верхней трети травостоя максимум листовой поверхности создает деятельный слой, где формируется соответствующий режим радиации, температуры, турбулентности и где в основном происходит ассимиляция углекислоты. Это слой резкого изменения профилей

метеорологических элементов, и иногда считают, что расположение его в верхней части травостоя характерно для всех сельскохозяйственных культур. В посевах же озимой ржи и пшеницы в период колошение — цветение — налив зерна такого слоя не наблюдается вследствие равномерного уменьшения общей площади растений с высотой (при максимуме ее в нижней трети высоты стеблей) и преобладающего влияния вертикально расположенных стеблей. Изменение всех метеорологических элементов, включая потоки радиации, с высотой происходит в таком типе травостоя плавно, без резких изломов.

Таким образом, особенности структуры травостоя сельскохозяйственных культур позволяют объяснить основные черты метеорологического режима в растительном покрове.

Результаты анализа экспериментальных данных позволяют сделать следующее заключение. Особенности метеорологического режима внутри растительного покрова в основном определяются структурой травостоя сельскохозяйственных культур. По данным наших наблюдений в северо-западной зоне (Ленинградская область, ЭССР) травостой озимой пшеницы и озимой ржи имеет аналогичную структуру. Характерной особенностью структуры травостоя этих культур является, во-первых, наличие максимума общей поверхности растений в слое нижней трети высоты стеблей и равномерное уменьшение поверхности растений с высотой, во-вторых, то, что при очень большом индексе общей поверхности растений (около 9—10) на долю листовой поверхности приходится только третья часть от нее, а две трети общей поверхности растений составляют вертикальные стебли. Такая структура травостоя способствует плавному изменению с высотой всех метеорологических элементов внутри растительного покрова, при этом создаются благоприятные условия для турбулентного обмена и проникновения радиации в глубь травостоя, что в свою очередь должно благоприятствовать ассимиляции углекислоты растениями. Данные по приросту биомассы и потокам углекислоты подтверждают это.

Исследования взаимосвязи структуры травостоя и метеорологического режима, в особенности режима интегральной коротковолновой и фотосинтетически активной радиации на полях озимых культур и кукурузы, позволяют наметить пути типизации травостоя посевов и в соответствии с этим классифицировать различные типы фитолимата сельскохозяйственных культур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бudyко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Гидрометеоздат, Л., 1956.
2. Гуляев Б. И. К методике измерений ФАР. Сб. «Фотосинтез и продуктивность растений». Киев, 1965.
3. Ефимова Н. А., Саноян М. Г. Новый вид теплобалансографа и результаты испытания его в полевых условиях. Метеорология и гидрология, № 9, 1966.
4. Ефимова Н. А. Некоторые особенности метеорологического режима внутри растительного покрова озимой пшеницы и кукурузы. Труды ГГО, вып. 179, 1965.
5. Забрoда О. К. Влияние климата СССР на урожай картофеля. Сб. «Вопросы метеорологии, агрометеорологии и гидрологии». Гидрометеоздат, М., 1965.
6. Ляпина Р. С., Огнева Т. А. К методике определения теплового баланса на картофельном поле. Труды ГГО, вып. 214, 1967.
7. Ляпина Р. С., Огиева Т. А. К методике определения составляющих теплового баланса за короткие интервалы времени. Труды ГГО, вып. 194, 1966.
8. Розеншток Ю. Л. Автоматическое устройство для измерения и регистрации коэффициента обмена и турбулентных потоков тепла и влаги. Метеорология и гидрология, № 8, 1961.

9. Росс Ю. К. Роль солнечной радиации в фотосинтетической деятельности посевов. Сб. «Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности». Изд. «Наука», М., 1966.
10. Росс Ю. К., Нильсон Т. Вертикальное распределение биомассы в посевах. Сб. «Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности». Изд. «Наука», М., 1966.
11. Руководство по градиентным наблюдениям и определению составляющих теплового баланса. Гидрометеониздат, Л., 1964.
12. Тооминг Х. Приближенный метод определения ослабления и отражения ФАР и ближней инфракрасной радиации в посевах кукурузы по измерениям интегральной радиации. Сб. «Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности». Изд. «Наука», М., 1966.
13. Тооминг Х., Росс Ю. К. Ослабление интегральной радиации различными посевами кукурузы. Сб. «Вопросы радиационного режима растительного покрова». Изд. АН ЭССР, Тарту, 1965.
14. Устенко Г. П., Ягнова С. Н. Опыт программированного получения высоких урожаев кукурузы по заданным КПД энергии солнечной радиации. Сб. «Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности». Изд. «Наука», М., 1966.
15. Чирков Ю. И., Белухина Г. В. Микроклимат и тепловой баланс на посевах орошаемой и неорошаемой кукурузы в Молдавии. Труды ЦИП, вып. 145, 1965.

Н. Д. АЗИМОВА, Е. В. ЗАРУБИН, Л. Г. КАЧУРИН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ И ГРАДИЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ВНУТРИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

§ 1. Структурные измерения

Для вычисления коэффициента турбулентного обмена по структурным характеристикам воздушного потока использовались записи мгновенных значений горизонтальной и вертикальной составляющих скорости ветра. В экспедиции был применен двухкомпонентный высокочастотный искровой анемометр. Для измерения горизонтальной составляющей ветра использован прибор, описанный в работе [3], причем измеритель вертикальной составляющей был специально разработан применительно к условиям работы внутри растительного покрова.

Подобные приборы позволяют полностью автоматизировать процесс определения коэффициента турбулентного обмена с помощью вычислительных машин, например, типа МН-7 или аналогичных [8]. Однако опыта эксплуатации таких машин в экспедиционных условиях нет, поэтому запись мгновенных значений выполнялась с помощью шлейфowego осциллографа Н-107.

Чувствительным элементом анемометра служит искровой канал высокочастотного разряда, который испытывает деформацию под действием воздушного потока. Искровой канал прогибается и при этом меняет величину своего электрического сопротивления тем сильнее, чем больше прогиб. Равновесная деформация определяется соотношением между динамическим давлением потока, который обуславливает деформацию канала, и электромагнитными силами, стремящимися вернуть искровой канал в исходное положение.

Использование искрового канала в режиме прогиба [2] позволило снизить пороговую скорость примерно до 2—3 см/сек.

Датчик горизонтальной скорости выполнен в виде игольчатого вертикально установленного разрядника, между остриями которого может существовать устойчивый искровой разряд (рис. 1 а).

В датчике вертикальной составляющей скорости искровой канал осуществляется между коаксиально расположенными диском и кольцом (рис. 1 б). Кольцо и диск служат электродами разрядника и располагаются в горизонтальной плоскости. Поэтому искровой канал, разворачиваясь в направлении воздушного потока, деформируется практически лишь под действием вертикальной составляющей потока.

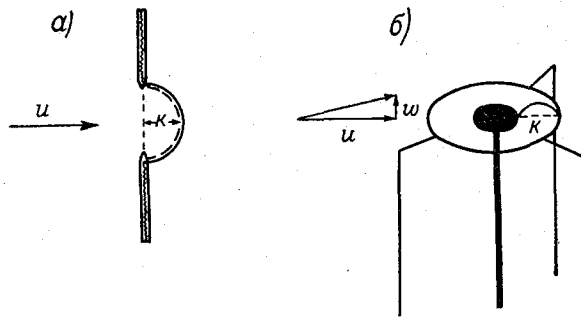


Рис. 1. Принципиальные схемы датчиков искрового анемометра для измерения горизонтальной (а) и вертикальной (б) составляющих скоростей.

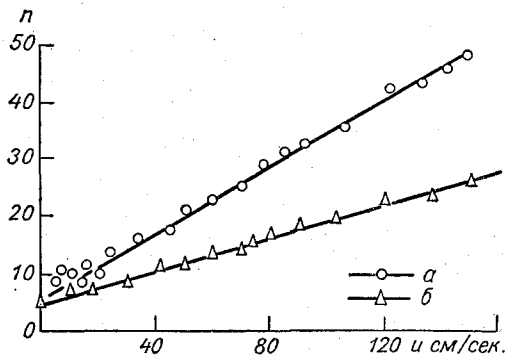


Рис. 2. Градуировочные кривые датчиков горизонтальной (а) и вертикальной (б) составляющих скоростей.
 n — деления осциллографа.

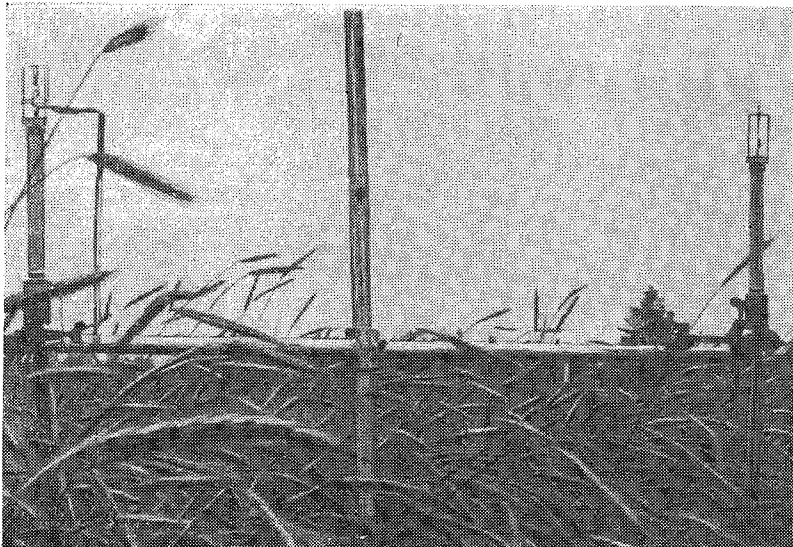


Рис. 3. Установка датчиков в поле.

Для определения знака вертикальной составляющей было использовано свойство искрового канала испускать термоэлектроны, направление переноса которых можно фиксировать специальными сетками, расположенными выше и ниже электродов (на рис. 1б не показаны). Знак разности электрических сигналов на верхней и нижней сетках однозначно определяется знаком вертикальной составляющей.

Перед установкой в поле датчики тарировались в аэродинамической трубе. На рис. 2 представлены типовые тарировочные кривые датчиков горизонтальной и вертикальной составляющих скоростей. Как видно из графика, зависимость выходного сигнала от скорости потока в выбранном диапазоне скоростей близка к линейной. У приведенного образца

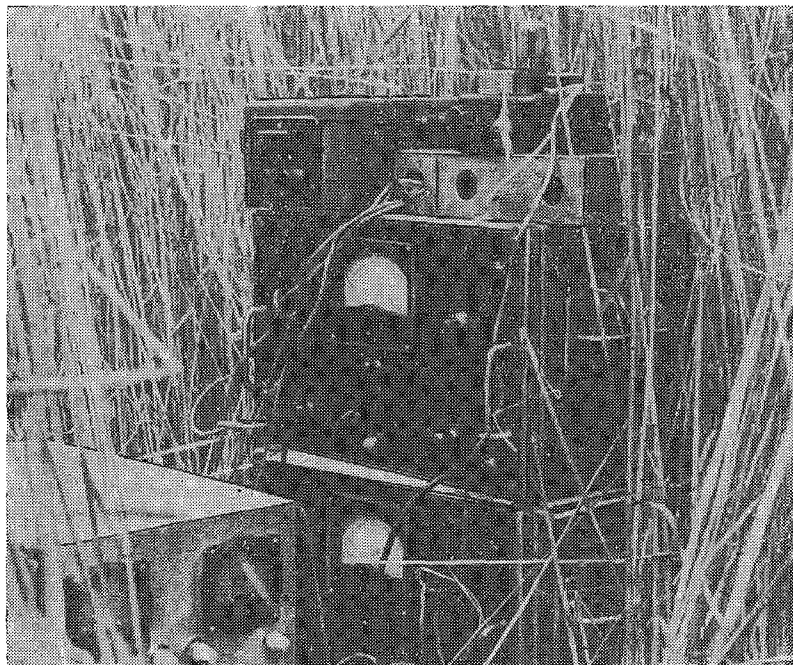


Рис. 4. Генератор высокочастотного сигнала и преобразователя.

датчика вертикальной составляющей дрейф нуля существенно зависит от модуля скорости. Так, например, при модуле скорости менее 20 см/сек. дрейф может достигать 20—30% и при скоростях более 50—60 см/сек. дрейфом нуля можно пренебречь. Дополнительные исследования показали, что улучшением технологии изготовления электродов датчика вертикальной скорости дрейф нуля можно значительно уменьшить. Основное значение в этом отношении имеет степень коаксиальности диска и кольца.

Датчики устанавливались во ржи на специальной матче (рис. 3). Генератор высокочастотного сигнала и преобразователя находились в поле на расстоянии нескольких метров от датчиков (рис. 4), осциллограф и пульт управления — в палатке на расстоянии 60 м от датчиков. Питание прибора осуществлялось от сети переменного тока 220 в.

В процессе работы периодически контролировалось напряжение, подаваемое от сети, и положение места нулей аппаратуры. При работе во время тумана, дождя и сильной росы несколько увеличивалось время

стабилизации генератора после включения, но режим работы датчиков заметно не изменялся. Введение герметизации генераторного узла позволит, по-видимому, в дальнейшем сделать время стабилизации постоянным и независимым от погодных условий.

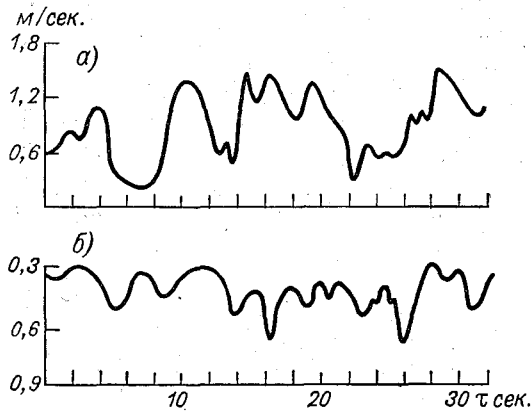


Рис. 5. Типовой график записи горизонтальной (а) и модуля вертикальной (б) составляющих скоростей потока.

На рис. 5 дан типовой график одновременной записи горизонтальной (а) и вертикальной (б) составляющих скоростей воздушного потока.

Всего было проведено 64 серии наблюдений. Из них для дальнейшей обработки была использована лишь та часть, где горизонтальные скорости не превышали 3,3 м/сек., так как градуировка при больших скоростях не проводилась.

Для вычисления коэффициента турбулентного обмена k была использована формула Е. С. Ляпина [4],

$$k = \frac{\bar{v}}{2} \frac{|\overline{\omega - \bar{\omega}}|^2}{|\bar{v} - \bar{v}|} D, \quad (1)$$

где v — горизонтальная составляющая скорости, ω — вертикальная составляющая скорости, D — среднее время существования вертикальной составляющей одного знака. Осреднение выполнялось за 2 мин. По этой формуле были проведены расчеты для 22 серий наблюдений.

На графике рис. 6 представлены результаты сравнения коэффициентов турбулентности, рассчитанные по формуле (1) и по стандартной методике [1].

При наличии определенного разброса точек можно отметить удовлетворительное согласование средних значений измеренных величин. При оценке данных, представленных на рис. 6, необходимо иметь в виду следующие обстоятельства. Как указывалось выше, при измерениях внутри растительности метод [1] имеет определенные ограничения, причем ошибки определения градиентов температуры и влажности могут достигать больших значений (см. § 2).

При измерении внутри растительности на результаты наблюдений влияет то, что датчики различных приборов оказываются в различных микроклиматических условиях.

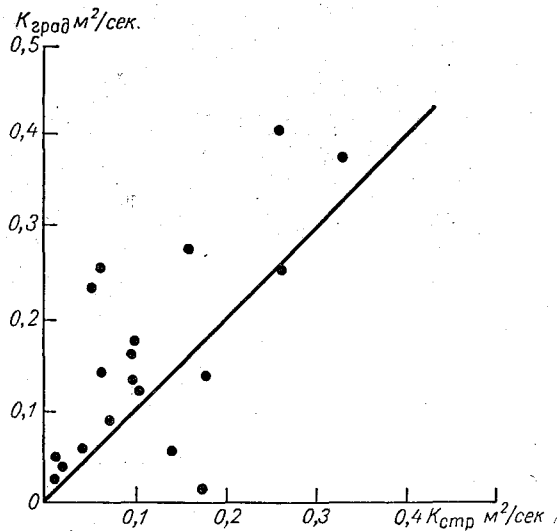


Рис. 6. Корреляционный график для значений коэффициента обмена, рассчитанного градиентным и структурным методом.

Наконец, периоды осреднения результатов измерения при определении $k_{стр}$ и $k_{град}$ различны. Какие из обстоятельств определяют в основном разброс точек на рис. 6, на основании анализа имеющихся материалов сказать затруднительно.

На рис. 7 приведен график сравнения суточного хода $k_{стр}$ и $k_{град}$. Как видно из графика, в большинстве случаев суточный ход $k_{стр}$ и $k_{град}$ имеет сходную форму.

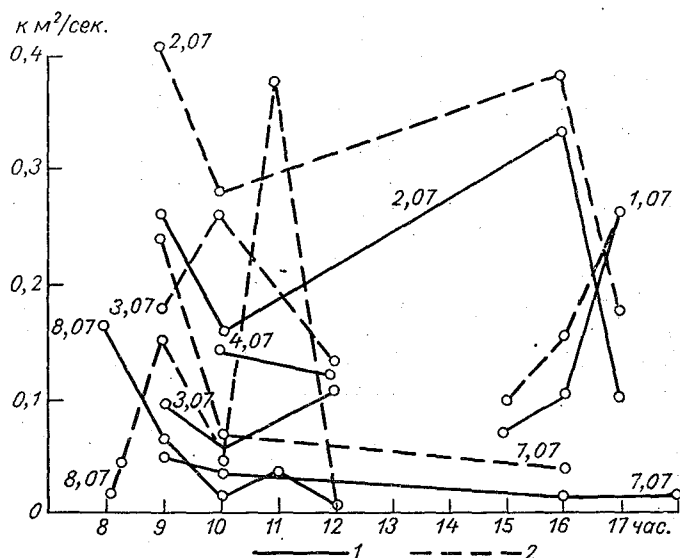


Рис. 7. График сравнения суточного хода $k_{стр}$ (1) и $k_{град}$ (2).

§ 2. Градиентные измерения

Для измерения градиентов температуры и влажности воздуха использовался автоматический дистанционный термоградиентограф АДГ, принцип работы которого был опубликован еще в 1955 г. [6], способ автоматизации — позже [7].

В его основе лежит психрометрический метод. Непосредственно измеряются: градиент температуры Δt , градиент температуры смоченных термометров $\Delta t'$, средние температуры сухого и смоченного термометров t и t' .

Чувствительными элементами являются медные термосопротивления (терморезисторы) в вентилируемой радиационной защите. Блок датчиков на мачте, установленной в поле, показан на рис. 8. Регистрация выполняется электронным потенциометром ЭПП-09 М2 на расстоянии 60 м от датчика.

Чувствительность измерителей градиентов $0,02^\circ/мм$, термометров $0,1^\circ/мм$.

Образец записи показан на рис. 9.

Перед установкой АДГ была проверена устойчивость нуля прибора и определен психрометрический коэффициент A .

Для проверки устойчивости нуля прибора все датчики устанавливались на одном уровне, что соответствовало условию $\Delta t = 0$ и $\Delta t' = 0$.

Соответствующая типовая запись показана на рис. 10, где видно, что колебания измеренных величин малы, хотя следует иметь в виду, что за

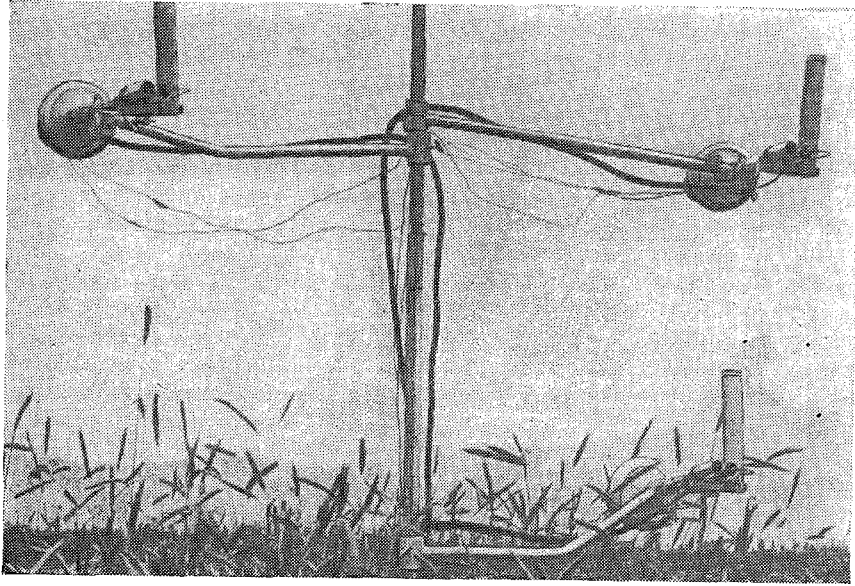


Рис. 8. Датчики АДГ в поле.

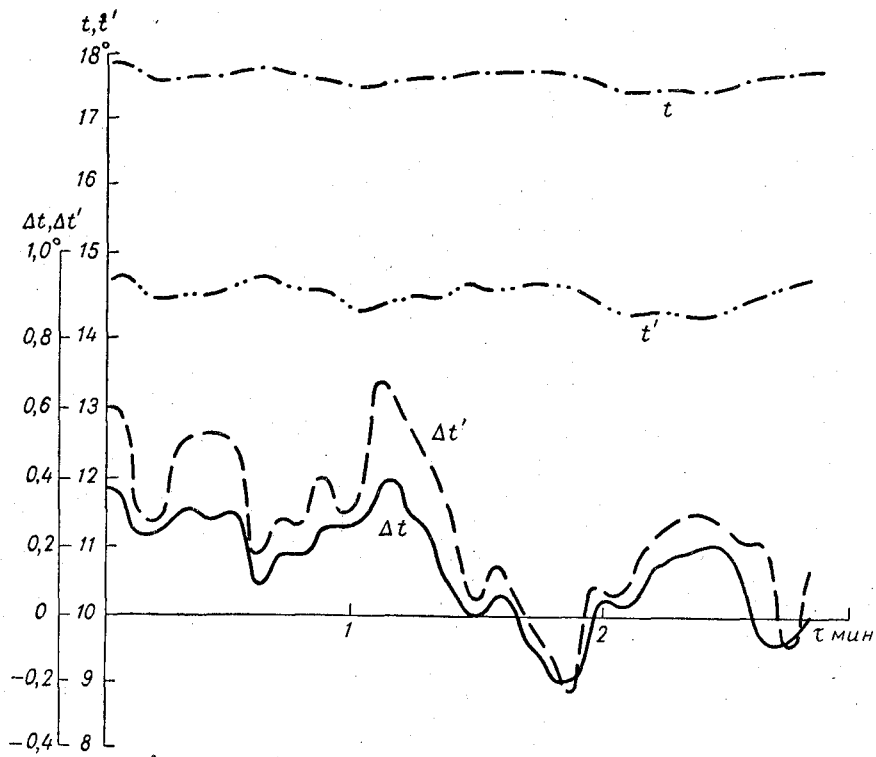


Рис. 9. Образец записи температуры и градиентов температуры.

длительный срок они оказываются большими, особенно колебания $\Delta t'$. Поэтому для получения реальной максимальной точности измерения порядка $0,01-0,02^\circ$ необходимым условием является систематическая проверка нулевых положений и их учет при обработке результатов. Эталоных приборов, которые могли бы использоваться для градуировки гигроградиентографов, не существует. Поэтому отдельно градуировались измерители Δt , $\Delta t'$, t' , t и, кроме того, определялась психрометрическая постоянная A .

Рабочая формула гигроградиентографа может быть представлена в виде [5]

$$\frac{\Delta e}{p} = A(B \Delta t' - \Delta t),$$

где $B = 1 + \frac{LE'}{ApK(T')^2}$, Δe — разность упругостей водяного пара в точках установки датчиков, p — атмосферное давление, L — скрытая теплота парообразования, E' — упругость насыщения при t' , K — постоянная Больцмана.

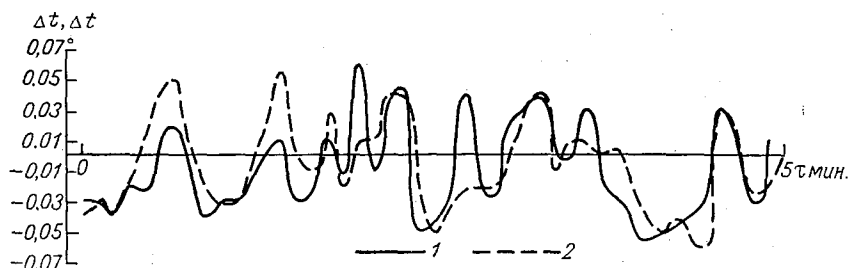


Рис. 10. График колебаний нуля АДГ во времени.
1) Δt , 2) $\Delta t'$.

При градуировке все четыре датчика устанавливались на одном уровне, на том же уровне измерялись e , t и p . Батист с одного из смоченных термометров снимался. Таким образом, создавались условия, эквивалентные условиям в случае измерения градиента влажности при разности упругости пара на двух уровнях, равной дефициту влажности воздуха на том уровне, на котором выполнялись измерения при определении A .

Измерение градиентов температуры и влажности воздуха выполнялось как внутри растительного покрова, так и на испытательной метеоплощадке в Воейково.

Следуя обычной методике сравнений, сопоставим показания АДГ и психрометров, установленных на тех же высотах, что и датчики АДГ.

На рис. 11 и 12 дано сравнение для 82 серий измерений в августе и сентябре 1966 г. в Воейково. Точки на обоих рисунках располагаются примерно симметрично относительно биссектрисы между осями координат. Разброс точек велик — больше допустимой погрешности. Этого и следовало ожидать. Во-первых, инструментальная точность психрометров недостаточна. Во-вторых, по психрометру за 10-минутный срок наблюдения делается всего лишь три отсчета.

Суммарные погрешности измерения Δt и $\Delta t'$ можно оценить по формулам:

для психрометров

$$\delta_n = 2|\delta_n^H| + \frac{1}{n_n} \left| \sqrt{2(\delta_n^{or})^2 + 2(\sigma_n)^2} \right|, \quad (2)$$

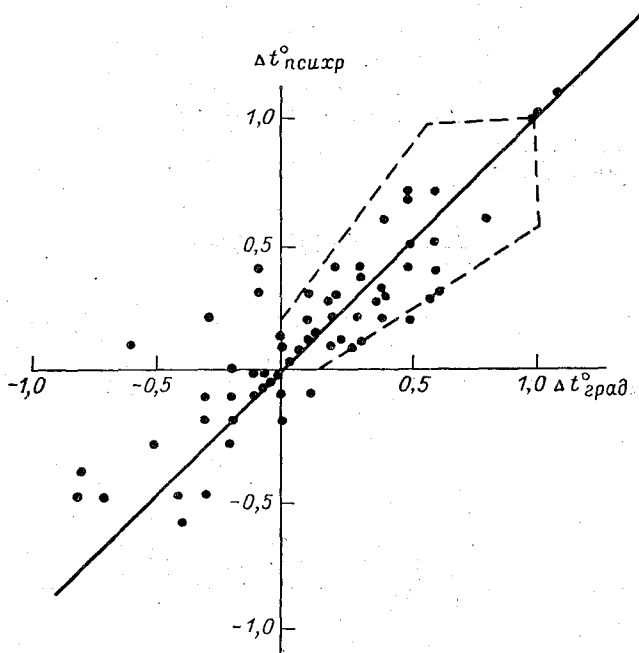


Рис. 11. Корреляционный график для Δt , измеренного с помощью АДГ и психрометров. Воейково.

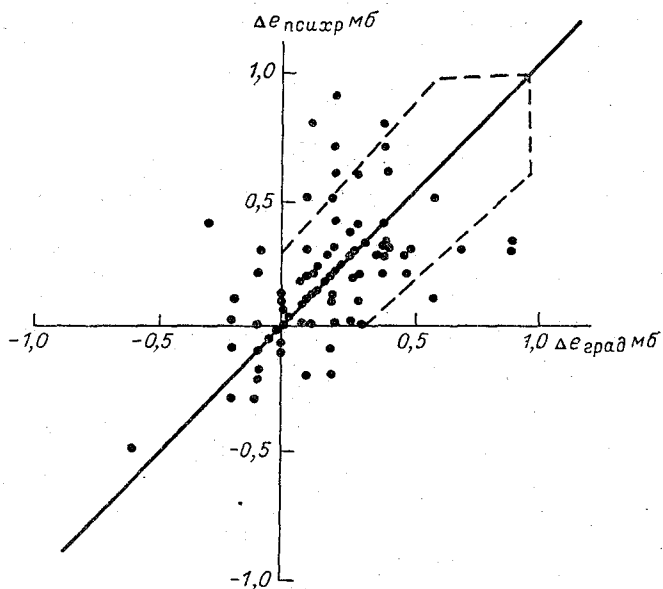


Рис. 12. Корреляционный график для $\Delta \epsilon$, измеренного с помощью АДГ и психрометров. Воейково.

для АДГ

$$\delta_a = |\delta_a^и| + \frac{1}{n_a} \sqrt{(\delta_a^{от})^2 + (\sigma_a)^2}, \quad (3)$$

где индекс «и» — инструментальная погрешность, «от» — погрешность отсчета, σ — среднее квадратичное отклонение от среднего измеряемых температур (психрометрами) или разностей температур (АДГ), n — число отсчетов по приборам за время осреднения.

Величины $\delta^и$ и $\delta^{от}$ во всем диапазоне измерений постоянны. Величины σ несколько растут с увеличением Δt и $\Delta t'$.

По результатам выполненных измерений можно принять для АДГ при условиях неустойчивости ($\Delta t > 0$)

$$\sigma_a \approx 0,1 + 0,4 \Delta t (\Delta t'). \quad (4)$$

Для психрометров величина σ уменьшается. Это уменьшение можно рассчитать по значениям коэффициентов инерции λ_n , λ_a и характерным периодам колебаний Δt и $\Delta t'$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_n} \approx \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{2\pi}{T} \lambda_n\right)^2}{1 + \left(\frac{2\pi}{T} \lambda_a\right)^2}},$$

где T — характерный период изменения Δt и $\Delta t'$. Характерный период T для выполненных измерений равен примерно 10 сек., соответственно $\sigma_a/\sigma_n \approx 1,2$. За время осреднения 10 мин. по АДГ выполнялось 100 отсчетов, по трем психрометрам. Примем для психрометров $\delta_n^и = \delta_n^{от} = 0,1^\circ$, для АДГ $\delta_a^и = \delta_a^{от} = 0,01^\circ$. Тогда для Δt и $\Delta t'$, равных нулю,

$$\delta_n \approx 0,2^\circ, \quad \delta_a \approx 0,01^\circ \ll \delta_n;$$

для Δt и $\Delta t'$, равных 1° (максимальное значение),

$$\delta_n \approx 0,4^\circ, \\ \delta_a \approx 0,02^\circ \ll \delta_n.$$

Отметим на рис. 11 границы вероятных погрешностей измерения Δt по психрометрам (для $\Delta t'$ картина аналогичная). Такого разброса точек на рисунке, оказывается, и следовало ожидать.

Чтобы отметить на рис. 12 границы вероятных погрешностей градиентов влажности, надо от погрешностей измерения Δt и $\Delta t'$ перейти к погрешности измерения Δe . Методика такого перехода подробно рассмотрена в [5], поэтому на ней мы сейчас останавливаться не будем. Разумеется, относительная погрешность определения Δe оказалась значительно больше, чем погрешность определения Δt и $\Delta t'$, однако и здесь основная масса точек ложится в пределах очерченной области. Выход точек за ее пределы обусловлен, по-видимому, в основном погрешностями смачивания.

Подчеркнем еще раз, что мы оценивали, как это обычно делают, максимальную погрешность. Наиболее вероятная погрешность несколько меньше, в наших примерах на 20—30%.

Выполненные оценки погрешностей достаточны для того, чтобы прийти к заключению, что традиционное сравнение новых градиентографов и психрометров вряд ли целесообразно.

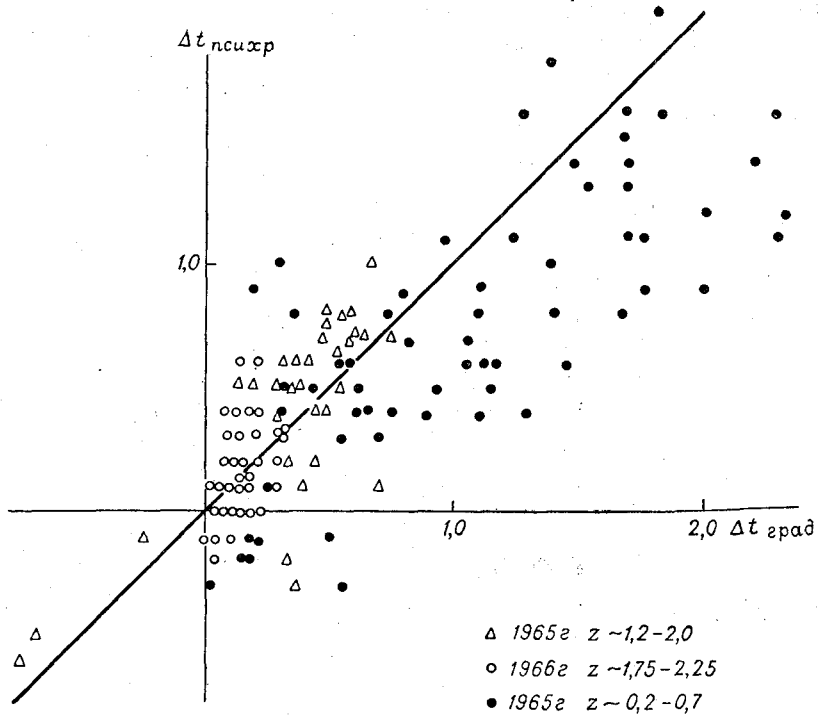


Рис. 13. Корреляционный график для Δt , измеренного с помощью АДГ и психрометров. Сиверская.

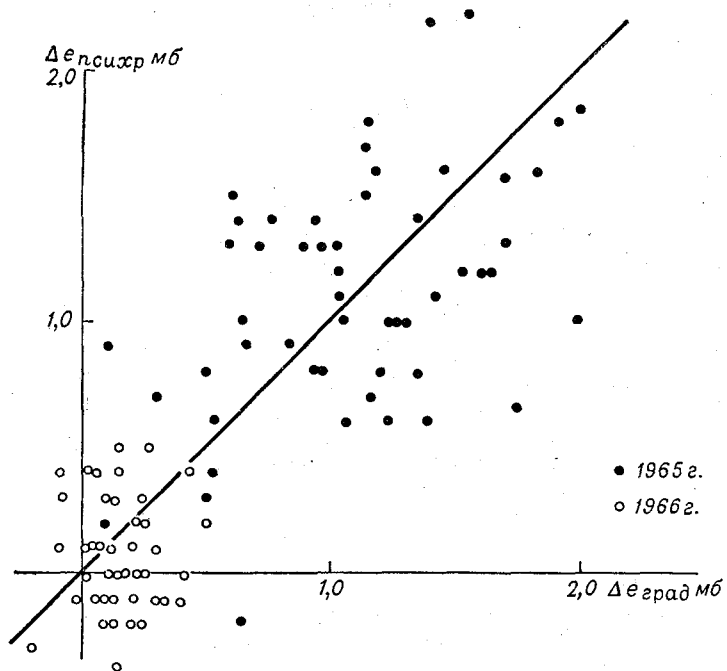


Рис. 14. Корреляционный график для $\Delta \epsilon$, измеренного с помощью АДГ и психрометров. Сиверская.

Более разумно создать эталонные приборы. В качестве эталона для измерителей градиентов температуры и влажности воздуха, по-видимому, вполне пригодны приборы типа АДГ.

На рис. 13 и 14 показано сравнение АДГ и психрометров во время экспедиционных работ в июле 1966 г. в Белогорке (ст. Сиверская).

Разброс точек здесь еще больше, чем на рис. 11 и 12, так как в условиях растительного покрова появляется еще одна причина, способствующая расхождению показаний психрометров и АДГ, обусловленная сильной неоднородностью поля температуры и влажности в этих условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Гидрометеиздат, Л., 1956.
2. Зарубин Е. В. Высокочастотный искровой анемометр. Труды ЛГМИ, вып. 21, 1966.
3. Зарубин Е. В. Способ определения скорости газового потока. Авторское свидетельство № 163444. Бюлл. изобр. № 12, 1964.
4. Ляпин Е. С. О турбулентном перемешивании воздуха в атмосфере. Метеорология и гидрология, № 5, 1948.
5. Качурин Л. Г. Электрические измерения аэрофизических величин. Изд. ЛГУ, Л., 1962.
6. Качурин Л. Г., Патрики Ф. Психрометрический метод измерения вертикальных градиентов влажности воздуха. Труды ГГО, вып. 52 (114), 1955.
7. Качурин Л. Г. и др. Автоматические градиентографы. Бюлл. изобретений № 19, 21, 1959.
8. Зарубин Е. В. Высокочастотный искровой анемометр. Сб. трудов ЛГМИ, вып. 21, 1966.

Ю. Е. ГИРШОВИЧ, К. И. КОБАК

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АГРОФИТОЦЕНОЗА

Решение задачи регулирования, управления и прогнозирования продуктивности растительных сообществ требует изучения динамики фотосинтеза в естественных условиях в зависимости от влияющих на него биологических, гидрометеорологических и почвенных факторов. Большинство из существующих в настоящее время способов определения интенсивности фотосинтеза (но изменению сухого веса, с помощью колориметрии, химических и радиометрических методов) не дает возможности вести непрерывные измерения и очень трудоемки из-за необходимости отбора большого количества проб по площади посева и во времени для получения достаточно репрезентативных данных. Поэтому в последние годы предпринимаются попытки исследования фотосинтеза по углекислотному газообмену растительных сообществ.

Баланс потоков углекислого газа в системе почва — растение — атмосферный воздух может быть представлен в виде

$$F_a = R_k + R_l + R_m - P_b,$$

где F_a — поток CO_2 над растительным покровом, R_k — дыхание корней, R_l — дыхание стеблей и листьев, R_m — выделения почвенных микроорганизмов, P_b — суммарный (брутто) фотосинтез, $R_k + R_m = F_p$ — поток CO_2 из почвы, а $P_b - R_l - R_k = P$ — чистый (нетто) фотосинтез. Поскольку составляющие почвенного потока углекислого газа не могут быть определены порознь, а, по имеющимся литературным данным [7], дыхание корней R_k составляет в большинстве случаев малую величину по сравнению с выделением почвенных микроорганизмов R_m , уравнение углекислотного баланса может быть представлено в виде

$$F_a = \alpha F_p - P,$$

где $\alpha = 0,7 \div 0,95$ в зависимости от типа почв, растительности и стадии развития посева.

Вертикальный поток углекислого газа в приземном слое воздуха, как и любой консервативной субстанции, определяется механизмом турбулентной диффузии и может быть записан в виде

$$F_a = -\rho k \frac{\partial c}{\partial z},$$

где ρ — плотность CO_2 , k — коэффициент турбулентной диффузии, $\frac{\partial c}{\partial z}$ — вертикальный градиент объемной концентрации CO_2 .

Возможность такого подхода к изучению турбулентных потоков углекислого газа в приземном слое воздуха была ясна уже давно, однако решение этой задачи сдерживалось сложностью инструментального измерения малых перепадов концентрации CO_2 в приземном слое воздуха.

Исследования содержания двуокиси углерода в атмосфере растительных сообществ и над ними, начавшиеся сравнительно давно, дали возможность установить распределение концентрации CO_2 на разных уровнях, ее суточную и сезонную динамику [19, 20, 26, 27, 28].

Были также сделаны попытки выявить роль отдельных источников углекислоты (почвенной и свободной атмосферы) в процессе ее ассимиляции растениями. Однако подавляющее большинство этих исследований ограничилось только изучением концентрации CO_2 в фитоценозе и не учитывало при этом интенсивности турбулентного обмена. Таким образом, решалась только одна сторона вопроса о снабжении углекислотой растительного сообщества.

Б. Губер [11, 12, 13, 14] представил необходимый для изучения продуктивности поток CO_2 как произведение градиента CO_2 на величину перемешивания. Эталонном интенсивности перемешивания служила скорость ветра. Измерив абсолютные концентрации CO_2 в шести точках на высотах от 1 до 22,5 м и умножив градиенты CO_2 на соответствующие скорости ветра, автор получил величины, приблизительно пропорциональные потоку, с явно выраженной суточной динамикой.

Первые попытки измерения потоков CO_2 были сделаны Иноуэ с сотрудниками [15, 16] на поле пшеницы (1957 г.) и на рисовом питомнике (1958 г.). На каждом поле были проведены суточные серии измерений. Воздух с шести уровней (внутри и над растительным покровом) засасывался в полиэтиленовые емкости, анализ же концентрации углекислого газа в пробах производился в лаборатории. Коэффициент обмена рассчитывался аэродинамическим методом по разности скоростей ветра на двух уровнях над посевам в предположении логарифмического профиля скорости ветра по высоте. Леман [18] получил потоки CO_2 над полем кукурузы, используя для последовательных измерений концентрации CO_2 на нескольких уровнях инфракрасный газоанализатор.

Длительные измерения турбулентных потоков углекислого газа были проведены Монтисом в Ротамстеде [22—24] на поле сахарной свеклы, а также над злаковыми и бобовыми. Для измерения перепадов концентрации CO_2 был использован специальный градиентный газоанализатор. Кроме измерений атмосферных потоков CO_2 , были проведены оценочные измерения прироста сухой биомассы по эталонным растениям. Было получено хорошее соответствие между метеорологической оценкой углекислотного обмена и обычными оценками прироста биомассы.

В первых работах по исследованию углекислотного газообмена растительных сообществ поток CO_2 из почвы или не учитывался совсем [15, 16, 18], или оценивался из общих соображений [22, 23].

Позднее Монтис [24] исследовал интенсивность почвенного потока углекислого газа методом поглощения CO_2 в растворе щелочи под установленным на почву колпаком. Отсчеты делались через несколько суток и выделение CO_2 из почвы за дневные часы принималось равным половине среднего суточного потока CO_2 из почвы. Полученные величины почвенного потока не превышали 15—20% общего количества углекислоты, ассимилированной растениями в течение вегетационного периода.

Суммируя полученные результаты, можно установить, что поток CO_2 над растительным покровом имеет явно выраженную суточную ритмику, отражающую характер жизнедеятельности подстилающей поверхности. В дневное время, когда идет фотосинтез, атмосферный поток направлен вниз. В ночные часы поток CO_2 направлен вверх. В период активного фотосинтеза в условиях развитого растительного покрова поток CO_2 из слоя воздуха над растениями является основным источником углекислого газа для растений, однако на других этапах вегетационного периода, а также в ночные часы поток CO_2 из почвы может составлять весьма существенную часть углекислотного баланса растительного покрова.

Успехи, достигнутые в данном направлении, позволяют поставить новые, более сложные задачи в исследовании газообмена фитоценозов. Возможность оценки продуктивности по интенсивности углекислотного газообмена требует для получения корреляционных коэффициентов, с одной стороны, всестороннего учета потоков CO_2 , с другой стороны, проведения достаточно репрезентативных биометрических измерений.

В последнее время сделаны первые шаги в разработке количественной теории фотосинтеза [1, 2, 3, 8, 21]. Проверка сделанных предположений и допущений требует изучения зависимости процессов газообмена от ряда важнейших гидрометеорологических параметров (ФАР, водно-температурного режима почвы и воздуха, турбулентности и др.).

Летом 1966 г. совместная экспедиция Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, Агрофизического института и Ленинградского гидрометеорологического института вела комплексные измерения на поле озимой ржи Научно-исследовательского института сельского хозяйства Северо-Западной зоны (Белогорка, Ленинградская область). Для исследования процессов газообмена были проведены следующие наблюдения.

В период с 8 июня по 7 июля проводились измерения концентрации CO_2 в воздухе на четырех высотах (у поверхности почвы, на уровне горизонта с максимальной ассимилирующей поверхностью, на верхней границе посева и на высоте 1 м над посевом). К началу наблюдений средняя высота посева была 90 см, к концу наблюдений — 170 см. С ростом растений верхние три уровня соответственно сдвигались.

Концентрация CO_2 определялась методом визуальной колориметрии [9, 10]. Шкала стандартных буферов в диапазоне 7,90—8,15 рН была приготовлена через 0,02 рН, а в интервале 8,15—8,25 рН — через 0,01 рН. Абсолютные величины рН приготовленных буферных растворов были проверены в лабораторных условиях на рН-метре типа ТТТ1С, который при абсолютной точности 0,01 рН дает значительно более высокую относительную точность (0,003—0,005 рН). Приготовленная таким образом шкала дает возможность определять концентрацию CO_2 с точностью 1—2,5 ppm (0,002—0,005 мг/л). Для уменьшения температурной погрешности измерения были приготовлены две шкалы: для температуры +10 и +23°. В процессе измерений используемая стандартная шкала поддерживалась при температуре калибровки.

Замеры концентрации CO_2 проводились через час с 8 до 18—20 час. Были проведены две серии круглосуточных наблюдений (11—12 и 15—16 июня). Коэффициент обмена в слое воздуха над растительным покровом (для расчета атмосферного потока CO_2) и внутри растительного покрова у поверхности почвы (для расчета потока CO_2 из почвы) определялся методом теплового баланса по стандартной методике¹.

¹ Н. А. Ефимова. Основные особенности метеорологического режима на полях озимой пшеницы и озимой ржи (см. наст. сб.).

С помощью градиентного оптико-акустического газоанализатора в период с 14 июня по 7 июля было проведено несколько серий непрерывных круглосуточных измерений (всего 12) перепада концентрации CO_2 над посевом с разницей высот 1 м.

Нижний уровень находился в 5—10 см над верхней границей посева. Мачта с заборниками проб воздуха была вынесена на расстояние 50 м на западо-юго-запад от будки с приборами (высота будки 220 см), расположенной в центре поля, имеющего размеры 300×350 м.

Воздух из заборников с помощью побудителя расхода подавался к газоанализатору по двум полиэтиленовым шлангам с внутренним диаметром 8 мм. На этой же мачте были установлены два психрометра

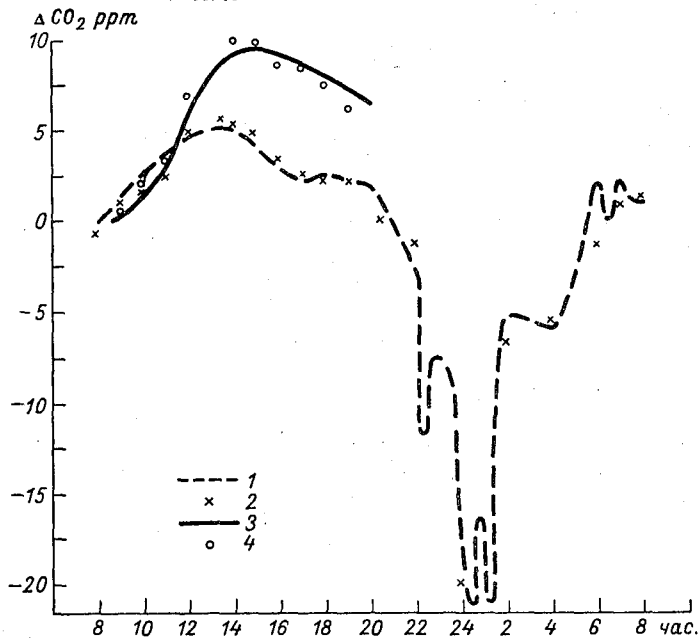


Рис. 1. Суточный ход разности концентраций CO_2 над посевом.

15—16 VI: 1 — градиентный газоанализатор, 2 — колориметрия;
18 VI: 3 — градиентный газоанализатор, 4 — колориметрия.

с полупроводниковыми термосопротивлениями для измерения перепада температуры и влажности воздуха на тех же высотах. Рядом была установлена стойка с балансомером АФИ для измерения величины радиационного баланса. Электрические сигналы, пропорциональные градиентам концентрации CO_2 , градиентам температуры и влажности воздуха, а также величинам радиационного баланса и потока тепла в почву, подавались на вход автоматического устройства для вычисления турбулентных потоков углекислого газа, тепла и влаги в приземном слое воздуха (тепlobалансограф). Кроме того, были проведены четыре суточные серии измерений потока CO_2 из почвы¹.

Профиль концентрации CO_2 внутри и над посевом. Типичный суточный ход перепада концентрации CO_2 над посевом представлен на рис. 1.

¹ Методика градиентных измерений CO_2 с помощью оптико-акустического газоанализатора и расчета атмосферных и почвенных потоков CO_2 изложена в статье Ю. Е. Гиршовича «Методика исследования углекислотного газообмена растительных сообществ» (см. наст. сб.).

Переход градиента через ноль практически совпадает по времени с переходом через ноль радиационного баланса. Хотя величина перепада концентрации CO_2 в слое воздуха над посевом определяется не только интенсивностью процесса ассимиляции, но и величиной коэффициента обмена, максимум градиента в дневное время в основном наблюдается между 13 и 15 час. Максимальные разности (15 ppm) концентрации CO_2 над посевом в эти часы отмечались 10—20 июня (в период интенсивного роста ржи), минимальные (3—4 ppm) — с 30 июня по 7 июля (стадия налива зерна).

В ночное время, когда величина коэффициента обмена резко уменьшается, градиент концентрации CO_2 над посевом меняет знак и по абсолютной величине, как правило, превышает градиенты, характерные для дневного времени. Максимумы наблюдаются в период с 22—23 до 2—3 час. В отдельные безветренные ночи (15—16 июня, 5—6 июля)

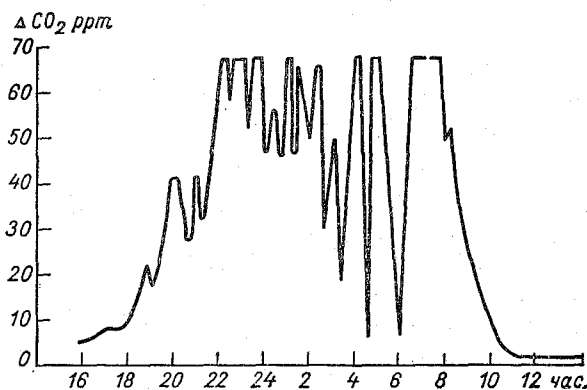


Рис. 2. Суточный ход разности концентраций CO_2 в воздухе над посевом ($H=270$ см) и у поверхности почвы ($H=2\div 3$ см) 20—21 VI.

разность концентрации CO_2 над посевом в период между 23 и 5 час. ночи превышала 25 ppm, вызывая зашкаливание газоанализатора. Это объясняется большой интенсивностью почвенного потока CO_2 в вечерние часы.

На рис. 2 показан суточный ход разности концентрации CO_2 в воздухе над посевом и у поверхности почвы. Если в полуденные часы, соответствующие интенсивному фотосинтезу, перепад стремится к нулю, то в ночные часы он достигает 70 ppm. Колебания градиента CO_2 объясняются сильными пульсациями скорости ветра в эти часы.

Измерения концентрации CO_2 в воздухе на четырех высотах дают четкий суточный ход на всех уровнях (рис. 3). На высоте 1 м над посевом концентрация CO_2 изменяется в основном в пределах от 320 до 360—370 ppm, уменьшаясь днем и увеличиваясь ночью. У поверхности почвы суточные колебания концентрации CO_2 больше по величине (325—420 ppm), но имеют тот же временной ход.

Вертикальный профиль концентрации CO_2 (рис. 4) в дневные часы имеет характерный минимум внутри растительного покрова, уже наблюдавшийся рядом исследователей. Недостаточное количество точек измерения по высоте посева не позволило установить точную высоту этого перегиба для каждого интервала осреднения, однако следует указать на важность этого уровня профиля. Очевидно, что уровень, который соответствует минимуму концентрации CO_2 внутри растительного покрова, делит весь посев на две области, отличающиеся

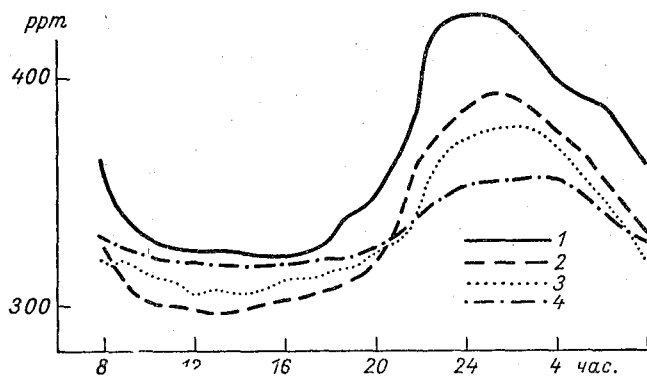


Рис. 3. Суточный ход абсолютной концентрации CO_2 на четырех высотах.
 1 — у поверхности почвы, 2 — на высоте 90 см, 3 — 110 см, 4 — 200 см.

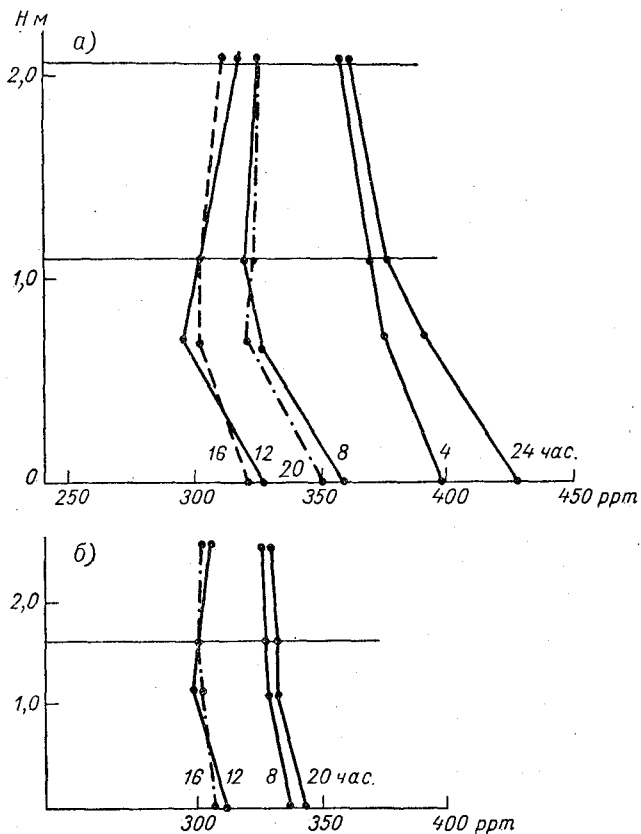


Рис. 4. Вертикальные профили концентрации CO_2 .
 а) 11—12 VI, б) 26 VI.

источником снабжения углекислого газа. Нижняя область ассимилирует CO_2 , продуцируемый почвой, верхняя — из слоя воздуха над посевом. Определение уровня минимальной концентрации внутри растительного покрова при параллельном измерении атмосферного и почвенного потоков CO_2 , распределения ФАР в посевах по вертикали и послойной биометрии даст возможность оценить ряд важных параметров фотосинтеза, в том числе и интенсивность переноса ассимилятов в растениях.

К концу июня, когда рост практически прекращается и уменьшается интенсивность фотосинтеза, вертикальный профиль выражен слабо (рис. 4 б).

Расхождение величин перепадов концентрации CO_2 над посевом, полученных разными методами, как видно из рис. 1, не превышает 5—10% в дневные часы, что находится в пределах суммарной погрешности этих измерений. В ранние утренние и предвечерние часы, когда

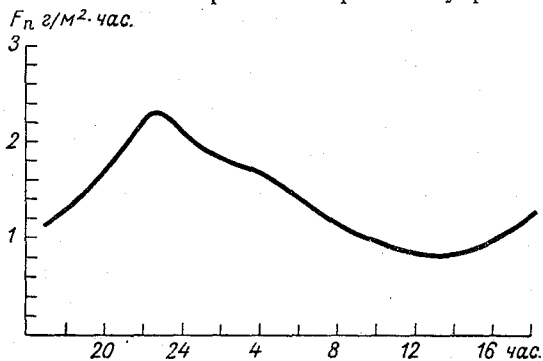


Рис. 5. Суточная динамика потока CO_2 из почвы (6—7 VII).

градиенты малы, расхождения увеличиваются вследствие недостаточной чувствительности колориметрических измерений и, возможно, отсутствия достаточного пространственного осреднения при заборе проб воздуха в приемник колориметрического прибора.

Поток CO_2 из почвы.

Определение интенсивности почвенного потока CO_2 в процессе экспедиционных наблюдений проводилось двумя независимыми мето-

дами. Для сопоставимых дней наблюдений получено хорошее совпадение дневной динамики потока. Величины почвенного потока, полученные протяжкой воздуха через установленный на почву колпак, оказались в среднем на 20—30% больше величин, полученных по данным разности концентрации CO_2 и коэффициента обмена внутри растительного покрова. Наиболее вероятным источником расхождения, по-видимому, является погрешность определения коэффициента обмена внутри растительного покрова.

Характерный суточный ход почвенного потока CO_2 представлен на рис. 5. В дневные часы, соответствующие активному фотосинтезу, почвенный поток уменьшается, а в предвечерние часы увеличивается, достигая максимума в 21—23 часа. Такой ход интенсивности выделения CO_2 из почвы совпадает с ходом температуры в почве на глубине 20—25 см. В часы максимальной интенсивности поток углекислого газа из почвы увеличивается в 2—2,5 раза по сравнению с полуденными часами, соответствующими минимальной интенсивности.

При определении почвенного потока колпак каждые сутки устанавливался на новом месте (при его установке растения в месте установки срезались точно на уровне поверхности почвы). Интенсивность продуцирования CO_2 из почвы на четырех участках составляла 0,6—0,9 г/м²·час в 12—13 час. и 1,7—2,3 г/м²·час в 22—23 часа (1—7 июля).

Для этих дней наблюдений дневной поток CO_2 из почвы (от 7 до 19 час.) составлял 30—40% суммарной продуктивности углекислоты почвы.

Атмосферный поток CO_2 . Наблюдения подтвердили наличие четко выраженной суточной динамики атмосферного потока CO_2 . Максимальные его величины приходится на 12—15 час. (в соответствии с максимальной интенсивностью солнечной радиации). В отдельные дни около 14 час. отмечалось уменьшение атмосферного потока CO_2 , что, очевидно, является следствием полуденной депрессии фотосинтеза. На рис. 6 представлены кривые суточной динамики атмосферного потока CO_2 .

Наиболее интенсивные полуденные потоки CO_2 имели место в период с 10 по 20 июня и достигали 13—14 г/м²·час. К концу наблюдений они составляли 4—5 г/м²·час. В ночные часы максимальные атмосферные потоки CO_2 наблюдаются в 22—23 часа; они достигают 6—7 г/м²·час. в период с 14 по 20 июня и с 1 по 7 июля и уменьшаются до 2—3 г/м²·час. 21—29 июня. Максимум ночного атмосферного потока

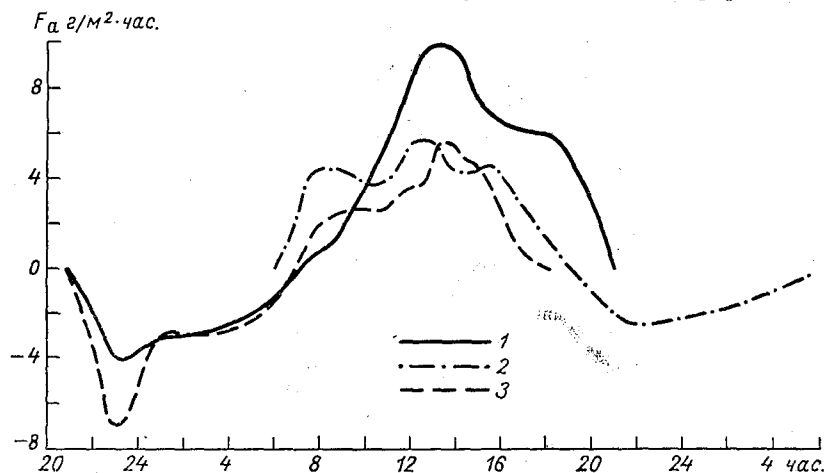


Рис. 6. Суточная динамика атмосферного потока CO_2 .
1 — 14—15 VI, 2 — 23—24 VI, 3 — 5—6 VII.

в 22—23 часа соответствует наибольшей величине почвенного потока CO_2 в эти часы (сравните с рис. 5).

Суммарный поток CO_2 из атмосферы в течение светового дня достигает 70—80 г/м² в период наиболее активного роста посева (10—20 июня) и уменьшается до 15—18 г/м² к концу наблюдений (1—7 июля), когда рост растений практически прекратился. Для последнего периода, когда проводились круглосуточные определения потока CO_2 из почвы, разность между атмосферным и почвенным потоками в ночные часы дает величину дыхания наземной части посева в пределах 12—15 г/м²·ночь, что составляет 40—50% количества CO_2 , ассимилированного посевом в течение светового дня. Если для остальных периодов наблюдений принять аналогичную динамику суточного хода почвенного потока углекислоты, то для дыхания посева будут получены величины 5—10 г/м²·ночь, что составляет 5—10% величины фотосинтеза для периода 10—20 июня и 10—40% для периода 20—30 июня.

Суммарный поток углекислоты и прирост биомассы. На рис. 7 показана динамика дневных величин (за время с 7 до 19 час.) почвенного, атмосферного и суммарного потоков CO_2 в течение всего периода наблюдений. Наиболее интенсивные потоки CO_2 из почвы имеют место с 10 по 20 июня. Между 20 и 30 июня интенсивность почвенного потока значительно уменьшается, несмотря на увеличение максимальных суточных температур (рис. 8) в жизнедеятельном слое почвы в эти дни. Это

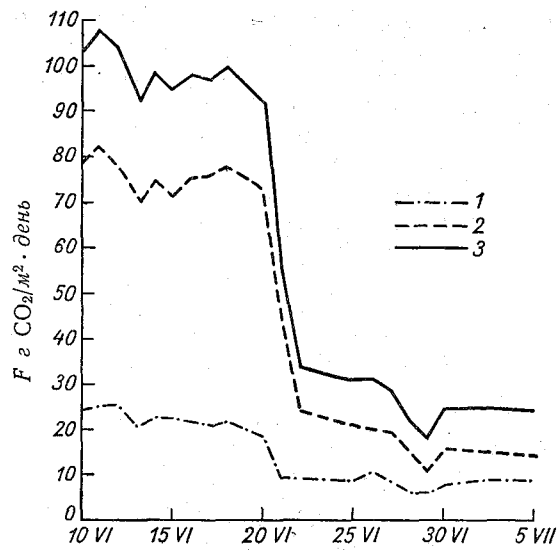


Рис. 7. Динамика дневных (с 7 до 19 час.) величин почвенного, атмосферного и суммарного потоков CO_2 за весь период наблюдений.
 1 — почвенный поток, 2 — атмосферный поток, 3 — суммарный поток.

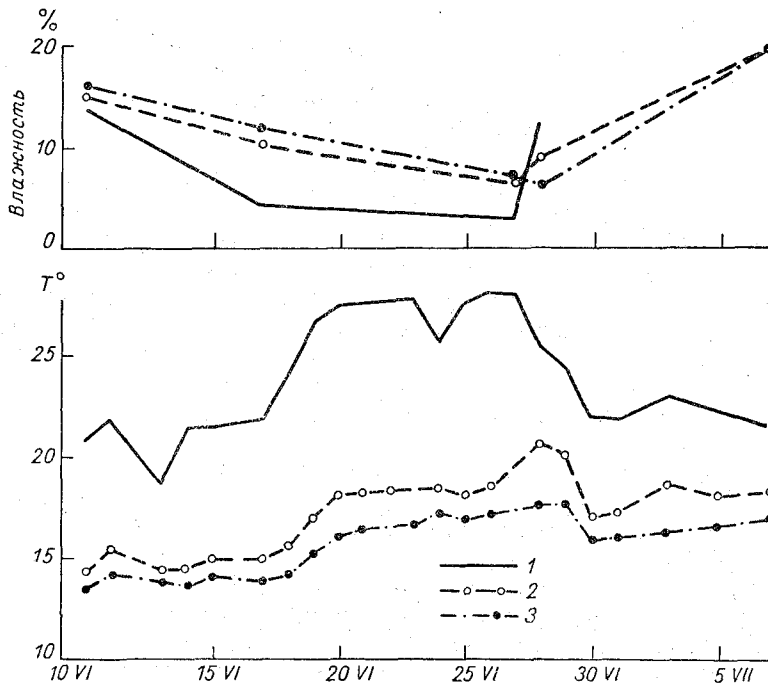


Рис. 8. Ход влажности и средних дневных температур в почве за весь период наблюдений.
 1 — поверхность почвы, 2 — глубина 10 см, 3 — глубина 20 см.

объясняется уменьшением влажности почвы (с 15,8% 11 июня до 6,3% 27 июня на глубине 20 см и с 15 до 6,2% соответственно на глубине 10 см), что приводит к снижению микробиологической активности почвы. В период с 30 июня по 7 июля почвенный поток опять несколько возрастает в связи с увеличением влажности почвы (прошли дожди).

Атмосферный и суммарный потоки CO_2 имеют максимальные величины во вторую десятидневку июня, соответствующую наиболее интенсивному росту растений (со 100 до 160 см). После 20 июня наблюдается их резкое уменьшение. В конце месяца зафиксированы следующие минимальные значения: 10,6 г/м²·день (атмосферный поток) и 17 г/м²·день (суммарный). В начале июля происходит некоторое увеличение потоков, но и в этот период (с 1 по 5 июля) величина атмосферного потока не превышает 15 г/м²·день, а суммарного — 25 г/м²·день.

Определение прироста биомассы посева проводилось с 10 июня по 1 июля¹.

Для сопоставления суммарного дневного потока CO_2 с приростом биомассы необходимо учесть дыхание корней R_k и ночное дыхание наземной части посева R_n . Для расчета расхода органического вещества на дыхание корней использовались данные Дж. Иенсена [17] и Н. А. Максимова [6]. По Иенсену, дыхание целых корней зерновых культур составляет при 20° около 1,5 мл CO_2 (~3 мг) в час на 1 г сырого веса, а при 5—10° около 0,5 мл (~1 мг). Принимая для 10—20 июня среднюю часовую интенсивность дыхания корней равной 1,9 мг CO_2 в час на 1 г, получим с учетом свежего веса корней (230 г/м²), что за счет дыхания корней посев расходует в течение суток 10,9 г CO_2 на 1 м². По данным Н. А. Максимова, интенсивность дыхания корней злаковых в период активного роста составляет в среднем 4 мл CO_2 в час на 1 г сухого вещества. Поскольку сухой вес корней в этот период составляет 55 г/м², величина суточного дыхания корней оказывается равной 10 г CO_2 на 1 м². Таким образом, в период 10—20 июня дыхание корней R_k составляет в среднем 10—11 г CO_2 в сутки на 1 м² или 9—11% суммарного дневного потока CO_2 . Принимая во внимание, что поток CO_2 из почвы в течение светового дня (7—19 час.) составляет лишь 30—40% суточного потока, получим величину среднего суточного потока CO_2 из почвы 50—60 г/м². Следовательно, дыхание корней составляет 17—22% почвенного потока, что находится в соответствии с данными [7], согласно которым доля дыхания корней оценивается в пределах 15—20%, максимально — 30%, общего количества CO_2 , продуцированного почвой.

По данным Джеймса [4], интенсивность дыхания листьев пшеницы в ночные часы составляет 0,3—0,4 мг CO_2 в час на 1 г, а стеблей — 0,2—0,3 мг CO_2 в час на 1 г. При величине сырой биомассы листьев 450 г/м² и стеблей 2550 г/м² имеем для дыхания листьев и стеблей соответственно 1,6—2,0 и 6—9 г CO_2 на 1 м². Таким образом, в период активного роста растений за счет ночного дыхания листьев и стеблей ежесуточно теряется 7—11 г CO_2 на 1 м², что составляет 7—11% суммарного дневного потока углекислоты. Эти величины хорошо совпадают с данными, полученными по разности атмосферного и почвенного потоков CO_2 в ночное время и приведенными выше. Аналогично были получены величины среднего суточного дыхания корней и ночного дыхания наземной части посева для периодов 20—25 и 25—30 июня.

¹ Г. С. Купченко. Некоторые биометрические характеристики озимых культур (см. наст. сб.).

К 20—25 июня по сравнению с предыдущей декадой площадь зеленых листьев уменьшается на 53,5%, что ведет к снижению расхода органического вещества на их ночное дыхание до 0,8—1,0 г/м². Но одновременно происходит ощутимое увеличение биомассы стеблей (их ночное дыхание составляет в этот период 7,2—10,6 г/м²) и желтых листьев. Согласно Джеймсу, интенсивность дыхания пожелтевших листьев сначала довольно велика, приблизительно одна треть величины дыхания молодых зеленых листьев. Постепенно она уменьшается, и через 6—8 дней после начала пожелтения дыхание прекращается полностью. Весьма приблизительная оценка вклада этих листьев в ночное дыхание посева дает величину 0,2—0,3 г/м².

Таким образом, в период 20—25 июня за счет ночного дыхания наземной части посева в среднем ежесуточно теряется около 10 г СО₂ с 1 м² посева, или 15—30% суммарного дневного потока углекислоты.

Для последней пятидневки июня рассчитанная величина ночного дыхания посева оказывается также равной приблизительно 10 г СО₂ за ночь с 1 м², поскольку продолжающееся уменьшение дыхания зеленых листьев за счет сокращения их площади компенсируется увеличением интенсивности дыхания растущих колосьев.

Уровень дыхания корней для периода 20—25 июня, по-видимому, остается таким же, как и в предыдущую декаду, так как, несмотря на возможное снижение интенсивности дыхания корней после цветения, с 20 июня наблюдается значительное увеличение температуры почвы (см. рис. 8). К концу же месяца (25—30 июня) расход органического вещества на дыхание корней уменьшается в связи с полным прекращением роста растений. По данным Мюллера [25], это снижение составляет 12—15%. Для двух последних пятидневок июня дыхание корней составляет соответственно 28—36 и 33—43% среднего суточного потока СО₂ из почвы. Столь значительное возрастание доли корневого дыхания в общем количестве углекислоты, продуцируемой почвой, очевидно, вызывается резким снижением влажности почвы в эти дни.

Сопоставление количества углекислоты, ассимилированной растительным покровом, с приростом биомассы проводилось двумя способами. Принимая, что в период активного роста растений ассимиляция *n* молей СО₂ приводит к получению 1 моля сухой массы вида (СН₂О)_{*n*}, ожидаемый прирост сухого вещества можно найти из нетто-ассимиляции СО₂ (коэффициент эффективности фотосинтеза $K_{эф} = \frac{30}{44}$) и сопоставить с величиной, полученной в процессе наблюдений методом взвешивания. При другом способе расчета нетто-ассимиляция СО₂ и прирост биомассы были пересчитаны на чистый углерод с учетом того, что у зерновых злаков чистый углерод составляет обычно около 47% абсолютно сухого веса.

Как показывают данные наблюдений и расчетов, сведенные в табл. 1 и 2, лучшие результаты дает сопоставление суммарного потока СО₂ с полученным приростом биомассы по чистому углероду (табл. 2).

Думается, что сопоставление по углероду более правомерно ввиду разнородности продуктов, получаемых в процессе фотосинтеза.

В период активного роста растений (10—20 июня) имеет место наилучшее соответствие результатов сопоставления суммарного потока СО₂ и найденного прироста сухого вещества с учетом суточного дыхания корней и ночного дыхания наземной части посева. Для остальных периодов результаты сопоставления несколько хуже. Наряду с погрешностью определения потоков СО₂ (в основном из-за коэффициента обмена) это можно объяснить тем, что для второго и третьего периодов

Таблица 1

	Июнь			
	10—20	20—25	25—30	10—30
Дневные потоки углекислоты, г CO ₂ :				
атмосферный	782	144	83	1009
почвенный	205	55	42	302
суммарный	987	199	125	1311
Суточное дыхание корней, г CO ₂	103	52	44	199
Ночное дыхание листьев и стеблей, г CO ₂	88	50	50	188
Нетто-ассимиляция, г CO ₂	796	97	31	924
Расчетный прирост сухого вещества, г	540	66	21	627
Полученный прирост сухого вещества, г	481	43	18	542
Разность:				
г	+59	+23	+3	+85
% от прироста	+12	+55	+17	+61

Таблица 2

	Июнь			
	10—20	20—25	25—30	10—30
Дневные потоки углекислоты, г С:				
атмосферный	213	39	23	275
почвенный	56	15	11	82
суммарный	269	54	34	357
Суточное дыхание корней, г С	28	14	12	54
Ночное дыхание листьев и стеблей, г С	24	13,5	13,5	51
Нетто-ассимиляция, г С	217	26,5	8,5	252
Прирост сухого вещества, г С	226	20,3	8,5	254,8
Разность:				
г С	-9	+6,2	0	-2,8
% от прироста	-4	+30,5	0	-1

наблюдений увеличивается погрешность определения прироста биомассы как малой разности двух больших величин. Кроме того, приведенные в таблицах данные по дыханию корней даны для этих периодов с большей погрешностью, чем для первого периода, из-за отсутствия в литературе данных по динамике корневого дыхания на разных стадиях развития зерновых злаков.

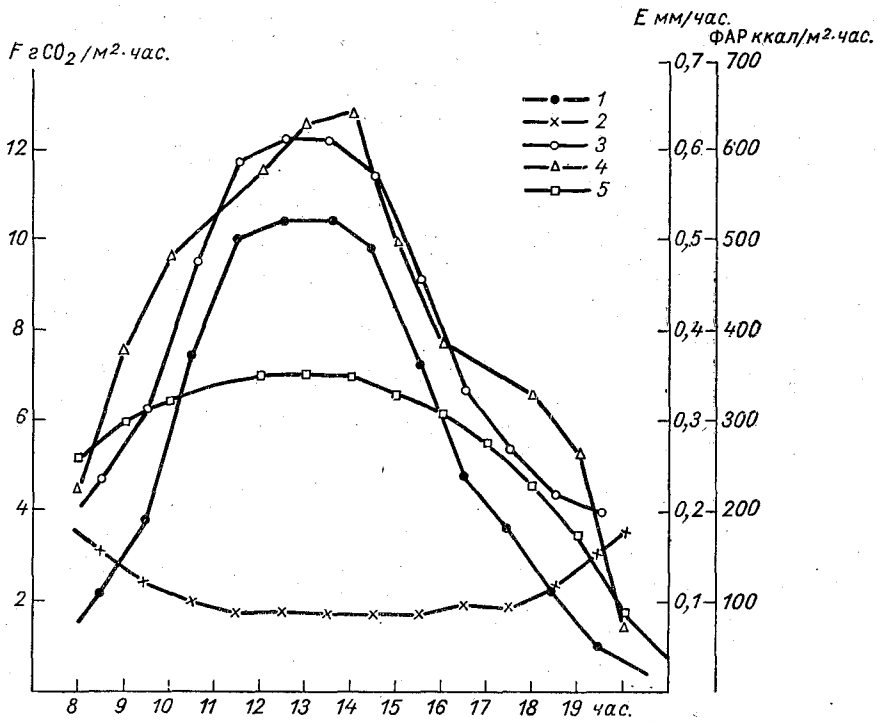


Рис. 9. Дневной ход средних часовых величин потоков углекислого газа, испарения и приходящей ФАР (10—20 VI).
 1 — атмосферный поток CO₂, 2 — почвенный поток CO₂, 3 — суммарный поток CO₂, 4 — испарение, 5 — ФАР.

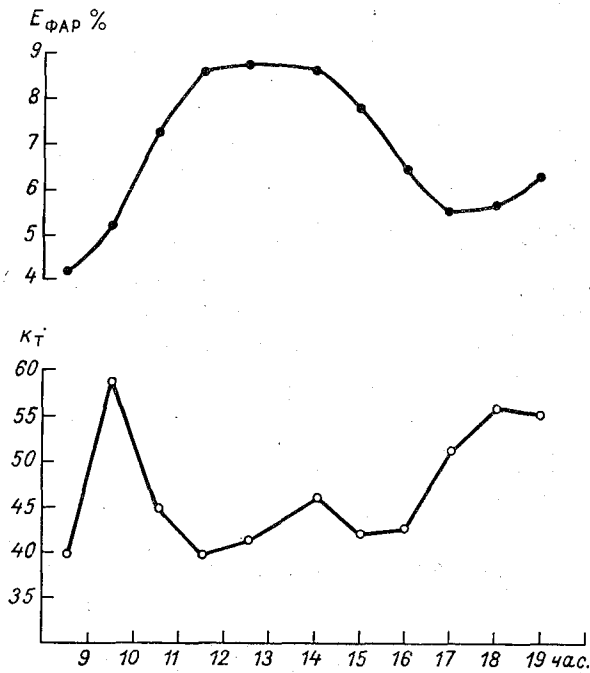


Рис. 10. Дневной ход коэффициента использования ФАР $E_{\text{ФАР}}$ и транспирационного коэффициента фотосинтеза k_T за период 10—20 VI.

В среднем за период 10—30 июня потери на дыхание корней и ночное дыхание наземной части посева составляют 41% — величину, идеально совпадающую с литературными данными (40%) по зерновым злакам [25]. На разных этапах развития эта величина меняется. В период активного роста растений траты на дыхание составляют 25%, а с 25 по 30 июня они в 3 раза превышают нетто-ассимиляцию углекислоты. Атмосферный поток CO_2 в течение светового дня составляет в первый период наблюдений 95% прироста, во второй 195% и в третий 288%. Для почвенного потока в те же периоды получаем соответственно 25, 75 и 138%.

Для периода 10—20 июня наряду с высокой фотосинтетической активностью посева характерна стабильность и однородность метеорологических условий (особенно радиационного режима). На рис. 9 дана дневная динамика величин средних часовых потоков углекислого газа, испарения и приходящей ФАР, осредненных за этот период.

Принимая, что на ассимиляцию одного моля CO_2 расходуется 112 ккал, можно рассчитать коэффициент использования посевом фотосинтетически активной части приходящей солнечной радиации $E_{\text{ФАР}}$. На рис. 10 показан дневной ход $E_{\text{ФАР}}$ и k_T — транспирационного коэффициента фотосинтеза, равного отношению интенсивности транспирации к интенсивности ассимиляции ($\text{г H}_2\text{O}/\text{г CO}_2$). Согласно А. Р. Константинову [5], для зерновых культур в районах Северо-Запада при температуре воздуха $+25^\circ$ транспирация посева, находящегося в фазе колошения, составляет 85% суммарного испарения. Таким образом, транспирация посева была найдена по величине суммарного испарения. Как следует из рис. 10, в период 10—20 июня исследуемый посев озимой ржи являлся высокопродуктивным растительным сообществом.

Выводы

1. Градиентные измерения концентрации CO_2 внутри растительного покрова и над ним подтвердили наличие четкого суточного хода на всех уровнях.

2. Наблюдения показали наличие ярко выраженной динамики атмосферного, почвенного и суммарного потоков CO_2 как в течение суток, так и на разных стадиях развития посева.

Почвенный поток достигает максимума в вечерние часы, причем на световой день падает 30—40% суточного потока CO_2 из почвы.

Атмосферный поток CO_2 в период активного роста растений составляет около 80% суммарного потока в течение светового дня, уменьшаясь к концу наблюдений, когда рост посева прекращается, до 68%.

3. Суммарный поток углекислоты хорошо сопоставим с приростом сухого вещества при учете суточного дыхания корней и ночного дыхания наземной части посева, особенно в период активного роста посева. Величина ночного дыхания стеблей и листьев растений, полученная расчетным путем, совпадает с величиной, полученной по разности атмосферного и почвенного потоков CO_2 в ночные часы. Дыхание корней в основном составляет 17—30% почвенного потока CO_2 , увеличиваясь до 43% в условиях резкого падения влажности почвы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будыко М. И. К теории физико-географического процесса. Вопросы географии, вып. 15, 1949.
2. Будыко М. И., Гандин Л. С. Об учете закономерностей физики атмосферы в агрометеорологических исследованиях. Метеорология и гидрология, № 11, 1964.

3. Будыко М. И., Гандин Л. С. К теории фотосинтеза в слое растительного покрова. ДАН СССР, т. 164 (2), 1965.
4. Джеймс Р. Дыхание растений. ИЛ, М., 1956.
5. Константинов А. Р. Испарение в природе. Гидрометеониздат, Л., 1963.
6. Максимов Н. А. Краткий курс физиологии растений. Сельхозгиз, М., 1958.
7. Мина В. Н. Интенсивность образования углекислоты и ее распределение в почвенном воздухе в выщелоченных черноземах в зависимости от состава лесной растительности. Труды Лаб. лесоведения, № 1, 1960.
8. Ничипорович А. А., Будаговский А. И., Росс Ю. К. Количественная теория фотосинтеза и ее значение для решения научных и практических задач физической географии. Изв. АН СССР, сер. географ., 6.34, 1964.
9. Catsky J. Zur Frage der PH Bestimmung bei colorimetrischen Assimilationmessungen. Planta, 55, 1960, 381—389.
10. Catsky J., Slavik B. Freilandapparat zur Bestimmung der Intensität des Photosynthese. Biol. Plant., 2, 1960, 107—122.
11. Huber B. Registrierung des CO₂-Gefälles und Berechnung des CO₂-Stromes über Pflanzengesellschaften mittels URAS. Ber. d. dtsh. Bot. Ges., 63, 1950, 53.
12. Huber B. Der Einfluß der Vegetation auf Schwankungen des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre. Arch. f. Meteor., 4, 1952, 154—167.
13. Huber B. Über die Reichweite vegetationsbedingter Tagesschwankungen im CO₂-Gehalt der Atmosphäre. Forstw. Cbl., 71 (2), 1952, 372—380.
14. Huber B. Die CO₂-Konzentration in Pflanzengesellschaften. Handb. d. Pflanzenphysiologie, 5, 1960, 339—348.
15. Inoue E., a. o. The aerodynamic measurement of photosynthesis over the wheat field. J. Agric. Met. 13, 1958, 121—125.
16. Inoue E. a. o. The aerodynamic measurement of photosynthesis over a nursery of rice plants. J. Agric. Met. 14, 1958, 45—53.
17. Jensen G. Effect of temperature and shifts in temperature on the respiration of intact root systems. Physiol. Plant., 13, 4, 1960.
18. Lemon E. Photosynthesis under field conditions. II. An aerodynamic method for determining the turbulent carbon dioxide exchange between the atmosphere and a corn field. Agronomy J., 52 (12), 1960, 697—703.
19. Lundegård H. Der Kreislauf der Kohlensäure in der Natur. Jena. 1924.
20. Misra R. K. Studies on the carbon dioxide factor in the air and soil near the ground. Ind. J. Met. and Geophys., 1 (4), 1950, 275—286.
21. Monsi M., Saeki T. Über den Zichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. Japan. J. Bot., 14, 22, 1953.
22. Monteith J. L., G. Szeicz. Carbon dioxide flux over a field of sugar beet. Q. J. Roy. Met. Soc., 86, 1960, 205—214.
23. Monteith J. L. Measurement and interpretation of carbon dioxide fluxes in field. Netherl. J. Agric. Sc. 10 (5), 1962.
24. Monteith J. L., Szeicz G. and Yabuki K. Crop photosynthesis and the flux of carbon dioxide below the canopy. J. appl. Ecol., 1, 1964, 321—337.
25. Müller D. Wie groß ist der prozentuale Anteil der Nettoproduktion und der Bruttoproduktion. "Stoffproduktion der Pflanzendecke". 1962. S. 26—32.
26. Reinau E. Kohlensäure und Pflanzen, Halle. 1920.
27. Reinau E. Der CO₂ Gehalt, Lichtproduktgesetz und Resttheorie der Luft CO₂. Angew. Bot., 31 (3), 1957, 74—83.
28. Tamm E., Krzysch G. Beobachtungen des Wachstumfaktors CO₂ in der Vegetationszone. Ztsch. f. Acker und Pflanzenbau, 107 (3), 1959, 275—300

Ю. Е. ГИРШОВИЧ

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛЕКИСЛОТНОГО ГАЗООБМЕНА РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ

Баланс вертикальных потоков углекислого газа в системе почва—растение—приземный слой воздуха может быть представлен в виде

$$F_a = F_{\pi} + R_{\pi} - P_6$$

где F_a — атмосферный поток CO_2 над растительным покровом, F_{π} — поток CO_2 из почвы, R_{π} — дыхание наземной части фитоценоза, P_6 — суммарный (брутто) фотосинтез. Отсюда видно, что для нахождения величины ассимиляции фитоценоза $P_6 - R_{\pi}$ в течение светового дня и дыхания R_{π} ночью ($P_6 = 0$) необходимо определить атмосферный и почвенный потоки углекислого газа.

Вертикальный перенос углекислого газа в приземном слое воздуха, как и любой другой консервативной субстанции, определяется механизмом турбулентной диффузии и, следовательно, описывается уравнением

$$\bar{F}_a \bar{r} = -\rho k \frac{\partial \bar{c}}{\partial z},$$

где \bar{F}_a — средний поток CO_2 , ρ — плотность CO_2 , k — коэффициент турбулентной диффузии, $\frac{\partial \bar{c}}{\partial z}$ — градиент среднего значения объемной концентрации CO_2 в приземном слое воздуха. Решая уравнение турбулентной диффузии совместно с уравнением теплового баланса для подстилающей поверхности с учетом известного отношения Боуэна, получим [4]

$$F_a = 1,8 \frac{(R - B) \Delta c}{\Delta e + 0,48 \Delta T} \text{ г/м}^2 \cdot \text{час}, \quad (1)$$

где R — радиационный баланс ($\text{кал/см}^2 \cdot \text{мин.}$), B — поток тепла в почву ($\text{кал/см}^2 \cdot \text{мин.}$), Δc — перепад концентрации CO_2 в воздухе на двух высотах над растительным покровом ($10^{-4}\%$ или ppm), Δe и ΔT — перепады влажности (мм рт. ст.) и температуры ($^{\circ}\text{C}$) воздуха на тех же высотах, 1,8 и 0,48 — коэффициенты размерности.

Формула (1) получена в предположении равенства коэффициентов обмена для турбулентных потоков тепла, влаги и углекислого газа в приземном слое воздуха и справедлива для любого типа горизонтальной однородной подстилающей поверхности, для которой можно пренебречь горизонтальной адвекцией. При этом относительная погрешность определения вертикальных потоков за счет горизонтальной адвекции N может быть найдена, согласно [1], из выражения

$$N = -\frac{k_1}{u_1 z_1} x \ln(1 - N),$$

где H — предельная высота измерения, x — расстояние от места измерения до границы поверхности, k_1, u_1, z_1 — постоянные в обобщенном степенном законе Лайхтмана для распределения скорости ветра с высотой.

Таким образом, для определения атмосферного потока углекислого газа необходимо прежде всего измерить малые перепады концентрации CO_2 над растительным покровом. В настоящее время наиболее точными приборами для определения концентрации многих газов (в том числе и CO_2), входящих в состав многокомпонентных газовых смесей, являются оптико-акустические газоанализаторы ввиду их большой избирательности, разрешающей способности, а также в связи с тем, что они дают возможность вести непрерывное измерение и регистрацию [3].

Однако определение малых перепадов концентрации по разности значений абсолютных концентраций приводит к большой погрешности, так как искомая разность может быть соизмерима с погрешностью газового анализа и даже меньше. Оптико-акустические газоанализаторы, выпускаемые в СССР и за рубежом (в иностранной литературе они обычно называются «инфракрасные газоанализаторы»), выполнены по дифференциальной схеме измерения, в которой поток радиации, прошедший через рабочую кювету с исследуемой газовой смесью, сравнивается с потоком радиации, прошедшим через эталонную кювету, заполненную непоглощающим газом. Если эталонную кювету использовать в качестве второй рабочей, то сигнал от оптико-акустической камеры будет пропорционален разности концентрации исследуемого газа в двух сравниваемых газовых потоках. Ряд исследователей [2, 6, 7] использовали эту возможность для непосредственного измерения перепадов концентрации CO_2 , однако в литературе отсутствуют анализ погрешностей газоанализатора при градиентной схеме измерения и методика градуировки.

Для исследования потоков углекислого газа в приземном слое воздуха в Агрофизическом институте в 1964—1965 гг. была разработана методика градиентных измерений CO_2 путем реконструкции газоанализатора ОА-5501 (0—0,01% CO_2 по объему). В конструкцию прибора внесены незначительные изменения. Кроме того, шкала газоанализатора была растянута в 2 раза за счет повышения чувствительности электронного потенциометра, являющегося выходным измерительным прибором газоанализатора. В схеме потенциометра предусмотрена возможность сдвига нуля на середину шкалы для измерения знакопеременных перепадов концентрации CO_2 . В результате прибор стал иметь два диапазона измерения: 0—0,005 и $0 \pm 0,0025\%$ CO_2 по объему. При такой схеме работы газоанализатора принципиальное значение имеет выбор методики градуировки. Обычный способ градуировки по нескольким газовым смесям, пропускаемым через рабочую и эталонную кюветы, дает большую погрешность (до 40% предела измерения в диапазоне $0 \pm 0,0025\%$ CO_2). Поэтому нами была предложена следующая схема градуировки (рис. 1).

Контрольная газовая смесь из баллона 1 через вентиль точной регулировки 2, тройник 3 и вентили 4 и 5 подается параллельно в рабочие кюветы 6 и 7 и далее через вентили 8, 9 и ротаметры 10 и 11 выходит в атмосферу. Между газовыми каналами за рабочими кюветами включен дифференциальный водяной манометр 12. При установке нуля вентили 8 и 9 полностью открыты, с помощью вентиля 4 и 5 устанавливается равенство давлений в кюветах при расходе смеси 0,3—0,5 л/мин. При калибровке шкалы вентилями 8 и 9 поочередно устанавливается подпор давления соответственно в правой и левой кюветах. С помощью вентиля 4 и 5 поддерживается равенство расходов в обоих каналах.

Разность концентрации Δc , соответствующая половине шкалы прибора (вся шкала 100 делений), находится по формуле

$$\Delta c = \frac{c_0 \Delta p}{p_0 n}, \quad (2)$$

где c_0 — концентрация CO_2 в контрольной смеси, p_0 — атмосферное давление, Δp — разность давлений в рабочих кюветтах, n — сигнал прибора в делениях шкалы.

Таким образом, погрешность градуировки фактически определяется погрешностью анализа контрольной газовой смеси и не превосходит 1,5—2% верхнего предела шкалы.

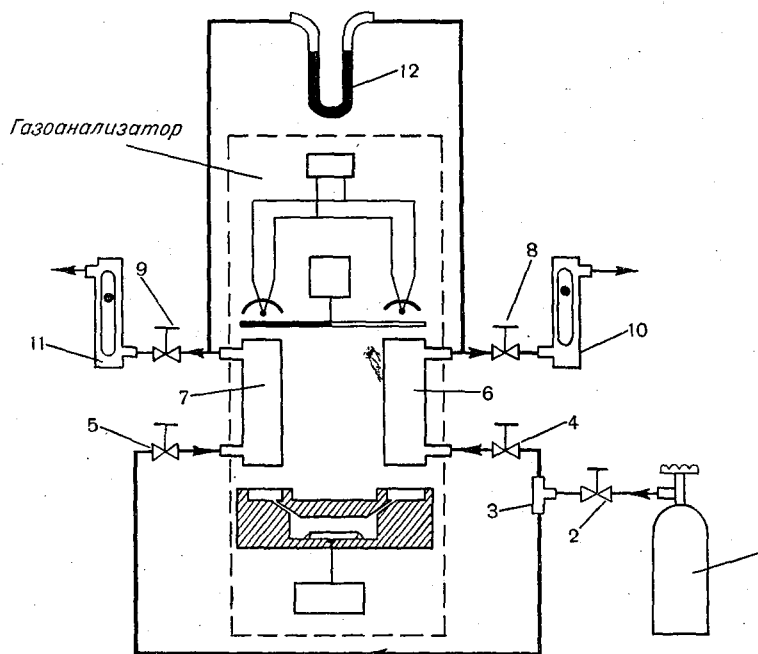


Рис. 1. Схема градуировки градиентного газоанализатора

Описанная выше методика градуировки дала возможность исследовать ряд важных характеристик газоанализатора: пороговую чувствительность, линейность шкалы, зависимость чувствительности от величины абсолютной концентрации CO_2 . Найденная величина пороговой чувствительности оказалась менее одного деления шкалы (0,00005% CO_2 по объему).

Основные погрешности градиентного газоанализатора со шкалой $0 \pm 0,0025\% \text{ CO}_2$ ($0 \pm 25 \text{ ppm}$) на фоне абсолютной концентрации CO_2 0,028—0,034% составляют следующие величины:

- градуировочная погрешность $\pm 1,5\text{—}2\%$;
- погрешность, вызываемая вариациями абсолютной концентрации CO_2 в смеси, $\pm 3,5\%$;
- погрешность от нестабильности нулевой точки $\pm 2\%$;
- погрешность от изменения атмосферного давления на $\pm 10 \text{ мм}$ $\pm 1,3\%$.

Следовательно, суммарная квадратичная погрешность не превышает величины $\pm 5\%$ верхнего предела шкалы.

При проведении измерений в полевых условиях воздух с двух уровней над посевом с помощью специального побудителя расхода подается к газоанализатору по двум полиэтиленовым шлангам длиной 50—60 м и внутренним диаметром 8 мм. Перед входом в газоанализатор воздух проходит через влагопоглотительные фильтры, заполненные прокаленным химически чистым хлористым кальцием. Для временного и пространственного осреднения исследуемой пробы воздуха и исключения влияния пульсаций давления на показания прибора были сконструированы специальные заборники воздуха, представляющие собой цилиндрические сосуды объемом 2,5 л, по периметру которых расположены шесть стеклянных трубок длиной 600 мм и внутренним диаметром 3 мм. При этом забор воздуха происходит в шести точках узкого горизонтального слоя, расположенных по периметру круга с диаметром 150 см.

В 1959 г. Ю. Л. Розеншток (Агрофизический институт) разработал автоматическое устройство (тепlobалансограф) для определения и регистрации турбулентных потоков тепла и влаги в приземном слое воздуха [5]. Синтез градиентного газоанализатора и тепlobалансографа позволил создать установку для комплексного измерения и регистрации турбулентных потоков углекислого газа, тепла и влаги над растительным покровом. В основе схемы вычисления лежит формула (1) для потока углекислого газа и аналогичные формулы для потока тепла P и влаги E .

$$P = \frac{(R - B) 0,48 \Delta T}{\Delta e + 0,48 \Delta T} \text{ кал/см}^2 \text{ мин.}, \quad (3)$$

$$E = \frac{(R - B) \Delta e}{\Delta e + 0,48 \Delta T} \text{ мм/час.} \quad (4)$$

В качестве датчиков входных величин применены следующие устройства. Для получения электрических сигналов, пропорциональных величинам радиационного баланса R , потока тепла в почву B и разности концентрации CO_2 Δc на двух высотах, используются соответственно ветронезависимый балансомер АФИ, термомер, образованный системой дифференциальных термопар, и градиентный газоанализатор. Для получения электрических сигналов, пропорциональных разности температуры ΔT и разности влажности Δe на тех же высотах, использована схема измерения малых перепадов температуры и влажности в приземном слое воздуха. Схема представляет собой два дифференциальных моста с двумя сухими и двумя смоченными термисторами, включенными соответственно в плечи первого и второго мостов. На выходе двух включенных навстречу друг другу мостов получается напряжение, пропорциональное разности упругости водяных паров на двух высотах Δe , а на выходе моста с сухими термосопротивлениями — напряжение, пропорциональное разности температур ΔT . Сухие и смоченные термосопротивления попарно смонтированы в аспирационных психрометрах АФИ.

Электронно-вычислительное устройство состоит из обрабатывающей и регистрирующей частей 12-точечного потенциометра ЭПП-09, следящей системы с запоминающими потенциометрами и релейно-контактной схемы для определения знака выходной величины. Установка позволяет вести непрерывные круглосуточные измерения с частотой 10 циклов в час.

Для определения потока углекислого газа из почвы была применена следующая методика. На почву внутри посева устанавливается металлический колпак, имеющий хорошую отражающую поверхность. Колпак

заглубляется в почву на 1,5—2 см. С поверхности почвы под колпаком предварительно удаляются остатки растительности. Объем колпака 2—2,5 л, площадь почвы под колпаком 150—200 см². Через колпак непрерывно с постоянной, очень малой скоростью, протягивается воздух, забираемый с верхнего над посевом уровня. Разность концентрации CO₂ в потоке воздуха до колпака и за ним, регистрируемая газоанализатором, дает возможность определить поток углекислоты из почвы

$$F_{\text{п}} = \rho \frac{Q}{s} \Delta c, \quad (5)$$

где Q — расход воздуха (м³/час), s — площадь почвы под колпаком (м²),

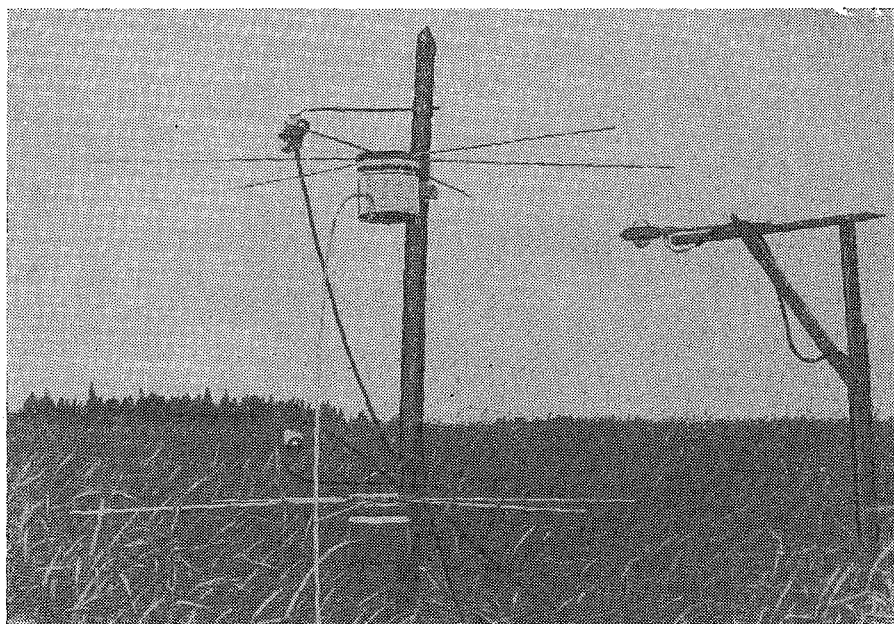


Рис. 2. Мачты с датчиками на поле озимой ржи. Белогорка, июнь 1966 г.

ρ — плотность CO₂ (г/м³), Δc — разность концентрации CO₂ (10⁻⁴%).

Описанные выше методика и аппаратура были использованы для исследования углекислотного газообмена на поле озимой ржи (Белогорка, Ленинградская область, 10 июня—10 июля 1966 г.) и на орошаемом поле хлопчатника (Туркмения, 25 июля—26 августа 1966 г.).

На рис. 2 показаны мачты с датчиками на поле озимой ржи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айзенштадт Б. А. и др. Изменение теплового баланса деятельной поверхности при орошении. Труды ГГО, вып. 39 (101), 1953.
2. Вейнгеро́в М. Л. Физические основы создания оптических газоанализаторов, в которых используются поглощения инфракрасной и ультрафиолетовой радиации. Сб. «Автоматические газоанализаторы», ЦИНТИ, М., 1961.

3. Беликов П. С., Моторина М. В., Куркова Е. Б. Опыт применения инфракрасного газоанализатора (ГИП-5) для определения интенсивности фотосинтеза. Изв. ТСХА, вып. 3 (34), 1960.
4. Гиршович Ю. Е., Чудновский А. Ф. Комплексное определение и регистрация турбулентных потоков углекислого газа, тепла и влаги в приземном слое воздуха. Сб. трудов по агрофизике, АФИ, 1968.
5. Розеншток Ю. Л. Автоматическое устройство для измерения и регистрации коэффициента обмена и турбулентных потоков тепла и влаги. Метеорология и гидрология, № 8, 1961.
6. Monteith J. L. and Szeicz G. Carbon dioxide flux over a field of sugar beet. Q. J. Roy. Met. Soc., 86, 1960, 205—214.
7. Wright J. L. and Lemon E. R. Photosynthesis under field conditions. IX. Vertical distribution of photosynthesis within a corn crop. Agronomy Journal. Vol 58, No. 3, 1966, 265—271.

М. И. БУДЫКО, Л. С. ГАНДИН

К ТЕОРИИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Тепловой режим растительного покрова оказывает существенное влияние на условия произрастания растений. Ассимиляция углекислоты и дыхание растений определяются наряду с другими факторами распределением температуры в слое растительного покрова. Поэтому температурные условия являются одним из факторов, определяющих продуктивность биомассы. Процесс ассимиляции CO_2 ограничивается также, особенно в районах недостаточного увлажнения, транспирацией водяного пара, которая в свою очередь существенно зависит от теплового режима слоя растительного покрова.

Будем рассматривать характеристики растительного покрова, осредненные по горизонтали, и считать процессы и тепло- и влагообмена квазистационарными. Тогда температуру θ и удельную влажность q воздуха внутри растительного покрова можно рассматривать как функции только вертикальной координаты z . Соответственно этому уравнение теплового баланса может быть записано в виде

$$\frac{dQ}{dz} - \frac{dI}{dz} = L \frac{dE}{dz} + \frac{dP}{dz}, \quad (1)$$

где Q — суммарная коротковолновая радиация, I — эффективное излучение,

$$P = -\rho c_p k \frac{d\theta}{dz} \quad (2)$$

— турбулентный поток тепла,

$$E = -\rho k \frac{dq}{dz} \quad (3)$$

— турбулентный поток водяного пара, L — скрытая теплота парообразования, ρ — плотность воздуха, c_p — теплоемкость воздуха, k — коэффициент турбулентного обмена в межлиственном пространстве.

Интегрирование уравнения (1) с учетом граничного условия на поверхности земли $z=0$ дает

$$Q - I = LE + P + B, \quad (4)$$

где B — поток тепла в почву.

Поглощение Q в растительном покрове опишем уравнением

$$\frac{dQ}{dz} = \gamma s Q, \quad (5)$$

где s — удельная поверхность листьев (поверхность листьев в единице объема), γ — коэффициент пропорциональности.

Из уравнения (5)

$$Q = Q_H e^{-\gamma \int_z^H s dz}, \quad (6)$$

где Q_H — поток коротковолновой радиации, приходящей на верхнюю границу слоя растительного покрова $z=H$ (за вычетом отраженной радиации). Зависимость I от z будем искать на основании уравнения

$$\frac{dI}{dz} = 4f\sigma T^3 \frac{d\theta_w}{dz}, \quad (7)$$

где θ_w — температура растения, f — коэффициент нечерноты излучения растительного покрова, σ — постоянная Стефана, T — средняя абсолютная температура.

Из уравнения (7) с учетом условия на верхней границе растительного покрова получим

$$I = I_0 + 4f\sigma T^3 (\theta_w - \theta_\infty) \quad (8)$$

где I_0 — эффективное излучение, рассчитанное по температуре воздуха θ_∞ , измеренной на некотором уровне z_∞ над растительным покровом.

Теплообмен и влагообмен между растительным покровом и межлиственным пространством можно описать уравнениями, аналогичными уравнению обмена углекислотой [1]

$$\frac{dP}{dz} = \rho c_p s D'_\theta (\theta_w - \theta), \quad (9)$$

$$\frac{dE}{dz} = \rho s D'_q (q_s - q). \quad (10)$$

Здесь q_s представляет собой насыщенную концентрацию водяного пара внутри листьев (при температуре θ_w), а коэффициенты D'_θ и D'_q описывают интенсивность соответственно тепло- и влагообмена между листьями и межлиственным пространством. Уравнения (9) и (10) можно с учетом (2) и (3) рассматривать, как дифференциальные уравнения для определения θ и q . В качестве граничных условий для решения этих уравнений примем следующие.

На верхней границе растительного покрова примем турбулентный поток тепла $P(H)$ (суммарную теплоотдачу) и поток водяного пара $E(H)$ (суммарное испарение) пропорциональными соответственно разности температуры и разности влажности на уровнях H и z_∞ :

$$P(H) = \rho c_p D_H [\theta(H) - \theta_\infty], \quad (11)$$

$$E(H) = \rho D_H [q(H) - q_\infty], \quad (12)$$

где D_H — коэффициент, описывающий интенсивность турбулентного обмена в слое между уровнями H и z_∞ .

Турбулентный поток водяного пара на уровне $z=0$ (испарение с почвы) $E(0)$ примем пропорциональным разности насыщающей влажности q_s и влажности на уровне $z=0$

$$E(0) = \rho D_1 [q_s - q(0)]. \quad (13)$$

Это соответствует предположению о существовании водоносного слоя почвы, интенсивность диффузии водяного пара между верхней границей которого и поверхностью почвы характеризуется коэффициентом D_1 .

Наконец, примем, что на уровне $z=0$ температуры воздуха в меж-
листном пространстве и растительного покрова совпадают между собой
(и с температурой поверхности почвы)

$$\theta(0) = \theta_w(0). \quad (14)$$

Заметим, что насыщающую удельную влажность q_s можно считать
однозначной функцией температуры растительного покрова θ_w , посколь-
ку изменения давления в рассматриваемом слое ничтожны. Эту связь
можно описать известной формулой Магнуса

$$q_s = q_{s0} e^{\frac{a\theta_w}{b+\theta_w}} \quad (15)$$

$(q_{s0} = 3,79 \cdot 10^{-3}, \quad a = 17,1, \quad b = 235^{\circ}).$

Выписанных соотношений достаточно для получения однозначного
решения рассматриваемой задачи, т. е. для определения зависимостей
 $P(z)$, $E(z)$, $\theta(z)$, $q(z)$, $\theta_w(z)$ и $q_s(z)$, если остальные входящие в выпи-
санные формулы величины известны. Действительно, решая уравнение,
получающееся из (9) и (2),

$$\frac{d}{dz} k \frac{d\theta}{dz} = -sD'_\theta (\theta_w - \theta) \quad (16)$$

при граничных условиях (11) и (14) и уравнение, получающееся из (10)
и (3),

$$\frac{d}{dz} k \frac{dq}{dz} = -sD'_q (q_s - q) \quad (17)$$

при условиях (12) и (13) и подставляя эти решения, а также выраже-
ния (2), (3), (6), (8) и (15) в уравнение (4), получим уравнение для
определения функции $\theta_w(z)$, решив которое, можно затем найти и ос-
тальные искомые функции. Поскольку решения уравнений (16) и (17)
выражаются в квадратурах, содержащих функции $\theta_w(z)$ и $q_s(z)$, а со-
отношение (15) нелинейно, упомянутое уравнение для определения θ_w
будет нелинейным интегральным уравнением. Оно может быть решено
численными методами.

Можно указать также иной способ решения задачи, который сво-
дится к выполнению последовательных приближений. Задавая некото-
рое начальное приближение $\theta_{w0}(z)$ для распределения $\theta_w(z)$, можно
из (15) найти $q_{s0}(z)$, а затем, решая уравнения (16) и (17), определить
функции $\theta_0(z)$ и $q_0(z)$. После этого уравнение (4) может быть исполь-
зовано для вычисления следующего приближения $\theta_{w1}(z)$ и т. д. В этом
случае для получения разумного начального приближения целесооб-
разно поступить следующим образом.

Положим $\theta_{w0} = \text{const}$, так что и $q_{s0} = \text{const}$. Тогда решения уравнений
(16) и (17) при условиях (11), (14) и, соответственно, (12), (13) можно
записать в виде:

$$\theta_0(z) = \theta_{w0} - (\theta_{w0} - \theta_\infty) u(z; D'_\theta, \infty), \quad (18)$$

$$q_0(z) = q_{s0} - (q_{s0} - q_\infty) u(z; D'_q, D_1), \quad (19)$$

где функция

$$u(z; D', D_1) \quad (20)$$

представляет собой решение уравнения

$$\frac{d}{dz} k \frac{du}{dz} = sD'u \quad (21)$$

при граничных условиях:

$$k \frac{du}{dz} \Big|_{z=H} = D_H [1 - u(H)], \quad (22)$$

$$k \frac{du}{dz} \Big|_{z=0} = D_1 u(0). \quad (23)$$

На основании (18), (19), (2) и (3)

$$\begin{aligned} P_0(H) &= \rho c_p D_\theta (\theta_w - \theta_\infty); \\ E_0(H) &= \rho D_q (q_s - q_\infty), \end{aligned} \quad (24)$$

где

$$\left. \begin{aligned} D_\theta &= k \frac{d}{dz} \{ u(z; D'_\theta, \infty) \} \Big|_{z=H}; \\ D_q &= k \frac{d}{dz} \{ u(z; D'_q, D_1) \} \Big|_{z=H}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

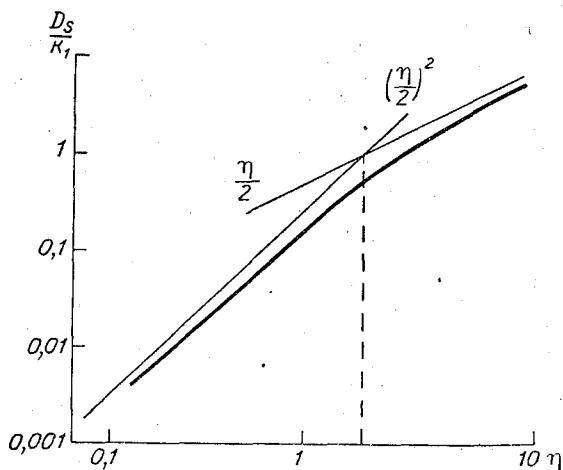


Рис. 1. Зависимость $\frac{D_s}{k_1}$ от безразмерного параметра, согласно формуле (28). Тонкие прямые — асимптоты, соответствующие большим и малым значениям η .

Для определения θ_w воспользуемся соотношением, которое получается интегрированием уравнения (4) во всем слое $0 \leq z \leq H$. Это соотношение можно с учетом (24) записать в виде (см. также [2])

$$R_0 - B = \rho L D_q (q_s - q_\infty) + (\rho c_p D_\theta + 4 f \sigma T^3) (\theta_w - \theta). \quad (26)$$

В частности, если принять $k = k_0 + k_1 z$, $s = \text{const}$, $D' = \text{const}$ и учесть, что $k_0 \ll k_1 H$, то из (21), (22), (23) и (25) можно получить формулу

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D_H} + \frac{1}{D_s}, \quad (27)$$

где

$$D_s = \frac{k_1 \eta}{2} \frac{I_1(\eta)}{I_0(\eta)}, \quad (28)$$

$$\eta = 2 \sqrt{\frac{D' s H}{k_1}}, \quad (29)$$

I_0 и I_1 — бесселевы функции мнимого аргумента.

Согласно формуле (27), величина D_s описывает интенсивность соответственно тепло- и влагообмена между растениями во всем слое и воздухом на уровне H . Зависимость отношения $\frac{D_s}{k_1}$ от параметра η представлена на рис. 1. На этом рисунке приведены также прямолинейные (в логарифмическом масштабе) асимптоты $\frac{D_s}{k_1} = \left(\frac{\eta}{2}\right)^2$ и $\frac{D_s}{k_1} = \frac{\eta}{2}$, к которым рассматриваемая зависимость приближается соответственно при малых и больших η . Первая из них соответствует сильно вентилируемому растительному покрову (большие k_1), когда D_s описывается формулой

$$D_s = D'sH, \quad (30)$$

не содержащей k_1 . Вторая асимптота описывает слабо вентилируемый растительный покров. В этом случае

$$D_s = \sqrt{k_1 D'sH}. \quad (31)$$

Как видно из рис. 1, отклонения от соответствующей из зависимостей (30), (31) в промежуточной области сравнительно невелики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будыко М. И. К теории влияния климатических факторов на фотосинтез. ДАН СССР, т. 158, № 2, 1964.
2. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Гидрометеиздат, Л., 1956.

Л. С. ГАНДИН, Г. В. МЕНЖУЛИН

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Изучение теплового режима растительности представляет большой интерес с точки зрения влияния его на важнейшую функцию растительного организма, хозяйственно стимулируемую человеком; — на ассимиляцию углекислоты. Из физиологии растений хорошо известно как непосредственное, так и опосредованное влияние температуры на такие определяющие хозяйственное использование растений процессы, как фотосинтез, дыхание, транспирация, корневое давление и т. п. Тепловой режим, который в более общем случае должен рассматриваться как водно-тепловой, определяет снабжение водой тех органов растительного организма, жизнедеятельность которых возможна лишь при достаточном увлажнении. Кроме того, в сфере действия водно-теплого режима лежит и снабжение необходимым количеством водорода (водород, находящийся в связанном состоянии в молекуле H_2O) ассимилирующих клеток листьев.

Очевидно, что после установления водно-тепловых характеристик растительного покрова возможно более полное исследование фотосинтеза как основного процесса физиологической деятельности растений, так как температура и влажность, являясь элементами водно-теплого режима, весьма существенно влияют на биофизические коэффициенты этих процессов. С другой стороны, влияние фотосинтеза, дыхания и минерального питания на температуру и тепловой режим практически вообще отсутствует. Это делает возможным отдельное изучение водно-теплого режима растительного покрова, отдельное в смысле независимости его от других процессов жизнедеятельности растительных организмов. Такое независимое изучение водно-теплого режима растительности во всяком случае можно считать физически обоснованным в рамках рассмотрения интересующих нас процессов как квазистационарных.

В качестве начального приближения описания водно-теплого режима растительного покрова весьма целесообразно рассмотреть его при некоторых облегчающих это рассмотрение предположениях.

В работе М. И. Будыко и Л. С. Гандина [4] было получено интегральное уравнение для определения температуры листьев растительного покрова θ_w . В предположении, что θ_w , а значит и насыщающая влажность q_s не зависят от высоты в слое растительности, что весьма близко к действительности для многих типов растительности, это интегральное

уравнение существенно упрощается и становится конечным трансцендентным уравнением относительно θ_w :

$$R_0 - B = \rho L D_q \left(q_{s0} e^{\frac{a\theta_w}{b+\theta_w}} - q_\infty \right) + (\rho c_p D_\theta + 4f\sigma T^3)(\theta_w - \theta_\infty),$$

где R_0 — радиационный баланс верхней границы растительного покрова, рассчитанный по температуре воздуха, B — поток тепла в почву, D_q — интегральный коэффициент турбулентного обмена для водяного пара, D_θ — тот же коэффициент для тепла, c_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении, L — скрытая теплота парообразования, ρ — плотность воздуха, f — коэффициент «серости» излучения растительного покрова, σ — постоянная Стефана, $q_{s0} = 3,79 \cdot 10^{-3}$, $a = 17,1$, $b = 235^\circ$, θ_∞ , q_∞ — температура и влажность воздуха над растительным покровом.

Коэффициенты обмена D_q и D_θ определяются из соотношений [4]

$$\frac{1}{D_q} = \frac{1}{D_H} + \frac{1}{D_{s,q}};$$

$$\frac{1}{D_\theta} = \frac{1}{D_H} + \frac{1}{D_{s,\theta}}.$$

Здесь

$$D_{s,q,\theta} = k_1 \frac{\eta}{2} \frac{I_1(\eta)}{I_0(\eta)},$$

где I_0 и I_1 — функции Бесселя мнимого аргумента первого рода нулевого и первого порядка, причем для коэффициента $D_{s,q}$

$$\eta = 2 \sqrt{\frac{D'_q s H}{k_1}},$$

а для $D_{s,\theta}$

$$\eta = 2 \sqrt{\frac{D'_\theta s H}{k_1}}.$$

В этих двух выражениях для η , D'_q и D'_θ представляют собой коэффициенты диффузии водяного пара и температуры от поверхности листа к окружающему лист воздуху, k_1 — коэффициент турбулентного обмена в межлиственном пространстве слоя растительного покрова, sH — индекс листовой поверхности.

Целью настоящей работы было выполнение численных экспериментов с помощью описанного начального приближения теории для выявления закономерностей влияния различных факторов на водно-тепловой режим растительного покрова. Именно выявлялась зависимость температуры и составляющих теплового баланса растительного покрова от следующих величин:

1. Совокупности значений $R_0 - B$, q_∞ , θ_∞ . Такая совокупность характеризует ту или иную климатическую зону, в которой находится растение, а также время года.

2. Коэффициента теплообмена между поверхностью листа и межлиственным пространством D'_θ .

3. Коэффициента турбулентного обмена в межлиственном пространстве k_1 .

4. Интегрального коэффициента турбулентного обмена над растительным покровом D_H .

5. Величины $\beta = \frac{D_q}{D_\theta}$, характеризующей различие механизмов тепло- и влагообмена внутри растительного покрова. В случае полностью

смоченной водой поверхности листьев величина β равна единице, так как насыщающая влажность имеет место на поверхности листьев. В противном случае величина β представляет собой правильную дробь, поскольку влагообмен, в отличие от теплообмена, испытывает дополнительное сопротивление при прохождении водяного пара из внутренних органов листьев к их поверхности. Это сопротивление в свою очередь изменяется в зависимости от интенсивности устьичной регуляции испарения.

6. Индекса листовой поверхности sH .

Перечисленные величины, от которых выяснялась зависимость, принимали значения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Значения параметров							
Изменяемые величины	Принимаемые значения					Единицы измерения	
$R_0 - B$	0,35;	0,30;	0,25			кал/см ² сек.	
θ_∞	25;	20;	15			град.	
q_∞	12;	10;	8			—	
k_1	0,1;	0,3;	1;	3;	10	см/сек.	
D'_0	1,5;		3;	6		см/сек.	
D_H	0,1;	0,3;	0,6;	1		см/сек.	
β	$\frac{1}{10}$;	$\frac{1}{8}$;	$\frac{1}{6}$;	$\frac{1}{4}$;	$\frac{1}{2}$;	1	—
sH		2,5		5		—	

В качестве основных значений перечисленных величин были выбраны следующие:

$$R_0 - B = 0,30, \quad \theta_\infty = 20, \quad q_\infty = 10, \quad k_1 = 3,$$

$$D'_0 = 3, \quad D_H = 0,6, \quad \beta = \frac{1}{4}.$$

При расчетах варьировался какой-либо один из параметров (за исключением величин $R_0 - B$, θ_∞ и q_∞ , которые, как указывалось, варьировались совместно), а для остальных параметров принимались основные значения.

Каждый расчет состоял из следующих этапов:

1. Вычисление значений безразмерного параметра η для температуры и влажности.
2. Вычисление величин $D_{s\theta}$ и D_{sq} .
3. Вычисление величин D_θ и D_q .
4. Решение трансцендентного уравнения и определение компонент теплового баланса.

Первые три этапа выполнялись вручную, а четвертый реализовался на электронной вычислительной машине «Урал-4» с помощью программы, составленной В. А. Ефимовым.

Результаты расчетов представлены на рис. 1—5.

Из рассмотрения любой из зависимостей составляющих теплового баланса растительного покрова от перечисленных выше величин видно, насколько существенна составляющая, описывающая отдачу тепла за счет испарения воды листьями.

Отсюда ясно, как велика роль транспирации и последующего испарения транспирированной воды листьями в процессе охлаждения перегретых прямой солнечной радиацией листьев и всего организма растений.

Интересна зависимость членов теплового баланса и температуры растительного покрова от совокупности параметров R_0-B ; θ_∞ и q_∞ (рис. 1). Видно, что с ростом R_0-B (с переходом к более теплым климатическим зонам или к более теплому времени года) перепад температуры между растительным покровом и воздухом над ним увеличивается в меньшей степени по сравнению с увеличением R_0-B . Это замедление роста $\Delta\theta = \theta_w - \theta_\infty$ вызвано значительным увеличением в более теплых климатических зонах составляющей LE , обуславливающей

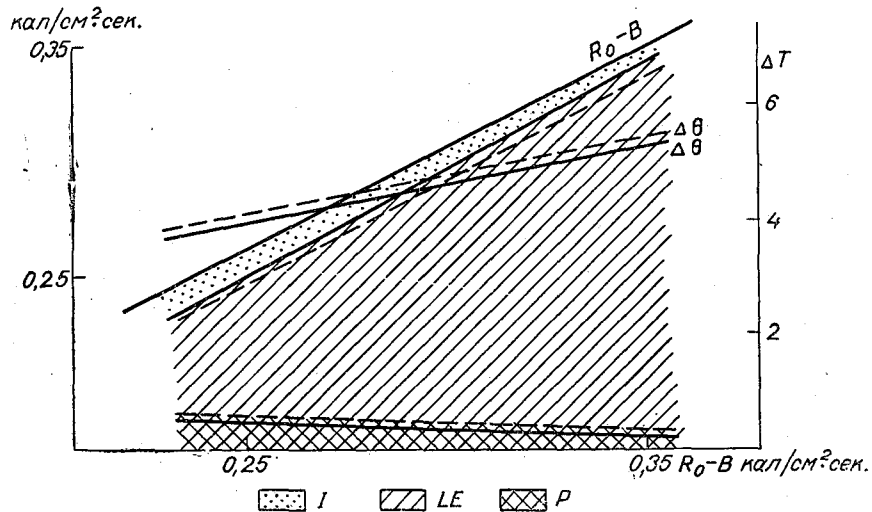


Рис. 1. Изменение компонент теплового баланса и разности температур растительного покрова и воздуха над ним, $\Delta\theta = \theta_w - \theta_\infty$ с изменением внешних термических условий.

уменьшение температуры растительного покрова, остальные составляющие баланса с увеличением R_0-B остаются почти постоянными. При этом если для $R_0-B=0,25$ турбулентная теплоотдача составляет около 25% затраты тепла на испарение, то при переходе к $R_0-B=0,35$ ее часть составляет только около 5%.

На рис. 2 представлена зависимость компонент теплового баланса и разности температур θ_∞ и θ_w от коэффициента турбулентного обмена k_1 . Из рисунка можно заметить, что, начиная с некоторого значения $k_1 = k_1^* \approx 1$ см/сек., составляющие теплового баланса и температура растительного покрова практически не зависят от k , и он перестает лимитировать дальнейшее уменьшение разности температур воздуха и растительности, уступая в этом отношении место другим факторам. Интересно, что коэффициент турбулентности k подобным же образом влияет и на ассимиляцию углекислоты растительным покровом [3]. Этот факт говорит о своеобразном влиянии турбулентности на жизнь растительности: лимитируя весьма существенно физиологические процессы в растительном покрове до некоторого характеристического значения $k_1 = k_1^* \approx 1$ см/сек., турбулентность практически перестает влиять на процессы в растительном покрове при больших значениях характеризующего турбулентность коэффициента. Иначе говоря, при значениях коэффициента

обмена, превышающего некоторую величину, процессы протекают так же, как и при безграничной интенсивности турбулентного обмена в меж-
листом пространстве (т. е. как при $k_1 = \infty$).

кал/см²сек.

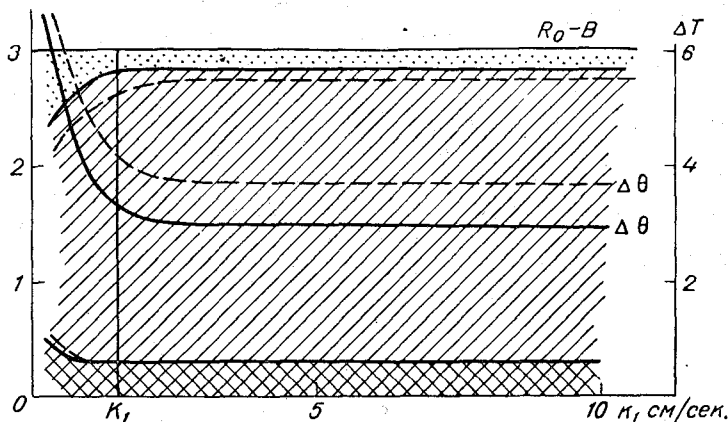


Рис. 2. Зависимость компонент теплового баланса и $\Delta\theta$ от коэффициента турбулентного обмена k_1 .

См. усл. обозн. рис. 1

Зависимость составляющих теплового баланса от коэффициента молекулярной диффузии для тепла (рис. 3) при постоянном значении

$\beta = \frac{D'_q}{D'_\theta}$ интересна тем, что с ростом D'_θ увеличивается отдача расти-

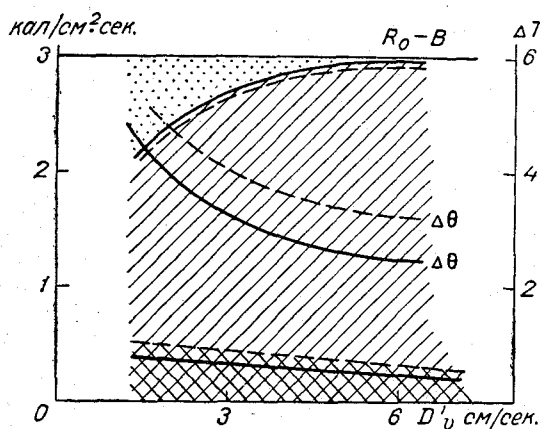


Рис. 3. Зависимость компонент теплового баланса и $\Delta\theta$ от коэффициента теплоотдачи листьев D'_θ

См. усл. обозн. рис. 1

тельным покровом тепла за счет испарения, а не за счет теплоотдачи в воздух, которая главным образом, казалось бы, должна была увеличиваться. Дело здесь в том, что отношение $\frac{D'_q}{D'_\theta}$ остается постоянным в процессе роста D'_θ , и вместе с ростом D'_θ растет также быстро и D'_q , поэтому растения «используют» увеличение D'_θ для отдачи тепла посредством испарения.

На рис. 4 представлена зависимость температуры и компонент теплового баланса растительности от β . Рост β вызывает уменьшение тем-

пературы, уменьшение теплоотдачи и длинноволнового излучения I растительным покровом. Это уменьшение двух последних составляющих баланса происходит за счет увеличения LE . Заметим, что в действительности коэффициент β может, особенно в засушливых районах, принимать значения, существенно меньшие 0,1 (нижняя граница наших расчетов). При таких условиях турбулентная теплоотдача P и длинноволновое излучение растительного покрова I могут сравняться с величиной

затраты тепла на испарение LE и даже превзойти ее. Впрочем, при указанных условиях возможность жизнедеятельности растений весьма ограничивается.

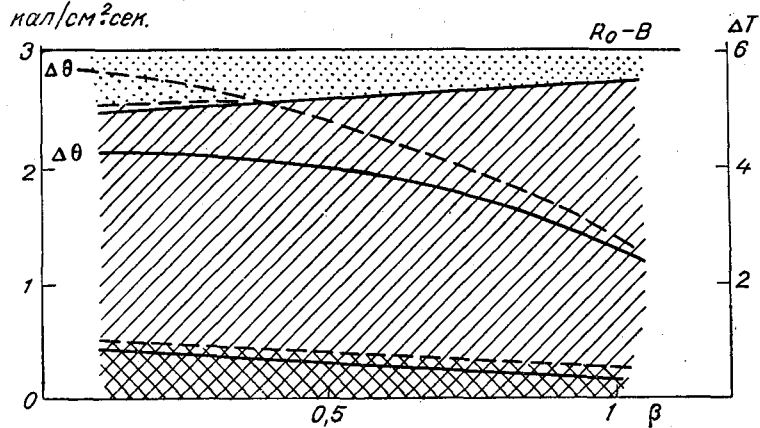


Рис. 4. Зависимость компонент теплового баланса и $\Delta\theta$ от коэффициента увлажнения листьев, $\beta = \frac{D'_q}{D'_\theta}$

См. усл. обозн. рис. 1

Зависимость компонент теплового баланса и температуры от интегрального коэффициента обмена над растительным покровом представлена на рис. 5. Интересно, что зависимость теплоотдачи от величины D_H

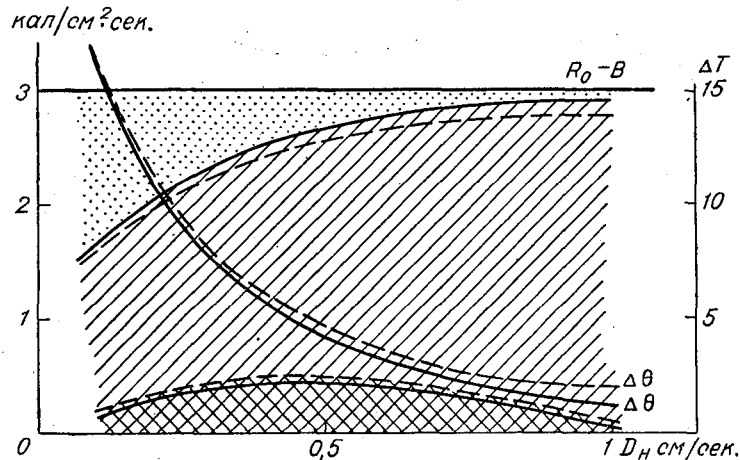


Рис. 5. Зависимость компонент теплового баланса и $\Delta\theta$ от интегрального коэффициента обмена, D_H , над растительным покровом.

См. усл. обозн. рис. 1

имеет максимум при значении $D_H = 0,5$ см/сек. При больших значениях D_H величина теплоотдачи уменьшается за счет роста «скрытой теплоотдачи» LE , а при меньших значениях D_H — за счет как LE , так и эффективного излучения I .

В заключение отметим, что приведенные расчеты основываются на весьма упрощенной теоретической схеме процессов тепло- и

лагообмена в растительном покрове. Наиболее ограничительным, на наш взгляд, является предположение о постоянстве величины θ_w с высотой. Результаты численных экспериментов по теоретической модели, свободной от этого ограничения, составляют предмет дальнейших публикаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будыко М. И. К теории влияния климатических факторов на фотосинтез. ДАН, т. 158, № 2, 1964.
2. Будыко М. И., Гандин Л. С. Об учете закономерностей физики атмосферы в агроклиматологических исследованиях. Метеорология и гидрология, № 11, 1964.
3. Будыко М. И., Гандин Л. С. К теории фотосинтеза в слое растительного покрова. ДАН, т. 164, № 2, 1965.
4. Будыко М. И., Гандин Л. С. К теории теплового режима растительного покрова. См. наст. сб.

Г. В. МЕНЖУЛИН

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФОТОСИНТЕЗА РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ ПРИ ДОСТАТОЧНОМ УВЛАЖНЕНИИ

Одним из основных направлений развития физики растительной биосферы является изучение влияния факторов окружения на фотосинтез, этот практически единственный источник прироста органического вещества в биосфере. В случае изучения фотосинтеза факторами окружения являются такие метеорологические параметры, как освещенность фотосинтетически активной радиацией (ФАР), концентрация углекислого газа, температура. Взаимодействуя с растительными организмами биосферы, эти параметры изменяют свои законы распределения внутри ее. Выяснению вопроса распределения углекислоты и через него влияния окружения на фотосинтез посвящена настоящая статья.

В основу методики расчета скорости фотосинтеза положено уравнение переноса консервативной скалярной субстанции (CO_2) в случае наличия турбулентного обмена, которое в наиболее общем случае имеет вид

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \bar{u}_i \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\sigma_{ik} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_k} \right) - \bar{\Phi} + \bar{R}. \quad (1)$$

В этом уравнении \bar{c} — осредненное значение концентрации CO_2 , \bar{u}_i — осредненные компоненты скорости направленного переноса,

$\sigma_{ik} = - \frac{\overline{c' u_i'}}{\frac{\partial \bar{c}}{\partial x_k}} + \mu$ — компоненты тензора турбулентной диффузии, μ —

коэффициент молекулярной диффузии, $\bar{\Phi}$, \bar{R} — осредненные функции стоков и источников соответственно, x_i ($i=1, 2, 3$) — декартовы координаты, t — время.

Применение уравнения переноса обусловлено тем, что в растительной «биосфере» действуют общие закономерности турбулентного обмена в приземном слое атмосферы.

Введем характеристику распределения растений в объеме их произрастания: будем называть удельным индексом листовой поверхности величину $\bar{s} = \frac{\Delta \Sigma}{\Delta v}$, где $\Delta \Sigma$ площадь листьев в малом конечном объеме Δv . Определение \bar{s} как отношения конечных величин осуществляет

необходимое в уравнении (1) осреднение. Функции $\bar{\Phi}$ и \bar{R} представим в виде:

$$\bar{\Phi} = \bar{s}\varphi, \quad \bar{R} = \bar{s}r. \quad (2)$$

В этих выражениях φ и r — нормированные функции стоков и источников, имеющие размерность $\frac{[M]}{[L]^2 [T]}$

Считаем в дальнейшем, что

- 1) $\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = 0$ — задача стационарная,
- 2) $\bar{u}_i = 0$ — нет направленного переноса,
- 3) $\frac{\partial \bar{c}}{\partial x_1} = \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_2} = 0$ — в плоскости $x_1 x_2$ распределение CO_2 равномерное.

Тогда из уравнений (1) и (2) следует

$$\frac{d}{dz} \left[\sigma(z) \frac{d\bar{c}}{dz} \right] = \bar{s}\varphi - \bar{s}r. \quad (3)$$

Здесь $\sigma(z) = \sigma_{33}(z)$, $z = x_3$.

Нормированную функцию поглощения (стока) углекислоты φ , функцию скорости фотосинтеза, представим в виде

$$\varphi = \frac{1}{\frac{1}{\varphi_m} + \sum_i \frac{1}{\alpha_i F_i}}, \quad (4)$$

где φ_m — абсолютная максимальная скорость фотосинтеза, потенциально возможная (нелимитированная) скорость процесса;

F_i — лимитирующие скорость фотосинтеза концентрационные факторы, такие как концентрация CO_2 , освещенность ФАР, пигментный фактор и т. п. ($i = 1, 2, \dots, n$), n — число лимитирующих концентрационных факторов;

α_i — величины, равные $\left. \frac{\partial \varphi}{\partial F_i} \right|_{F_i=0}$.

Зависимости $\varphi(F_i)$ из (4) имеют вид кривых с насыщением [4].

Если в формуле (4) обозначить

$$\frac{1}{\varphi_m} + \sum_i \frac{1}{\alpha_i F_i} = \frac{1}{A_m} \quad (i \neq k) \quad (5)$$

и умножить числитель и знаменатель на $\alpha_k F_k$, то получим известную формулу, ранее примененную М. И. Будыко, для вывода уравнения фотосинтеза в растительном покрове [1]

$$\varphi = \frac{\alpha_k F_k}{1 + \frac{\alpha_k F_k}{A_m}}. \quad (6)$$

Здесь под F_k понимается освещенность фотосинтезирующих поверхностей активной радиацией.

Предположим, что в выражении (5) одно из слагаемых, пусть $\frac{1}{\alpha_j F_j}$, много больше остальных, т. е. ограничение A_m сверху определяется j -тым членом ряда (5). Отразим этот факт значком j у A_m . A_m^j называют относительной максимальной скоростью фотосинтеза.

Будем считать, что в нашем случае никакой концентрационный фактор не ограничивает относительную максимальную скорость процесса,

кроме концентрации CO_2 , т. е. F_j — концентрация углекислоты. Тогда A_m^j практически будет равно $\alpha_{\text{CO}_2} \bar{c}$, где \bar{c} — концентрация CO_2 у фотосинтезирующих поверхностей.

Из сказанного видно, что формула (4), преобразованная к виду (6), удобна для применения в тех случаях, когда отвлекаются от рассмотрения зависимости скорости процесса от параметров, не лимитирующих его, и учитывают влияние на фотосинтез лишь двух концентрационных факторов, в данном случае освещенности ФАР и концентрации углекислоты.

Следуя М. И. Будыко [1], обозначим α_{CO_2} через D — коэффициент молекулярной диффузии CO_2 из межлистного пространства к хлоропластам листа.

Что касается нормированного стока r , скорости дыхания единицы листовой поверхности, то будем считать его постоянной величиной.

При всех сделанных выше предположениях уравнение (3) примет вид

$$\frac{d}{dz} \left[\sigma(z) \frac{d\bar{c}}{dz} \right] = \frac{\bar{s} \alpha F_k(z)}{1 + \frac{\alpha F_k(z)}{Dc}} - \bar{s} r. \quad (7)$$

Индекс k у F в дальнейшем опустим. Уравнение (7) представляет собой основное уравнение фотосинтеза, впервые полученное М. И. Будыко [1]. В нем остается сделать предположения, касающиеся вида функций \bar{s} , $\sigma(z)$ и $F(z)$.

Коэффициент турбулентной диффузии $\sigma(z)$ положим равным $k_0 + kz$, где k_0, k — константы; \bar{s} — будем считать не изменяющимся по высоте z . Функцию $F(z)$ наиболее целесообразно подчинить закону Буге—Ламберта:

$$F = F_H e^{-\gamma \bar{s} (H-z)}. \quad (8)$$

Это выражение показывает, что поток ФАР, плотность которого равна F_H в месте входа его в растительный покров, распространяется вдоль отрицательного направления координаты z , за нулевое значение которой принята подстилающая поверхность. Здесь γ — коэффициент ослабления ФАР растительностью.

Следует отметить, что (8) для F , $\sigma(z) = k_0 + kz$ и $\bar{s} = \text{const}$ ни в коей мере не ограничивает общности подхода, основанного на уравнении переноса (1), к количественному описанию фотосинтеза. Применение закона Буге для вычисления F было обусловлено еще и тем, что нельзя было использовать более частные виды зависимости $F(z)$ ввиду нерегулярности определенных отклонений от (8) для определенных, частных видов растительного покрова.

Перепишем уравнение (7), сделав в нем замену аргумента и функции по формулам $\zeta = \ln \frac{H}{z}$ и $\bar{c} = \rho c_\infty (1 - \bar{q})$. Здесь \bar{q} — относительный дефицит углекислоты, H — высота растительного покрова, c_∞ — концентрация CO_2 в свободной от растений атмосфере.

Далее, учтя (8), будем иметь

$$\bar{q}_\zeta = f(\bar{q}, \zeta),$$

$$f(\bar{q}, \zeta) = - \frac{\alpha \bar{s} H e^{-\zeta}}{\rho k c_\infty} \frac{F_H e^{-\gamma \bar{s} H (1 - \exp(-\zeta))}}{1 + \frac{\alpha F_H e^{-\gamma \bar{s} H (1 - \exp(-\zeta))}}{\rho D c_\infty (1 - \bar{q})}} + \frac{r \bar{s} H e^{-\zeta}}{\rho k}. \quad (9)$$

Для решения уравнения второго порядка (9) необходимо иметь два граничных условия. Считаем, что при $z=H$ ($\xi=0$),

$$-\sigma c'_z|_{z=H} = D_H (c_\infty - \bar{c}(H)), \quad \frac{D_H}{k} \bar{q}|_{\xi=0} = \bar{q}'|_{\xi=0}$$

и при $z = \frac{k_0}{k} = z_0$ ($\xi_0 = \ln \frac{H}{z_0}$),

$$\sigma c'_z|_{z=z_0} = -A_0, \quad \bar{q}'|_{\xi=\xi_0} = -\frac{A_0}{\rho k c_\infty}. \quad (10)$$

Здесь A_0 — плотность потока углекислоты из почвы.

Из решения задачи (9), (10) можно определить A_H — турбулентный приток CO_2 через верхнюю границу в покров — по $A_H = -\sigma c'_z|_{z=H}$, а через него и общую ассимиляцию A слоем в целом по соотношению

$$A = \int_0^H \bar{s} r dz = A_0 + A_H. \quad (11)$$

Ввиду нелинейного характера зависимости $f(\bar{q}, \xi)$ от \bar{q} задачу удастся решить лишь численно. Для этого отрезок задания $\xi[0, \xi_0]$ разобьем на n равных промежутков длиной h ($h = [\xi_i - \xi_{i+1}]$, $i = 0, 1, \dots, n$), и запишем уравнение (9) в конечноразностном виде, используя выражение для второй производной

$$\bar{q}''_{\xi_i} = \frac{\bar{q}_{i+1} - 2\bar{q}_i + \bar{q}_{i-1}}{h^2}.$$

Решение задачи (9), (10) будем искать в виде

$$\bar{q}_i = \tilde{q}_i + \bar{t}_i,$$

где \tilde{q}_i есть решение уравнения (9) с нулевыми граничными условиями, а

$$\bar{t}_i = -\frac{A_0}{\rho D_H c_\infty} \left(1 + \frac{D_H h}{k} i \right)$$

— решение уравнения $t''_{\xi i} = 0$ с граничными условиями (10).

С помощью непосредственной подстановки можно убедиться, что решением конечноразностного аналога уравнения (9) с нулевыми граничными условиями является

$$\bar{q}_j = h^2 \left[\left(j + \frac{k}{D_H h} \right) \sum_{i=1}^{n-1} F_i - \sum_{i=1}^{j-1} (j-i) F_i \right]. \quad (12)$$

Выражение (12) будем использовать как рекуррентную формулу для нахождения $(r+1)$ -й итерации при известной r -той итерации q , а значит и F . Нулевым приближением считаем $\bar{q}=0$ на каждом из уровней $\xi = h, 2h, \dots, nh$.

Алгоритм решения задачи был запрограммирован В. Б. Усовым для ЭВМ «Урал-4». Счет ведется со значениями n , равными 10, 20, 40, 80, 160, причем итерации при каждом n производятся до выполнения условия $|\bar{q}^{(r+1)} - \bar{q}^{(r)}| < 10^{-6}$. После решения задачи (9), (10) автоматически производится расчет A по соотношению (11). На печать выдается значение общей ассимиляции углекислоты растительным покровом и, в случае надобности, поле величин (\bar{q}_0, \bar{q}_n) , $n=160$.

В указанной схеме расчета фотосинтеза слоем растительности не учитывается зависимость процесса от водно-тепловых характеристик внутри покрова. Очевидно, что максимально-возможная величина среднего для определенного промежутка времени коэффициента диффузии \bar{D} определяется средним значением испарения \bar{E} за этот же промежуток. Указанная зависимость есть результат того, что как испарение транспирированной влаги, так и поглощение углекислоты растения осуществляют практически через устьица, чье диффузное сопротивление весьма существенно влияет на величину D . В существовании зависимости $\bar{D}(\bar{E})$ проявляется факт лимитирования скорости фотосинтеза недостатком увлажнения. Недостаток увлажнения, как видно, не является лимитирующим концентрационным фактором и не входит в число F_i в формуле (4).

Для вычисления скорости процесса фотосинтеза растительных покровов на почвах с недостаточным увлажнением предполагается в дальнейшем данную схему дополнить независимым расчетом $\bar{D}(\bar{E})$. Пока же будем производить вычисления с учетом D , как независимо изменяющегося физиологического параметра растений.

На рис. 1—5 представлены результаты численных экспериментов по описанной выше схеме расчета интегрального фотосинтеза и распределения CO_2 в растительном покрове.

При варьировании одного из параметров, влияющих на скорость процесса и распределение CO_2 , остальным придавались следующие значения:

$$\begin{aligned} \rho &= 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}, & c_{\infty} &= 4,62 \cdot 10^{-4}, & F_H &= 0,35 \text{ кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}, \\ D &= 0,1 \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}, & k &= 3 \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}, & A_0 &= 0 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}, \\ r &= 0 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}, & \bar{s}H &= 5, & D_H &= 0,6 \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}, \\ & & k_0 &= 3 \text{ см}^2 \cdot \text{сек}^{-1} \end{aligned}$$

На рис. 1 даны интегральные световые кривые растительного покрова, построенные при различных D и sH , а на рис. 2 — зависимость общей ассимиляции \bar{A} от коэффициента диффузии D ; здесь параметрами являются F_H и $\bar{s}H$. Обе эти зависимости показательны тем, что по их проявлению можно судить о значениях аргументов, лимитирующих процесс фотосинтеза. При росте же аргументов этих зависимостей скорость интегрального фотосинтеза насыщается.

Рис. 3 отражает зависимость общей ассимиляции и значений концентраций углекислоты на верхней границе растительности c_H и у подстилающей поверхности c_0 , от дыхания почвы A_0 . На рис. 3 вместе с A нанесена и $A^*(A_0) = A|_{A_0=0} + A_0$, т. е. возможная скорость фотосинтеза при полном поглощении потока углекислоты из почвы. Реально наблюдаемая скорость A существенно меньше A^* , что вызвано лимитирующим влиянием главным образом недостатком фотосинтетически активной радиации на нижних уровнях растительного покрова. Очевидно, что при $F_i \rightarrow \infty$ $i=1, 2, \dots, n$, (n — количество лимитирующих факторов), $A \rightarrow A^*$.

На рис. 4 аргументом для A , c_0 и c_H является r — скорость дыхания единицы поверхности листьев покрова. Характерно, что значения c_H и c_0 сближаются с ростом r , что объясняется увеличением притока углекислоты, образующейся при дыхании растений, на всех уровнях растительного покрова. Что касается сравнения A и $\bar{A} = A|_{r=0} + r\bar{s}H$ —

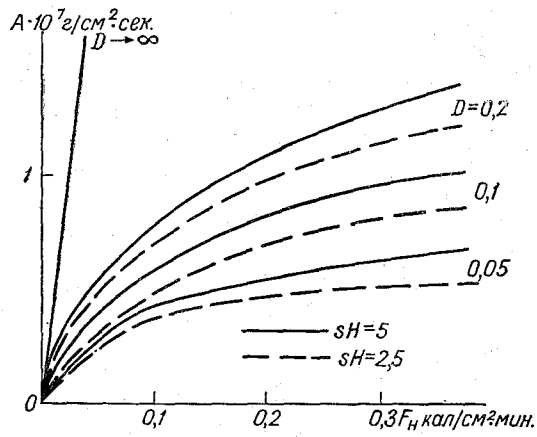


Рис. 1. Зависимость общей ассимиляции A от освещенности фотосинтетически активной радиацией верхней границы растительного покрова.

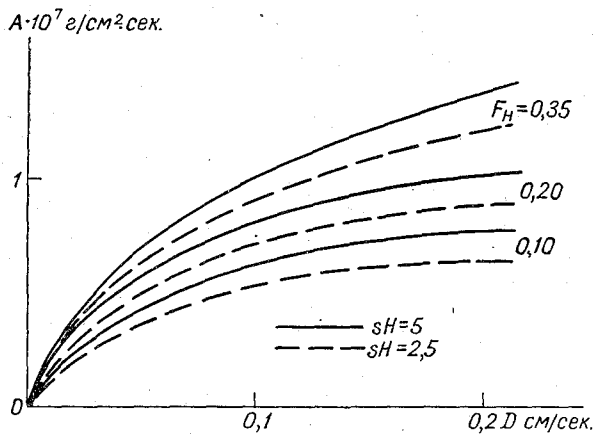


Рис. 2. Зависимость общей ассимиляции A от коэффициента диффузии D .

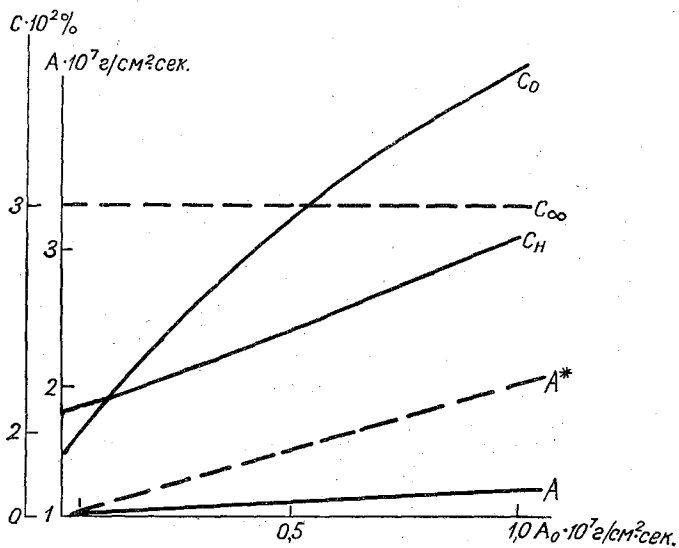


Рис. 3. Зависимость общей ассимиляции A и концентраций C_0 и C_H от скорости дыхания почвы A_0 .

потенциально-возможной скорости фотосинтеза при полном поглощении углекислоты, образующейся при дыхании, — то здесь полностью применимо сказанное выше об $A(A_0)$ и $A^*(A_0)$.

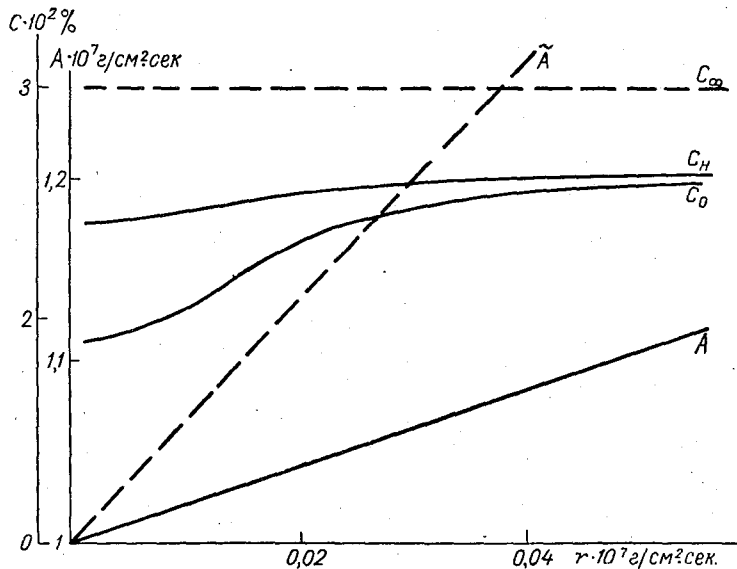


Рис. 4. Зависимость общей ассимиляции A и концентраций c_0 и c_H от скорости дыхания единицы листовой поверхности g .

Влияние коэффициента k , характеризующего интенсивность турбулентного обмена в растительном покрове, на фотосинтез отражено на

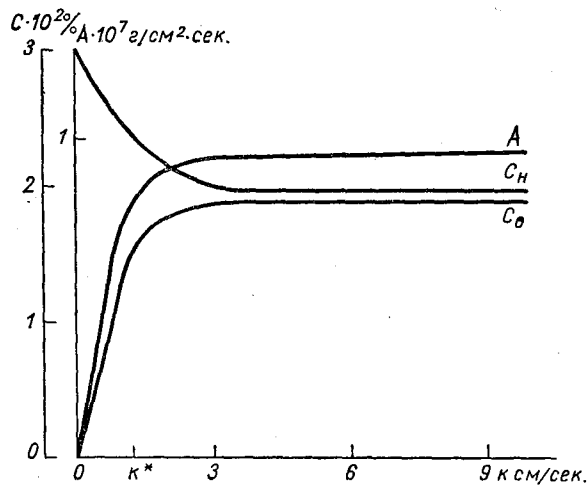


Рис. 5. Зависимость общей ассимиляции A и концентраций c_0 и c_H от коэффициента турбулентного обмена в межлиственном пространстве k .

рис. 5, на котором отчетливо выявляется насыщение скорости процесса фактором k . Коэффициент k , влияя существенно на A при малых своих значениях, практически перестает влиять на процесс при $k > k^*$, где $k^* = 1 \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}$.

Выводы, полученные здесь о частных зависимостях скорости фотосинтеза слоя растительного покрова, подтверждают закон максимального влияния фактора, находящегося в минимуме относительно своего значения, насыщающего процесс. Факт, отраженный в формуле (4) в применении к индивидуальной фотосинтезирующей единице, полностью применим и к рассмотрению процесса фотосинтеза растительными сообществами.

Описанный теоретический подход к проблеме влияния факторов окружения на скорость фотосинтеза растительности имеет практическое применение при расчетах общего прироста биомассы в растительной биосфере. Дальнейшее распространение физико-математических методов изучения влияния как факторов окружения, так и внутренних параметров на жизнь растительных организмов и на их фотосинтез требует привлечения сведений из биофизики растений как биологических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будыко М. И. К теории влияния климатических факторов на фотосинтез. ДАН СССР, т. 158, № 2, 1964.
2. Будыко М. И., Гандин Л. С. Об учете закономерностей физики атмосферы в агрометеорологических исследованиях. Метеорология и гидрология, № 11, 1964.
3. Будыко М. И., Гандин Л. С. Влияние климатических факторов на растительный покров. Изв. АН СССР сер. географ., № 1, 1966.
4. Рабинович Е. Фотосинтез. Изд. ИЛ, т. 1, 2, 3, М., 1951, 1956, 1959.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Данные градиентных наблюде

Число	Срок	Напр. ветра	Температура воздуха (град.) на высотах, м						Упругость водяного (мб) на высо			
			0,2	0,5	0,8	1,2	1,7	2,2	0,2	0,5	0,8	1,2
			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
8 VI	10 35		20,4	20,0	19,7	19,4	19,3		18,4	17,4	17,0	16,4
	11 00		21,2	20,7	20,4	20,2	20,2		18,6	18,1	16,6	16,0
	12 00		20,0	19,7	19,9	19,7	20,0		17,2	16,7	16,4	15,6
	14 00		21,7	21,2	21,3	21,3	21,5		17,2	16,4	15,6	14,8
	15 00		21,2	20,8	21,2	21,0	21,1		15,6	14,8	13,4	13,1
	16 00		21,0	20,8	21,0	21,0	21,1		15,4	14,6	13,7	13,6
	17 00		19,8	20,0	20,6	20,4	20,4		14,2	13,6	12,8	13,0
	18 00		18,8	19,0	19,2	19,3	18,7		14,2	13,8	13,3	13,2
	19 00		17,2	17,1	17,0	16,8	17,6		13,7	13,8	13,6	13,8
9 VI	8 00		15,2	15,2	15,1	14,9	14,8		12,6	12,2	11,3	11,3
	9 00		16,2	16,2	16,2	15,9	15,9		12,4	11,8	11,0	10,8
	10 00		17,4	17,2	17,4	17,2	17,1		12,4	11,4	10,6	10,2
	11 00		18,6	18,0	18,2	17,9	17,9		12,2	10,9	10,9	10,0
	12 00		19,2	18,8	18,8	19,3	18,5		12,0	11,2	10,2	10,3
	13 00		20,3	19,8	19,8	19,5	19,3		12,5	11,2	10,4	10,1
	14 00		20,0	19,0	19,0	18,9	19,1		12,3	11,0	10,0	9,6
	15 00	CB	20,0	19,4	19,4	19,3	19,4		13,0	11,8	10,8	10,6
	16 00	CB	19,6	18,9	18,5	19,0	18,9		14,7	11,8	10,8	11,2
	17 00	BCB	18,8	18,6	18,4	18,4	18,3		13,3	11,6	11,0	11,0
	18 00	CCB	17,8	18,0	18,0	17,9	17,9		12,4	11,2	10,7	10,6
10 VI	8 25	Ю	13,3	14,0	14,3	14,2	14,0		11,5	10,5	9,4	9,0
	9 00	Ю	15,4	15,8	15,8	15,6	15,5		11,2	10,1	8,8	8,2
	10 00	Ю	17,4	17,6	17,6	17,2	16,9		12,2	11,2	10,2	9,4
	11 00	ЮЮВ	19,0	18,6	18,6	18,4	18,5		12,0	11,2	9,8	9,4
	11 50		20,6	20,2	19,9	19,8	19,8		12,4	11,4	10,1	10,0
	13 30	неуст.	21,4	20,8	20,8	20,6	20,9		12,0	11,0	9,8	9,4
	14 00	CCB	22,2	21,9	21,6	21,2	21,3		13,2	12,2	11,4	10,2
	15 00	С	21,9	21,8	22,1	21,8	21,6		14,1	13,2	11,9	10,9
	16 00	С	21,3	21,6	21,9	21,6	21,2		15,2	13,1	12,0	11,6
	17 00	CCB	21,1	21,2	21,3	21,2	21,1		12,4	12,0	11,6	11,4
	18 00	CCB	20,3	20,6	20,8	20,8	21,0		10,8	10,2	9,6	9,4
	19 00		19,1	19,6	20,1	20,2	20,3		11,2	10,3	9,8	9,4
11 VI	8 10	CCЗ	18,1	18,2	18,0	17,9	17,8		13,5	12,9	12,3	11,8
	9 00	CCB	19,1	18,9	19,0	18,8	19,0		12,9	12,4	11,8	11,4
	10 00	CCB	20,1	19,9	20,0	19,8	20,0		12,2	11,3	10,7	10,3
	11 00	С	20,9	20,6	20,7	20,8	20,7		13,5	11,8	11,3	10,6
	12 00	CB	22,0	21,4	21,4	21,4	21,2		13,0	12,1	10,7	10,4
	12 50		21,9	21,8	21,8	21,6	21,7		12,2	11,6	10,4	9,9
	14 30	CCB	22,2	22,0	22,0	21,9	22,2		11,5	10,2	9,0	8,4
	15 00		22,2	22,0	22,2	22,2	22,2		10,6	9,9	9,5	9,0
	16 00		21,8	22,3	22,1	22,3	22,0		11,0	9,8	10,3	9,8
	17 00		21,3	21,6	21,6	21,6	21,6		10,2	9,6	9,1	10,2
	18 00	CCB	20,4	21,0	21,0	20,6	21,2		10,6	9,4	9,2	8,9
	19 00	CB	19,4	20,2	20,2	20,4	20,4		9,4	8,4	8,2	7,8
	20 00	CB	17,7	18,6	19,0	19,4	19,4		9,7	8,9	9,2	8,4

¹ Термоэлектрический прибор системы Агрофизического института.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ний. Белогорка, 1966 г.

пара тах, м		Скорость ветра (м/сек.) на высотах, м				Температура почвы на глубинах, м						Облачность	
1,7	2,2	0,5	1,0	2,0	4,0	0		0,05	0,10	0,15	0,20	колич.	форма
						ртутный термометр	ПТПП						
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
16,2			1,1	2,2		-	-	16,5	14,5	13,5	13,5		
15,4	-	-	1,7	2,3	-	-	-	17,1	14,7	13,6	13,6		
15,4	-	-	2,1	3,3	-	-	-	17,7	15,5	14,1	13,5		
14,8	-	-	2,2	3,0	-	25,0	-	18,6	16,4	14,8	14,3		
12,8	-	-	2,1	3,4	-	23,4	-	18,4	16,9	15,2	14,4		
13,2	-	-	2,0	3,6	-	23,1	-	19,4	17,2	15,4	14,8	1/1	Cu
12,6	-	-	2,2	3,6	-	21,9	-	18,9	17,5	15,8	15,1	0/0	сл. Cu
13,0	-	-	2,6	4,4	-	19,2	-	18,4	17,4	15,8	15,2	0/0	
13,3	-	-	2,6	4,5	-	17,6	-	17,6	17,2	15,9	15,4	0/0	
11,0	-	-	1,8	2,5	-	15,0	-	12,6	12,7	12,9	13,0	0/0	
10,4	-	-	1,8	3,0	-	17,8	-	13,6	13,0	13,0	12,9	0/0	сл. Cu
9,8	-	-	2,0	3,4	-	20,8	-	14,6	13,6	13,1	13,0	0/0	сл. Cu
9,5	-	-	2,3	3,6	-	22,1	20,6	15,6	14,2	13,4	13,3	0/0	
9,4	-	-	2,2	4,0	-	21,0	22,1	16,4	14,6	13,7	13,4	0/0	
9,1	-	-	1,6	3,0	-	23,8	23,4	17,0	15,2	14,0	13,6	0/0	сл. Cu, Cl
9,1	-	-	2,0	3,9	-	23,2	-	17,6	15,7	14,2	13,9	2/0	Cl fil.
10,4	-	0,4	1,8	3,6	-	21,9	19,7	17,8	16,0	14,6	14,2	4/0	Cl fil.
11,0	-	0,5	2,4	4,4	-	20,8	19,8	18,0	16,4	14,8	14,4	2/0	Cl fil.
10,6	-	0,4	2,0	4,1	-	20,6	18,5	17,8	16,6	15,0	14,6	1/0	Cl
10,2	-	0,4	1,6	3,6	-	18,1	17,2	17,2	16,4	15,1	14,7	1/0	Cl
8,6	-	0,0	0,4	0,9	-	15,7	14,8	11,9	11,8	12,2	12,4	9/0	Cl fil.
7,4	-	0,0	0,4	1,0	-	17,3	16,6	12,6	12,2	12,2	12,4	10/0	Cl
8,8	-	0,0	0,5	1,3	-	21,8	19,4	13,8	12,6	12,4	12,4	10/0	Cl
8,5	-	0,0	0,8	1,8	-	20,8	20,2	15,0	13,4	12,6	12,6	10/0	Cl
8,9	-	0,4	1,0	2,1	-	21,4	22,7	15,7	13,9	12,9	12,8	10/0	Cl
9,2	-	0,5	1,2	2,8	-	24,4	23,6	17,2	15,0	13,5	13,2	10/0	Cl
9,1	-	0,4	0,8	1,8	-	24,3	23,2	17,6	15,3	13,8	13,4	10/0	Cl, сл. Cu
10,0	-	0,0	0,8	1,7	-	23,8	22,3	18,0	15,8	14,1	13,7	10/1	Cl, Cu
10,0	-	0,0	0,8	1,5	-	22,2	21,3	18,4	16,3	14,5	14,2	10/0	Cl, сл. Cu
9,8	-	0,0	0,7	1,7	-	21,4	20,1	18,2	16,6	14,8	14,3	10/0	Cl
9,1	-	0,0	0,7	2,1	-	19,8	17,0	17,8	16,6	15,0	14,5	8/0	Cl
9,1	-	0,0	0,5	1,2	-	17,6	17,5	17,2	16,6	15,1	14,6	9/0	Cl
11,2	-	0,0	0,9	2,0	-	16,6	17,5	13,4	13,1	13,2	13,2	0/0	
10,8	-	0,4	1,0	2,4	-	19,3	18,8	14,2	13,4	13,2	13,2	0/0	
9,7	-	0,4	1,2	3,1	-	23,5	20,7	15,2	13,9	13,4	13,3	0/0	
10,1	-	0,4	0,8	3,6	-	24,0	22,8	16,3	14,6	13,6	13,3	0/0	
9,9	-	0,4	1,6	3,4	-	22,9	24,4	17,2	15,2	13,8	13,6	0/0	
9,6	-	0,5	1,4	3,2	-	25,2	24,2	17,8	15,8	14,1	13,8	0/0	
8,2	-	0,6	1,4	3,9	-	24,6	22,6	18,4	16,4	14,8	14,2	0/0	
8,5	-	0,8	1,4	4,4	-	23,6	23,2	18,8	16,6	14,8	14,5	0/0	
8,9	-	0,5	1,9	7,1	-	22,8	21,6	19,0	17,0	15,0	14,7	0/0	
8,4	-	0,8	1,1	3,4	-	21,6	21,5	18,5	17,0	15,5	14,7	0/0	
8,4	-	0,4	1,3	3,2	-	19,8	18,4	18,0	17,0	15,6	14,6	0/0	
7,7	-	0,0	1,4	2,9	-	18,1	17,4	17,2	16,7	15,5	14,8	0/0	
8,2	-	0,0	0,5	1,7	-	16,5	16,1	16,6	16,4	15,5	15,1	0/0	сл. Cl

Число	Срок	Напр. ветра	Температура воздуха (град.) на высотах, м						Упругость водяного (мб) на высо			
			0,2	0,5	0,8	1,2	1,7	2,2	0,2	0,5	0,8	1,2
			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
11 VI	21 00 22 00		12,8 9,9	13,0 9,3	13,2 9,5	15,0 10,2	16,4 10,7	— —	14,8 11,7	14,3 11,0	14,1 11,7	12,2 11,5
12 VI	0 00 2 00 4 00 6 0 7 00 8 00	3 3 3	8,5 8,8 8,6 13,2 14,8 18,7	8,2 8,7 8,6 14,0 16,0 19,8	8,2 8,9 8,8 14,2 16,4 20,2	8,7 9,0 8,9 14,4 16,4 20,2	9,1 9,4 9,2 14,3 16,2 20,0	— — — — — —	10,8 10,9 10,6 11,8 14,2 16,6	10,6 10,5 10,4 11,2 13,2 15,5	10,6 10,6 10,6 11,2 13,2 15,5	10,5 10,7 10,4 10,9 12,6 14,0
13 VI	9 00 10 00 11 00 12 00 14 00 15 00 16 00 17 00 18 00	CB CB CB CCB CB CCB C CB	13,8 15,3 16,1 17,5 17,1 17,3 17,1 16,1	13,7 15,2 15,6 16,9 16,6 16,6 16,8 16,2	13,4 14,6 14,9 16,4 16,2 16,6 16,8 16,2	13,4 14,6 14,9 16,4 16,4 16,3 16,6 16,2	13,4 14,4 14,8 16,3 16,3 16,3 16,6 16,0	— — — — — — — —	8,8 8,6 9,2 10,1 9,0 7,5 7,1 7,3	7,3 7,2 8,0 9,2 7,8 7,4 7,6 6,8	7,2 7,3 7,6 8,4 7,4 7,2 7,0 6,6	6,8 6,8 7,4 8,2 7,0 7,1 7,0 7,0
14 VI	8 05 9 00 10 00 11 00 12 00 14 10 15 00 16 00 17 00 18 00		13,7 15,0 17,7 18,8 20,4 23,4	14,4 15,6 17,6 19,1 20,0 22,5	14,8 15,7 17,5 18,8 19,8 22,2	14,7 15,6 17,2 18,9 19,8 21,8	14,3 15,4 16,8 18,5 19,7 21,5	— — — — — —	9,4 11,1 11,4 12,0 10,6 11,6	9,2 9,4 10,4 11,8 9,6 10,4	8,1 9,0 9,8 11,8 9,2 9,3	7,7 8,3 9,0 9,8 8,2 9,4
	15 00 16 00 17 00 18 00	C3 3C3 3C3	22,8 21,6 21,8 21,0	21,9 21,7 21,8 21,3	21,7 21,8 21,6	21,5 22,0 21,9 22,0	21,3 22,1 21,9 22,1	— — — —	12,3 11,0 11,6 12,0	10,9 9,8 11,6 10,8	10,3 11,4 10,6 10,4	9,5 8,6 9,7 9,5
15 VI	8 10 9 00 9 20 9 50 11 00 11 15 11 50 13 25 14 0 15 00 16 00 17 00 18 00 19 00 20 10 21 00 22 00	B BCB B CCB CCB BCB CC3 CB CB CCB CB CB	14,4 15,0 15,2 15,6 17,4 18,2 19,8 20,2 19,8 18,8 18,7 17,5 16,0 14,6 12,8 8,0	14,6 15,0 15,1 15,7 17,0 17,8 19,4 19,8 19,5 18,8 18,6 17,6 16,4 15,1 13,3 7,9	14,4 14,7 14,8 15,2 16,8 17,2 19,4 19,0 19,0 18,5 18,4 17,6 16,6 15,2 13,6 7,8	14,1 14,8 14,6 15,0 16,6 17,0 18,4 19,0 18,7 18,4 18,4 17,9 16,8 15,4 13,8 8,2	14,0 14,2 14,4 14,7 16,4 16,8 18,0 18,6 18,4 18,0 17,8 17,4 16,4 15,4 14,0 10,0	13,5 14,1 14,2 14,5 15,9 16,4 17,9 18,3 17,9 17,9 17,8 17,6 16,8 15,6 14,1 11,0	11,0 10,4 10,2 10,4 10,7 10,8 11,3 11,8 11,3 9,6 10,4 9,8 9,5 10,4 10,2 10,3	10,4 9,6 9,5 9,6 9,6 10,2 10,8 10,8 10,7 10,2 10,8 8,9 9,2 9,0 9,1 9,6 10,2	10,0 9,4 9,6 9,7 9,8 9,8 10,1 11,1 10,2 8,8 9,2 8,8 9,2 9,2 9,9 9,9	9,4 9,0 9,0 9,8 9,4 10,4 10,0 10,4 9,0 9,7 10,0 9,8 8,6 9,1 9,4 10,4

пара тах, м		Скорость ветра (м/сек.) на высотах, м				Температура почвы на глубинах, м						Облачность	
1,7	2,2	0,5	1,0	2,0	4,0	0		0,05	0,10	0,15	0,20	колич.	форма
						грунтный термометр	ПТПП						
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
10,7	—	ШТИЛЬ			—	15,4	14,5	16,2	16,2	15,4	15,0	0/0	сл. Cl
11,4	—	ШТИЛЬ			—	13,4	13,4	15,4	15,8	15,2	15,0	0/0	
10,5	—	ШТИЛЬ			—	11,6	11,2	13,9	14,7	14,8	14,6	0/0	
10,4	—	ШТИЛЬ			—	11,2	10,9	13,1	13,9	14,2	14,2	0/0	
10,2	—	0,0	—	0,9	—	10,8	10,8	12,4	13,3	13,7	13,7	0/0	
10,8	—	0,0	0,8	2,1	—	12,5	13,0	12,3	12,9	13,3	13,4	0/0	
12,4	—	0,0	1,0	2,6	—	14,5	14,1	12,7	12,8	13,2	13,4	0/0	сл. Cl
13,6	—	0,0	0,6	1,0	—	17,5	18,6	13,6	13,2	13,2	13,4	3/0	Cl
		0,0	0,6	5,4	—	13,1	12,4	12,2	13,0	13,6	13,8	2/0	Cl, сл. Cu
		1,2	2,7	5,6	—	15,3	13,7	12,8	13,0	13,6	13,8	1/0	Cl
6,5	—	1,2	2,2	5,0	—	18,9	17,2	13,4	13,4	13,5	13,7	1/0	Cl
6,6	—	1,2	1,8	5,2	—	20,8	17,4	14,2	13,7	13,5	13,6	2/1	Cu, Cl
7,0	—	1,3	2,1	5,3	—	20,0	20,9	15,2	14,0	13,8	13,7	2/2	Cu, Cl
8,0	—	1,0	1,4	4,2	—	22,2	21,8	16,4	15,0	14,1	14,0	3/2	Cu, Cl
6,8	—	1,0	2,4	4,8	—	21,4	21,5	16,8	15,2	14,4	14,1	4/0	Cl
7,2	—	1,0	2,0	3,9	—	19,6	19,1	16,8	15,6	14,6	14,4	10/0	Cl
6,9	—	1,2	1,8	4,4	—	19,0	17,7	16,6	15,8	14,8	14,6	10/0	Cl
6,5	—	0,8	1,6	4,2	—	16,8	14,9	16,0	15,6	14,8	14,6	10/0	Cl
7,3	—	0,0	0,2	0,4	—	14,4	15,3	11,4	11,4	12,0	12,3	0/0	у гориз.
7,6	—	0,0	0,5	1,1	—	18,2	17,9	12,4	11,8	12,1	12,3	2/0	Ac
8,8	—	0,0	0,2	0,8	—	20,8	20,3	13,8	12,5	12,3	12,4	1/0	Ac
9,4	—	0,4	0,6	1,9	—	21,4	22,2	14,8	13,2	12,6	12,6	8/0	Ac
7,1	—	0,6	0,8	2,0	2,9	23,2	22,1	15,8	13,8	13,0	12,8	6/0	Ac
8,0	—	0,6	1,1	2,8	3,8	25,2	21,8	17,7	15,4	13,8	13,6	7/0	As, Ac, Cl
8,9	—	0,5	1,3	3,0	4,2	25,2	25,0	18,0	15,9	14,2	13,8	10/0	As, Ac, Cl
7,8	—	0,6	1,1	2,8	4,2	23,0	22,9	18,2	16,2	14,6	14,2	9/0	Cl, As
9,0	—	0,4	0,8	2,4	3,6	21,8	20,9	18,0	16,6	16,0	14,4	4/0	Cl, As
9,2	—					20,0	19,5	17,6	16,4	15,2	14,6	2/0	Cl, Cc
8,8	8,8	0,2	0,8	2,2	2,7	16,0	16,7	13,4	13,2	13,4	13,6	0/0	
8,6	8,5	0,5	0,8	2,4	3,6	19,0	18,3	14,0	13,8	13,4	13,6	0/0	
8,8	8,6	0,5	1,0	2,8	4,0	20,2	18,5	14,4	13,6	13,6	13,5	0/0	
8,6	8,7	0,6	0,6	2,4	3,3	20,3	19,6	14,8	13,8	13,5	13,6	0/0	
8,8	8,7	0,6	0,8	2,0	2,9	22,2	22,5	15,8	14,4	13,8	13,6	0/0	
		0,6	1,1	2,8	4,0	21,6	22,7	16,0	14,6	13,8	13,6		
9,4	9,2	0,4	0,8	2,2	3,1	22,2	21,8	16,3	14,8	13,8	13,8	0/0	
9,2	9,0	0,5	0,8	2,0	2,7	25,8	25,1	17,2	15,6	14,4	14,1	0/0	
10,0	9,7	0,2	0,6	1,8	2,6	25,0	24,4	17,8	16,0	14,5	14,4	0/0	сл. Cu
8,4	8,6	0,5	0,8	2,2	3,1	23,8	23,6	18,0	16,3	14,8	14,5	0/0	
7,8	7,8	0,4	0,6	2,0	2,7	21,8	21,7	18,2	16,6	15,2	14,6	1/0	Cl
8,6	8,2	0,4	0,8	2,0	3,1	21,0	20,2	18,0	16,6	15,3	14,9	2/0	Cl
9,8	8,4	0,5	0,8	2,3	3,6	18,8	18,2	17,5	16,6	15,4	15,0	1/0	Cl sp.
8,5	8,4					17,0	16,6	16,8	16,4	15,4	14,6	0/0	Cl sp.
8,8	8,2	0,2	0,4	1,8	—	15,4	15,1	16,0	16,0	15,2	15,0	0/0	
9,0	8,8	0,0	0,2	1,4	—	14,3	13,7	15,4	15,6	15,1	14,8	0/0	
9,6	9,0	0,0	0,0	0,6	—	12,2	10,9	14,4	15,2	14,8	14,6	0/0	

Число	Срок	Напр. ветра	Температура воздуха (град.) на высотах, м						Упругость водяного (мб) на высо			
			0,2	0,5	0,8	1,2	1,7	2,2	0,2	0,5	0,8	1,2
			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
16 VI	0 00		4,2	4,2	4,4	4,9	6,0	6,9	8,2	8,1	8,3	8,4
	2 00		4,8	4,6	4,8	4,9	5,0	5,4	8,6	8,4	8,4	8,5
	4 00		4,0	4,0	4,2	4,0	4,2	4,6	7,8	8,1	8,0	8,0
	6 00		8,3	8,2	8,5	8,8	8,4	8,5	10,6	10,7	10,8	10,9
	7 00		11,0	11,6	11,8	12,4	12,1	11,6	11,1	11,0	10,9	11,4
	8 00		14,2	15,0	15,0	15,4	15,2	14,8	11,2	11,1	11,3	
17 VI	8 10		15,2	15,3	15,6	15,4	14,8	14,4	12,0	11,5	11,3	10,8
	9 00		17,4	17,6	17,8	17,6	17,1	16,5	12,4	11,8	12,5	11,8
	10 00	В	19,6	19,6	19,8	19,5	19,2	18,8	13,3	12,4	12,1	11,7
	11 00	ВЮВ	20,7	20,5	20,3	20,0	19,6	19,6	11,9	10,3	9,2	8,8
	12 00	З	21,2	20,9	20,7	20,4	20,2	19,8	10,3	9,5	8,6	8,2
	12 30	В	21,4	21,3	21,2	20,8	20,6	20,0	10,2	9,5	9,1	8,5
	14 05		22,9	22,5	22,4	21,9	21,6	21,2	14,8	14,1	13,9	13,3
	15 00	BCB	22,7	22,6	22,4	22,0	21,8	21,6	14,5	14,0	13,1	13,4
	16 00	ВЮВ	22,2	22,3	22,2	21,9	21,8	21,4	11,8	11,4	10,5	9,7
	17 00	CCB	21,4	21,4	21,8	21,6	21,6	21,8	9,9	9,8	10,2	8,8
	18 00	В	20,4	21,0	21,4	21,5	21,4	21,5	11,5	10,7	10,1	9,6
	19 00		18,9	19,6	20,4	20,8	20,8	21,1	10,9	9,3	9,1	8,6
18 VI	8 05	ЗЮЗ	17,5	18,0	18,4	18,2	18,1	18,0	12,6	12,9	11,0	11,0
	9 00	З	19,0	19,0	19,3	19,0	18,9	18,9	13,2	11,8	11,4	11,1
	10 00	З	18,2	18,2	18,4	18,6	18,5	18,6	12,8	12,0	12,2	11,8
	11 00	СЗ	19,8	19,8	19,9	20,0	19,8	20,0	13,4	12,9	12,9	11,6
	12 00	CCЗ	21,0	21,0	21,0	21,0	20,9	21,1	14,6	14,0	14,4	13,0
	14 00	Ю	23,7	23,5	23,2	23,1	22,8	23,0	11,4	10,7	10,4	9,6
	15 00	ВЮВ	25,3	25,3	24,9	24,6	24,1	24,3	14,4	13,6	12,6	10,9
	16 00	ЮЮВ	24,2	24,1	23,8	23,8	23,4	23,0	14,1	14,0	12,6	11,1
	17 00	ЮЮЗ	23,6	23,7	23,8	24,0	23,8	23,7	13,8	13,6	12,2	10,3
	18 00	З	23,4	23,6	23,8	24,0	24,0	23,7	14,8	14,5	13,0	11,3
19 VI	8 00	З	18,6	19,2	19,4	19,6	19,4	19,4	14,3	13,4	13,1	12,6
	9 00	З	20,8	21,2	21,3	21,4	21,2	21,0	14,5	14,2	14,1	13,0
	10 00	З	22,7	22,9	22,8	22,8	22,4	22,3	14,9	13,8	13,0	12,5
	11 00		24,4	24,3	24,0	23,8	23,4	23,2	15,3	13,9	13,4	12,4
	12 00		25,2	25,0	24,6	24,6	24,2	23,8	14,4	13,6	13,2	12,0
	13 20	З	26,8	26,4	25,8	25,4	25,0	24,8	15,2	14,0	13,8	12,6
	14 00	З	26,4	26,2	26,2	25,9	25,6	25,2	14,2	13,8	13,8	12,8
	15 00	Ю	27,5	27,2	26,4	26,2	26,4	25,6	14,5	14,6	14,0	13,2
	16 00	З	24,2	24,2	24,1	24,4	24,3	24,2	15,4	14,8	14,8	13,4
	17 00		25,8	25,9	25,8	26,0	26,0	25,6	14,6	14,0	13,6	12,8
20 VI	8 15	ЮЮЗ	21,0	21,3	21,8	21,9	21,9	21,4	16,7	17,1	15,5	15,1
	9 00	Ю	22,4	22,6	23,0	23,00	22,9	23,0	15,6	14,9	14,8	14,8
	10 00	ЮЮЗ	24,4	24,6	24,8	24,5	24,2	24,2	15,8	14,7	14,6	15,5
	11 00	ЗЮЗ	26,0	25,8	25,5	25,4	25,2	25,0	14,8	14,6	14,4	14,0
	12 00	ЗСЗ	27,9	27,4	26,8	26,3	26,0	25,6	15,4	13,8	13,7	13,4
	14 00	З	28,8	28,4	27,8	27,5	27,0	26,4	15,2	15,0	14,6	13,5
	15 00	ЗЮЗ	28,2	28,0	27,4	27,3	27,0	26,5	14,9	15,8	13,8	12,8
	16 00	З	28,4	28,2	27,9	28,0	28,0	27,6	16,5	16,4	15,6	15,0
	17 00		26,6	26,8	26,6	26,8	26,8	26,4	16,0	16,2	15,0	14,2
	18 00	ЮЮЗ	23,8	23,8	24,0	24,4	24,8	25,3	18,0	17,3	16,5	16,2

пара тах, м		Скорость ветра (м/сек.) на высотах, м				Температура почвы на глубинах, м				Облачность			
1,7	2,2	0,5	1,0	2,0	4,0	0		0,05	0,10	0,15	0,20	колич.	форма
						ртутный термометр	ПТПП						
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
8,7	8,6	0,0	0,0	0,9	—	9,4	8,0	12,4	14,0	14,5	14,3	0/0	
8,6	8,6	0,2	0,2	1,3	1,8	8,5	8,1	11,4	12,8	13,8	13,8	1/0	
8,1	8,2	0,0	0,0	0,4		7,0	7,1	10,6	12,0	13,0	13,2	4/0	Ac
10,2	9,8	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	9,9	10,3	11,5	12,5	12,8	5/0	Ac
10,0	10,2	0,0	0,0	0,0	0,0	12,2	12,9	10,6	11,6	12,4	12,8	7/0	Ac
9,0	9,6	0,0				15,2	15,9	11,6	11,6	12,4	12,6	2/0	Ac
10,3	10,2	0,0	0,3	0,9		13,5	13,1	11,5	11,6	12,2	12,5	0/0	
10,7	10,5	0,0	0,2	2,2		19,0	18,7	12,8	11,9	12,2	12,5	0/0	
9,9	9,6	0,0	0,8	1,6	2,0	22,4	22,0	14,2	13,0	12,4	12,4	0/0	
8,1	7,5	0,3	0,3	1,5	1,8	22,7	24,2	15,4	13,6	12,8	12,8	0/0	
7,4	7,0	0,4	0,6	1,2	1,2	23,0	25,4	16,2	14,3	13,1	13,0	0/0	
7,8	7,2	0,0	0,2	1,2	1,6	25,4	25,6	16,8	14,7	13,4	13,1	0/0	
12,2	11,7	0,0	0,0	1,2	1,3	25,7	25,9	18,0	15,7	14,1	13,7	0/0	
12,4	11,8	0,2	0,2	1,4	1,8	25,1	25,0	18,2	16,2	14,6	14,1	0/0	
9,0	8,8	0,0	0,0	0,6	0,9	23,2	23,4	18,6	16,6	14,9	14,4	0/0	
8,2	7,9	0,0	0,0	1,8	2,2	22,4	21,4	18,4	16,8	15,1	14,6	0/0	
9,4	9,3	0,0	0,0	1,3	1,8	20,3	19,9	18,0	16,8	15,4	14,8	0/0	
8,0	7,6	0,0	0,0	1,2	1,8	18,6	18,1	17,5	16,7	15,4	14,0	0/0	
10,1	9,6	0,0	0,0	1,5	2,2	18,2	19,2	12,8	12,5	12,8	13,1	0/0	
9,8	9,3	0,0	0,6	2,0	2,9	21,7	20,8	14,1	13,0	13,0	13,1	10/0	Ci fil.
10,0	10,2	0,4	0,6	2,0	2,5	21,6	21,5	15,4	13,8	13,2	13,2	10/0	Ci fil.
11,0	11,0	0,0	0,4	1,6	2,2	23,6	24,2	16,4	14,4	13,5	13,4	10/0	Ci fil.
11,4	11,2	0,0	0,0	0,8	1,6	24,6	24,3	17,2	15,2	13,9	13,5	10/0	Ci fil.
8,9	9,5	0,0	0,0	0,4	0,5	27,6	27,3	19,0	16,4	14,6	14,2	10/0	Ci fil.
9,8	10,0	0,0	0,6	1,5	1,8	27,2	27,3	19,6	16,9	15,0	14,4	8/0	Ci, As
9,8	9,2	0,0	0,4	0,8	1,4	26,0	24,8	19,8	17,4	15,3	14,8	9/0	Ci fil.
9,5	9,2	0,0	0,4	0,8	2,0	23,6	23,8	19,8	17,8	15,6	15,2	8/0	Ci, Ac
10,6	10,1	0,0	0,0	0,4	0,8	24,1	22,5	19,5	17,8	15,8	15,3	—	
12,4	12,4	0,0	0,2	1,8	1,8	20,4	20,3	14,2	13,8	14,0	14,1	0/0	
12,6	12,8	0,0	0,3	1,5	2,0	21,4	22,6	15,4	14,4	14,3	14,2	0/0	
11,7	11,5	0,0	0,2	1,2	2,0	26,3	26,1	16,6	15,0	14,3	14,2	0/0	
11,8	12,1	0,0	0,2	1,4	2,3	26,4	27,9	17,8	15,9	14,6	14,4	0/0	
11,6	10,8	0,0	0,2	1,0	1,6	27,9	29,1	18,8	16,6	14,8	14,6	3/3	Cu
11,8	12,0	0,0	0,3	1,8	2,5	30,6	30,0	20,2	17,8	15,8	15,3	—	
11,9	12,0	0,0	0,2	1,0	1,1	29,6	29,2	20,6	18,0	16,0	15,4	3/3	Cu
12,3	11,8	0,0	0,4	1,2	1,6	29,6	29,9	21,0	18,5	16,4	15,8	5/5	Cu
12,3	11,2	0,0	0,0	1,2	1,6	27,0	25,6	21,4	18,9	16,7	16,0	8/8	Cu
12,0	11,8	0,0	0,5	1,8	2,9	26,9	25,7	21,2	19,2	17,1	16,3	8/8	Cu
15,6	14,4	0,0	0,2	1,0	2,0	22,3	22,8	16,0	15,4	15,2	15,1	0/0	сл. Ci
13,3	13,2	0,0	0,2	1,2	2,2	24,8	24,2	16,8	15,8	15,2	15,2	0/0	
12,4	12,9	0,0	0,3	1,2	2,0	28,6	27,5	18,0	16,2	14,4	15,2	0/0	
12,4	11,6	0,0	0,6	1,4	2,2	27,3	27,3	19,2	17,2	15,7	15,5	0/0	сл. Cu
11,9	12,4	0,0	0,7	1,4	2,7	29,6	31,1	20,2	17,8	16,0	15,7	1/1	Cu
12,6	12,6	0,0	0,7	1,6	2,4	32,2	31,0	21,8	19,0	16,8	16,1	3/3	Cu
11,9	12,2	0,0	0,4	1,2	1,8	30,6	30,2	22,1	19,4	17,2	16,5	6/6	Cu
14,0	13,0	0,0	0,0	1,1	1,4	28,4	28,5	22,1	19,3	17,8	16,2	4/4	Cu
13,6	12,6	0,0	0,2	0,9	1,6	27,0	26,0	22,0	20,1	18,0	17,1	3/3	Cu
14,6	13,1	0,0	0,0	0,6	2,0	24,6	22,8	21,9	20,0	17,9	17,0	3/3	Cu

Число	Срок	Напр. ветра	Температура воздуха (град.) на высотах, м						Упругость водяного (мб) на высо			
			0,2	0,5	0,8	1,2	1,7	2,2	0,2	0,5	0,8	1,2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
21 VI	8 00	Ю	21,0	21,8	22,0	22,4	22,8	22,3	18,2	17,6	17,5	16,8
	9 00	ЮЗ	23,6	24,0	24,0	24,1	23,9	24,0	19,1	18,2	17,4	16,5
	10 00	ЮЗ	25,4	25,4	25,4	25,4	25,0	25,0	17,2	16,9	16,0	15,0
	12 00	ЮЮЗ	28,1	27,7	27,0	26,8	26,2	26,1	15,6	14,8	14,4	13,9
	14 00	Ю	29,4	29,2	28,7	28,1	27,8	27,2	15,6	15,3	14,8	13,4
	16 00	ЮЮВ	26,6	26,5	26,3	26,4	26,6	26,4	15,4	15,0	15,1	14,6
	18 00	ЮЮВ	25,2	25,3	25,2	25,4	25,3	25,4	17,2	16,3	15,9	15,0
23 VI	8 00	ЮЗ	20,8	21,0	20,7	20,8	20,7	20,5	17,7	17,0	17,0	16,8
	9 30	ЮЮВ	23,0	23,0	22,5	22,5	22,1	22,0	18,0	18,4	17,2	16,7
	11 00	Ю	26,3	25,2	24,7	24,2	24,0	23,3	17,6	17,0	16,6	16,2
	12 30		24,4	24,1	23,6	23,6	23,4	23,4	15,6	14,8	14,8	14,4
	14 00		28,2	27,5	27,0	26,9	25,7	25,4	16,2	15,8	14,8	14,4
	15 00	СЗ	29,0	28,4	27,8	27,4	27,0	27,3	17,6	17,6	17,5	17,6
	16 00	СЗ	26,2	25,8	25,6	25,4	25,5	25,4	17,7	18,3	18,9	16,0
24 VI	8 05	ЗЮЗ	17,6	18,0	18,1	18,0	17,8	17,7	17,8	17,2	17,3	16,4
	9 00	З	19,8	20,0	19,8	19,6	19,4	19,1	18,2	17,4	17,0	16,5
	10 00	ЗЮЗ	20,4	20,2	19,8	19,6	19,4	19,4	17,4	16,4	16,2	16,4
	11 00	ЗСЗ	22,8	22,4	21,6	21,1	20,8	20,5	16,8	15,8	15,3	14,9
	12 30	ЗСЗ	23,9	23,4	22,7	22,2	22,0	21,8	16,0	15,2	14,6	14,0
	14 00	ЗСЗ	27,3	26,4	25,3	24,5	24,2	23,3	16,0	15,8	12,6	14,0
	15 00	ЗЮЗ	26,2	25,4	24,6	24,4	24,6	24,2	14,9	14,7	14,1	13,3
	16 00		24,4	24,5	24,0	24,0	23,9	23,6	15,3	14,6	14,4	14,0
	17 00	ЗЮЗ	24,6	24,6	24,2	24,1	24,0	24,0	14,2	14,6	13,5	11,8
	18 00	З	23,4	23,6	23,5	23,6	23,7	23,6	13,3	12,6	12,6	11,4
25 VI	8 10	З	20,6	21,0	21,0	20,8	20,6	20,4	14,8	14,6	14,4	14,0
	9 00	З	22,5	22,6	22,6	22,4	22,0	21,7	13,5	12,8	13,2	12,6
	10 00	З	24,5	24,1	23,8	23,3	22,8	22,4	15,3	14,2	14,0	13,4
	11 00	ЮЗ	25,3	24,9	24,3	23,9	23,4	23,2	13,3	13,7	12,8	12,9
	12 00	ЮВ	27,4	26,8	26,0	25,4	24,8	24,6	12,8	12,2	11,8	11,6
	14 00	ЗСЗ	28,5	28,1	27,4	26,8	26,3	25,9	12,8	12,6	12,8	12,6
	15 00	З	28,4	28,0	27,3	26,8	26,4	25,8	12,4	12,7	12,6	10,4
	16 00	ЗСЗ	28,2	28,0	27,4	26,8	26,4	26,2	13,8	12,8	12,8	11,6
	17 00	ЮЮВ	27,1	27,0	26,6	26,4	26,1	25,6	13,7	13,3	13,0	12,8
	18 00	ЮЮВ	26,4	26,1	25,6	25,6	25,6	25,3	13,8	13,6	13,8	12,8
26 VI	8 05	ЮВ	26,8	21,0	21,1	21,1	20,9	21,0	16,8	16,0	15,8	15,0
	9 00	ЮЮВ	23,2	23,2	23,0	22,9	22,8	22,9	16,0	15,4	15,3	14,9
	10 00	ВЮВ	25,2	24,8	24,4	24,1	24,0	24,0	16,2	15,6	15,5	14,8
	11 00		27,8	27,5	27,0	26,6	26,2	25,8	16,6	16,2	16,3	15,1
	12 00	ЮВ	27,8	27,4	26,6	26,2	26,0	25,8	15,2	15,0	15,3	14,8
	14 00	ЮВ	27,2	26,8	26,2	26,0	26,0	26,0	15,1	14,4	14,0	13,6
	15 00	ЮВ	29,2	28,7	28,0	27,4	27,0	26,6	15,4	14,8	14,7	13,8
	16 00	Ю	26,0	25,7	23,3	25,2	25,0	25,0	15,1	15,0	14,6	14,0
	17 00	ЮЮВ	26,1	25,8	25,3	25,3	25,3	25,2	14,7	14,1	13,7	13,1
	18 00	ЮЮВ	26,2	26,2	25,8	25,8	25,8	25,6	15,0	14,0	13,8	13,4
28 VI	10 45	СВ	20,9	21,0	20,8	20,6	20,6	19,8	20,9	20,2	20,1	20,1

пара тах, м		Скорость ветра (м/сек.) на высотах, м				Температура почвы на глубинах, м						Облачность	
1,7	2,2	0,5	1,0	2,0	4,0	0		0,05	0,10	0,15	0,20	колич.	форма
						рлутный термометр	ПТПП						
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
16,4	16,0	0,0	0,2	1,0	1,3	21,8	22,4	15,8	15,6	15,4	15,5	0/0	
15,9	15,8	0,2	0,4	1,2	1,3	25,0	24,6	17,0	15,8	15,6	15,6	0/0	
14,2	14,0	0,2	0,2	0,9	1,6	29,2	27,7	18,6	16,8	15,7	15,6	0/0	сл. Cu
12,5	12,7	0,0	0,2	0,9	1,3	30,2	31,8	20,6	18,2	16,6	16,0	1/1	Cu
13,0	12,2	0,0	0,2	1,6	2,7	32,2	31,9	22,0	19,7	17,5	16,8	2/2	Cu
12,8	13,9	0,0	0,2	2,0	3,6	28,8	28,6	22,4	20,3	18,2	17,4	9/9	Cu
14,8	14,9	0,0	0,0	1,2	2,2	26,2	25,4	21,8	20,6	18,6	17,8	8/8	Cu
16,2	16,4	0,0	0,0	0,6	0,8	22,6	22,6	16,8	16,0	15,8	15,8	8/0	Ac, Ci
16,2	16,4	0,0	0,0	0,5	0,7	26,4	25,4	17,7	16,6	16,2	15,6	8/0	Ac, Ci
14,5	15,3	0,0	0,2	0,6	1,2	27,6	29,8	19,6	17,8	16,4	16,2	8/4	Cu, Ci
14,2	13,0	0,0	0,0	1,0	1,3	30,2	30,8	21,0	18,8	16,8	16,5	8/4	Ci, Cu
14,1	13,8	0,0	—	1,6	2,9	32,1	31,9	22,4	19,8	17,7	17,1	10/3	Ci, fil.
15,2	15,0	0,0	0,2	1,8	2,9	30,0	31,1	22,9	20,2	18,0	17,4	7/7	Cu, Ci
15,4	15,2	0,0	0,2	1,8	2,9	28,4	28,6	22,6	20,6	18,4	17,7	10/5	Cs, Cu
16,2	16,2	0,0	0,6	2,0	3,3	25,6	25,0	22,4	20,6	18,6	17,8	10/9	Cu, Ci
16,3	16,7	0,0	0,2	1,6	3,3	20,1	20,6	16,7	16,6	16,5	16,4	10/0	Cs
16,2	16,4	0,2	0,4	1,8	2,9	23,6	22,8	17,6	16,9	16,5	16,4	10/0	Ci, Cs, Cu
16,1	16,2	0,4	0,4	2,0	3,6	24,9	24,1	18,8	17,4	16,6	16,5	10/5	Cu, Ci
14,7	14,7	0,4	0,5	2,3	4,0	25,1	25,9	19,7	18,2	16,8	16,6	10/4	Cu, Ci
14,6	14,0	0,0	0,4	1,8	3,1	27,2	28,1	20,6	18,6	17,3	16,8	10/4	Cu, Ci
12,8	14,9	0,2	0,3	1,7	2,9	30,0	30,1	21,6	19,6	17,8	17,2	10/7	Ci, Cu
13,3	13,2	0,0	0,5	2,4	2,9	28,2	26,4	22,1	20,0	18,0	17,4	7/7	Cu
13,4	13,3	0,0	0,2	1,4	2,3	26,0	25,9	22,2	20,2	18,4	17,7	10/7	Cu, Ci
11,7	12,0	0,1	0,5	1,9	3,2	25,4	25,1	21,8	20,2	18,5	17,8	3/3	Cu
10,8	10,6	0,7	0,8	2,0	3,5	23,7	23,0	21,5	19,9	18,6	17,9	10/0	Ci, Cu
13,6	13,6	0,0	0,5	1,0	2,0	21,2	21,7	15,6	15,4	15,4	15,8	10/0	Ci, Cs
12,2	12,1	0,2	0,4	0,6	2,0	24,8	24,2	16,6	15,8	15,6	15,7	10/0	Ci
13,0	12,9	0,0	0,2	1,1	1,5	28,0	26,7	18,0	16,5	15,8	15,8	10/0	Ci
12,0	11,9	0,2	0,4	1,2	1,4	27,0	29,2	19,0	17,2	16,1	15,9	10/0	Ci, сл. Cu
11,4	11,1	0,0	0,6	1,0	2,2	29,2	30,9	20,0	17,7	16,4	16,1	10/1	Ci, Cu
11,6	11,5	0,0	0,5	1,2	1,8	31,2	31,6	22,0	19,5	17,5	17,0	5/5	Cu
10,5	10,9	0,0	0,3	1,1	1,8	30,5	31,4	22,6	20,0	18,0	17,3	4/4	Cu
11,8	11,6	0,2	0,5	1,1	1,8	29,0	29,7	22,8	20,4	18,4	17,6	3/3	Cu
11,7	11,2	0,0	0,2	1,1	1,6	27,6	27,6	22,8	20,7	18,6	17,8	3/3	Cu
11,8	11,9	0,0	0,4	1,4	2,4	26,6	26,1	22,6	20,8	18,8	18,0	2/2	Cu
14,7	14,8	0,0	0,4	1,4	2,2	21,0	22,2	16,1	15,9	16,1	16,0	0/0	
14,3	14,5	0,0	0,6	1,8	2,9	25,0	24,9	17,2	16,4	16,1	16,2	0/0	сл. Cu
14,4	14,4	0,2	0,6	1,8	2,9	29,2	27,6	18,6	17,0	16,2	16,2	7/0	Ac, Cs
14,2	14,7	0,4	0,6	1,4	2,7	29,4	31,0	19,8	17,8	16,6	16,4	3/0	Cs
13,6	13,7	0,2	0,6	1,8	2,1	30,5	30,5	20,8	18,6	17,0	16,7	3/3	Cu, Cs
13,2	13,1	0,2	0,8	1,4	2,5	30,0	29,8	21,8	19,6	17,7	17,2	10/8	Cu, As
12,8	13,0	0,2	0,3	1,5	2,6	31,2	31,5	22,4	20,2	18,2	17,4	10/5	Cu, Cs
13,2	12,8	0,2	0,2	1,2	2,5	28,1	28,0	22,4	20,5	18,4	17,6	10/8	Cu, Ci
12,6	12,6	0,0	0,2	1,4	2,9	28,3	28,0	22,6	20,8	18,6	18,0	7/4	Cu, Ci
12,6	12,8	0,0	0,4	1,6	3,1	26,4	25,1	22,4	20,8	18,9	18,2	—	
19,6	19,4	0,2	0,2	1,4	2,6	22,7	23,5	19,6	18,6	17,2	17,2	10/10	Cu, Cu

Число	Срок	Напр. ветра	Температура воздуха (град.) на высотах, м						Упругость водяного (мб) на высо			
			0,2	0,5	0,8	1,2	1,7	2,2	0,2	0,5	0,8	1,2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
28 VI	11 50	СВ	22,4	22,3	21,9	21,8	21,8	21,4	20,8	20,7	20,3	20,0
	12 50		25,5	25,1	24,4	24,1	24,0	23,3	22,5	21,9	21,7	21,3
	14 15	ЮЮВ	25,6	25,0	24,3	24,1	24,0	24,0	21,8	21,2	20,2	19,5
	15 00	ЮЮВ	26,7	26,0	25,5	25,3	25,0	24,5	21,1	20,4	19,5	18,5
	16 00		26,4	26,1	25,5	25,5	25,3	24,8	19,4	19,0	18,4	17,7
	17 00		26,0	25,8	25,5	25,4	25,3	24,9	19,5	19,2	18,8	18,0
	18 00	ЮЮВ	24,1	24,1	24,0	24,0	24,1	24,0	20,1	18,6	18,4	16,9
29 VI	8 10	ЮЮВ	20,4	20,3	20,0	19,9	19,8	19,7	19,0	18,6	18,8	18,3
	9 00	ЮЮВ	21,9	21,8	21,6	21,6	21,2	21,0	19,4	19,0	18,8	18,4
	10 00	ЮВ	24,1	23,4	23,3	23,0	22,6	22,6	19,7	19,3	18,6	17,8
	11 00	ЮЮВ	25,2	24,8	24,1	23,6	23,4	23,2	19,6	19,0	18,4	17,4
	11 55		22,5	22,2	21,6	21,6	21,6	21,8	19,1	18,4	18,2	17,9
	14 00	ЮЮВ	23,9	24,3	24,1	24,0	23,9	23,8	23,4	21,6	20,2	18,8
	15 00	В	26,0	25,8	25,2	24,8	24,7	24,6	19,7	18,6	17,1	16,2
	16 00	В	24,8	24,5	24,0	23,8	23,6	23,2	18,2	17,2	16,0	15,2
	17 00	ВЮВ	24,1	23,8	23,4	23,4	23,3	23,0	17,2	15,7	15,4	14,8
	18 00	ВЮВ	22,4	22,6	22,6	22,6	22,4	22,3	18,4	17,7	17,1	16,1
1 VII	10 00	ЗЮЗ	18,8	18,4	18,0	17,4	17,0	16,8	14,3	13,4	13,1	12,7
	10 55	ЗЮЗ	21,4	21,0	20,6	19,8	19,0	18,4	13,4	12,4	12,2	11,8
	11 40	ЗЮЗ	22,7	22,1	21,4	20,5	19,9	19,4	12,0	11,9	11,8	11,0
	12 15	С	22,9	22,6	21,7	20,9	20,4	19,6	11,8	11,4	11,0	10,5
	14 30	ЗСЗ	23,6	23,2	22,2	21,4	20,8	20,5	13,1	12,6	12,0	12,0
	15 00	ССЗ	20,2	20,1	19,8	19,4	19,0	19,1	14,0	13,2	12,6	11,4
	16 00	СЗ	23,3	23,0	22,4	22,0	21,6	20,9	12,6	11,6	11,2	10,8
	17 00	ЗЮЗ	22,6	22,2	21,8	21,8	21,4	21,2	11,6	10,8	10,2	10,0
	18 00		20,4	20,4	20,3	20,4	20,4	20,4	11,8	10,2	9,9	9,6
	2 VII	8 05	Ю	17,6	18,2	18,2	18,2	18,0	18,0	12,2	11,1	11,2
9 00		Ю	19,8	20,0	19,6	19,4	19,0	18,8	11,4	10,9	10,8	10,5
10 00		ЮЮЗ	21,0	21,0	20,6	20,2	19,9	20,0	12,5	11,7	11,6	10,8
11 00		ЗЮЗ	23,2	23,0	22,4	21,8	21,0	21,0	13,6	13,0	12,4	12,2
12 00		ЗСЗ	24,6	24,2	23,4	22,6	22,0	21,7	13,7	13,0	12,8	12,4
14 00		З										
15 00		СЗ	22,6	22,4	22,0	22,2	22,2	22,3	13,6	13,2	12,8	12,6
16 00		ССЗ	24,4	24,6	24,1	23,9	23,9	23,8	13,2	12,6	12,4	12,2
17 00		ССВ	21,9	21,9	21,8	22,1	22,0	22,2	14,8	14,1	14,2	12,8
18 00		З	23,2	23,4	23,3	23,4	23,4	23,4	14,3	13,7	13,4	12,6
3 VII	8 10	СВ	19,8	20,2	20,1	19,8	19,6	19,2	17,1	16,4	16,4	16,2
	9 00	СВ	21,9	22,0	21,8	21,6	21,2	21,0	17,1	17,0	16,4	16,2
	10 00	ЮЗ	21,4	21,4	21,0	21,0	20,8	21,0	16,6	15,7	15,6	15,3
	11 00	З	23,5	23,2	22,6	22,2	22,0	22,0	15,0	14,2	13,9	13,7
3 VII	12 00	З	24,1	23,6	22,9	22,6	22,2	22,2	15,2	14,2	14,3	14,2
	14 30	З	22,8	23,0	22,8	22,6	22,2	22,0	19,2	17,5	16,8	16,2

пара тах, м		Скорость ветра (м/сек.) на высотах, м				Температура почвы на глубинах, м						Облачность	
1,7	2,2	0,5	1,0	2,0	4,0	0		0,05	0,10	0,15	0,20	колич.	форма
						грунтный термометр	ПТП I						
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
19,6	19,6	0,0	0,3	1,9	2,6	24,1	23,4	20,6	19,2	17,6	17,4	10/8	Cu, Ac
20,2	20,3	0,0	0,4	1,2	2,0	25,6	25,8	21,4	19,7	18,0	17,4	10/5	Cu, Ac
19,1	18,7	0,2	0,4	2,0	3,1	27,3	27,4	22,6	20,8	18,9	18,0	10/10	Cu, Ac
17,6	17,7	0,4	0,6	2,2	3,6	27,0	27,1	23,4	21,2	18,8	18,2	10/5	Ci, Cu
16,8	16,7	0,4	0,9	2,4	4,0	26,0	26,6	23,5	21,7	19,4	18,6	6/6	Cu cong.
17,2	17,1	0,4	0,6	2,3	4,0	25,3	24,8	23,4	21,8	19,7	19,0	5/5	Cu
16,4	16,7	0,0	0,4	1,5	2,9	24,0	23,3	23,0	21,8	19,8	19,0	7/5	Ci, Cu
17,8	18,2	0,2	0,4	0,8	1,6	20,9	21,6	18,4	17,9	17,6	17,4	3/0	Ci, Ac
17,6	17,6	0,0	0,2	0,8	1,5	23,2	22,8	19,0	18,2	17,6	17,4	3/0	Ac, Ci
17,2	17,0	0,0	1,0	1,6	2,2	24,9	23,8	20,2	18,8	17,8	17,4	3/2	Cu, Ac
17,0	16,8	0,4	0,8	2,3	3,6	25,0	25,2	21,0	19,4	18,1	17,6	8/7	Ac, Cu cong.
17,2	17,2	0,4	0,8	2,0	3,1	25,6	26,9	21,6	20,0	18,8	17,8	10/7	Cu, Ac
17,9	17,4	0,4	0,7	1,5	2,5	25,4	24,7	22,0	20,6	19,4	18,2	7/7	Cu
15,8	15,3	0,4	0,6	1,8	2,9	25,6	25,4	22,6	21,0	19,4	18,6	6/6	Cu cong.
14,0	14,6	0,5	0,8	2,5	4,0	25,0	24,8	22,7	21,4	19,4	18,6	7/7	Cu
13,9	14,2	0,6	0,6	2,2	3,5	24,0	22,5	22,6	21,6	19,6	18,5	8/4	Ci, Cu
15,7	15,9	—	—	1,4	2,5	22,7	21,9	22,5	21,4	19,6	18,8	7/4	Cu, Ci
12,2	12,4	0,0	0,6	3,0	3,2	21,6	20,6	16,0	14,7	14,4	14,6	7/7	Cu cong.
11,2	10,8	0,0	0,5	1,4	2,7	20,2	18,2	17,2	15,6	14,7	14,6	8/8	Cu cong., Cu
10,4	10,2	0,0	0,6	2,3	3,5	22,2	24,5	17,5	16,2	15,0	15,1	7/7	Cu cong.
9,8	9,8	0,0	0,7	2,3	3,5	22,4	24,8	18,2	16,6	15,2	15,2	6/6	Cu
11,0	10,2	0,0	0,6	1,8	2,9	22,8	24,3	19,8	18,2	16,5	16,0	7/7	Cu cong.
10,8	10,5	0,0	0,6	2,2	3,8	22,6	23,0	19,8	18,2	16,6	16,2	5/5	Cu
10,4	10,0	0,0	0,6	1,5	2,7	22,1	23,0	19,7	18,4	17,0	16,6	5/5	Cu
9,4	9,1	0,4	0,9	2,8	4,9	21,7	22,8	19,6	18,6	17,3	16,8	4/4	Cu
9,2	9,0	0,0	0,5	2,5	4,0	20,0	19,7	19,2	18,8	17,4	16,9	3/3	Cu, Ci
10,3	10,1	0,0	0,0	0,6	1,6	16,8	17,6	14,2	14,0	14,4	14,7	5/0	Ac, Ci
10,0	9,9	0,0	0,5	1,0	1,6	20,2	19,5	15,2	14,5	14,5	14,7	6/0	Ac, Ci
10,8	10,3	0,0	0,4	0,7	1,1	22,0	21,4	16,6	15,2	14,7	14,8	7/0	Ac
11,6	12,0	0,0	0,4	0,8	1,1	22,4	24,5	17,8	16,2	15,0	15,0	2/0	Ac, сл. Cu
11,4	11,8	0,4	0,6	1,4	2,0	24,1	26,5	18,9	16,8	15,4	15,2	2/2	Cu, Ac
						25,8	26,9	20,8	18,0	16,2	16,0	4/4	Cu, сл. Ac
11,6	11,6	0,0	0,0	0,8	1,3	24,0	23,1	21,1	18,8	16,8	16,2	9/9	Cu
11,7	11,6	0,0	0,4	0,5	0,7	24,0	24,0	21,2	19,2	17,4	16,6	5/5	Cu
12,0	11,6	0,0	0,4	0,7	0,7	23,2	23,1	21,2	19,4	17,6	16,9	6/6	Cu cong.
11,8	11,6	0,0	0,4	1,3	1,8	22,0	21,1	20,6	19,4	17,8	17,1	6/6	Cu
15,9	16,1	0,0	0,4	0,7	0,8	18,5	18,5	14,9	14,8	15,0	15,2	0/0	Ac у гориз.
15,5	15,6	0,0	0,7	1,2	3,8	22,0	21,5	16,0	15,4	15,1	15,2	0/0	сл. Cu
15,0	15,0	0,0	0,5	1,5	2,7	22,8	22,3	17,2	16,2	15,4	15,4	8/8	Cu
13,4	13,5	0,0	0,5	1,8	3,5	23,4	23,8	18,4	17,0	15,4	15,6	9/8	Cu cong., Cc
14,2	13,9	0,0	0,4	1,8	3,3	24,4	24,4	19,1	17,6	16,6	15,8	10/9	Cu cong., Ac
15,9	15,6	0,4	0,6	1,0	2,9	24,0	24,3	20,0	18,6	17,0	16,6	—	—

Число	Срок	Напр. ветра	Температура воздуха (град.) на высотах, м						Упругость водяного (мб) на высо			
			0,2	0,5	0,8	1,2	1,7	2,2	0,2	0,5	0,8	1,2
			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
3 VII	15 00	ССВ	21,8	21,8	21,4	21,4	21,3	21,4	16,0	14,8	14,8	14,6
	16 00	ССВ	23,9	23,2	22,8	22,4	22,0	21,9	18,0	17,3	17,0	16,6
	16 50	ЗЮЗ	22,8	22,6	22,2	22,2	22,0	22,0	16,0	15,0	14,6	14,2
4 VII	8 00	ЗЮЗ	16,7	16,6	16,6	16,6	16,6	16,5	15,9	14,9	14,8	14,6
	9 00	ВЮВ	17,6	17,3	17,1	17,0	16,8	16,8	16,1	15,4	15,4	15,2
	10 00	Ю	20,8	20,6	20,2	20,1	19,6	19,4	16,0	15,0	15,5	15,2
5 VII	11 00	Ю	21,5	21,2	20,6	20,4	20,0	20,1	15,9	15,2	15,1	15,1
	12 00		20,4	20,2	20,0	20,0	19,9	20,0	16,1	15,4	15,4	15,0
	8 25	ЮЗ	16,5	16,6	16,4	16,1	15,8	15,6	17,4	16,6	16,2	15,6
	9 00	ЮЗ	17,6	17,6	17,4	17,2	16,8	16,6	16,6	16,0	15,6	15,0
	10 00	З	17,8	17,6	17,4	17,2	17,0	17,0		15,5	15,4	15,0
	11 00	ЮЗ	19,8	19,6	19,2	18,8	18,4	18,4	15,8	15,1	15,0	14,6
	12 00	З	23,6	23,4	22,4	21,7	21,0	20,2	14,8	14,4	14,4	13,4
	14 00	З	24,1	23,6	23,0	22,6	21,8	21,5	15,1	13,7	13,8	13,2
	15 00		21,6	21,6	21,2	21,0	20,8	20,8	14,7	14,2	14,0	13,5
6 VII	16 00	ЗЮЗ	22,4	22,2	21,8	21,8	21,8	21,8	16,2	14,0	14,3	14,2
	17 00	З	23,0	23,0	22,6	22,4	22,2	21,9	15,2	14,2	14,4	13,2
	17 50		22,2	22,3	22,0	21,8	21,8	21,6	15,1	14,6	14,2	13,6
	8 30	ЮЮВ	20,0	20,4	20,4	20,2	20,2	19,9	16,4	16,0	15,8	15,2
	9 00	ЮВ	21,2	21,4	21,0	21,0	21,0	20,4	15,5	15,0	14,6	14,0
	10 00	ЮЮВ	22,4	22,4	22,2	22,2	22,0	21,6	14,7	14,0	13,8	13,5
	11 00	ЮВ	24,4	24,2	23,6	23,4	23,4	22,8	15,8	15,7	15,2	14,2
7 VII	12 00	ЮВ	24,4	24,2	23,8	23,4	23,4	23,0	16,6	16,0	15,8	15,0
	13 00	ЮВ	22,5	22,3	22,0	21,8	21,7	21,5	18,0	17,1	16,5	16,0
	14 00	ЮЮВ	21,7	21,6	21,4	21,4	21,3	21,4	17,5	17,0	16,5	16,0
	15 00	ЮВ	22,5	22,4	22,1	22,0	22,0	21,8	19,2	18,4	18,2	17,6
	8 20	ЮЗ	16,8	16,6	16,6	16,4	16,4	16,3	18,4	17,2	17,0	16,8
	9 00	ЮЗ	16,8	16,8	16,7	16,4	16,4	16,3	17,9	17,4	—	16,2
	10 00	ССВ	17,8	17,8	17,6	17,5	17,2	17,0	16,2	15,6	15,8	15,4
	11 00	ЗСЗ	18,00	17,8	17,6	17,4	17,2	17,2	16,5	16,2	16,0	15,6
12 00	З	18,4	18,2	18,0	17,7	17,4	17,4	16,6	16,2	15,9	15,7	
14 06	СЗ	21,0	20,8	20,3	20,0	19,8	19,5	16,6	16,2	16,4	15,8	
15 00	СЗ	22,4	22,2	21,7	21,1	21,0	20,8	17,2	16,6	16,2	15,9	
16 00	ССЗ	21,8	21,5	21,0	20,8	20,6	20,4	16,4	15,8	15,6	15,6	

пара тах, м		Скорость ветра (м/сек.) на высотах, м				Температура почвы на глубинах, м						Облачность	
1,7	2,2	0,5	1,0	2,0	4,0	0		0,05	0,10	0,15	0,20	колич.	форма
						рутный термометр	ПТП						
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
14,4	14,6	0,4	0,6	2,6	4,2	24,3	25,2	20,4	18,6	17,2	16,6	8/7	Cu, Ac
16,2	16,3	0,0	0,0	1,6	4,2	23,7	23,3	20,8	19,1	17,6	16,8	10/4	Ci fil., Ac, Cu
14,0	14,3	0,4	0,6	1,7	3,2	22,8	22,5	20,8	19,2	17,6	17,0	10/6	Ci fil., Cu cong.
14,4	14,5	0,0	0,0	1,3	1,4	17,7	17,3	15,1	15,0	15,2	15,4	10/5	As, Ns, St
15,1	15,2	0,0	0,0	1,1	3,3	18,2	17,6	15,8	15,6	15,4	15,4	10/7	As, St
14,6	14,6	0,0	—	1,2	2,3	20,9	21,2	16,6	15,8	15,4	15,4	8/4	Cb, As, St
14,6	14,4	0,4	0,8	2,2	3,5	22,7	22,3	18,2	16,5	15,4	15,5	10/1	As, Cu
14,9	14,8	0,4	0,6	1,8	2,9	22,0	20,3	18,8	17,0	15,8	15,6	10/10	Sc, Ns, Cu
15,4	15,6	0,0	0,6	1,2	2,2	18,1	18,4	16,0	15,6	15,5	15,6	10/10	Cu, Sc
14,7	14,8	0,0	0,5	1,2	2,2	19,8	19,4	16,4	15,8	15,5	15,6	10/4	Cs, Cs, Cu
—	15,1	0,0	0,4	1,2	2,0	20,6	20,4	17,2	16,3	15,7	15,6	10/2	Cs, Ac, Cu
—	14,5	0,0	0,4	1,2	1,8	22,2	22,5	18,5	16,9	15,9	15,8	10/1	Cu, Ac, Cs
12,9	12,8	0,0	0,6	1,5	2,5	24,4	26,0	19,4	17,6	16,2	16,0	10/4	Ac, Cu, Cs
12,6	12,6	0,0	0,4	0,8	1,4	24,6	24,4	20,2	18,4	16,8	16,6	10/6	Ci, Ac, Cu
13,0	—	0,0	0,4	0,8	0,7	23,4	22,8	20,8	19,0	17,4	16,8	7/7	Cu cong., Cu
13,7	13,6	0,0	0,4	1,5	2,2	23,8	23,2	21,0	19,4	17,8	17,1	8/7	Cu, Ac
13,2	12,8	0,0	0,6	0,8	1,5	22,8	22,2	21,0	19,6	18,0	17,4	7/4	Ci, Cu, Ac
13,1	12,8	0,0	0,4	1,0	0,7	22,4	21,5	20,8	19,7	18,2	17,6	8/4	Ci, Ac, Cu
14,4	14,7	0,0	0,4	0,6	1,3	19,0	19,9	15,8	15,4	15,5	15,6	0/0	сл. Ci, Ac
13,4	13,3	0,0	0,7	1,1	2,5	20,6	20,5	16,4	15,6	15,6	15,6	7/0	Ci fil.
12,6	12,4	0,4	0,6	0,9	2,5	22,6	21,7	17,6	16,8	15,8	15,6	7/0	Ci fil., сл. Cu
13,8	13,4	0,4	0,6	1,6	2,5	23,0	24,0	18,8	17,1	16,0	15,9	8/0	Ci, сл., Cu, Ac
14,5	14,6	0,4	0,6	1,7	2,2	24,3	25,7	19,6	17,8	16,4	16,1	10/2	Ac, Cu
15,6	15,0	0,4	0,8	1,6	2,0	23,4	23,1	20,2	18,4	16,9	16,5	10/8	St, Ac
15,7	15,6	0,4	0,6	1,9	2,9	22,9	21,9	20,3	18,6	17,1	16,6	10/10	St
17,1	17,2	0,4	0,6	1,7	2,7	23,3	23,3	20,3	18,9	17,2	16,9	10/10	Sc, St
16,8	16,4	0,0	—	1,1	0,8	18,5	18,1	17,0	17,0	16,6	16,5	10/10	St, Ns
16,0	16,0	0,0	0,4	1,0	0,8	18,3	17,8	17,2	16,8	16,6	16,4	10/10	St, Ns
15,4	15,1	0,0	0,4	1,0	1,5	20,4	19,1	17,6	17,0	16,6	16,4	10/10	St, Sc, Ns
15,6	15,6	0,0	0,4	1,0	1,3	20,6	19,2	18,4	17,4	16,6	16,4	10/10	St, Sc
15,3	15,4	0,0	0,4	0,8	1,4	20,3	19,9	18,4	17,6	16,8	16,6	10/10	Sc
15,6	15,2	0,0	0,4	1,0	1,1	23,4	21,7	19,7	18,6	17,3	17,0	10/10	Sc, Ac
15,4	15,6	0,4	0,6	1,8	2,5	23,4	23,8	20,4	18,9	17,6	17,1	10/10	Sc, Ac
15,2	14,9	0,0	0,6	1,3	1,6	22,6	22,6	20,6	19,2	17,8	17,2	10/5	Sc, As

Число	Срок	Напр. ветра	Температура воздуха (град.) на высотах, м						Упругость водяного (мб) на высо			
			0,2	0,5	0,8	1,2	1,7	2,2	0,2	0,5	0,8	1,2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

8 VII	17 00	СВ	20,5	20,6	20,4	20,2	20,1	20,0	16,7	16,0	16,2	15,8
	18 00	ССВ	21,6	21,7	21,4	21,4	21,3	21,2	16,2	15,8	15,6	15,2
	8 06	СВ	19,2	19,4	19,2	18,9	18,8	18,2	17,0	16,4	16,9	16,8
	9 00	В	20,4	20,8	20,4	20,2	19,7	19,2	17,2	16,7	17,0	16,7
	10 00	СВ	21,0	21,1	20,8	20,8	20,0	20,2	16,9	16,5	16,8	16,5
	10 45	СВ	24,0	23,6	23,0	22,5	21,6	22,0	17,6	17,0	16,8	16,6
	11 45	В	21,1	21,2	21,0	21,0	21,0	20,8	16,2	16,2	15,8	15,6

пара тах, м		Скорость ветра (м/сек.) на высотах, м				Температура почвы на глубинах, м				Облачность			
1,7	2,2	0,5	1,0	2,0	4,0	0		0,05	0,10	0,15	0,20	колич.	форма
						ртутный термометр	ПТП I						
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27

15,5	15,4	0,4	0,6	1,6	2,2	22,1	21,6	20,6	19,4	18,1	17,4	<u>10/10</u>	Sc, Ac
14,8	15,0	0,0	0,4	1,0	1,1	21,4	21,0	20,5	19,6	18,2	17,6	6/5	Cu, Sc, Ac, As
16,4	15,8	0,0	0,4	1,2	1,1	18,3	19,4	15,4	15,2	15,5	15,6	10/0	Ci
16,4	16,9	0,0	0,4	0,6	0,4	20,6	20,6	16,2	15,5	15,6	15,4	10/0	Ci
16,0	16,0	0,0	0,6	0,7	0,4	21,6	21,0	17,2	16,0	15,6	15,6	10/4	Ci, Cu
16,6	16,2	0,0	0,4	1,5	1,5	22,6	23,0	18,0	16,7	15,9	15,8	10/8	Ci, Cu
15,8	15,2	0,0	0,0	0,5	0,0	22,6	22,3	19,2	17,6	16,2	16,0	10/8	Cu, Ci

СОДЕРЖАНИЕ

Н. А. Ефимова. Полевые исследования метеорологического режима растительного покрова	4
Г. С. Купченко. Некоторые биометрические характеристики озимых культур	7
Н. А. Ефимова. Основные особенности метеорологического режима на полях озимой пшеницы и озимой ржи	23
Н. Д. Азимова, Е. В. Зарубин, Л. Г. Качурин. Определение структурных и градиентных характеристик приземного слоя атмосферы внутри растительного покрова	37
Ю. Е. Гиршович, К. И. Кобак. Исследование фотосинтетической деятельности агрофитоценоза	48
Ю. Е. Гиршович. Методика исследования углекислотного газообмена растительных сообществ	63
М. И. Будыко, Л. С. Гандин. К теории теплового режима растительного покрова	69
Л. С. Гандин, Г. В. Менжулин. Расчет характеристик теплового режима растительного покрова	74
Г. В. Менжулин. Методика расчета фотосинтеза растительных сообществ при достаточном увлажнении	81
Приложение	89

Труды ГГО, вып. 229

ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ФОТОСИНТЕЗ
И ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Редактор *Л. В. Царькова*

Техн. редактор *Л. А. Липатова* Корректор *Г. С. Макарова*

Сдано в набор 23/X 1967 г. Подписано к печати 11/III 1968 г.
Бумага 70×108^{1/16} Бум. л. 3,375 Печ. л. 9,45
Уч.-изд. л. 8,53 Тираж 1630 экз. М-21772 Индекс МЛ-217
Гидрометеорологическое издательство. Ленинград. В-53,
2-я линия, д. № 23. Заказ № 686 Цена 60 коп.

Ленинградская типография № 8 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Ленинград, Прачечный пер., 6

Полевые исследования метеорологического режима растительного покрова. Ефимова Н. А. Труды ГГО, 1968, вып. 229, стр. 4—6.

Дана краткая характеристика сельскохозяйственных полей, погодных условий, а также приведены методика и объем экспедиционных наблюдений, выполненных с целью изучения влияния метеорологических факторов на фотосинтетическую продуктивность сельскохозяйственных культур.

Наблюдения проводились в июне—июле 1965—1966 гг. на полях озимой пшеницы и озимой ржи в Ленинградской области.

В комплекс наблюдений были включены:

- 1) стандартные теплобалансовые наблюдения и специальные наблюдения над вертикальными профилями метеорологических элементов (включая потоки радиации, в том числе и фотосинтетически активной) внутри травостоя;
- 2) наблюдения над концентрацией углекислоты на нескольких уровнях внутри травостоя и градиентами концентрации углекислоты над посевом, выполненные с помощью колориметрического и оптикоакустического методов;
- 3) биометрические наблюдения за фазами развития растений, высотой, густотой стояния растений, приростом биомассы и вертикальным распределением элементов растений.

Наблюдения охватывали фазы выхода в трубку, колошения, цветения и налива зерна.

Некоторые биометрические характеристики озимых. Купченко Г. С. Труды ГГО, 1968, вып. 229, стр. 7—22.

Определены основные биометрические характеристики посева (высота, густота стояния стеблей, площадь всех элементов растений и вес сухой биомассы) с учетом их статистической обоснованности.

При анализе вертикального распределения площади элементов растений и сухой биомассы озимой пшеницы и озимой ржи выявлено, что максимум общей поверхности листьев и стеблей у обеих культур отмечается на уровне $\frac{1}{3}$ высоты роста растений от поверхности земли, выше этого слоя площадь листьев и стеблей равномерно уменьшается с высотой. Высота, на которой наблюдается максимум фотосинтезирующей поверхности, меняется в течение вегетации, при этом уменьшение листовой поверхности от слоя максимума происходит симметрично.

Индексы общей площади листьев и стеблей в период налива зерна составляли у озимой пшеницы 11,1, у озимой ржи 8,6. Индексы листовой поверхности у обеих культур были одинаковы и составляли 2,5.

Основной прирост веса сухого вещества наблюдался в фазы выхода в трубку и колошения, после фазы цветения накопление сухой биомассы резко уменьшалось. Табл. 12. Илл. 9. Библ. 31.

Основные особенности метеорологического режима на полях озимой пшеницы и озимой ржи. Ефимова Н. А. Труды ГГО, 1968, вып. 229, стр. 23—36.

По данным специальных градиентных наблюдений над метеорологическими элементами на полях озимой пшеницы и озимой ржи приведены вертикальные профили температуры воздуха, упругости водяного пара, скорости ветра, а также результаты наблюдений над суточным ходом составляющих теплового баланса (радиационного баланса, затрат тепла на испарение, потока тепла в почву и турбулентного потока тепла между подстилающей поверхностью и атмосферой) при разных типах погодных условий и в зависимости от фаз развития растений. Рассмотрен режим турбулентности и радиационный режим внутри растительного покрова, при этом коэффициент турбулентного обмена на нескольких уровнях внутри травостоя рассчитывался по методу теплового баланса, а фотосинтетически активная радиация измерялась с помощью фотоинтегратора системы Б. И. Гуляева.