МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. М.В.ЛОМОНОСОВА

Географический факультет

Кафедра физической географии СССР

На правах рукописи

Роосаарe Юри Михкелевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИГОДОВОЙ ДИНАМИКИ ПОЛЬДЕРНЫХ ГЕОТЕХНОСИСТЕМ

II.00.0I. – физическая география, геофизика и геохимия ландшафтов

Д И С С Е Р Т А Ц И Я

на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель

доктор географических наук
профессор Ю.Г.СИМОНОВ

М о с к в а – I982

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 4

I. ПОЛЬДЕРЫ КАК ГЕОТЕХНОСИСТЕМЫ 10

I.I. Развитие и проблемы польдерного освоения земель 11

I.2. Польдер как объект географических исследований 23

2. ГЕОТЕХНОСИСТЕМА ПОЛЬДЕРА ТАММЕ И ЕЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ 33

2.I. Характеристика эталонного участка Тамме 33

2.I.I. Ландшафтные единицы участка 37

2.I.2. Польдер Тамме 40

2.2. Выделение геотехносистемы - объекта исследования 42

2.3. Структура геотехносистемы польдера Тамме 50

2.4. Исследование геотехносистемы польдера Тамме ... 61

2.4.I. Фитометрические наблюдения 62

2.4.2. Изучение почв 71

2.4.3. Наблюдения за гидрологическим действием технических элементов польдера ... 75

2.4.4. Изучение зимних состояний 77

3. РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ-ПРЕДСТАВЛЕНИЯ В ВИДЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ 78

3.I. Принципы построения модели 79

3.2. Динамика характеристик геосистемы, связанных со снежным покровом 81

3.3. Динамика сезонного промерзания-оттаивания почвы 85

3.4. Компоненты суммарного испарения 92

3.5. Продукционный процесс растений 96
3.5.I. Ячмень 98
3.5.2. Картофель 100
3.5.3. Многолетние травы 103
3.5.4. Параметры корней и водопотребление растений 107
3.5.5. Работа биопродукционного блока модели 112
3.6. Поверхностный сток 112
3.7. Влажность почвы 115
3.7.I. Динамика почвенной влаги 115
3.7.2. Параметры и водно-физические константы почвы 119
3.7.3. Взаимодействия подблоков, имитирующих движение воды 121
3.8. Дренажный сток 123
3.9. Структура целостной модели 127
3.9.I. Управляющий блок 128
3.9.2. Обмен информации и обслуживающие подпрограммы 129
3.9.3. Логическая структура имитационной системы .. 131
4. ПРОВЕРКА И ОБСУЖДЕНИЕ МОДЕЛИ 133
4.I. Характеристика входных данных 133
4.2. Порядок проведения численных экспериментов 144
4.3. Обсуждение модели 148
З А К Л Ю Ч Е Н И Е 182
Л И Т Е Р А Т У Р А 185
Приложение I 213
Приложение 2 216
Приложение 3 220
Приложение 4 221
Приложение 5 289

В В Е Д Е Н И Е

По мере роста интенсивности и комплексности природопользования на первый план современной физико-географической науки выдвигаются проблемы оптимизации природной (географической) среды. Особую важность приобрело: изучение изменений в геотехнических системах, предвидение результатов целенаправленных воздействий и управление геотехническими системами.

Польдеры и другие мелиоративные объекты с двусторонним регулированием водного режима и с интенсивным сельским хозяйством можно рассматривать в качестве управляемых геотехносистем. Для географа польдеры представляют особый интерес для исследования реально существующих управляемых геотехносистем ландшафтного (топологического) уровня. До сих пор польдеры мало охвачены географическими исследованиями. Полученные при этом знания могут помочь разработке и совершенствованию научных основ географической концепции формирования и динамики культурных ландшафтов. На важность применения этих основ в хозяйственной практике указывалось в решениях XXУI съезда КПСС (Материалы...,I98I).

Одним наиболее мощным средством современной науки является моделирование при помощи ЭВМ. При исследовании динамики геосистем в настоящее время все чаще применяется имитационное моделирование на ЭВМ, позволяющее использовать большой и разнородный фактический материал и проводить численные эксперименты, которые протекают гораздо быстрее, чем испытания в самой природе и не имеют нежелательных последствий. При множестве отраслевых моделей такого типа, мало еще целостных моделей геосистем,

а в существующих опытах их построения, как правило, не учитывается территориальная дифференциация и изменение во времени функциональной структуры геосистем. Нередко модели "геосистем вообще" оказываются непроверяемыми на экспериментальном материале.

Цель настоящей работы - разработать имитационную модель геотехносистемы на материале конкретного польдера для изучения его внутригодовой динамики с учетом функциональной, геогоризонтной (вертикальной) и территориальной структур.

Для ее достижения потребовалось решение следующих задач: создать модель-представление территориально разнородной геотехносистемы интенсивного земледелия; изучить взаимосвязи элементов такой системы и построить их математические модели; реализовать их в виде вычислительных алгоритмов на ЭВМ и объединить в целостную имитационную систему; отладить такую систему, ввести в действие, обеспечить необходимой вводной информацией, проверить и показать, что она адекватно отражает динамику реального польдера. Главной проблемой, которая возникла при стремлении к намеченной цели, оказалась идентификация структуры и количественных параметров планируемой алгоритмической модели, ибо она не могла быть создана просто при объединении имеющихся в частных географических дисциплинах разнокачественных моделей компонентов геосистемы, а необходим был определенный ландшафтный синтез.

Объектом исследования был польдер Тамме в Эстонской ССР - тестовой участок дистанционных исследований и один из наиболее благоустроенных польдеров водохозяйственного комплекса озера Выртсъярв.

Необходимые экспериментальные данные для построения и про-

верки модели были получены в экспедиционном порядке автором и студентами Тартуского госуниверситета под руководством автора в ходе производственных практик, курсовых, дипломных и работ по линии HCO^+. При написании работы были использованы фондовые материалы Управлений геологии ЭССР, Тартуского отделения ГПИ "Эстмелиопроект", отчетная документация показательного совхоза им. Ленина Тартуского района ЭССР и опубликованные материалы. Для проверки подблока модели для многолетних трав были использованы материалы, любезно предоставленные В.Росс, для суммарного испарения - материалы А.Яани. Для оценки метеорологических условий были использованы материалы, любезно предоставленные Актинометрической станцией Тыравере и Агрометеорологическим отделом ГУГМС ЭССР.

Методологической основой проведения экспериментальных исследований, обработки материала и анализа литературных источников служил системный подход.

На основе сформировавшихся представлений, руководствуясь идеями ведущих ученых-ландшафтоведов и принятых в метеорологии, в биогеофизике, в гидрологии почв, в мелиоративной и др. науках математических моделей были построены и отлажены на ЭВМ, а затем и исследованы адекватность алгоритмов функциональных подблоков имитационной модели. Они описывают отдельные процессы: промерзание-оттаивание почвы, поверхностный сток, испарение, инфильтрацию, увеличение биомассы, дренажный сток и др. Далее было необходимо построить алгоритм, который учитывал бы различия в функциональной структуре геотехносистемы на разных мес-

---

+ На полевых работах и при первичной обработке материала участвовали: Р.Алликофф, Х.Варенд, Я.Лаан, Л.Меэме, Э.Гаускар, К.Сепп, П.Сепп, Т.Таккис, Ю.Тарвель, Т.Терн, М.Хыбемяги, Т.Юксвярав.

Практическая ценность диссертации связана с тем, что при необходимости улучшения работы польдерных систем производственные организации могут с помощью модели учесть географические особенности функционирования конкретных геотехносистем. Строительство новых польдеров продолжается, также повышается интенсивность сельскохозяйственного землепользования. Поэтому при проектировании новых геотехносистем подобного рода настоящая работа позволяет составлять более точные проекты с учетом тех особенностей, которые нужны для оптимизации работы таких систем. Выполненная работа является составной частью темы кафедры физической географии Тартуского ГУ "Исследование структуры и ландшафтно-экологического режима природных и природно-технических геосистем для сопряженного анализа результатов с материалами аэрокосмического мониторинга, в особенности для разработки элементов геоинформационных систем и решения проблем территориальных планировок" (№ гос. рег. 80072035).

Материалы диссертации докладывались на методологической конференции молодых ученых Московского университета (апрель 1979), на УП межвузовской МГУ-Тартуский ГУ школе по охране природы (Сангасте, сентябрь, 1980) и на Всесоюзном симпозиуме по проблемам оптимизации воздействия общества на окружающую природную среду (Москва, сентябрь, 1981).

За оказанную при выполнении работы помощь, автор выражает свою глубокую благодарность доктору географических наук, профессору Юрию Гавриловичу Симонову. За помощь, консультации и ценные замечания автор благодарит всех товарищей, к которым он обращался или вел совместную работу, особенно сотрудников кафедры физической географии Тартуского госуниверситета, членов кафедры физической географии СССР Московского университета и

сотрудников лаборатории математического моделирования географического факультета МГУ. Автор выражает благодарность за поддержку в борьбе с трудностями, возникавшими при работе на ЭВМ сотрудникам вычислительных центров ТГУ и МГУ.

Автор признателен за помощь всем учреждениям, куда он обратился в процессе работы над диссертацией.

I. ПОЛЬДЕРЫ КАК ГЕОТЕХНОСИСТЕМЫ

Польдер по "Многоязычному техническому словарю по ирригации и дренажу" (I978, с. II9), это "пространство низинных земель, отгороженных от моря или другого водоема дамбами. Сброс воды с польдера осуществляется с помощью шлюзов или насосов, а уровень грунтовых вод на польдере не зависит от уровня воды на соседних площадях".

Это определение польдерного типа освоения земель можно рассматривать как наиболее широкое. В нем охватывается и инженерная защита городов, карьеров, аэродромов и разных земельных угодий как на берегах естественных, так и искусственных водоемов (Успенский, I974; Бондарев, I979). Кроме того, иногда польдерный тип освоения территории создается для устройства в море между шхерами хранилищ пресной воды, как например в прибрежной зоне в Финляндии (Tomberg, I97I).

По Ю.А.Юшкаускасу (I974) польдерной системой является совокупность гидромелиоративных сооружений, включающих, кроме мелиоративной сети и устройств для сброса воды, оградительные (защитные) дамбы, как основной элемент таких систем. Принято считать, что территория (участок), на которой заложена польдерная система, называется морским польдером (Tidepolder), если она защищается дамбами от затопления морской водой, или пойменным польдером (Flusspolder), если дамбами от затопления оберегаются пойменные или дельтовые земли, или низинным польдером (Tiefpolder), если дамбы оберегают земли от затопления другими водоисточниками, например озерами, искусственными водохранилищами.

Таким образом польдер - это мелиоративный объект (и природно-техническая система), поверхность которого временно или постоянно находится ниже водоприемника и который поэтому от него отгораживается дамбой. Он может иметь насосные станции, может не иметь их; он может быть летним или зимним, иметь режим односторонний (осушение) или двусторонний (осушение-орошение) - таблица I. Основные технические элементы польдера изсбражены на принципиальной схеме (рис. I), а подробное описание технических элементов польдера можно найти в специальной литературе (Haldre, Maastik, I963; Зеленка, Юшкаускас, I969; Юшкаускас, I974; Рекомендации..., I979; Эксплуатация..., I98I).

I.I. Развитие и проблемы польдерного освоения земель

Каждый, кто знакомился с использованием земель в Голландии, не мог не восхищаться высокой культурой земледелия на отвоеванных у моря землях Долларта или Зёйдерзе, не мог не удивляться, узнав, что общая протяженность главных плотин в Нидерландах превышает 3 000 км, а протяженность дренажных труб одного только Северо-Восточного польдера близка к длине экватора (Бондарев, I979). На побережье Северного моря, где люди имеют тысячелетний опыт устройства польдерных земель, как нигде больше подтверждается утверждение о том, что антропогенное воздействие на природу отнюдь не должно быть всегда отрицательным.

Нидерланды - родина польдеров, как и самого этого слова ("poel" по голландски значит "болото", "лужа"), но сейчас подобный тип освоения земель широко распространен уже не только на берегах Северного моря, а во многих государствах (Ороше-

Таблица I

Классификация польдеров

Признак	Польдеры разделяются		
Характер водоприемника	морские	низинные (приозерные)	речные (пойменные)
Режим работы	зимние	летние	
Способ подъема воды	механически (насосные станции)		шлюзами
Характер регулирования водного режима	односторонний (осушение)	двусторонний (осушение-орошение)	
Способ осушения	канавами	канавами и дренажем	закрытая сеть осушения
Тип орошения	подпочвенное орошение (дренажное орошение или шлюзование)		дождевание

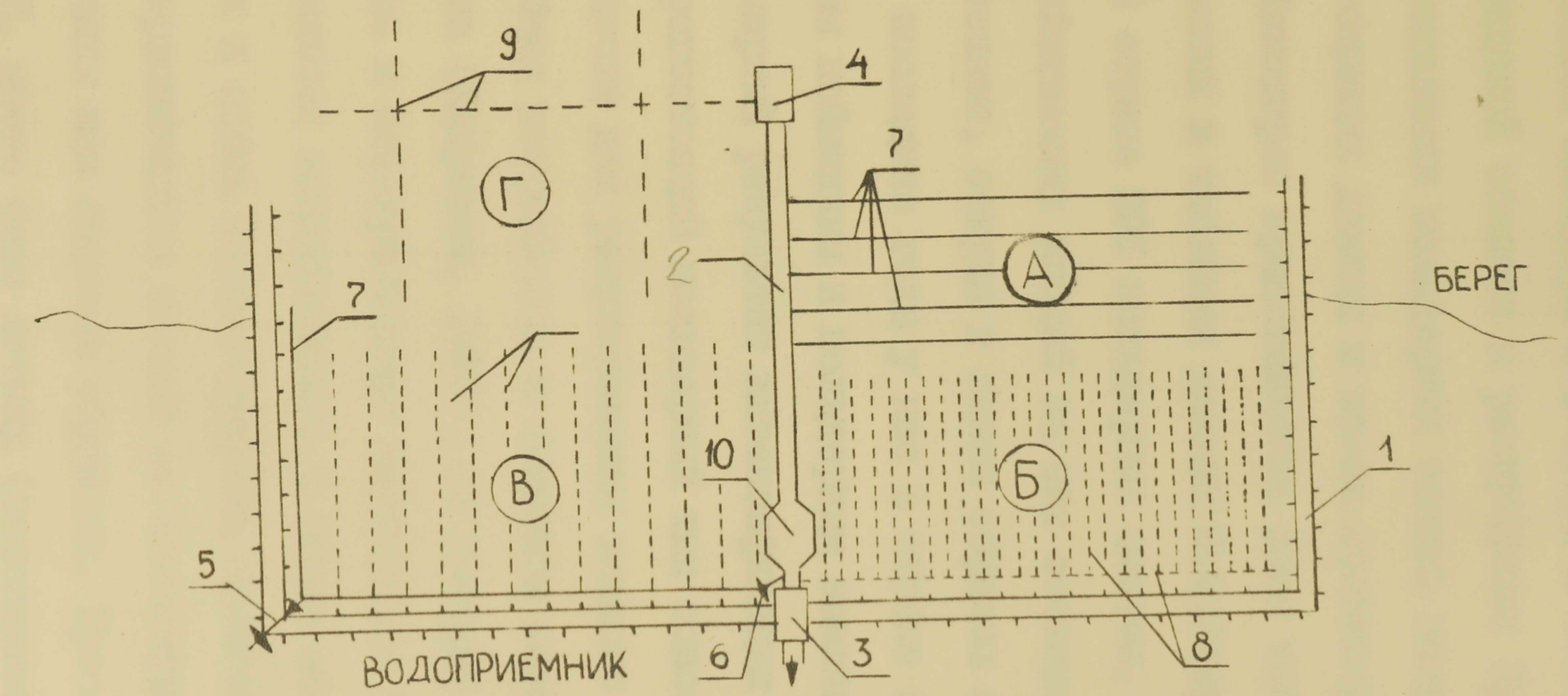


Рис. I. Технические элементы польдеров. Участки, на которых проводится: А - осушение канавами; Б - осушение с гончарным дренажем; В - дренажное осушение-орошение; Г - дождевание. I.Дамба. 2.Магистральный канал. 3.Главная насосная станция. 4.Насосная станция дождевания. 5.Дюкер со шлюзом для обратного пропуска воды. 6.Шлюз. 7.Осушительные каналы. 8.Дрены. 9.Водопровод дождевания. IO.Регулирующий бассейн.

ние..., I974). Кроме США и Китая, Японии и Австралии огромные польдерные массивы находятся на Падуанской низменности Италии, а также в других государствах Европы. Очень много микропольдеров в странах Скандинавии (Кадревич, I976).

Имеются польдеры и в СССР. В основном они находятся в Калининградской области и республиках Прибалтики. Точные данные о распределении польдерных земель получить трудно из-за отсутствия обобщающих данных и из-за противоречий в имеющихся публикациях. Некоторое представление дают таблицы 2 и 3. В отличие от приведенных в таблицах данных Н.Ф.Лаврик (I978) утверждает, что в нашей стране 200 польдерных систем, и что общая площадь сельскохозяйственных угодий на них составляет более 8 млн.га, но не объясняет, откуда и каким образом он получил подобные цифры.

В последние годы у нас в стране повышается интерес к плодородным пойменным и польдерным землям. Это - не случайность, а закономерный результат интенсификации сельского хозяйства, так как дорогостоящий польдерный тип освоения земель имеет и ряд преимуществ для регулирования водного режима почвы.

Общая потребность в машинном осушении в СССР примерно 6 млн.га (Кадревич, I980), из которых 4 млн.га составляют прилегающие к водохранилищам мелководья и подтопляемые земли. Их рациональное использование в общем водохозяйственном комплексе сложная и очень многосторонняя проблема (Мелиорация..., I974).

Первоначально многие из отечественных польдеров были спроектированы как системы осушения. Преобладала открытая сеть осушителей, много было летних (затопляемых) польдеров. О недостаточности одностороннего регулирования водного режима писал А.М.Алпатьев (I969).

Недостаток систем одностороннего действия заключается в

Таблица 2

Польдерные земли СССР

Админ. единица	Источник	Всего польдеров (тыс.га)	Замечания
РСФСР	Ватутин, 1977	141	
Укр. ССР	Успенский, 1974	185+	только Днепровский каскад водохран.
Бел. ССР	Галковский, Полевой, 1980	80	проектом предусмотрено в Полесье всего 124 тыс.га (Маланкина, 1976)
Лит. ССР	Эксплуатация..., 1981	50	88% пойменные, 12% низинные; много летних польдеров
Лат. ССР	Эксплуатация..., 1981	27	
Эст. ССР	Эксплуатация..., 1981	5	
	В с е г о	488	

+ Включаются пойменные земли водохранилищ с т.н. землями инженерной защиты

Таблица 3

Осушение с механическим водоподъемом на затапливаемых землях Нечерноземной зоны РСФСР (по Климко и др., I976)

Территориальная единица	Польдерные системы (тыс.га)		
	действу-ющие	строящиеся	проектир. и перспективн.
Архангельская обл.			I,8
Брянская обл.			0,7
Владимирская обл.			9,3
Калининградская обл.	I00,3	4,5	5,9
Калининская обл.			I,0
Кировская обл.			0,5
Костромская обл.	I5,6+		
Ленинградская обл.	2,8	I,7	I,0
Московская обл.	7,3	2,5	I,0
Новгородская обл.			5,0
Пермская обл.			I,6
Псковская обл.		I,I	I,I
Рязанская обл.	I,8	I,7	4,2
Ярославская обл.	I3,5		приозерная котловина оз. Неро
Карельская АССР			0,2
В с е г о	I4I,4	I2,3	32,7

+ По ряду других источников I6,6 тыс.га

том, что уровень грунтовых вод (УГВ) и влажность почвы как основные параметры польдера в зависимости от погодных условий все время меняются, а параметры систем (глубина заложения дрен,

расстояния между ними и др.) остаются неизменными (Турбин, I977). Например, по данным В.И.Панасина и О.А.Борматенкова I969) невозможность повышения УГВ на летний период интенсивного роста растений привела в хозяйствах Славского района Калининградской области в I967-68 гг. к большому недобору сена луговых трав и снижению урожайности других культур на очень богатых сельскохозяйственных угодьях польдеров. Кроме того, специально проведенные ими опыты показали зависимость эффективности минеральных удобрений во время вегетационного периода от уровня грунтовых вод. Аналогичные данные приводит Н.Ф.Лаврик (I978) для польдеров Костромской области. Поэтому в настоящее время ведется активная реконструкция старых польдеров, а новые проектируются как у нас (Ватутин, I977; Valing, I978), так и за рубежом (Jannermann, e.a., I977; Sokolowsky, I977) с системой двустороннего регулирования водного режима. Технической целью является автоматизация гидромелиоративной системы. Такие экспериментальные системы работают как у нас в стране (Циприс, Саноян, I978; Шевелев, Ломакин, I978; Приборы..., I979), так и за рубежом (Odle, I977; Radcenko, I977).

При выдвижении объектов польдерного типа освоения сельскохозяйственных земель следует учитывать их высокую стоимость (по Успенскому капитальные затраты 4-5 тыс.руб./га, эксплуатационные 25-I00 руб./га). Поэтому такой способ перспективен пока только для высокопродуктивных земельных массивов при условии интенсивного их использования. Как показывают исследования по орошению в ЭССР (Sulger, I978; Tamm, Roostalu, I978), эти системы требуют точного соблюдения режима работы. Нерентабельность их определяется в основном причинами не технологического порядка (текучесть рабочей силы, дефицит запчастей и т.п.) и,

таким образом, с успехом эти системы работают только в передовых хозяйствах. Более рентабельным в зоне избыточного увлажнения является подпочвенное орошение (шлюзование). Этот метод имеет ряд ограничений (Турбин, I977), из которых для польдерных земель существенным является требование достаточной водопроницаемости почвы (коэффициент фильтрации не менее 0,5 м/сутки).

Наибольшее распространение дренажное орошение нашло при выращивании многолетних трав на легких почвах. Для ЭССР соответствующая методика выработана Ю.Энно (I974). Дождевание, наоборот, оказывается неэффективным на песчаных почвах из-за малой водовместимости их, а на тяжелых почвах появляется опасность возникновения анаэробных условий. Для ЭССР методика определения времени и режима поливов выработана В.Таммом (I972).

Совмещение систем орошения и осушения на конкретном польдере зависит от многих конкретных природных условий. Выбор способа дополнительного увлажнения (орошения) будет зависеть от величины и конфигурации польдера, а также от рельефа и свойств почв.

Т.Кадревич и У.Клявиньш (I976) делят польдер на две зоны. В зоне активного влияния насосной станции (подпора) - при соответствующих условий рельефа и почвы - предпочтение следует отдать подпочвенному орошению. В зоне свободного стока со сложным рельефом, легкими почвами и ограниченными водными ресурсами целесообразнее дождевание.

Размер польдера имеет оптимальную величину, связанную с географическими условиями местности. Малые польдеры по Ю.А.Юшкаускасу (I974) экономически малорентабельны. Он считает для Литовской ССР минимальной площадь польдера в 800 га, а Г.И.Ва-

тутин (I977) указывает, что в Калининградской области для осуществления оперативного управления польдером размер его не должен превышать I000 га. Но по практике в Финляндии (Муотиала, I972), где средняя площадь одного польдера составляет 200 га, и в Эстонии, где средний польдер имеет площадь около 300 га, видно, что строят и меньшие по площади польдеры.

Польдер, будучи мелиоративным объектом, строится в первую очередь для мелиорации (улучшения) водного режима почв. Как отмечает Б.Б.Шумаков (I977), измененный водный режим оказывает значительное воздействие на изменение теплового, пищевого, воздушного (газового) и солевого режима почв. Основным рычагом оперативного управления водным режимом на польдере является откачка воды в водоприемник (или обратный пропуск воды) для поддержания на польдере желаемого уровня грунтовых вод, что осуществляется при помощи насосных станций (НС). Мощность НС должна быть достаточной для откачки определенных объемов воды. Последние связаны с географическими особенностями территории. Поэтому при проектировании НС в определенном географическом районе необходимо определить следующие гидрометеорологические факторы (Волков, I975): годовые объемы стока (для обоснования экономической эффективности откачки воды); максимальный приток воды (для определения общей производительности НС); сезонное распределение стока и высоту подъема перекачиваемой воды (для определения количества и соотношения производительности насосных агрегатов). Важные для работы НС параметры самой станции, магистрального канала и объем регулирующего бассейна тоже предусматривается проектом.

Для откачки воды из магистрального канала (из регулирующего бассейна) необходимо определить рабочий горизонт уровня

Таблица 4

Сезонное распределение коэффициентов откачки ($К_{отк}$) на разных польдерах СССР

Свойства польдера, рассматриваемая территория или год	Период года				
	осень	зима	весна	лето	ср.за год
I	2	3	4	5	6
Дельта р. Вислы	0,65	I,I2	0,42	0,I8	0,30 - 0,42
Рижское побереж.	0,32	0,47	0,98	0,I8	0,30 - 0,47
Калинингр. обл.	0,40	0,72	I,36	0,I5	0,45
Костромская обл.	0,08	0,23	I,83	0,07	0,44
(по: Романова, I973)					
Польдеры ЛитССР	0,4I	0,8I	0,63	0,I8	-
(по: Лукянене, I980)					
БелССР, в т.ч.:					
- периодически подтопляемые; маловодн. год	0,49	0,35	0,54	0,0I	0,I7
средний год	0,I6	0,I8	0,77	0,I4	0,27
многоводн.год	0,50	I,03	0,55	0,37	0,54
- постоянно подтопляемые					
маловодн.год	0,6I	0,80	0,77	0,32	0,50
средний год	0,53	0,47	0,85	0,44	0,52
многоводн.год	0,90	I,60	0,80	0,60	0,89
(по: Рекомендации..., I979)					

Таблица 4 (продолжение)

I	2	3	4	5	6
УССР, Золотоношская осуш. сист.	0,69	0,42	0,97	0,44	0,60
(по: Юрченко, I978)					
Польдеры Смачко и Шиша, дельта Немана ЛитССР					
тепл., ср.-вл.год	0,42	0,37	I,55	-	0,37
средний год	I,I2	0,2I	I,I3	0,06	0,44
холодн.сух.г.	I,33	0,22	I,04	0,I2	0,58
(по: Римидис, I974)					

Таблица 5

Коэффициенты откачки ($К_{отк}$) на польдере Тамме

	I975	I977	I978	I979	I980
Январь	I,36	0,49	-	0,52	0,87
Февраль	I,79	0,33	-	0,75	I,28
Март	I,77	4,64	-	4,I9	2,06
Апрель	0,69	I,67	-	I,87	0,3I
Май	0,3I	0,6I	-	0,26	0,I5
Июнь	0,24	0,39	-	0,II	0,00
Июль	0,I0	0,04	0,I8	0,05	0,33
Август	0,07	0,I3	0,25	0,07	0,05
Сентябрь	0,09	0,I2	0,9I	0,03	0,22
Октябрь	0,2I	0,32	I,73	0,I3	0,22
Ноябрь	0,II	0,74	2,40	0,2I	I,49
Декабрь	0,30	0,57	2,94	I,65	0,63
Среднегодовые	0,40	0,59	-	0,45	0,42

воды в нем, ($H_{раб}$), т.е. такой горизонт воды, при котором должна включаться НС; и нижний горизонт, при котором НС должна выключаться из работы. При настоящих реальных откачках $H_{раб}$ для НС считается постоянной или выбирается несколько постоянных $H_{раб}$ для различных сезон года. Рекомендации по учету разных природных факторов и географических особенностей различных территорий имеются в работах (Шкинкис, 1961; Филатов, 1965; Юшкаускас, 1966; Рябкова, 1970; Гидромелиоративные..., 1971; Duensing, 1972 и др.).

Соблюдение таких заранее выбранных уровней воды в магистральном канале вместе с гидрологическими условиями конкретного года определяют режим откачки и количества откаченной воды. Для характеристики последних применяются коэффициенты откачки ($K_{отк}$) - соотношения откаченной из водосбора НС воды (в мм) к осадкам в определенном периоде (также пользуются слоем откачки в мм и модулями стока с польдера в л/сек/га).

Некоторые данные по откачке по польдерам, расположенных в достаточно разных географических условиях представлены в таблице 4, а для исследуемого нами польдера Тамме - в таблице 5. Но пока мало длительных временных рядов. Анализ режима откачки и акторов водного баланса имеется в разных работах (Кадревич, 1970; Рябкова, 1970; Романова, 1973; Kink, 1973; Филатов, 1974; Волков, 1975; Юрченко, 1978; Рекомендации..., 1979; Галковский, Полевой, 1980; Лукянене, 1980; Эксплуатация..., 1981).

Строительство водохранилищ продолжается, также повышается интенсивность сельскохозяйственного землепользования. Следовательно, польдерный тип освоения заболоченных и подтопляемых земель является перспективным и имеет тенденцию дальнейшего совершенствования.

Проведенный анализ показал, что конструкция и особенности эксплуатации польдеров различны в разных физико-географических условиях. Именно это и требует географической интерпретации вопросов проектирования и эксплуатации польдеров как одного из видов геотехносистем. Для эффективного управления такими геотехносистемами важно знать и учитывать изменения природных (точнее: гидрометеорологических) условий. На ноябрьском Пленуме ЦК КПСС 1981 года, посвященным вопросам управления в сельском хозяйстве, на это обратил внимание Л.И.Брежнев: "Пока мы не научились командовать погодой, работу в сельском хозяйстве надо более умело приспосабливать к климатическим невзгодам"[I].

I.2. Польдер как объект географических исследований

"Любая комбинация из технического устройства (...) и природного тела любой размерности, технические и природные элементы которой обладают связью и объединяются единством выполняемой социально-экономической функции", называется природно-технической системой (Природа, техника..., с. 47, 1978)[+]. Геосистемами В.Б.Сочава (1978) называет особый класс управляющих систем и определяет их как земное пространство всех размерностей, где отдельные компоненты природы находятся в системной связи друг с другом. При логическом умножении этих двух понятий мы получаем их общую часть - геотехносистему (ГТС), т.е.

[I] Речь товарища Л.И.Брежнева на пленуме ЦК КПСС 16 ноября 1981 года. - Коммунист, 1981, № 17, с. 5.

[+] А.Ю.Ретеюм (1978) называет такую систему техноитом.

такое подмножество природно-технических систем, которое выделяется по признаку географичности.

Выявление признаков географичности является фундаментальной проблемой географии, имеющей первостепенное значение. Выделение из объективной разнообразной реальности модельных систем для производства на них определенных исследовательских процедур - задача не формальная и отнюдь не простая, если мы хотим обеспечить адекватную интерпретацию полученных результатов. Вышесказанное подтверждается историей науки и опытом по исследованиям систем.

В книге "Природа, техника..." (1978) географичность определяется с помощью трех ограничений, накладываемых на природно-технические системы: временное, пространственное, и ограничения по содержанию. По существу имеется в виду, что в геотехнических системах элементы и отношения как природные, так и технические должны иметь географический масштаб как по времени, так и по пространству.

Масштаб в географии целесообразно понимать не только как атрибут картографии, а как важное свойство исследуемой системы. Масштаб определяет что выделяется из непосредственного реального мира - например, какие структуры мы видим на аэрокосмических съемках, или какие периодические процессы выделяем из сложных природных колебаний.

Как правило, не существует постоянного соответствия "масштаб - выделяемое явление", а в разных географических условиях в одном и том же масштабе в зависимости от сложности территориальной структуры на передний план выдвигаются географические объекты разного ранга.

Третье ограничение связывается с требованием территори-

альности, но пока четкого определения не имеет.

В.Б.Сочава (1978) определяет геотехническую систему как переменное состояние природного инварианта геосистемы, функционирующую спонтанно, но регулирующуюся техническими средствами. При применении этого определения на все имеющиеся геотехнические системы возникает два затруднения. Во-первых: понятие "инвариант" имеет гносеологическое определение, что затрудняет нахождение плодотворного ответа на вопрос: переменное состояние - чего? Во-вторых: целый ряд более преобразованных геосистем (городские, созданные земли крупных польдеров и др.) уже имеют качественно другие эволюционные свойства, не позволяющие их рассматривать в качестве переменного состояния естественной природы. Для них возвращение к первоначальному состоянию означает прекращение существования.

Может быть имеет смысл при подходе к исследованию геотехносистем учиться из опытов экосистемного исследования городов, где выделяются (Masing, 1979) функциональные отличительные черты (город как зависимая, как аккумулятивная, как нестабильная и как интразональная экосистема).

В связи с нашим вниманием к геотехническим системам интенсивного сельского хозяйства представляют интерес выделенные Е.П.Галяминым (1974) следующие различия агробиоценозов от естественных биогеоценозов: извлечение из системы большого количества энергии и вещества, отсутствие в системе устойчивости, нахождение ее постоянно в переходном процессе и потребность в связи с этим постоянного вмешательства человека - управления. А управление по нему - это тактические действия, направленные на получение высоких урожаев с учетом ограничений стратегического характера (многолетнее поддержание плодородия почвы,

сохранение окружающей среды и т.п.). Отсюда вытекает, что подобные системы необходимо рассматривать в временном разрезе.

Агро-геотехническая система включает в себя кроме свойств агробиоценоза еще и дополнительные свойства, связанные с абиогенными потоками вещества и энергии и с их территориальностью. Среди последних важными следует считать упрощение и гомогенизацию территориальной структуры и уменьшение переходных полос (экотонов).

В рабочем порядке мы определяем геотехносистемы (ГТС) как такие геосистемы, где среди элементов или среди внутрисистемных отношений или среди отношений между элементами системы и средой имеется техника или технология.

Исторический обзор формирования понятия геотехнической системы в географической литературе дает К.Н.Дьяконов (1978).

Степень и место присутствия техники в подмножествах элементов ГТС - основа для классификации ГТС. Функциональную классификацию технических систем, влияющих на природу, дают А.Ю.Ретеюм, К.Н.Дьяконов и А.Ф.Куницын (1972); в нескольких работах (Мильков, 1973; Мухина, 1973; Герасимов, 1976; Природа...,1978) имеются частные классификации. Всеобщей классификации ГТС нам не удалось найти.

Польдер отличает от других мелиоративных систем наличие дамбы. Остальные элементы техники и технологии, которые присутствуют на польдере, существуют и в различных других мелиоративных системах. Но современный польдер охватывает эти элементы обычно наиболее комплексно, он также является целостной системой и поэтому как ГТС имеет ряд преимуществ для географического исследования.

Границы польдера, как правило, можно четко определить, а

внутренняя территориальная структура его обычно более простая и поддается несомненно проще дискретизации, чем в естественных ландшафтах. Сельскохозяйственные поля польдера заняты монокультурами или травосмесями, имеют относительно простой видовой состав и поэтому географ здесь может абстрагироваться от многих весьма сложных экологических проблем, возникающих на природных лугах или в лесу.

Польдер является геотехносистемой (ГТС), существование которого предполагает управление. Это в оперативном плане включает не только осушение-орошение, но и удобрение, севообороты, проведение различных агроприемов, выбор засева и норм высева. Значительная стоимость польдера для рентабельной эксплуатации требует высокого уровня земледелия, что позволяет именно здесь изучить географом опыт функционирования благоустроенных ГТС. При машинном водоподъеме ведется учет откачек и исследователь может легче проследить за элементами водного баланса, чем на мелиоративных участках с естественным стоком. Наконец, активное управление ГТС делает возможным проведение натурных экспериментов. Как пример подобной территории - натурной модели - можно указать на польдер Роттегат в северо-востоке Голландии, представляющий себе натурный лизиметр площадью 86 га, наблюдения на котором ведутся уже тридцать лет (Makkink, Heemst, 1975).

Каждый польдер как геотехносистема ландшафтного (топологического) уровня является одним из элементов водохозяйственного комплекса (Сыроежкин, 1978) конкретного географического региона. Роль польдеров в общем ансамбле проблем региона можно иллюстрировать проектом повышения уровня воды в водоприемнике рассматриваемого нами польдера - в озере Выртсъярв (Kaljumäe, Koskor, 1980).

Озеро Выртсъярв в ЭССР с площадью 27 тыс.га со средней глубиной 2,8 м представляет собой стареющий водоем, уровень воды в котором заметно колеблется. Связанная с этим амплитуда перемещения береговой линии достигает I км. В интересах рационального использования ресурсов озера планируется комплекс гидросооружений, который позволяет поддерживать уровень воды в озере на заданном оптимальном уровне. Для одновременного использования прилегающих к озеру прибрежных земель в интенсивном сельском хозяйстве, проектом предусмотрено создание системы польдеров вокруг озера с общей протяженностью дамб - 40 км. Кроме выгод для рыбного и сельского хозяйства улучшаются санитарные условия самого озера и рек, из него вытекающих, также рекреационные условия в районе озера.

Подробнее следует остановиться на устойчивости польдерных ГТС и особенно на одном ее аспекте - на стационарности. Система устойчива относительно определенного множества состояний, если все состояния, характеризующие ее функционирование, являются подмножествами этого определенного множества. А стационарность - это постоянство во времени характеристик некоторого процесса (Математика..., 1975). Конкретизируем эти определения относительно польдерных ГТС. Возникновение польдера в определенном месте по сути процесс, состоящий из трех стадий. В стадии проектирования местность будущего польдера находится в первоначальном состоянии (это не обязательно естественный, нетронутый, природный ландшафт). Необходимые для проекта данные о природе (режим грунтовых вод, водно-физические свойства почвогрунтов, распределение вероятностей или кривые обеспеченностей гидрологических и метеорологических процессов и др.) получаются при исследовании этого первоначального состояния, а также при по-

мощи переноса предыдущего опыта проектирования. Учитывается географические условия местности, требования охраны природы, предполагаемое использование польдерных земель, существующие нормативы, экономическую обоснованность. Для их одновременного и экономически наиболее выгодного учета иногда составляют даже специальную математическую модель (A Model ..., 1977). Проектом должно быть предусмотрено безотказное функционирование польдеров в тех природных условиях, которые возникают после осуществления проекта (позиционное управление по "Природа...; 1978).

Таким образом, при определении константных параметров польдера в проекте должен присутствовать территориальный прогноз последствий мелиоративного воздействия на местность. Например, для торфов при расчете расстояний между дренами и глубины закладки осушителей необходимо предусмотреть осадку дрен, изменения коэффициентов фильтрации и водно-физических свойств почвы из-за оседания и минерализации торфа; специальные формулы этого класса имеются для Эстонии в работах У.Томберга (Tomberg, 1960; Томберг, 1972а,б).

Со строительством польдера начинается переходная стадия. Активное вмешательство человека в природные процессы приводит к коренным изменениям в структуре и функционировании геосистемы. В природу вторгается техника. Сдача в эксплуатацию польдера отнюдь не означает конец этой стадии, а в течении нескольких лет происходит асимптотическое приближение к устойчивому режиму параметров польдера, причем разные параметры имеют разную скорость перехода. Так, например, на голландских польдерах превращение тяжелых и богатых солями морских илов в плодородную для культурных растений почву - хотя этому активно содей-

ствует человек - требует много десятилетий (Glopper, Smits, 1974). На польдере Бабите в Латвии, возраст которого 35 лет, в результате осадки торфа и сработки верхнего горизонта поверхность земли осела на 0,7-1,0 м; дренаж стал мелким (0,6-0,8 м) и заилился (Кадревич, Клявиньш, 1976).

На переходной стадии происходит образование депрессионной воронки грунтовых вод, свойства дренажной засыпки приближаются к свойствам грунта в естественном сложении.

Постепенно польдер приближается к такому режиму (при постоянном антропогенном поддержании геотехнической структуры его), который не имеет внутренней тенденции развития и зависит от гидрометеорологических условий+. Другими словами, изменения, вызванные в природе со строительством польдера, уже прошли, а возникновению новых тенденций развития - энтропийных, стагнационных - препятствует антропогенное поддержание структуры польдера. Последнее выражается в своевременном и правильном удобрении (стационарность продуктивности почвы), в откачке излишка воды из магистрального канала (стационарность гидрологических условий), в закономерном севообороте (стационарность биопродукционного процесса в многолетнем разрезе) и, наконец, в ремонтировании технических элементов польдера.

Как простые критерии устойчивости мелиоративных систем К.Н.Дьяконов (1979) предлагает соотношения показателей вариабельности свойств геотехносистемы после и до мелиорации. Каждый такой коэффициент показывает, сколько раз увеличивался изменчивость индикаторного показателя за счет мелиорации.

+ Это является главным затруднительным обстоятельством к использованию имитационных моделей подобных модели Форрестера, так как последние требуют автономности системы (Форрестер, 1971).

Стационарность любой реальной системы относительна. Всегда необходимо уточнять, стационарность какого процесса мы имеем в виду - тем самым мы определяем и тот промежуток времени, который мы рассматриваем. В зависимости от выбранного временного масштаба явление может появляться как стационарное или как нестационарное. Например, при изучении климатических процессов - метеоданные непостоянные во времени (нестационарные). А при выведении многолетних норм метеопоказателей предполагается стационарность метеоданных.

Надо сказать, что чем точнее осуществляется управление ГТС польдера, тем больше она соответствует требованиям стационарности в многолетнем интервале. Для поддержания стационарности требуются затраты материальных ресурсов - вещества и энергии. При стационарном состоянии польдера наилучшим образом выражается внутригодовая динамика его и можно видеть, что определенному набору состояний внешней среды соответствует определенное функционирование польдерной ГТС. Возможность получить заметное повышение урожая при поддержании на польдере субоптимальных условий для растений доказано программированием урожая. Х.Т.Тооминг и др. (Программирование..., 1978) экспериментально показали реализуемость программирования высоких урожаев и приближение урожая в производстве к действительно возможному урожаю, получая в среднем 523 ц/га (а потенциальный урожай равен 700...800 ц/га). Опыты программирования урожая И.М.Емельяновой и Г.А.Малышевой (1980) в Костромской области и О.А.Борматенкова (1981) на польдерах Калининградской области доказали рентабельность дополнительных затрат.

Изложенное позволяет сделать вывод о том, что польдер как геотехносистема обладает чертами, сходными с природными геогра-

фическими системами, для которых свойственны сложные отношения между элементами внутри системы и системой и ее средой. Польдер, как географическая система, после начального неустойчивого периода переходит в стационарный режим (аналог климакса), когда достигается наиболее высокая его географическая продуктивность. Особенностью польдера является то, что стационарность в данном случае не только спонтанное свойство системы - оно достигается с помощью специального регулирования системы человеком.

По мере увеличения возможностей регулирования работы геотехносистем, для успеха такой регулировки необходимо все глубже знать механизмы функционирования этих систем. Их большая сложность вынуждает использовать при изучении сложные средства, среди которых относительно новым, перспективным и быстро развивающимся методом исследования является имитация на ЭВМ.

2. ГЕОТЕХНОСИСТЕМА ПОЛЬДЕРА ТАММЕ И ЕЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Выбор конкретного объекта исследования всегда связан со многими обстоятельствами, среди которых приходится учитывать не только научные проблемы, но и обстоятельства административного, технического и экономического характера. Для географа важна комплексность исследований, поэтому нами при выборе территории исследования было отдано предпочтение иметь возможность достаточно комплексного изучения объекта. Таким объектом оказался исследовательский эталонный участок Тамме, который расположен в западной части Тартуского административного района ЭССР на территории показательного совхоза им. Ленина. На этом участке ведутся совместные исследования НИИ Астрофизики и Физики Атмосферы АН ЭССР и Биолого-географического факультета Тартуского ГУ по выработке и применению дистанционных методов исследования. Наблюдения за режимом грунтовых вод и за суммарным испарением проводятся Гидрогеологической партией УГ ЭССР.

2.I. Характеристика эталонного участка Тамме

Природные, антропогенные и административные границы, как правило, не совпадают. Не совпадают они и на исследуемом участке. Поэтому для большей обзорности мы дает общую характеристику территории, которая по площади несколько превышает площадь моделируемого участка. Такой территорией является исследовательский эталонный участок Тамме, охватывающий кроме мелиоративного объекта Тамме еще берег озера Выртсъярв и полосу земель,

прилегающих к мелиоративному объекту (рис. 2).

По физико-географическому районированию Эстонии (Varep, I964) эталонный участок охватывает частично два ландшафтных района: Юго-Восточное плато и Выртсъярвскую низменность. Таким образом на участке имеются границы ранга физико-географического района.

Из юго-восточного плато к участку относится часть местности друмлиновой моренной равнины Ранну с двумя урочищами: I) друмлин Тамме и 2) средне-волнистая моренная равнина (рис.3).

Из Выртсъярвской низменности к полигону относится три местности: часть местности береговой зоны озера Выртсъярв, частично болотные равнины Сангла и Тамме-Салу. Местность береговой зоны представлена двумя урочищами: I) урощиче клифового берега и 2) урочище низменного берега. В пределах последнего можно различать заболоченный берег и береговой вал с признаками образования дюн как два подурочища. Болотные равнины представлены в пределах участка оба одним урочищем низинного болота. Из-за осушения гончарным дренажем часть болотной равнины Тамме-Салу, находящаяся на территории польдера Тамме, переходит в стадию перегнойного болота, также происходит минерализация и осадка торфа.

Кроме названных, на исследуемой территории имеются замощенные дороги, которые условно выделяем как техногенное урочище шоссе.

Землепользование на исследуемой территории охватывает в основном культурные, мелиорированные земли. В центральной части эталонного участка расположены поля с многолетними травами для изготовления силоса и травяной муки. На участке преобладают поля с севооборотами зерновых (ячмень, рожь), картофеля и

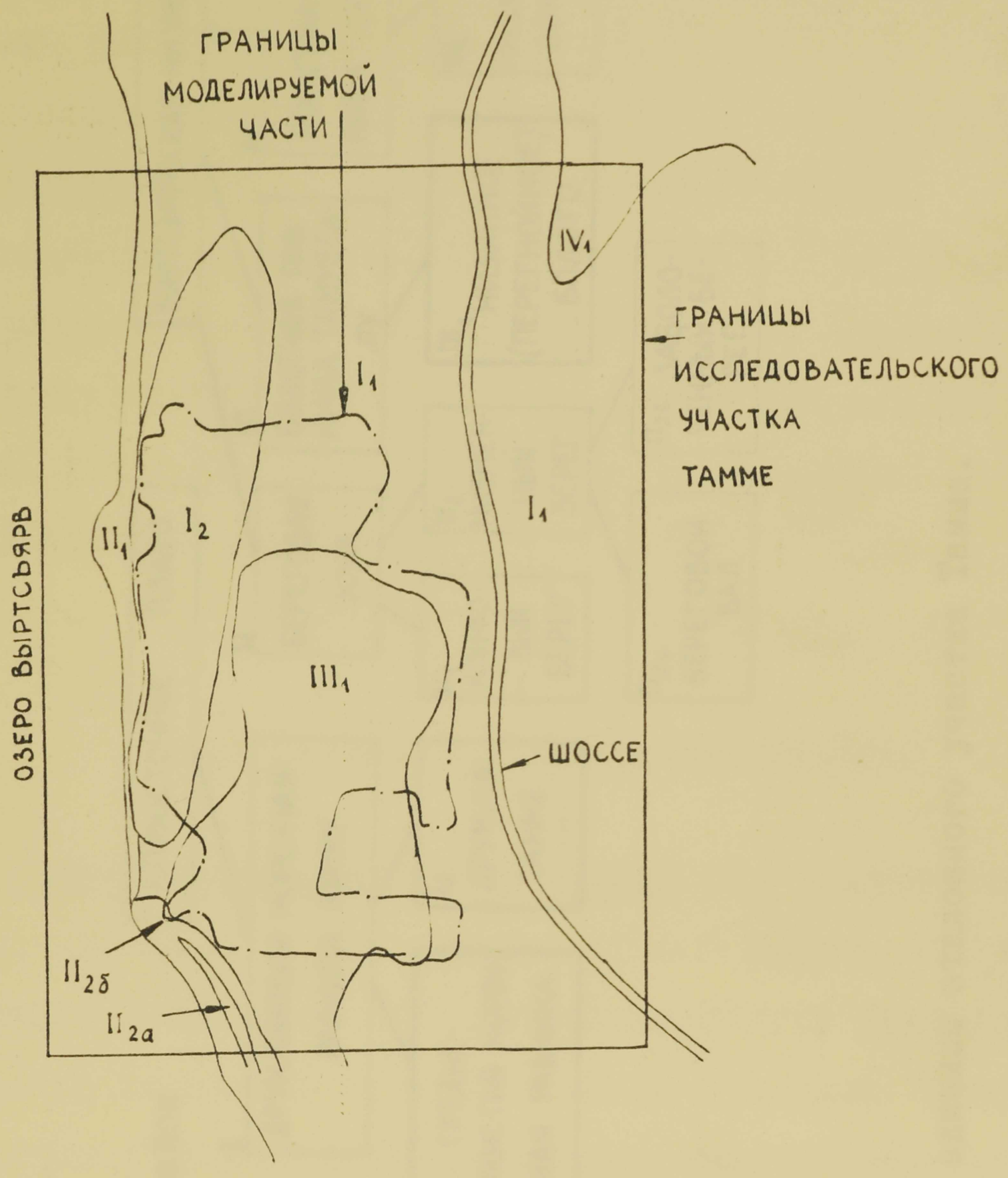


Рис. 2. Расположение ландшафтных единиц и моделируемой части исследованной территории (значения индексов см. на рис. 3).

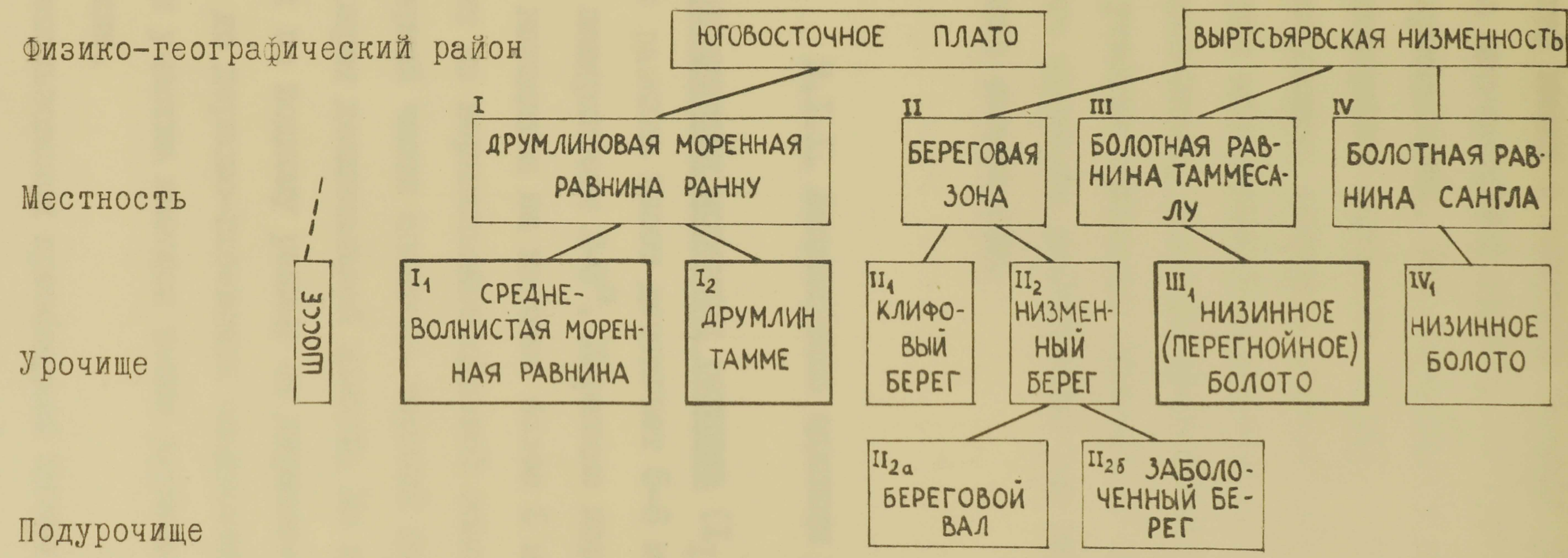


Рис. 3. Ландшафтные единицы эталонного участка Тамме.

клевера. На северо-восточной части участка имеются загоны для коров и молодняка ферм, находящихся в поселке Курекюла. Лесные полосы (150 га) имеют в основном природоохранный характер, сосновые боры на юго-западной окраине эталонного участка важны также как рекреационные. Там находится комплекс сооружений дома отдыха Пивоварного завода г. Тарту, а южнее площадка для проведения спортивных сборов и лагерей яхтсменов.

Территория обследований сравнительно густо застроена около шоссе Сангла-Эльва, а в непосредственной близости к восточной границе участка находится Курекюла - центральный поселок совхоза. В его пределах расположена еще сыроварня Ранну и водоочистительное сооружение.

2.I.I. Ландшафтные единицы участка

Средне-волнистая моренная равнина (I_I) представляет собой равнину, где разница высот достигает 5-6 метров, а средние уклоны земной поверхности 2-3°. Коренные породы (песчаники и алевролиты) находятся на глубине более 6 метров. Четвертичная толща состоит из верхнеплейстоценовой основной суглинистой морены. В северной части полигона верхний горизонт четвертичных отложений покрыт делювиальной глиной. Из почв преобладают дерновые почвы: по водному режиму от дерново-карбонатных выщелоченных почв до дерново-глееватых оподзоленных почв. На юго-восточной части участка имеются также дерново-слабоподзолистые почвы на песке.

В землепользовании преобладает интенсивное земледелие, лесные полосы имеют природоохранный характер и выполняют экологическую роль, увеличивая густоту экотонов.

Друмлин Тамме (I_2) (с размерами 3,9х0,5 км) морфологически представляет собой гриву со средними уклонами склонов около трех градусов. Его западный склон абрадирован водами озера Выртсъярв и превращен в клифовый берег. На этом же крутом склоне коренные породы частично обнажаются. Общая длина обнажения пород среднего девона несколько км, максимальная высота 8 м. Относительная высота друмлина до 12-13 метров от уровня озера.

Друмлин Тамме имеет ядро из коренных пород средне-девонских песчаников и алевролитов горизонта Арукюла (Эйфельский ярус), покрытых основной мореной мощностью 2-3 м, которая содержит в себе небольшое количество крупных обломков. Южный конец друмлина перекрыт песками озерного происхождения.

На северной части друмлина преобладают дерново-оподзоленные почвы, центральная часть характеризуется дерново-среднеподзолистыми почвами, пески на юге - дерново-слабоподзолистыми почвами, имеющими островки подзолисто-глееватых почв. На восточном склоне друмлина наблюдаются дерново-глееватые оподзоленные почвы.

Кроме южной части, где находится сосновый бор, друмлин занят пашней.

Клифовый берег (II_I) представляет собой узкий (около 20 м) и длинный (общей протяженностью около 5 км) участок между озером Выртсъярв и береговым обрывом Тамме. Четвертичные отложения имеют различный характер. В северной части урочища, где в голоценовом этапе развития озера преобладала аккумулятивная деятельность, берег песчаный. К югу от расширения береговой зоны преобладают илистые осадки. В самой южной части урочища берег моренный - там преобладала абразия озера Выртсъярв.

На участке расширения берега преобладают дерново-глеевые

насыщенные почвы на песке, в остальных местах аллювиальные дерново-глеевые почвы. Частично в береговой зоне растет тростник, ширина полосы которого составляет несколько десятков метров.

Береговой вал (II_{2a}) имеет относительные высоты ниже I м. Его поверхность переработана образованием дюн, поэтому озерные (лимнические) осадки покрыты эоловыми песками. Почвы подзолисто-глееватые и глеево-подзолистые. Подурочище частично переобразовано в дамбу польдера, частично находится вне территории польдера в естественном состоянии и покрыто лесом.

Заболоченный берег ($II_{2б}$) образует территорию километровой длины с шириной несколько сот метров. Представляет собой аккумулятивный берег, который после образования сильно заболочен в результате трансгрессии озера. Торф является низинным со средней степенью разложения (40-60%), мощностью 0,5 м и залегает на песках.

Подурочище занято пойменным лугом (из осоковых) с торфяно-перегнойно-глеево-болотными низинными почвами.

Перегнойное болото (III_I), охватывающее центральную часть польдера Тамме, представляет собой слабо вогнутую равнину, покрытую низинным торфом с мощностью I,5-3,0 м (макс. 5 м). Под торфом находится в основном морена, частично также глинистый слой.

Первоначальные почвы - торфяно-перегнойные болотные на глубоких торфах постепенно преобразуются в хорошо разложенные, минерализуются и уплотняются. В северной части урочища находятся дерново-глееватые насыщенные почвы с мощной толщей грубого гумуса на среднем и тяжелом суглинке.

Урочище занято культурными лугами, также оставлено несколько компенсирующих (экологических) лесных полос (45 га)

экстензивного осушения.

Низинное болото ($IУ_I$). На северо-восточную окраину территории участка остается часть урочища низинного болота болотной равнины Сангла. Урочище характеризуется мощным слоем низинного торфа и торфяно-перегнойно-болотными почвами. Не относится к водосбору магистрального канала Ранну и польдера Тамме.

2.I.2. Польдер Тамме

Мелиоративный объект (МО) польдера Тамме, сданный в эксплуатацию тремя очередями в годы I972-I974, охватывает площадь 684 га (588 га культурных и 96 га лесных земель; гончарный дренаж имеется на территории 557 га; оборудование для дождевания установками "Волжанка" - на 233 га). Проектировало польдер Тартуское отделение "Эстмелиопроекта", построило Эльваское отделение объединения "Эстонская сельхозтехника". Кроме собственного польдера восточная часть МО охватывает также территорию с естественным стоком в ручей Раудя.

Перед созданием польдера часть земель осушалась канавами, часть была занята порослью. Урожайность многолетних трав составляла 20 ц/га. Нерациональной была дорожная сеть, меньше была площадь лесов.

Польдер Тамме является зимним низинным польдером с машинным водоподъемом и двусторонним регулированием водного режима. Водоприемник польдера - озеро Выртсъярв (разница уровней воды в озере с 5% и 95% обеспеченностями составляет 2,5 м). Откачка воды обеспечивается насосной станцией, которая имеет три насоса с суммарной мощностью I,99 $м^3$/сек при высоте подъема 4,0 м. Магистральный канал польдера длиной 2,8 км обеспечивает тех-

нические требования откачки, а также делает возможным обратный пропуск воды в канал при низком уровне воды в озере (до 95% обеспеченности). Обратный приток воды необходим летом для дождевания, которое предполагает наличие в магистральном канале достаточного количества воды для второй (верхней) насосной станции, обеспечивающей дождевание.

Вода для дождевания содержит значительное количество остаточных веществ, которые поступают в магистральный канал из водоочистительного сооружения сыроварни Ранну.

Лесные полосы польдера осушаются канавами, сельскохозяйственные земли гончарным дренажем. Проектные параметры дренажа определены по принятым в "Эстмелиопроекте" руководствам (Drenaazi..., 1979). Осушение ведется по 2 степени интенсивности, обеспечивающее модули стока $q_{95\%}$ = 0,01 л/сек/га и $q_{50\%}$ = =0,08 л/сек/га.

Для вегетационного периода максимальный сток принят (в зависимости от почвы) 0,27-1,75 л/сек/га. Глубина дрен получена в минеральной почве 1,0 м, в торфе (во время закладывания) 1,3-1,6 м. Расстояние между дренами в основном 16-24 м. В ограниченных местах (при тяжелом суглинке и при выклинивании грунтовых вод) расстояние сокращено до 8 метров, местами (на склоне, в микропонижениях друмлина) применен выборочный дренаж.

Летом во время дождевания затопляются устья дренажных систем южной части польдера, но необходимый для дождевания уровень воды в канале еще к заметному дренажному орошению в этих системах не приведет.

Дамба польдера длиной 1,5 км является одновременно дорогой. Со стороны польдера дамба окаймляется канавой. Между дамбой и сельскохозяйственными землями находится лесная полоса.

Управление польдером происходит при помощи поддержания заданного уровня воды в магистральном канале нормированной откачкой. Количество откачанной воды учитывается по расходу электричества. Дождевание проводится на основе балансовой методики В.Тамм (1972), учитывающей расходы воды на транспирацию на основе учета облачности и приход воды в почву с атмосферными осадками. Из-за технических причин бывают запаздывания с дождеванием.

Проектные урожайности сельскохозяйственных полей на польдере 4800 корм.ед. на га без дождевания и 6000 корм.ед. на га с дождеванием.

2.2. Выделение геотехносистемы - объекта исследования

Для четкости проведения исследований и для построения модели объекта следует четко определить его границы, пространственный и временный масштабы исследования, применяемые упрощения и сделанные допущения, которые неизбежно присутствуют в любом процессе познания. Такое выделение собственного объекта исследования проведем в соответствии с целью настоящей работы.

Границы объекта по территории мы провели исходя из границ водосбора польдера. Поэтому исключены части мелиоративного объекта (МО) с естественным стоком, также не рассматривается северовосточная часть МО, находящаяся под влиянием промышленного геохимического влияния и функционирующая по другим принципам (выборочный дренаж, используется как пастбище). Поля на друмлине включены в объект исследования целиком, потому что границы МО, охватывающие только нижнюю часть склонов друмлина, в

настоящее время не являются географически обоснованными, а изучение функционирования геосистемы требовало проведение границ по водоразделу. На восточной окраине польдера аналогичной ситуации не возникает, потому что влияние извне исключается там поперечными дренажными системами, задерживающими приток грунтовых вод, которые здесь выклиниваются.

На польдере находятся разные постройки и поля индивидуального пользования, также лесные полосы. Эти виды землепользования мы объединяем в категорию "другие земли" и при исследовании их не рассматриваем.

Масштаб по территории связан с размерами объекта, который в проведенных нами границах имеет площадь 450 га. Проектирование дренажа, а также детальные исследования геотехносистемы были выполнены в картографическом масштабе I:2000, но основным масштабом оказался I:I0 000, в котором представлена основная входная и выходная территориальная информация. Содержательная сторона такого масштаба выражается в степени дробности территориального расчленения объекта и обсуждается при выводе элементарной территориальной ячейки.

Масштаб по времени определяет круг рассматриваемых процессов и таким образом связан с целью исследования. Верхний рубеж, длина изучаемого целостного временного промежутка, целесообразно принимать равным году - длине четкого астрономического цикла. Это не значит, что мы учитываем только один конкретный год, а означает ограничение исследований внутригодовой динамикой; многолетние направленные изменения не анализируются.

Нижний временной рубеж определяется пределом точности исследования и исключает высокочастотные составляющие рассматриваемых процессов. Выбор его во многом аналогичен выделению эле-

ментарной территориальной ячейки. Исследования показывают (см. Справочники по климату СССР) большую дисперсию времени начала и длительности климатических сезонов.

Внутрисезонный режим погод разделяется на периоды различной длины и поэтому формальные декады, пентады и т.п. оказываются мало представительными для описания функционирования геосистемы. Сутки как элементарный промежуток времени для внутригодовой динамики имеют прочную геофизическую основу. Сильно выраженная в умеренной зоне внутрисуточная цикличность функционирования геосистемы проявляется и при очень резких изменениях погоды.

С другой стороны, возможность интегрально учитывать внутрисуточные изменения появляется из-за более-менее закономерного внутрисуточного хода многих процессов. Для них можно найти репрезентативные средние или суммарные показатели. Одновременно следует отметить, что рассмотрение временной структуры функционирования геосистем как иерархической и многоуровенной требует уже другого класса точности входных данных и другого уровня детальности моделирования, доступного пока только лабораторным экспериментам отраслевых исследований.

Дискретность как свойство геокомплексов и геосистем и ее связь с другими свойствами неоднократно обсуждалось в отечественной географической литературе (см., например, Исаченко, 1965; Преображенский, 1972; Прокаев, 1973; Арманд Д.Л., 1975). Мы не остановимся на разных аспектах этого вопроса. Для своих исследований мы выбрали дискретный подход, основываясь на характере материала об объекте и предполагаемом виде его модели. Следовательно, наш объект исследования рассмотрен как состоявший из однородных элементов, на границах между которыми проис-

ходят скачкообразные изменения. Методические ограничения, вызванные дискретностью, обсуждаются при структурализации геотехносистемы и при выводе ее алгоритмической модели.

Достаточность питательных веществ почвы. Возможность изучения лимитирующей роли воды на биопродукцию появляется только тогда, когда не существует других, более "сильных" лимитирующих факторов, которые свели бы на нет влияние неоптимальности водного режима. Важным фактором биопродукционного процесса являются условия минерального питания растений. В нашу задачу не входило составление модели геохимических процессов на польдере, но учитывать их необходимо. Имея в виду, что польдер - объект интенсивного сельского хозяйства с большими капиталовложениями и что землепользователь польдера Тамме - показательный совхоз им. Ленина, нам показалось оправданным исходить из предположения о достаточности внесенных удобрений. Приближенно это было проверено расчетами.

Недостаточность элементов минерального питания выражается в следующих признаках (Лархер, 1978). Нехватка азота приведет к слабому или карликовому росту, к увеличению массы корней за счет массы надземных органов, к преждевременному пожелтению листьев. Недостаток фосфора служит причиной нарушения репродуктивных процессов (задержку цветения), а недостаток в почве калия причиняет расстройства в регуляции водного баланса растения.

По материалам опытов, сделанных в Эстонии (Мяэталу, 1971; Пихо, 1974; Mäetalu, Karing, 1979) можно делать вывод, что неоптимальность минерального питания (особенно в умеренных дозах) оказывает более сильное влияние на ростовые процессы, чем на интенсивность фотосинтеза. В математических моделях продук-

ционного процесса, подобных нашему, нехватка питательных веществ должна бы выражаться в первую очередь в трансформациях кривых роста (см. 3.5.). Например, избыток азота приведет к чрезмерному росту листьев (и к полеганию), нехватка фосфора - к уменьшению доли репродуктивных органов, недостаток меди - к хрупкости стеблей у зерновых.

Де Вит (deWit, I958) делает вывод, что при "нормальном" минеральном питании растений чистая продуктивность фотосинтеза немного или совсем не зависит от плодородия почвы, но его "низкий" уровень уменьшает чистую продуктивность фотосинтеза. Количественных данных для различения "низкого" от "нормального" он не дает.

При определении оптимального количества удобрений можно опираться на балансовое соотношение (Шатилов, Каюмов, I97I; Тооминг, I977):

$$\sum(a_i \cdot A_i + b_i \cdot B + c_i \cdot C_i) = \sum(g_i \cdot G + s_i \cdot S),$$

где i - индекс соответствующего элемента в почве; A_i - количество элемента в почве (кг.га$^{-I}$) и a_i - коэффициент усвоения его из почвы; B - количество внесенного навоза (кг.га$^{-I}$) и b_i - коэффициент усвоения i-го элемента из навоза; C_i - количество внесенного с минеральным удобрением i-го элемента (кг.га$^{-I}$) и c_i - коэффициент усвоения его из минерального удобрения; G и S - урожай (ц.га$^{-I}$) зерна (клубней) и соломы (ботвы), g_i и s_i - коэффициенты содержания i-го элемента (кг.ц.$^{-I}$) в сухой фитомассе зерна (клубней) и соломы (ботвы). Другие возможные члены балансового уравнения имеют гораздо меньшую важность.

На основе литературных источников (Шатилов, Каюмов, I97I; Тооминг, I977; Программирование, I978) получаем для интересу-

ющихся нас основных культур следующие значения коэффициентов в балансовые уравнения удобрительных веществ:

Таблица 6

Культура	Для N	Для P_2O_5	Для K_2O
Средние значения a_i			
Зерновые	0,26	0,09	0,I3
Картофель	0,20	0,I0	0,40
Многолетние травы	0,20	0,05	0,I0
Средние значения b_i			
Для всех культур	0,25	0,20	0,50
Средние значения c_i			
Зерновые	0,50	0,I6	0,49
Картофель	0,60	0,20	0,60
Средние значения g_i			
Ячмень	2,45	I,07	I,65
Картофель	0,56	0,26	I,02
Сено многолетних трав	I,97	0,56	I,50

При увеличении доз удобрений значения c_i уменьшаются (Емельянова, Малышева, I980).

На основе приведенного уравнения и коэффициентов (табл.6) можно определить, на какой урожай хватает питательных веществ в почве или, наоборот, сколько надо удобрений для получения определенного урожая. Рассмотрим это на конкретном примере.

На польдере поле учетной единицы III/6 (ячейка № 9 на рис. 4) занято дерново-слабоподзолистыми почвами. Их механический состав - супесь. Объемный вес пахотного горизонта I,45;

содержание гумуса I,9-2,2%. В пахотном горизонте мощностью 30 см азота, лактатно-растворимых P_2O_5 и K_2O было соответственно I3,0; 4,5 и I5,0 мг на I00 г абсолютно сухой почвы (по картам нуждаемости в удобрениях). В I978 году поле было удобрено по норме $P_{I70}K_{230}$ и там выращивался ячмень сорта "Отра". Было получено зерна 32,I ц/га и соломы I5,9 ц/га. По этим данным, составляющие вышеприведенного балансового уравнения будут:

Таблица 7

	N	P_2O_5	K_2O
$a_i \cdot A_i$	0,26.566	0,09.I95	0,I3.652
$b_i \cdot B$	0	0	0
$c_i \cdot C_i$	0	0,I6.I70	0,49.230
$g_i \cdot G$	2,45.32,I	I,07.32,I	I,65.32,I
Остаток	68,5	I0,4	I44,5

Остаток указывает, насколько увеличивалось содержание минерального вещества (кг.га$^{-I}$) в пахотном слое. Видно, что удобрения не лимитируют величины урожая, хотя самым напряженным при его увеличении оказался бы баланс фосфатов. Необходимо добавить, что по экономическим соображениям поля удобряют не каждый год, а распределение удобрений между разными культурами производится таким образом, чтобы использовать их ресурсы наиболее рационально. Основой для этого в Эстонии служит выработанная А.П.Пихо (I974) методика.

Аналогичные расчеты были сделаны для разных полей на разные годы. Хотя имелись случаи с отрицательным остатком, их было мало и их отрицательность была незначительная. Например, на среднеразложенном торфянике, удобренном в I979 г. по норме

$N_{140}P_{190}K_{175}$, обеспечивается баланс питательных веществ для сена многолетних трав по Р и К (азота было достаточно) соответственно для 82 и 77 ц/га. В действительности было получено 83 ц/га сена. Для торфов большую роль играет доступность питательных веществ, которая по исследованиям в опытной базе Тоома (Eisen, 1960b ; Nõges, 1960) зависит от водного режима.

Подводя итоги, можно сказать, что обеспечено достаточное количество питательных элементов почвы, но для гарантии, что они нигде и никогда на польдере Тамме не лимитируют биопродукционный процесс, необходимы дополнительные исследования, поскольку a_i, b_i и c_i не являются константами. Такие исследования на базе определенного водного режима уже выходят за пределы настоящей работы.

Управляемость геотехносистемы (ГТС) польдера Тамме определялась при проектировании и с созданием соответствующих рычагов управления. Возможности и их практическая реализация были изложены в п. 2.1.2. Управляемость ГТС и ее модели зависит во многом от цели исследования. Мы не задались целью построения оптимизационной модели, а строили модель, которая описывает реально существующие процессы. Поэтому характеристики технических сооружений польдера для ГТС и для ее модели являются неизменными, какими они являются и в действительности на польдере Тамме. Соответственно управляемость технической подсистемы отвечает таковой на польдере. "Перепроектирование" польдера как оптимизационная задача является самостоятельно новым этапом, который предполагает при этом уже новые предпосылки (нестационарность в многолетнем разрезе, например).

В пределах изложенных ограничений выделяется непосредственный объект исследования - ГТС, требующая в первую очередь

раскрытия ее внутренней структуры.

2.3. Структура геотехносистемы польдера Тамме

Структурализация предполагает выделение элементов системы и указание связей между ними. ГТС - территориальное образование, поэтому важно выделить элементы территориальной структуры. Их выделение заключается в расчленении ГТС на территориальные гомогенные элементарные ячейки (или ОТЕ, ТНИНы, выделы, элементарные ареалы и т.п.), которые по учитываемым признакам внутренне не различаются. Относительность элементарных ячеек в том, что привлечением дополнительных признаков - при увеличении точности - можно выявить и различия в "элементарных ячейках", выделять новые элементарные ячейки и т.д. Логически такой путь соответствует районированию сверху (Арманд Д.Л., 1975).

Выбор признаков, на основе которых выделяются элементарные ячейки при данном масштабе исследования, определяется одновременно реально существующими физико-географическими комплексами (Федина, 1973), антропогенной структурой геотехносистемы (Природа..., 1978) и целями исследования (Арманд Д.Л., 1970).

Первым признаком расчленения геотехносистемы польдера было выбрано местоположение (Исаченко, 1965) относительно водного режима. Выделение данного признака основывается на понятие элементарного ландшафта (Полынов, 1956; Глазовская, 1976). Их последовательная смена, или смена среды или местоположения (toposequenz по Haase, 1976) выражается в образовании ряда фаций. С дискретизацией получаются структуры, которые В.Н.Солнцев (1975) называет векторными.

Таким образом, территория ГТС разделяется (см. рис. 4 и

табл. 8) на элювиальную часть, где грунтовые воды залегаются глубоко и не влияют на влажность почвы; на склоновую часть и на супераквальную (надводную) часть, где грунтовые воды либо капиллярный подъем достигают корневой зоны растений. Почвы в последнем временно или постоянно переувлажнены.

Полученные выделы близки к фациям, но различия в почвах требуют дальнейшего расчленения. Оказывается, что разницы в водно-физических свойствах почвы (емкость поглощения, коэффициент фильтрации и др.) обусловливают неодинаковость хода процессов и приведут к разным состояниям. Выбирая в качестве индикаторного признака механический состав почв (степень разложения у торфов), на территории польдера было выделено 7 разностей (см. табл. 8). Следует отметить, что информацией о почвообразовательных процессах и о водном режиме почв мы воспользовались уже на предыдущих стадиях расчленения.

Полученные выделы различаются по мелиоративному воздействию. Третий шаг расчленения, на котором уже техника выступала признаком выделения, был проведен по наличию и виду осушения и орошения.

Полученные выделы различаются по очень важному признаку в отношении нашей цели моделирования - по землепользованию. На этом этапе расчленения уже было нельзя обойтись без временной структуры - без рядов трансформации геосистем по В.Б.Сочаве (1978). Характерные времени изменений в землепользовании находятся во временных масштабах нашего исследования. Землепользование может измениться один раз в течение года (но не должен - многолетние травы). Нами выделены следующие виды землепользования на польдере: I) яровые зерновые культуры, 2) озимые зерновые культуры, 3) многолетние травы, 4) сеяные травы, 5) про-

Tartu Ülikooli Raamatukogu
ARHIIVKOGU

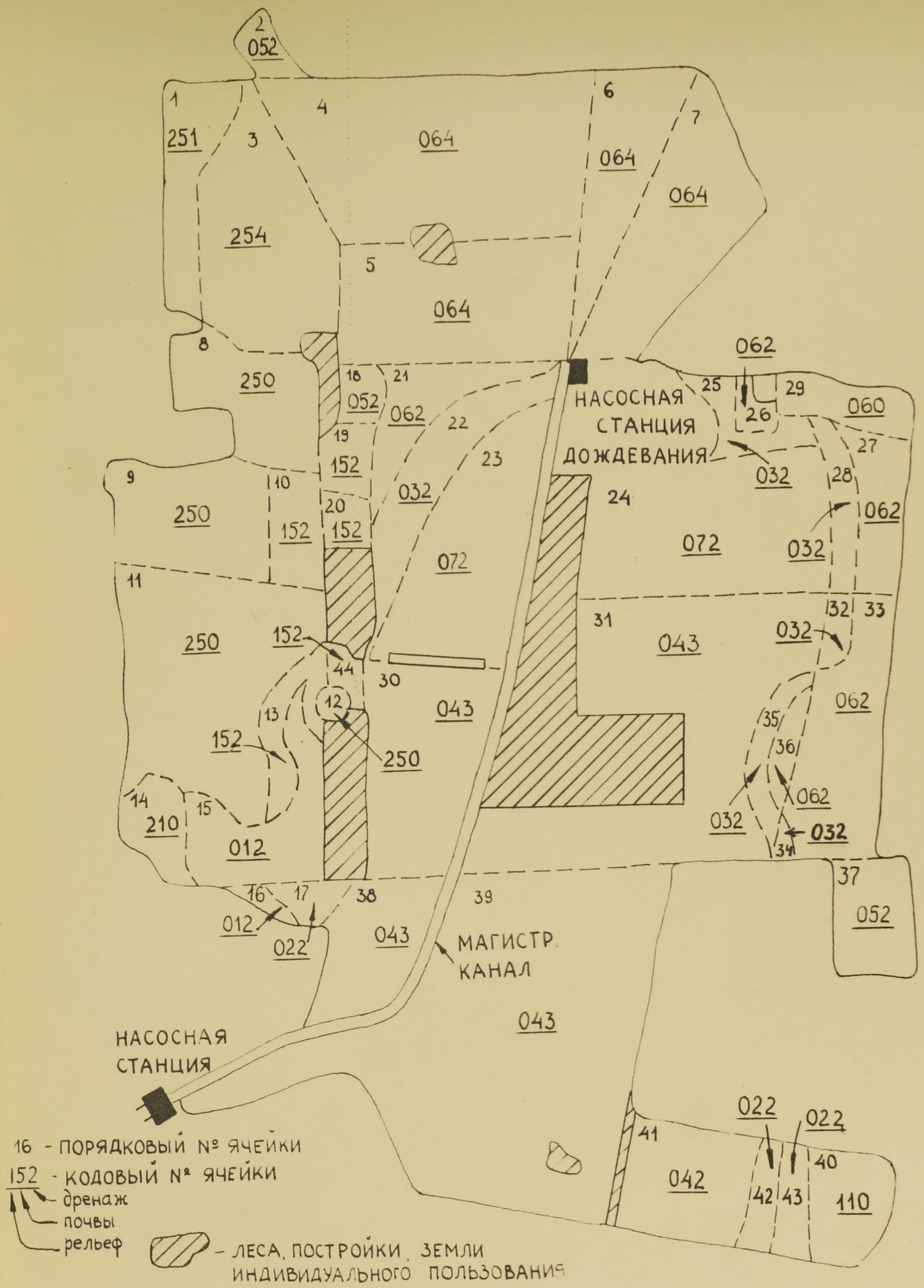


Рис. 4. Разделение геотехносистемы на элементарные территориальные ячейки.

Типизация ячеек на польдере Тамме (дальнейшее

Расчленение территории ГТС		
по местоположению (относительно водного режима)	по почвам (по водно-физическим свойствам)	по мелиоративному воздействию
	I - песок	0 - без дренажа
2 - элювиальные и элювиально-аккумулятивные		0 - без дренажа
	5 - супесь на суглинке	I - дождевание без дренажа
		4 - дождевание с дренажем
I - склоновые	I - песок	0 - без дренажа
	5 - супесь на суглинке	2 - закрытый дренаж
	I - песок	2 - закрытый дренаж
	2 - хорошоразложенный торф на песке	2 - закрытый дренаж
	3 - хор.разл.торф на суглинке	2 - закрытый дренаж
0 - супераквальные и аккумулятивно-элювиальные	4 - сред.разл. торф	2 - закрытый дренаж
		3 - осушение-орошение дренажем
	5 - супесь на суглинке	2 - закрытый дренаж
		0 - без дренажа
	6 - суглинок на глине	2 - закрытый дренаж
		4 - дождевание с дренажем
	7 - хор.разл. торф	2 - закрытый дренаж

ГЕОТЕХНОСИСТЕМА

Таблица 8

разделение их на модификации идет по землепользованию)

Кодовый номер типа ячеек	Литера на АЦПУ-карте	Номера конкретных ячеек данного типа	Количество ячеек	Площадь ячеек (%%)
2I0	I	I4	I	0,9
250	2	8, 9, II, I2	4	II,5
25I	3	I	I	I,7
254	4	3	I	3,9
II0	5	40	I	I,5
I52	6	I0, I3, I9, 20, 44	5	2,5
0I2	7	I5, I6	2	I,7
022	8	I7, 42, 43	3	I,7
032	9	22,25,28,32,34,35	6	5,0
042	A	4I	I	2,0
043	B	30, 3I, 38, 39	4	27,8
052	C	2, I8, 37	3	2,2
060	D	29	I	I,I
062	E	2I, 26, 27, 33, 36	5	6,7
064	F	4, 5, 6, 7	4	I7,7
072	G	23, 24	2	I2,4

пашные культуры, 6) семенник трав, 7) поля под пар. Как основные и наиболее типичные для дальнейшего моделирования биопродукционного процесса были выбраны (I), (3), (5).

Возникает вопрос о территориальной локализации землепользования. Строго говоря, в землепользовании не все границы постоянные, особенно если рассматривать территориальные границы земледельческих работ с характерным временем проведения меньше недели. Но подобные границы имеют случайный характер и в нашей модели не отражаются. Главным звеном территориальной локализации оказывается сельскохозяйственное поле - учетная единица в земледелии. На основе этих единиц в хозяйстве организуется производство, ведется учет и поэтому они (на территории ГТС их I8) имеют относительно фиксированные технологические границы. Различия антропогенных воздействий внутри этих полей можно получить уже только на основе прямого наблюдения за порядком проведения земледельческих работ.

Таким образом, элементарной гомогенной ячейкой оказывается часть с/х поля с определенной степенью (в пределах вышеприведенных признаков) однородности водного режима, почв и мелиоративного воздействия. Их на польдере Тамме мы выделили 44, что является максимальной дробностью территориального расчленения. При однообразном антропогенном воздействии (например, вся территория занята ячменем) смежные ячейки одного типа объединяются, образуя минимальную дробность территориального расчленения. При этой минимальной дробности (при однородном землепользовании) получается неизменная в исследуемом временном масштабе территориальная структура, своего рода каркас, типология элементов которого (см. табл. 8) являлся основой при описании ГТС польдера Тамме. Типов всего I6 (формально-комбинаторно их коли-

чество может достигать 105).

Элементарные территориальные ячейки имеют еще внутреннюю структуру компонентов, т.н. вертикальную структуру (Федина, 1973). Само название указывает на необходимость вертикального расчленения территориальных ячеек, для чего был использован подход выделения геогоризонтов и геомасс (Беручашвили, 1971; 1976), соответствующий требованиям дискретной модели (применен, например, в работе Makkink, Heemst, 1975).

В вертикальном разрезе каждой конкретной ячейки обнаруживаются однородные слои, которые Н.Л.Беручашвили (1980) называет геогоризонтами и которые характеризуются целым рядом ландшафтно-геофизических признаков. Эти признаки оказываются параметрами разных геомасс+, присутствующих в геогоризонтах.

Конкретизируя сказанное на материале польдера Тамме, были выделены следующие геогоризонты: 1) приземный слой воздуха, 2) ярус травянистых растений, 3) снежный покров, 4) ледяная корка на поверхности почвы, 5) мерзлотный слой в почве, 6) гумусный, 7) элювиальный и 8) иллювиальный горизонты почвы. Последние три могут быть расчленены по механическому составу на покрывающий и подстилающий подгоризонты. Следует обращать внимание на то, что только часть геогоризонтов (почвенные горизонты, например) постоянны во времени. Появление и исчезновение остальных, временных геогоризонтов зависят от метеоусловий (снежный покров, ледяная корка на поверхности земли или

+ Геомассы такие элементарные структурно-функциональные части природно-территориального комплекса, которые характеризуются определенной массой, специфичным функциональным назначением, а также скоростью изменения во времени; они состоят из определенных элементов, каждый из которых имеет свои метрические характеристики (Беручашвили, 1980).

слой промерзшей почвы) и от антропогенного воздействия (ярус наземных частей выращиваемых культур).

Каждый горизонт является подсистемой (с принятыми нами дискретными границами) территориальной ячейки. Свойства такой подсистемы рассмотрим на примере гумусного горизонта почвы. Он состоит из педомассы, гидромассы, фитомассы корней, из зоомассы и из массы почвенного воздуха. При этом качество геогоризонта и его функционирование определяется не просто массами в физическом смысле, а определенными параметрами их, характеристиками этих масс. Не столь важна педомасса (в тоннах), важно ее объемный вес, содержание гумуса, механический состав. Информативнее, чем просто гидромасса почвы оказывается количество доступной для растений почвенной воды.

Свойства геогоризонтов характеризуются целым рядом показателей, выбор которых зависит от того, какие аспекты функционирования выдвигаются на первый план. Но функциональная структура любой геосистемы весьма сложная и рациональность подхода геогоризонтов и геомасс именно в том, что она позволяет по наличию или отсутствию тех или иных геомасс и геогоризонтов выделить дискретные состояния. Хотя каждое такое состояние в каждой конкретной ячейке имеет свойственную только ему функциональную структуру, на основе типизации таких состояний удается выделить типические функциональные структуры. Другими словами (Беручашвили, 1980): определенным стексам соответствуют свои процессы функционирования.

Вышесказанное дает нам ключ для объединения территориальной, геогоризонтной и функциональной структур. А именно, элементарные территориальные ячейки одного типа при одной с/х культуре имеют одинаковый состав постоянных геогоризонтов. Па-

раметры их, также параметры временных геогоризонтов являются индивидуальными в каждой ячейке и их значения вместе с условиями среды определяют функциональную структуру ячейки в конкретный промежуток времени. Как правило, "там" и "тогда" происходят только некоторые процессы - летом не бывает снега, при отсутствии дренажа не будет дренажного стока, после уборки картофеля на поле отсутствует растительный покров и т.д.

Поэтому общая функциональная структура геотехносистемы является своего рода "тотальной". Для его выведения необходимо определить переменные, характеризующие состояния геотехносистемы (переменные состояния), переменные, характеризующие воздействие внешней среды (входные переменные) и описать взаимодействия всех этих переменных.

Входные переменные - переменные тех факторов среды, которые непосредственно влияют на исследуемую систему. Такими факторами являются локальная атмосфера над геотехносистемой, грунт под геотехносистемой и антропогенные воздействия.

Первая характеризуется метеоданными, которые между собой в определенной степени связаны. Часть из них может быть поэтому найдена на основе других и при помощи вспомогательных переменных. Мы используем следующие метеоданные как входные переменные, полученные из наблюдений: интенсивность суммарной коротковолновой радиации, радиационный баланс естественной поверхности, температура воздуха, температура поверхности земли, влажность воздуха, интенсивность атмосферных осадков, скорость и направление ветра, наличие росы и твердых осадков.

Влияние подстилающего грунта учитываем через уровни грунтовых вод.

Из антропогенных воздействий учитываем (в моделируемом

масштабе времени) виды землепользования: какая культура, где , когда и с какой густотой посеяна, убрана, скошена; где, когда, в каком количестве проведено дождевание.

Переменными состояния будут прежде всего (как определенные геомассы в геогоризонтах) количество воды на поверхности почвы, влажность горизонтов почвы, количество снега и количество биомассы. Последнее необходимо разделить на качественно различные части, прежде всего выделить урожай; также необходимо характеризовать некоторые другие свойства растительного покрова (высоту, фотосинтезирующую площадь и др.). Далее оказываются переменными состояния такие описывающие свойства геогоризонтов показатели, как мощность мерзлого слоя почвы, его температура и толщина корневой зоны в почве. Если интенсивность поступления воды в систему характеризуется входными переменными, то интенсивности ухода ее в качестве компонентов суммарного испарения и с дренажным стоком - тоже переменные состояния.

Кроме названных еще нужны вспомогательные переменные. Их необходимость вызвана с тем, что в изменении переменных состояния участвуют различные процессы, для описания которых требуется целый ряд локальных параметров, которые либо не представляют самостоятельного интереса, либо трудно проверяемы прямыми наблюдениями.

Все названные переменные взаимодействуют между собой. Эти взаимодействия могут быть описаны различными способами и с развитием наших знаний описываются все глубже и полнее. Но при любом конкретном исследовании, в зависимости от цели и возможностей, из них некоторые - более важные - выделяются, а другими пренебрегают. Выделяя основные взаимодействия, мы получаем общую функциональную структуру, которая для одной ячейки в

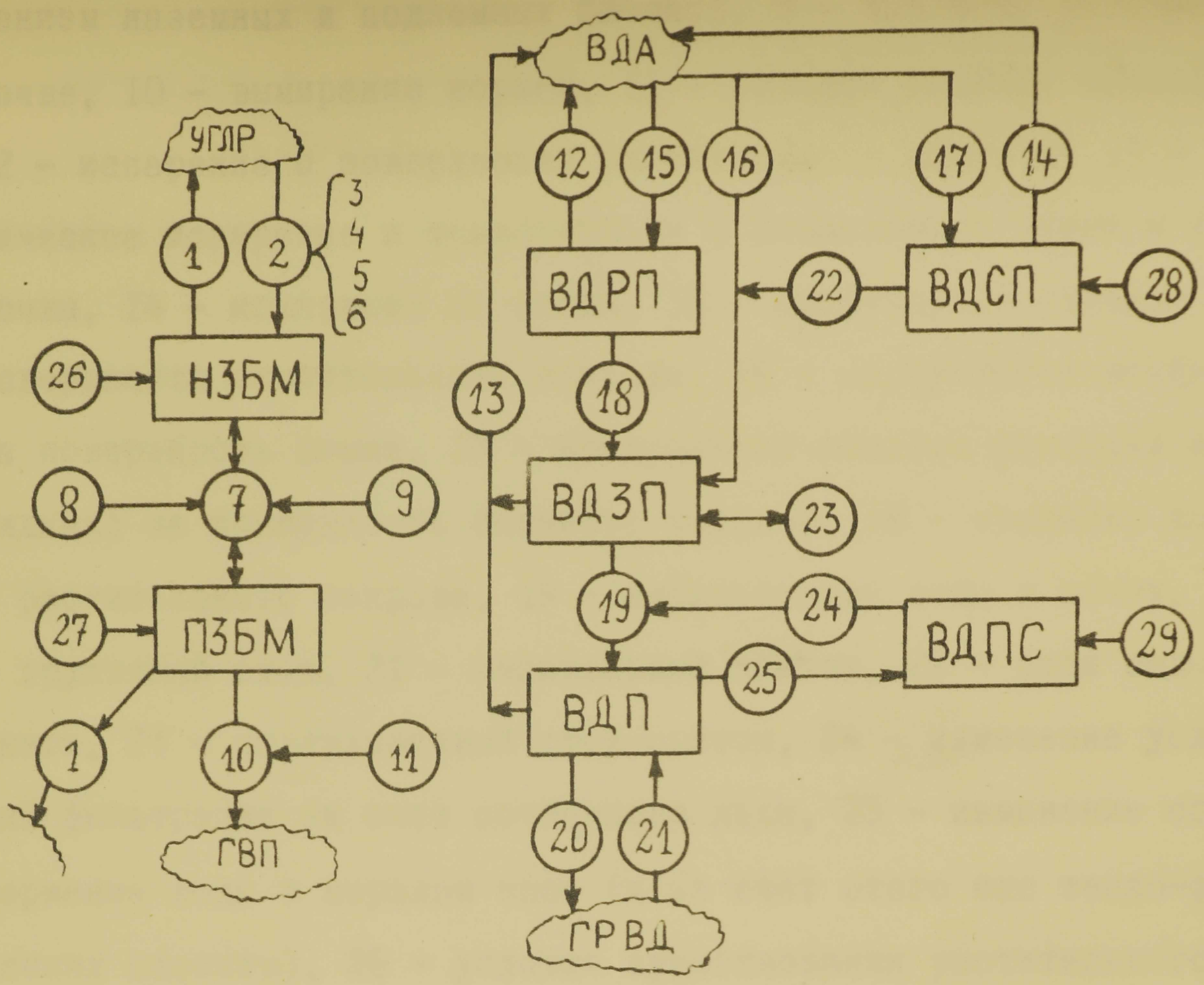


Рис. 5. Принципиальная функциональная структура однородной ячейки геотехносистемы интенсивного земледелия.

Обозначения: УГЛР - углерод в приземном слое воздуха, ВДА - вода в приземном слое воздуха, НЗБМ - наземная биомасса, ВДРП - вода на растительном покрове, ВДЗП - вода на земной поверхности, ВДП - вода в почве, ВДСП - вода в снежном покрове, ВДПС - вода в мерзлом слое почвы, ГРВД - грунтовая вода; I - дыхание, 2 - фотосинтез, 3 - интенсивность ФАР на единицу фотосинтетической поверхности, 4 - величина фотосинтетической поверхности, 5 - тепловые условия, 6 - условия водного режима через относительную транспирацию, которая зависит от испаряемости, потенциальной транспирации и влажности почвы, 7 - распределение и перераспределение ассимилятов, 8 - условия, связанные с онтогенетическим развитием и соотно-

шением наземных и подземных биомасс, 9 - тепловые условия в почве, I0 - вымирание корней, II - условия дыхания корней, I2 - испарение с поверхности растительного покрова, I3 - физическое испарение и транспирация с поверхности земли и из почвы, I4 - испарение со снега, I5 - поступление осадков на поверхность растительного покрова, I6 - поступление осадков на поверхность земли, I7 - поступление осадков (твердых и жидких) на поверхность снежного покрова, I8 - стекание воды с растительного покрова, I9 - инфильтрация воды в почву, 20 - грунтовый сток, 2I - капиллярный приток, 22 - сток воды со снега, 23 - поверхностный сток-приток, 24 - изменение условий фильтрации за счет почвенного льда, 25 - изменение содержания воды в мерзлом слое (и за счет этого его тепло-физических свойств), 26 - условия существования растительного покрова, 27 - условия, определяющие форму распределения корней, 28 - условия, определяющие существование и толщину снежного покрова, 29 - условия, определяющие существование и толщину мерзлого слоя.

принципиальном виде представлена на рисунке 5.

Каждый такой процесс - испарение, инфильтрация, снеготаяние и др. - как отдельно взятый исследуется в частных географических науках: в метеорологии, почвоведении, гидрологии и т.д., откуда можно заимствовать методы, приемы и формулы. Для их координации следует разные процессы связывать на основе фундаментальных законов, в качестве которых обычно применяется законы сохранения вещества и энергии в виде балансовых соотношений.

Изложенное выше создает модель-представление, которое позволяет рассматривать геотехносистему польдера как территориальную и динамическую систему. Для выявления информативных параметров геомасс и для нахождения связей между ними оказались необходимыми теоретические, полевые и камеральные исследования. Ввиду нереальности проведения достаточного количества наблюдений на польдере для эмпирического выведения функциональной структуры, широко был использован опыт и имеющиеся модели отраслевых дисциплин.

2.4. Исследование геотехносистемы польдера Тамме

Модель конкретной геосистемы невозможно построить чисто теоретическим и камеральным путем, но нужны эмпирические материалы и натурные наблюдения. На современном уровне науки географ часто не имеет возможности лично собрать все ему необходимые данные. В ходе проектирования польдера были проведены детальные исследования (в масштабе I:2000) рельефа и почв. Последние для обслуживания земледелия временами обновляются. Эти ма-

териалы вместе с проектом польдера были использованы в картометрических работах и при первоначальном территориальном расчленении польдера.

На основе модели-представления возникала необходимость в дополнительных исследованиях для контроля и уточнения картометрических характеристик, для наблюдения за основными процессами на польдере и для выяснения значений индивидуальных свойств важнейших параметров геотехносистемы.

Такие работы и наблюдения велись в экспедиционном порядке I978-I980, причем летом I980 года были проведены комплексные наблюдения за биопродукционным процессом основных с/х культур и за факторами, влияющими на этот процесс. Материалы комплексных наблюдений только в незначительной части были использованы для спецификации параметров модели; основная доля служила для контроля модели и анализа внутригодовой динамики.

В последующих подпунктах излагается основное содержание и методические разработки наблюдений и результаты исследования имеющихся материалов о польдере, важных при выведении структуры алгоритмической модели геотехносистемы.

2.4.I. Фитометрические наблюдения

Растительный покров (РП) в биофизике рассматривается (Ничипорович, I956; Раунер, I972; Росс, I975) как особый слой, в котором создается свой микрометеорологический режим, сложным образом связанный с фитогеометрическими свойствами растительности. На нашем уровне детальности - весь слой РП в каждой ячейке рассматривается интегрально и без пространственных различий - соответственно основными показателями будут относитель-

ная площадь зеленой фитомассы (LAI ; имеет размерность $м^2/м^2$), и фитомасса (общая и по представляющим нам интерес статьям с размерностью $г/м^2$). Для определения названных, а также в интересах моделирования продукционного процесса следовало определить еще некоторые дополнительные показатели, как высоту и густоту РП и его проективное покрытие. Динамика фитометрических показателей по времени характеризует ход и условия развития рассматриваемого РП.

По фитометрии летом 1980 года нами изучались ячмень и картофель, ботаниками-специалистами НИИ Зоологии и Ботаники АН ЭССР - подробно многолетние травы. В общей основе лежала принятая в Эстонии методика (Фитоактинометрические..., 1967; Фотосинтез..., 1968), а также методика, принятая при агрометеорологических наблюдениях в гидрометсети (Juhend ..., 1977).

Мы провели фитометрические наблюдения в производственных условиях - на полях совхоза, где наблюдались качество и сроки реального производства с одной стороны, а также налагались определенные ограничения на нашу деятельность с другой стороны. Например, ограничивался выбор для фитонаблюдений картофеля при максимуме фитоплощади или при определении биомассы клубней, когда лимитировалось количество проб, а место взятия одной пробы уже исключалось из дальнейших наблюдений.

С самого начала следовало определить, что является объектом исследования - ход динамики биомассы данного конкретного поля вместе с его участками разной густоты и времени появления всходов, местами полегания, следами прохождения трактора при опрыскивании ядохимикатов и т.д., либо динамика биомассы нормально развитых растений данного поля, не испытывающих влияние случайных относительно проведенного исследования факторов и

формирующих действительно возможный урожай+. Мы задались последним вариантом и поэтому охватывали пробами только определенный участок поля. На этом участке определилось место взятия пробы случайным образом (бросанием метного флажка), а нетипичные места исключились. Основным фактором нетипичности были у ячменя полегание и у картофеля фитофтора.

Ячмень. Был выбран сорт "Отра" как ранний и наиболее близкий из представленных на польдере сортов к параметрам биофункций модели О.Д.Сиротенко и А.Г.Просвиркины (1979). Два раза в декаде определили в четырех повторностях в квадратах 0,25х0,25 м проектное покрытие зеленой площади; после этого срезали растения ячменя и проводили анализ пробы. При этом для каждого растения определялось: 1) максимальная длина растения (h_s), 2) длина стебля (h_v), 3) длина пожелтевшей части стебля (h_k), 4) длина колоса (h_p), 5) степень пожелтения колоса по четырехбалльной шкале, 6) количество листьев, 7) длина и ширина второго листа; а для всей пробы: 8) количество растений, 9) сухая биомасса колосьев, стеблей, желтых листьев и отдельно первых, вторых и т.д. листьев. Названные показатели позволяли вычислить все необходимые фитометрические характеристики.

Дополнительно были проведены некоторые методические опыты, чтобы проверить применяемость на выбранном сорте "Отра" формул Х.Мяги и Ю.К.Росса (1969а,б) и найти закономерность изменения тех параметров, которые мы принимали как постоянные или меняющиеся линейно. Материалы по изучению четырех проб растений да-

+ По Х.Г.Тоомингу (1977) урожай в идеальных метеоусловиях или потенциальный урожай (ПУ) определяется приходом ФАР и уровнем потенциального коэффициента полезного действия культуры или сорта. Действительно возможный урожай (ДВУ) формируется в реальных метеоусловиях (поэтому ДВУ < ПУ) и является максимально возможным урожаем в производстве (УП) при идеальной организации производства. В реальных же условиях УП < ДВУ.

ли необходимую повторность для статистики при последующих вычислениях. Вероятную ошибку выборки определяли исходя из нормального распределения с уровнем значимости 95%. Сглаживание результатов по времени провели графически, пользуясь неформальными знаниями о ходе процессов.

В основе нахождения фитометрических характеристик ячменя лежал подход среднего эффективного растения (Мяги, 1971). Результаты наблюдений над развитием ячменя приведены в таблице 9. Как видно, густота растительности по пробам не одинакова, поэтому при построении графиков все значения были переведены на густоту 496 раст./м^2.

Так как изменения фитоплощади не были получены непосредственными измерениями, остановимся на способе нахождения их. Оказалось, что поверхность отдельного листа ячменя пропорциональна произведению его длины и ширины, причем множитель 2/3 инвариантен (что совпадает и с данными Мяги, Росс, 1969а). Для перехода на все листья необходимо знать одно какое-нибудь постоянное соотношение между листьями, или измерить все листья.

Оказалось, что для "Отра" формулы вышецитированных авторов не подходят, среднюю поверхностную плотность листьев непосредственно определять неудобно и что характерным оказывается второй лист, считанный с в е р х у. Его доля от поверхности всех листьев, также его доля от массы всех листьев оказались переменными, но их соотношение (c) сохранилось. Исходя из этого, для зеленой листовой поверхности была выведена формула:

$$\bar{S} = \frac{2/3 \cdot \bar{a}_2 \cdot \bar{b}_2}{c \cdot m_2 / M} \quad ,$$

Таблица 9

Результаты фитометрических наблюдений ячменя "Отра" (польдер Тамме, 1980 г.)

Сроки наблюдений	Густота шт/м^2	Проектное покрытие зел.поверх.	Зеленые поверхности м^2/м^2						Сухой вес фитомассы г/м^2				
			h_s (см)	LAI	S_L	S_s	S_c	k_t	суммарная	листья зеленые	листья желтые	стебли	колосья
5/06	410	5,36	25,6	1,37	1,23	0,14	0	-	40,2	-	-	-	-
13/06	496	8,24	37,3	-	-	-	-	-	128,6	67,3	3,4	58,0	-
19/06	396	8,90	36,6	2,65	1,93	0,73	0	-	290,3	90,4	24,2	174,5	1,2
24/06	496	8,25	62,3	7,28	4,58	2,64	0,06	1,0	419,4	82,0	24,2	249,8	63,4
1/07	496	9,26	85,0	7,36	2,52	4,35	0,50	1,0	612,3	69,8	30,4	375,8	136,2
5/07	476	7,54	96,4	7,64	2,15	4,78	0,71	1,0	736,0	67,7	33,7	442,8	181,8
11/07	496	9,10	98,5	7,71	1,74	5,08	0,89	1,0	905,8	47,0	45,0	521,4	292,4
15/07	340	7,44	89,9	3,31	0,54	2,10	0,67	0,68	648,4	17,8	34,9	300,6	295,4
19/07	528	7,39	96,5	3,96	0,25	2,60	1,11	0,49	1127,8	7,8	70,2	500,3	549,6
24/07	408	4,74	83,1	1,75	0,10	1,14	0,52	0,30	689,0	3,6	37,2	257,0	391,2
31/07	436	0,00	90,7	0,07	0,00	0,02	0,05	0	836,2	0,0	47,8	275,6	512,8

Объяснение обозначений в тексте

Урожай зерна 44,9 ц/га

где $\bar{a}_2$ - средняя длина вторых листьев растений; $\bar{b}_2$ - средняя ширина вторых листьев растений; c - параметрическое соотношение, $c = 0{,}93 \pm 0{,}009$ (коэф. вариации $v = 0{,}05$); m_2 - биомасса вторых листьев растений; M - биомасса всех зеленых листьев растений.

Боковая площадь стеблей описывалась (в $см^2$) эмпирической формулой (Мяги, Росс, 1969а):

$$\bar{S}_s = 1{,}35 \cdot (\bar{h}_s - 23).$$

На репродуктивном периоде роста стебли постепенно пожелтеют и зеленая площадь поэтому будет:

$$\bar{S}_s = k_t \cdot \bar{S}_s' \quad ;$$

$$k_t = \frac{(1 + 2{,}87 \cdot R) \cdot R}{3{,}87} \quad ,$$

$$R = 1 - h_k / h_v \quad .$$

Вывод нами k_t основывался на предположение, что стебель - усеченный конус. Соотношение малого и большого радиуса его по измерениям оказалось $r_1 / r_2 = 0{,}35$ (коэффициент вариации $v = 0{,}1$).

Боковая площадь колоса - моделируемая цилиндром - нами определялась по формуле:

$$\bar{S}_c' = d \cdot \pi \cdot \bar{h}_p' = 0{,}2 \cdot d \cdot \pi \cdot \bar{h}_p \quad ,$$

где $\bar{h}_p'$ - средняя длина колосьев без пленок; d - средний диаметр "колоса", т.е. цилиндра.

Учет пожелтения велся:

$$\bar{S}_c = F \cdot \bar{S}_c' \quad ,$$

$$F = \begin{cases} 1 \text{ если колос зеленый;} \\ 0{,}5 \text{ если колос зелено-желтый;} \\ 0 \text{ если колос желто-зеленый или желтый.} \end{cases}$$

Картофель. Сортом был выбран среднепоздний "Сулев", для которого уже имеется определенный фитометрический материал (Программирование..., 1978; Тооминг, Кыйва, 1979). Наблюдения проводились два раза в декаду, начиная с появления всходов. Объектом исследования на поле (пробой) оказалось визуально определяемое "гнездо". Методическая трудность состояла в том, что "гнездо" не совпадает с одним растением картофеля - некоторые растения, материнские клубни которых при севе оказались близко, визуально принимается за одно растение. Поэтому число "гнезд" по времени изменяется и количество их на 1 $м^2$ приходилось на первой половине вегетации определить несколько раз.

На поле определялось проектное покрытие (пятикратно по борозде, пятикратно между бороздами) и изучили 10 проб. В каждой измерялась длина всех стеблей, оценивалось их состояние и один из них брался для детальных исследований. При этом мы измерили на нем у каждого сложного листа длину и ширину верхней (верхушечной) пары листков, также определяли сухой вес этих листков, всего стебля и сырой вес клубней каждой пробы.

Дополнительно было проведено планиметрирование листков для определения параметров необходимых для вспомогательных формул. Фитометрические наблюдения в поле мы связывали с полукамеральными (детальными) измерениями через средний эффективный стебель растений; кроме того определялась густота посева D (количество стеблей на $м^2$):

$$D = c/(a \cdot b),$$

где a - среднее расстояние между "гнездами"; b - средняя ширина борозды: равнялась 0,69 м; и c - количество стеблей в "гнезде". Вариабельность этих показателей большая (коэффициент вариации $v \approx 0{,}5$) и их доверительные интервалы были, например, I8 июня следующими: $a = 0{,}279 \pm 0{,}018$ ($n = 351$); $c = 6{,}35 \pm 1{,}09$ ($n = 52$; при $n = 10$ будет $c = 6{,}35 \pm 2{,}49$).

Так как другие измерения были сделаны на стеблях, включенных в пробы, возникал вопрос о репрезентативности пробных стеблей. Сбор их случайной выборкой требовал бы 40 - I00 проб, что технически неприемлемо. Поэтому мы сознательно старались в пробы выбирать физиономически разные стебли от разных растений картофеля таким образом, чтобы они в совокупности образовали выборку, характерной среднему "гнезду". Хотя такая процедура довольно субъективна, обратная проверка по высотам стеблей показала, что она дает вполне удовлетворительные результаты. Средняя разница высоты среднего эффективного стебля, измеренная в поле, и среднего стебля пробы сказалось I0%, что значительно ниже статистических доверительных интервалов обоих показателей.

Результаты наблюдений и некоторые найденные параметры приведены в таблице I0. Для нахождения переходного коэффициента от биомассы сложных листьев к их площади - удельной поверхности листьев - мы провели их планиметрирование. Оказалось, что хотя удельная поверхность разных листков варьирует, ее средние значения близки к удельной поверхности первой пары листков, считанных с в е р х у. Площадь одного листка выражается через его длину (l) и ширину (k):

$$S = \beta \cdot k \cdot l,$$

Таблица 10

Результаты фитометрических наблюдений картофеля "Сулев" (польдер Тамме, 1980 г.)

Срок наблюдения	Число "гнезд" на 1 кв.м.	Число стеблей в "гнезде"	Высота ср. стебля (см)	Удельная поверхн. листьев 10^{-4} м^2/г	Проектное покрытие	Содержание сух. веществ в клубне %	Сухая биомасса г/м^2			
							суммар. наземн.	листья	стебли	клубни
13/06	6,52	6,1	7,2	-	-	-	2	-	-	-
18/06	5,20	6,4	9,2	-	1,9	-	40	-	-	-
25/06	-	6,3	19,6	-	3,2	-	73	-	-	-
30/06	-	7,9	24,8	195	4,1	-	145	95	49	-
4/07	-	9,7	37,7	208	5,4	-	374	232	143	-
9/07	-	12,5	45,7	230	8,6	14,1	381	221	-	-
14/07	-	13,4	62,9	241	8,5	-	334	195	-	82
19/07	3,68	13,8	64,1	250	-	-	388	219	-	185
23/07	-	11,5	51,0	289	=	16,7	=	=	=	232
2/08	-	9,0	76,5	265	9,9	-	482	206	-	397
7/08	-	8,7	83,1	-	-	-	338	92	-	439
12/08	-	7,8	84,4	-	-	19,0	-	-	-	753
17/08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	847
24/08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	924
31/08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	674
5/09	-	-	-	-	-	17,6	-	-	-	868

Биологический сырой урожай 456,7 ц/га

- отсутствие наблюдения

= выбракованные результаты

где β =0,76±0,01. Имея таким образом для пробных стеблей данные о листовой поверхности и о биомассе листьев, мы нашли ди-

намику удельной листовой поверхности (рис. 6), которая является важным параметром в модели и позволяет определить динамику LAI.

Наблюдения над образованием биомассы клубней не выявили никаких зависимостей между надземными и подземными биомассами+. Поэтому выбор проб на биомассы клубней оказался случайным и точность их особенно на конечной стадии - из-за ограниченности числа проб - низкой.

Несмотря на неполность фитометрических материалов картофеля, полученные результаты позволили проверить результаты моделирования и сделать определенные выводы, приведенные в заключительной главе.

2.4.2. Изучение почв

Пространственная изменчивость почвенного покрова и сложность моделирования движения влаги в почвах требует знания ряда показателей каждой конкретной изучаемой почвы. Часть из них входит в качестве параметров в разные уравнения, частично они нужны для относительной оценки почвенной влаги, выражаемой в весовых или объемных процентах. В зависимости от почвы, например, 30% влажность может указать как на очень большую влажность (при песках), так и на исключительную сухость почвы при торфе. Гидрофизические константы определенной почвы между собой коррелятивно связаны, но эта связь определяется обычно третьими факторами, с которыми константы тесно связаны. Удачный выбор нескольких таких основных факторов позволяет обоснованно найти остальные.

+ Аналогичные наблюдения сделала при своих опытах с сортами "Приекульский ранний" и "Берлихинген" Е.Л.Свердлова (1976б). Картофель выращивался в вегетационных сосудах.

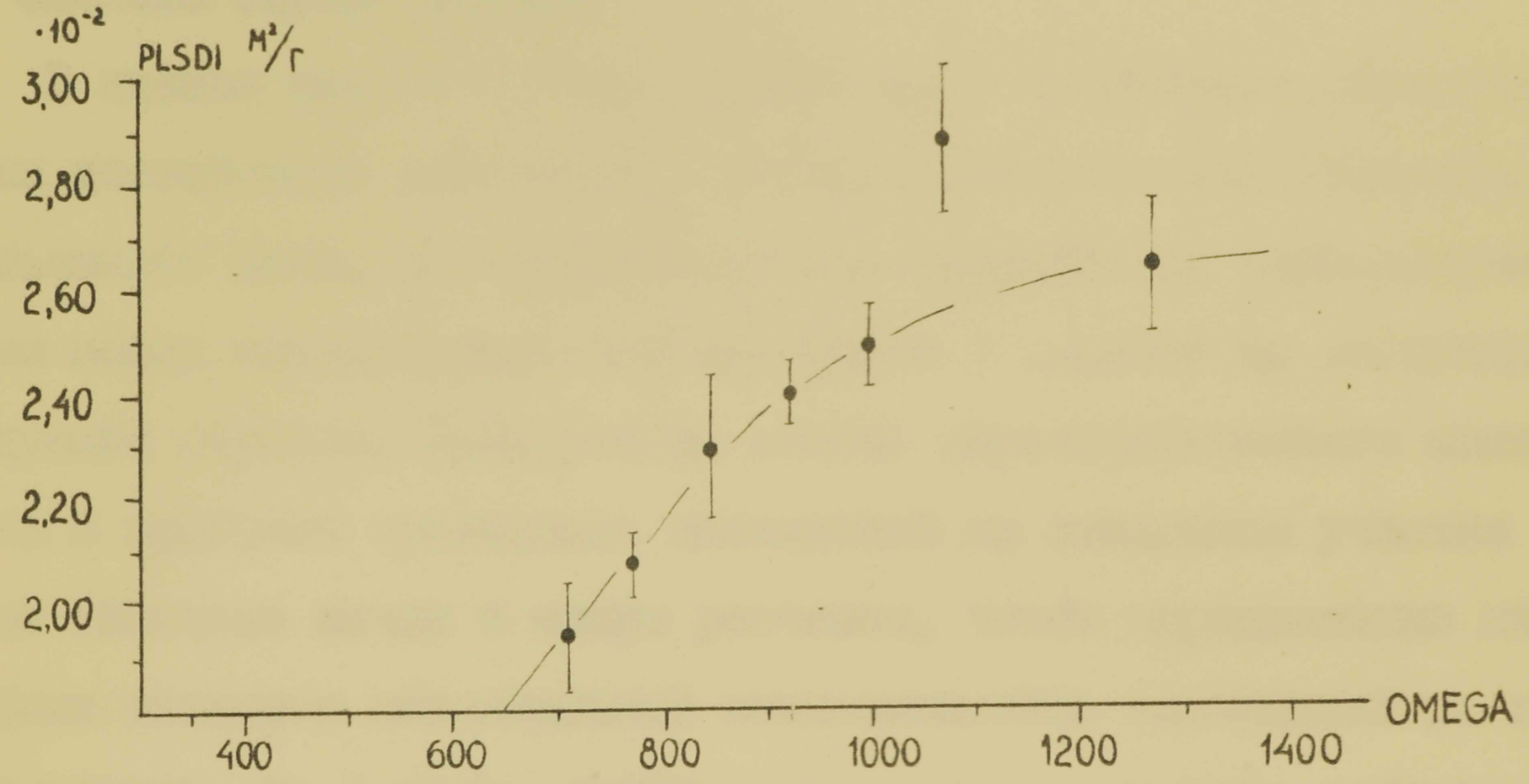


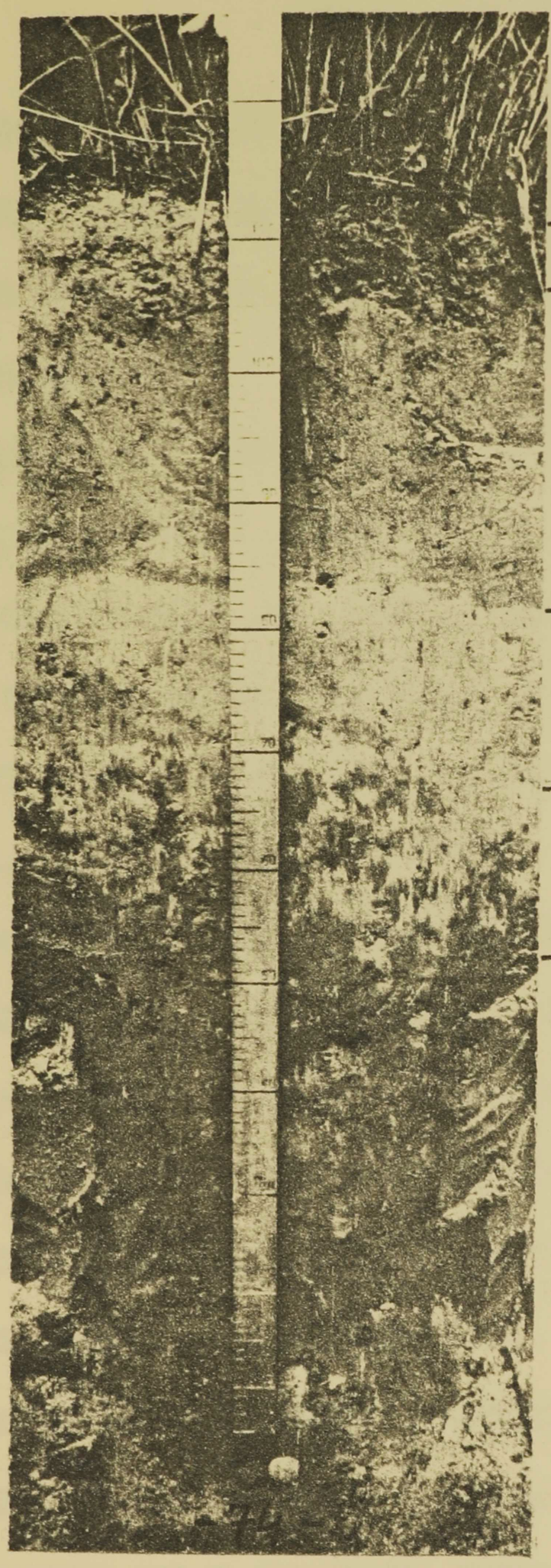
Рис. 6. Удельная поверхность листьев картофеля "Сулев" (PLSDI) в зависимости от суммы температур воздуха (OMEGA). Начало суммирования проводится со времени появления всходов. По материалам наблюдений на польдере Тамме 1980 г. Отрезками указаны доверительные интервалы.

Исследованиями Э.Я.Китсе на основе более чем 70 000 измерений для почв Эстонии найдено, что вариации гидрофизических характеристик почвы хорошо описываются удельной поверхностью почвы (Kitse, 1978).

Главной характеристикой сложения почвы является ее объемный вес и, таким образом, факторами, на основе которых мы нашли остальные, оказались удельная поверхность почвы и объемный вес его скелета (сухой почвы).

В идеале каждая ячейка должна быть обеспечена статистически достаточным количеством определений удельной поверхности и объемного веса, но практически это оказывается нереализуемой. Объем наших исследований был ограничен и поэтому мы поступили следующим образом. Выбирали на основе картографического материала и программ проведения наблюдений на эталонном участке Тамме типичные почвы с таким расчетом, чтобы определенные ячейки были охвачены максимальной комплексностью наблюдений по геокомпонентам. На 9 таких почвах нами велись сезонные наблюдения за влажностью почвы (раз в декаду) весовым методом четырехкратной повторностью (на 4 почвах два года). Пробы на влажность каждой выбранной почвы были взяты из точек, расположенных в вершине углов квадрата со стороной I5 м. В центре такого воображаемого квадрата мы сделали почвенный шурф глубиной I20 см, описали его и взяли пробы на объемный вес (по 4 пробы на каждый слой почвы) и удельную поверхность (3-4 пробы с пятикратной повторностью на каждый шурф в зависимости от сложности профиля).

Например, на фотографии I видно шурф дерново-подзолистой почвы. Величина пробы на объемный вес была 50 $см^3$ для минеральных почв и 500 $см^3$ для торфов; определили общепринятым способом (Роде, I969), а удельную поверхность определили по адсорбцию



Клевер

A_O

Песок
гумуса 3,9%
уд.поврх. 25,7 $м^2/г$

A_I

A_2 Песок
уд.поврх. II,5 $м^2/г$

BC Супесь
уд.поврх. 22,3 $м^2/г$

C Легкий суглинок
уд.поврх. 33,0 $м^2/г$

Фотография I. Почвенный шурф ячейки № I5 на польдере Тамме. Дерново-подзолистая почва; 4/УII I980 г.

водяных паров (Puri, Murari, 1964).

2.4.3. Наблюдения за гидрологическим действием технических элементов польдера

Необходимо было определить количества дренажного стока, динамику уровня воды в магистральном канале польдера, ее влияние на дренажный сток и модули откаченной воды с территории геотехносистемы.

Дренажная сеть на польдере построена таким образом, чтобы ее гидрологическое действие, с учетом рельефа и бывшей сети канав было наиболее эффективным. Дрены образуют стоковые системы, замыкающими створами которых являются устья дренажных коллекторов в отстойных колодцах или на берегу магистрального канала. Каждая такая система охватывает, как правило, несколько рассматриваемых нами ячеек и поэтому не удается измерить дренажный сток какой-нибудь конкретной ячейки. Данные измерения дренажного стока определенной дренажной системы оказывались интегральным показателем некоторого места на польдере, которое характеризовалось неоднородными географическими условиями и разными параметрами дренажа. При организации наблюдений за дренажным стоком была поставлена задача определить, какую роль играет дренажный сток в изменении влажности корневой зоны и как связан он с уровнем грунтовых вод (УГВ).

Наблюдения были проведены 1979-1980 г периодически в 11 дренажных системах. Летом устья некоторых систем были подтоплены, некоторые оказались сухими. Сток определили при помощи мерного сосуда объемным методом (Указания..., 1964) с измерением как времени расхода, так и объема воды. Результаты 2-3

повторных измерений различились менее 3%.

Зимние наблюдения в условиях отсутствия инфильтрации указывали на незначительность напорного питания (модуль дренажного стока q =0,003 - 0,0I л.с$^{-I}$.га$^{-I}$).

Весной при высоких УГВ отмечалась тесная связь между ними и модулем стока q до падения УГВ на определенный уровень. Последний был ниже глубины закладки дренажа 0,3...0,6 м(в зависимости от грунта). Зависимость q от УГВ при дальнейшем спаде УГВ не наблюдалась, а сами модули стока становились незначительными. Например, суммарный дренажный приток в магистральный канал в июле сравним с испарением из поверхности канала.

Летние ливни мощностью до 20 мм/сут на дренажном стоке практически не отражались (увеличение, например, в одной системе 2 августа I980 года после дождя I5,9 мм q с 0,0006 в течение 4 часа до 0,0027 л.с$^{-I}$.га$^{-I}$).

Динамика уровня воды в магистральном канале была измерена летом I980 года для изучения ее связи с откачками, обратными пропусками воды и дождеванием. Использовался самописец "Валдай". В связи с этими измерениями была проведена нивелировка устьев дренажных систем и определены пределы распространения подтопления дренажа.

Отчет работы насосной станции в хозяйстве ведется по потребляемой электроэнергии, что вместе с известной производительностью насосов позволяло определить объемы откачки. Для гидрологической оценки этих объемов необходимо было найти модули и коэффициенты откачки для территории геотехносистемы.

В магистральный канал притекает вода транзитного характера из очистительной станции сыроварни Ранну. Эту воду следует исключить из вычислений коэффициентов откачки. В I980 году,

например, эта вода составила 7% из всей откаченной воды. Также мы исключали из рассмотрения самотечную часть польдера и верхнюю часть друмлина Тамме, которые по существу не относятся к водосбору насосной станции. Учитывая площади лесов, индивидуальный сектор и земли несельскохозяйственного пользования, была определена площадь польдерной части водосбора насосной станции - 477,7 га. Найденные коэффициенты откачки представлены в таблице 5. Отмечались запаздывания в сравнении с осадками (см. табл. I2).

Следует также отметить, что из-за обратных пропусков воды, объем которой известен только весьма приблизительно, к величинам откачки в июле и августе следует относиться с осторожностью.

2.4.4. Изучение зимних состояний

Зимние наблюдения на польдере Тамме для определения параметров снежного покрова и глубины промерзания почвы велись на основе общепринятой методики (Указания..., I965; Руководство..., I970). Ежедекадно при помощи мерзлотомеров Данилина определялись глубина нулевой изотермы в почве и высота снежного покрова в шести местах польдера в разных типах ячеек. Эти материалы были использованы для контроля и оценки точности соответствующих блоков модели.

Для изучения территориального распределения высоты и плотности снежного покрова на польдере, зимой I980 года были два раза проведены снегомерные съемки на семи профилях. Эти материалы (вместе с метеоданными) в основном использовались для выработки функции перераспределения снега на польдере и помогали отладке подблока снежного покрова модели.

3. РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ-ПРЕДСТАВЛЕНИЯ В ВИДЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ

Алгоритм - это совокупность точных однозначных правил для выполнения определенного задания. Если модель - условный образ объекта исследования (Математика...,1975), следовательно алгоритмическая модель - это модель в виде алгоритма. Так как понятие "алгоритм" предполагает какое-нибудь действие, динамику, то словосочетание "алгоритмическая модель" применимо к модели определенного процесса. У нас таким оказывается функцирование геотехносистемы.

Отличие алгоритмической модели от математической состоит в том, что не каждая алгоритмическая модель является математической. Алгоритм может, но не должен быть реализован на ЭВМ. Вычислительный алгоритм для ЭВМ обычно нацелен (в том его целесообразность) на повторное его выполнение огромное количество раз - на циклические и интерационные действия - и как "инструкция для ручной работы" малопригоден.

Понятие "алгоритмическая модель" близкая к широко применяемому сейчас понятию "имитационная модель", хотя последнее еще не имеет единого толкования (см., например, Яковлев, 1975; Горстко, 1976; Бусленко, 1977; Имитационное..., 1978). В зарубежной литературе стали обозначать термином "имитация" (simulation) посуществу алгоритмические модели. Параметры и переменные модели будем обозначать (как идентификаторы алгоритмического языка программирования Фортран) словами из больших букв латинского алфавита и из цифр. Операцию умножения обозначаем только знаком " * ", деление знаком " / ", возведение в степень знаком " ** ". MIN означает нахождение минимальной,

MAX - нахождение максимальной величины, EXP(A) тождественный с e^A. Содержание остальных операций уточняется при необходимости в тексте.

3.I. Принципы построения модели

Наша задача заключается в создании такой алгоритмической детерминированной модели, которая позволяет имитировать на ЭВМ функционирование исследуемой геотехносистемы. Последняя относится к классу сложных динамических систем.

Принципы описания подобных систем с позиции системного подхода изложены в работах (Форрестер, I97I; Директор, Рорер, I974; Goodman, I974), а применительно к агроэкосистемам в работах (Dyne, Abramsky, I975; Гильманов, I978; Dent, Blackie, I979). Вопросы системного подхода при физико-географических исследований уже широко обсуждались в географической литературе (Chorley, Kennedy, I97I; Преображенский, I972; Ретеюм, I972; Капица, Симонов, I974; Weichkart, I975; Krcho, I976; Михайлов, I976; Симонов, I977; Беляев, I978; Сочава, I978; Гвоздецкий, I979; Симонов, Зейдис, I980).

Функционирование системы заключается в изменении значений ее переменных (которые в совокупности определяют состояние системы) под воздействием внешней системы и под влиянием взаимодействия самих элементов системы. Оно наиболее часто описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями, связывающими скорости изменения одних переменных состояния со значениями входных переменных, с другими переменными состояния и со вспомогательными переменными.

Решение таких дифференциальных уравнений иногда может

представить значительные трудности и при большинстве практических задач для их решения применяются методы численного интегрирования на основе конечно-разностных схем аппроксимации.

Конечно-разностное уравнение описывает дискретное изменение функции при дискретном изменении аргументов. У нас аргументами являются входные переменные, которые имеют именно дискретный характер.

Динамика по времени в дискретном случае определяется смеой дискретных состояний и, если выполнить экстраполяцию, выражается кусочно-линейной траекторией. Следует подчеркнуть утверждение (Директор, Рорер, 1974), что в действительности линейность зависит от способа описания системы и не является ее внутренним свойством.

Сделаем два вывода. Во-первых, на каждом шагу времени мы имеем дело с линейной системой и можем довольствоваться всеми "благами" линейных систем (прежде всего простотой решения). Во-вторых, система-оригинал отнодь не должна быть линейной на любом промежутке времени: от выбора временного шага зависит степень допущенного нами упрощения.

Переменные состояния имеют определенный диапазон изменения, своего рода "вместимость", что позволяет рассматривать их как абстрактные "резервуары". Например, количество воды на поверхности почвы не может быть отрицательным. Часть процессов протекает в строго определенном порядке, образуя т.н. каскадные (Chorley, Kennedy, 1971) подсистемы. Для остальных, чтобы положить все процессы в определенный ряд, где результаты одного изменения являются параметрами для другого, было введено дополнительное условие о приоритетности "резервуаров": при прочих равных условиях рассматриваемый ресурс (например, вода)

будет вначале поступать в резервуар, имеющий приоритет в отношении других резервуаров. Ситуация "прочих равных условий" возникает тогда, когда "потребности" нескольких резервуаров, независимых друг от друга, превышают количество имеющегося ресурса. Конкретный пример: если количество воды на поверхности почвы и на поверхности растений будет больше, чем расчетное количество физического испарения, то сперва испаряется вода с поверхности растений. Названная ситуация возникает также тогда, когда "потребности" резервуаров связаны друг с другом. В таком случае мы применяем интеграционное определение этих потребностей.

Но в большинстве случаев порядок операций имитирования естественным образом диктуется последовательностью процессов или оказывается независимым от них внутри временного шага.

Вышеприведенная функциональная структура (рис. 5) должна быть конкретизирована в каждой конкретной ячейке в каждое конкретное время. На основе информации о территориальной и геогоризонтной структуре, о значениях независимых входных переменных и используя результаты предыдущего шага по времени в алгоритме образовывается частная структура функционирования, при помощи которого вычисляются новые значения переменных состояний. Многократное повторение таких процедур делает возможным нахождение динамики.

По всей видимости, нет принципиальных ограничений, запрещающих охватывать таким способом более обширные территории и отрезки времени.

3.2. Динамика характеристик геосистемы, связанных со снежным покровом

Значительную часть года на польдере сохраняется снежный

покров, поэтому следует в модели выделить отдельный блок для имитации динамики характеристик снежного покрова.

Модели, где рассчитывалась динамика снежного покрова, рассмотрены в работах (Crawford, Linsley, I966; Computer ... I976; Палагин, Мосейчик, I978). Эти модели имеют различный по сравнению с нашим территориальный или временный масштаб.

Главные характеристики снежного покрова - его толщина и плотность - определяют водозапасы снега и его теплоизоляционные свойства. В формировании снежного покрова участвуют следующие процессы: а) прибавление твердых осадков; б) таяние снега, в) промерзание талого снега, г) сток талой воды со снега, д) уплотнение снега (самоуплотнение и уплотнение из-за смачивания его), е) испарение со снега. Последнее весной может играть значительную роль при исчезновении снежного покрова.

Определяя характер хода атмосферных осадков (снег или дождь), в алгоритме учитывается перераспределение снега для каждой ячейки при помощи средних скоростей и направлений ветра и "экспозиции ячеек относительно определенного направления ветра" (см. прил. 5). Твердые осадки (SPR-Solid PRecipitation) в конкретной ячейке NOTE будут:

$$SPR(NOTE) = COEF(NOTE) * PR ,$$

где PR твердые осадки по данным метеопоста, COEF - коэффициент перераспределения снега.

Плотность свежевыпавшего снега на основе работ (Кузьмин, I957; Иванов, Гаврилов, I965; Виссмен и др., I979) принимали равной I00 кг/м^3 при отрицательной температуре воздуха и I50 кг/м^3 в остальных случаях. При достаточной толщине снежного покрова учитывалась самоуплотнение его, принимая, что плотность снежного покрова определенной толщины не может быть

ниже некоторого значения, определяемого графиком на рис. 7.

Испарение с поверхности снега ESNOW определялось по эмпирической формуле, выведенной П.Н.Кузьминым (1953) на основе данных многосторонних опытов и имеющей вид:

$$ESNOW = HUMD * (0,24+0,04*T),$$

где HUMD – среднесуточный дефицит влажности и T – скорость ветра.

Расчетная формула для снеготаяния SMELT (Кузьмин, 1961, с. 234):

$$SMELT = 0,125 * (RBAL - 38,7 * (TCCO - TC + 1,75*DE) *(0,18 + 0,098 * WINDV)) ,$$

где DE – разница давлений водяных паров над поверхностью снежного покрова и в воздухе на высоте 2 м. Основное дополнительное условие (остальные см. в прил. 4):

если $TC < 0$ и $TCCO < 0$, то $TC - TCCO \leq 0$.

Таяние и дождь причиняют смачивание снега. При этом смоченный слой оседает и уплотняется (количество тепла, которое дождь дает в снег, пренебрегаем). Для оседания использовали формулу П.П.Кузьмина (1957, с. 69):

$$CSNOW'' = CSNOW' + SNDEN' + (3,7 - 3,1 + SNDEN') ,$$

где CSNOW – толщина снежного покрова, SNDEN – его плотность; prima означает старую и secunda новую величину. Толщина смоченного слоя зависит от количества воды (таяние снега и дождь: SMELT + PR) и от водоудерживающей способности снега (SNWC). О последней величине имеются (Кузьмин, 1957, с. 65) данные, которые аппроксимируем:

$$SNWC = 0,6 - SNDEN .$$

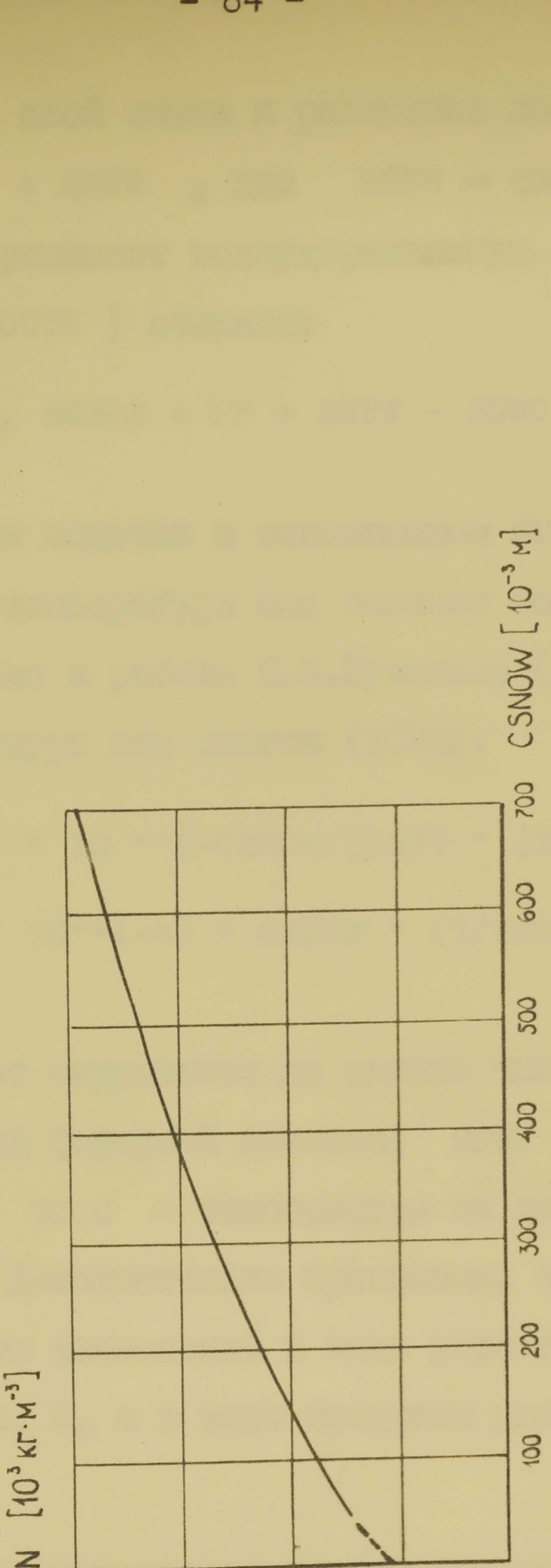


Рис. 7. Зависимость плотности снежного покрова SNDEN от его толщины CSNOW по данным Иванова и Гаврилова (1965, с.41).

Если промочен весь слой снега и расчетное количество воды в снегу (SMELT + PR + SNFW , где SNFW – свободная вода от предыдущего дня) превышает водоудерживающую способность снега, то лишняя вода (SOUTW) стекает:

SOUTW = MAX (0, SMELT + PR + SNFW - SNWC * CSNOW) .

Второй, своего рода подэтап в описываемом блоке модели составляет определение температуры под снежным покровом (TC22). Учитывая приведенные в работе П.П.Кузьмина (1957) формулы, получаем для температуры под снегом (TC22):

TC22 = TCCO(I-LAG) * 10 **(-CSNOW/(3830 * (TPER*SNCON)**0,5));

LAG = IFIX(9,596 * 10**(-4) * CSNOW * (1/SNCON)**0,5) ,

где IFIX означает округление до целого числа и температуропроводность найдена формулой Абельса; TPER – период температурных колебаний; TCCO – температура на поверхности снега; I – индекс суток. Дополнительно принимаем, что если SOUTW > 0, то TC22=0. Алгоритм вычислений в виде упрощенной блок-схемы представлен на рис. 8, а в виде программ для ЭВМ в приложении 4.

3.3. Динамика сезонного промерзания-оттаивания почвы

При отрицательных температурах на поверхности почвы часть содержащейся в почве воды замерзает и образуется слой промерзлого грунта, толщина и свойства которого изменяется в зависимости как от параметров среды, так и от температуры и влажности самой почвы. По вопросу имеется богатая литература (см., на-

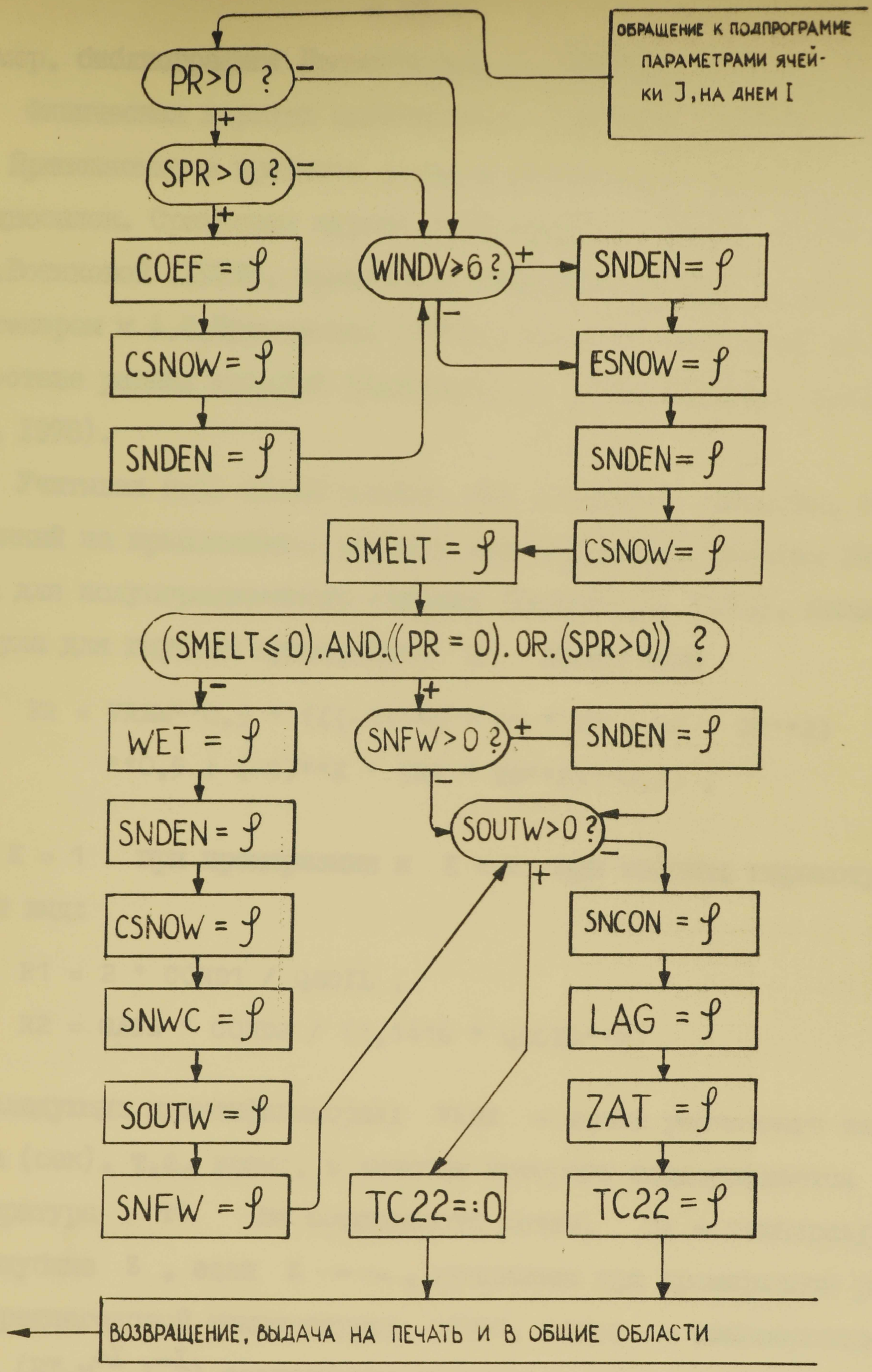


Рис. 8. Блок-схема алгоритма для определения динамики снежного покрова (объяснения к идентификаторам в тексте); вычисление обозначено знаком "f".

пример, библиографию: Промерзание..., 1977).

Физическая картина описываемого процесса достаточно сложна. Применяемые в практике формулы основаны на ряде упрощенных предпосылок. Сравнение широко употребляемых формул приводится Н.И.Вотяковой (1972), применение некоторых формул описано Д.А. Куртенером и А.Ф.Чудновским (1975); имеются реализации на ЭВМ в составе разных моделей (Алгоритм..., 1970; Палагин, Мосейчик, 1978).

Учитывая цель нашей модели, был составлен алгоритм, основанный на приближенном решении задачи Стефана методом Лейбензона для полуограниченного стержня (Основы..., 1974). Явная формула для глубины промерзания FR имеет вид:

```
FR = VREM**0,5 * (((-1)**K * R1 * T1 + R2 * T2**2)
     **0,5 + (-1)**K * (R2 * T2**2)**0,5) ,
```

где K = 1 при промерзании и K = 2 при таянии; параметры имеют вид:

```
R1 = 2 * COND1 / QSOIL ,
R2 = CAPA * COND2 / (3,1416 * QSOIL**2)
```

при следующих идентификаторах: VREM - время расчетного периода (сек), т.е. время, в течение которого поддерживается температура T1 на поверхности почвы. T2 - температура при глубине Z , если $Z \to \infty$, принимаем при промерзании равной среднегодовой температуре; COND1, COND2 - теплопроводность ($Вт.м^{-1}.К^{-1}$) соответственно выше и ниже глубины промерзания; CAPA - теплоемкость ($кДж.кг^{-1}.К^{-1}$) талого слоя; QSOIL - теплота плавления почвы ($кДж.м^{-3}$).

Приведенная выше формула вводится в модель в виде функ-

ции подпрограммы, к которой с соответствующими параметрами обращаются при работе с каждой территориальной ячейкой на каждом шагу времени, в каждой определенной ситуации (см. прил. 4).

Динамику промерзания-оттаивания в условиях неустойчивой эстонской зимы характеризует (особенно осенью и весной) частое изменение направленности процесса, поэтому алгоритм имитации на ЭВМ должен быть достаточно гибкий для работы в разных режимах, способный "помнить" времена и характер изменения граничных условий и т.д.

Для соблюдения требования о постоянстве температуры T1 мы пользуемся в вычислениях кумулятивной средней температурой. При помощи найденной T1 на каждом шагу вычисляется заново FR с новыми параметрами (из-за изменения влажности почвы или уровня грунтовых вод изменяются и другие параметры промерзания кроме T1). Для того, чтобы при изменениях направленности процесса не возникали скачки FR , необходимо запомнить VREM и T1 всех процессов (оттаивание сверху и снизу, промерзание при талых прослоях и без них), а при переходе направленности найти новые VREM и T1 решением обратной задачи с заданными параметрами и FR . Реализация этого приема иллюстрируется блок-схемой (рис. 9).

Параметры в формулах определялись следующим образом. Нами допущено, что теплопроводность COND2 независима от влажности почвы, постоянна для каждого типового горизонта почвы (см. 3.7.2) и определялась по материалам работ (Maaparanduse ..., 1962; Гаврильев, Елисеев, 1970). На основе COND2 определяется в модели COND1 (Палагин, Мосейчик, 1978).

При определении теплоемкости почвы, мы основываясь на нескольких работах (Куртенер, Чудновский, 1969; 1975; Int,

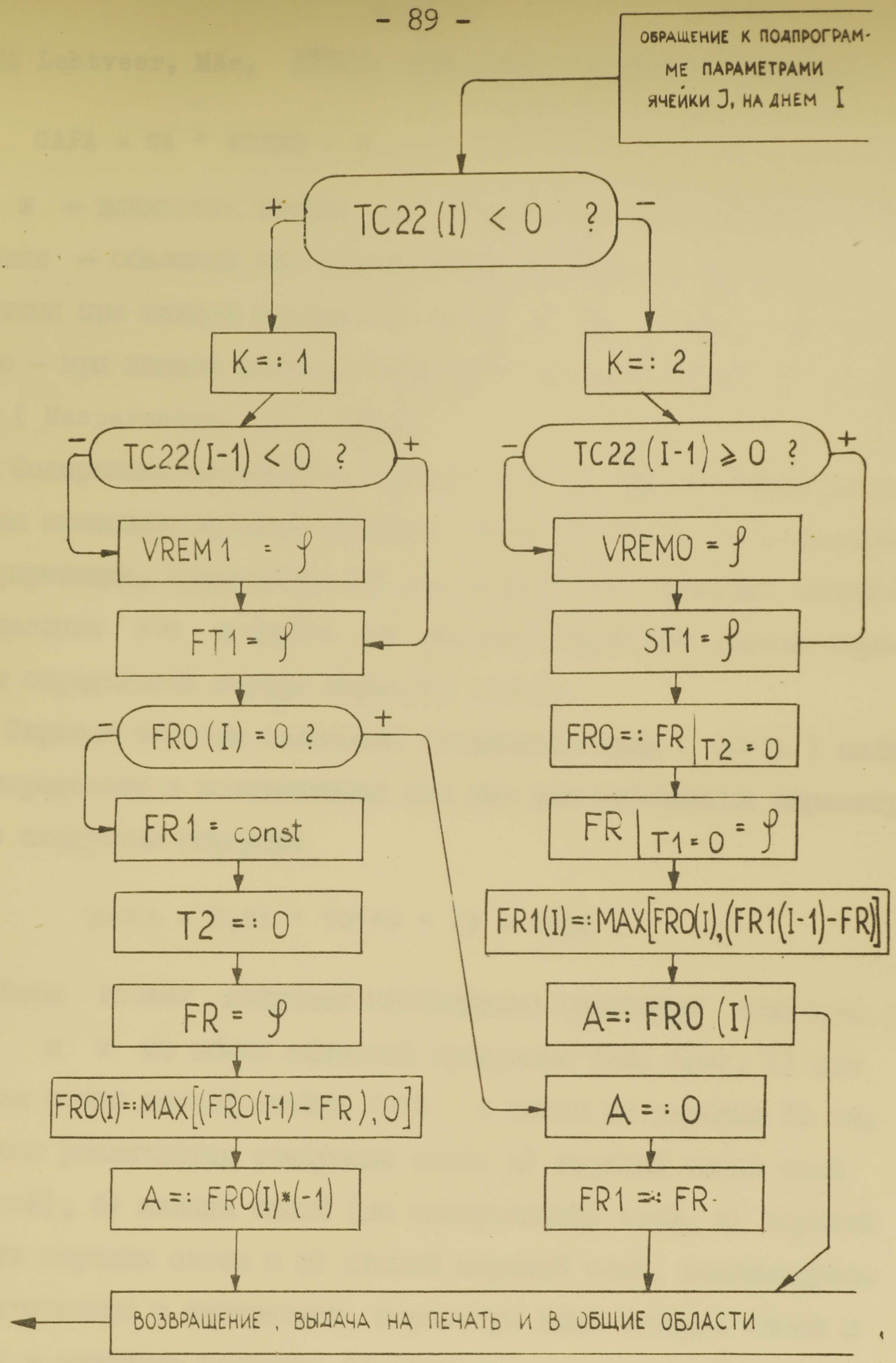


Рис. 9. Блок-схема алгоритма для расчёта промерзания-оттаивания почвы. Ситуация A отмечает при FRO(I) < 0 существование талого прослоя, толщину которого в этом случае маркирует FRO(I).

1970; Lehtveer, Mäe, 1978), применили следующую формулу:

$$CAPA = CA * WDENS + W ,$$

где W - влажность почвы; CA - удельная теплоемкость почвы и WDENS - объемный вес сухой почвы. Последние являются константами при каждой конкретной почвы (у нас в модели соответственно - при каждом типовом горизонте) в зависимости от ее состава (Maaparanduse ..., 1962).

Содержание незамерзшей воды (WNZ) в мерзлой почве описывается экспоненциальными кривыми (рис. 10 и 11). Их упрощенная интерпретация, представленная на рисунке 12, является основой определения WNZ в модели для каждого горизонта (потом параметры осредняются внутри мерзлого слоя).

Скрытая теплота плавления почвенного льда (QSOIL) целиком определяется константными или нам уже известными параметрами по следующей формуле:

$$QSOIL = 3,35 * 10**4 * (W - WNZ) .$$

Блок FROZEN получает необходимые параметры WDENS,PO,CA, COND2 и W из общих областей программы (см. прил. I) для профиля почвы данной ячейки NOTE с шагом по глубине 10 см. В модели различаются следующие слои: а) верхний талый слой (прослой), б) нижний талый (не замерзающий) слой, в) верхний из двух мерзлых слоев и г) нижний мерзлый слой. Комбинируясь в соответствии с алгоритмом, параметры этих четырех слоев и входят в основную формулу. Обратим внимание на то, что на каждом шагу времени эти параметры изменяются и вычисляются заново.

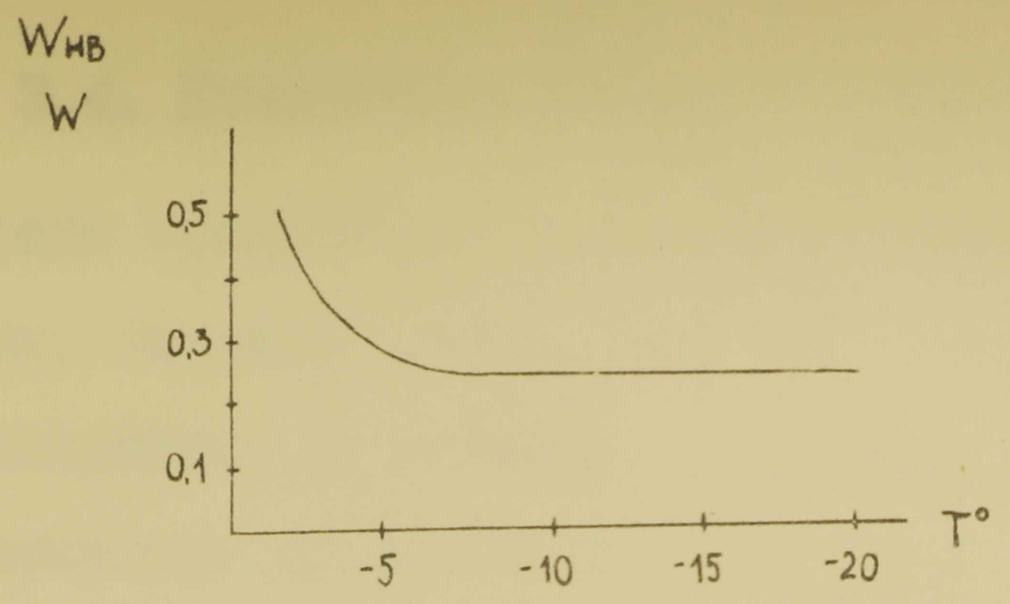


Рис. I0. Зависимость относительного содержания незамерзшей воды в торфе от температуры почвы по данным Гаврильева и Елисеева (I970,с.I44).

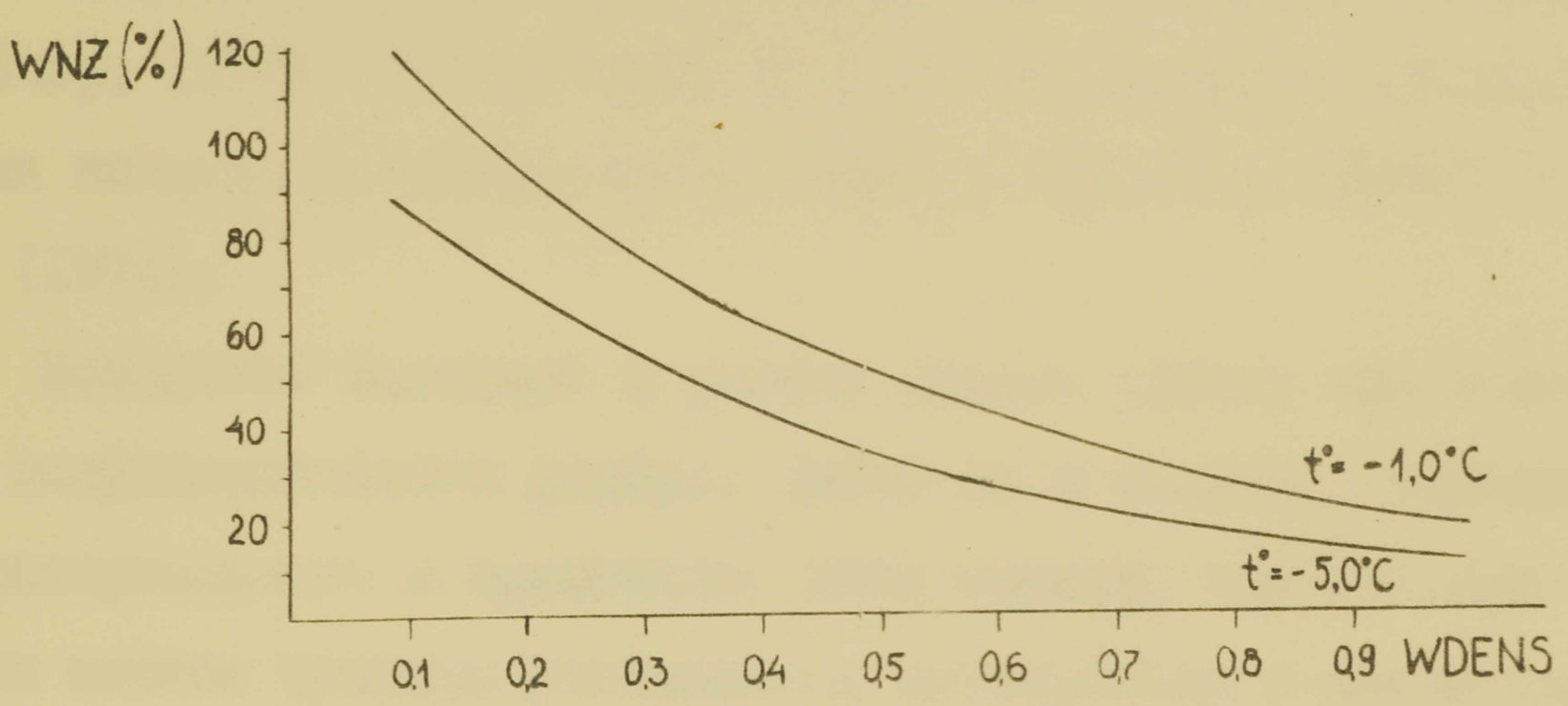


Рис. II. Зависимость содержания незамерзшей воды (в весовых %%) в торфе от объемного веса по формулам Голицыной и Калюжного (I980).

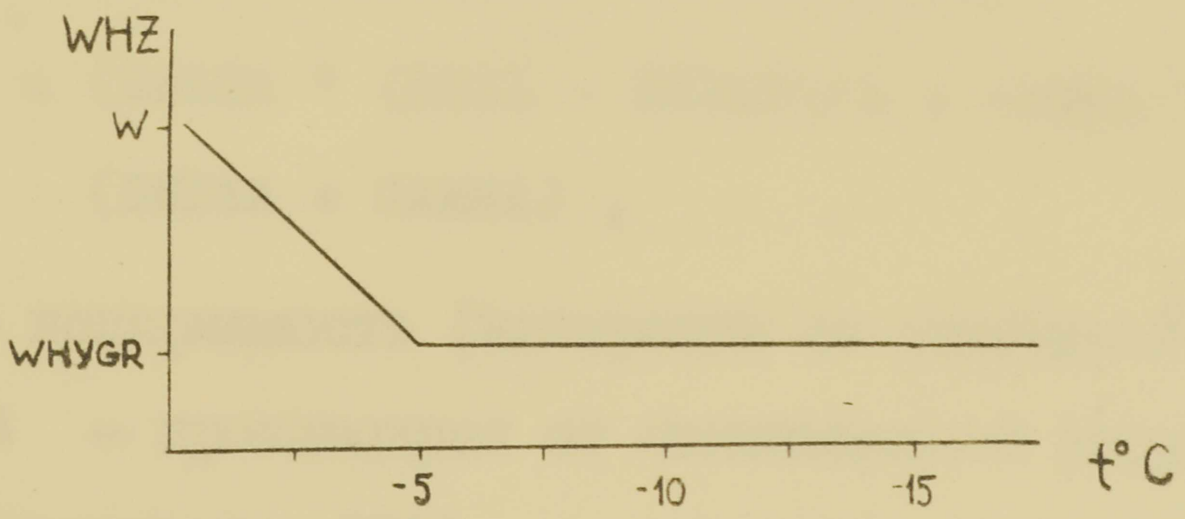


Рис. I2. Объем незамерзшей воды в почве в зависимости от температуры почвы (принято в модели).

3.4. Компоненты суммарного испарения

Важным среди процессов, определяющих круговорот воды в агрогеосистемах, является суммарное испарение, которое охватывает: I) транспирацию, 2) испарение с поверхности почвы, 3) испарение с поверхности растительного покрова (РП) и 4) испарение из почвы. Доля каждого компонента зависит от характера испаряющей влаги поверхности и от характера хода метеоэлементов.

По разным способам определения суммарного испарения имеется подробная литература (например работы Будаговский, I964; Слейчер, I970). Для условий Эстонии эмпирические формулы испарения найдены Э.М.Ольдекопом (I9II), В.Таммом (I972) и П.Карингом (I974).

Испарение включено в разные модели обычно при помощи разных полуэмпирических формул. Выбор их в основном зависит от территориального и временно́го шага модели, так как при осреднении многие факторы учитываются интегрально и расчетные формулы упрощаются. Мы использовали формулу Пенмана (Penman, I948), которая позволяет вычислить испарение со свободной водяной поверхности на основе стандартных метеоданных:

$$EWET = (DELTA * (RBAL - BHEAT)/L + GAMMA * ATP) / (DELTA + GAMMA),$$

где EWET – испаряемость (испарение со свободной поверхности воды); DELTA – производная от максимальной упругости водяных паров по температуре; RBAL – радиационный баланс; BHEAT – поток тепла в почву (нашли на основе работ Инт, I97I; Инт, Каринг, I973); L – скрытая теплота парообразования; GAMMA – психрометрический констант (для преобразования единиц); ATP – возможность атмосферы удалить водяные пары, определился по

Рийтема (Rijtema, I965):

$$ATP = 0{,}182 + WINDV + HUMD ,$$

где WINDV – скорость ветра (м/с); HUMD – дефицит влажности воздуха ($I0^2$Па).

Потенциальная транспирация (на основе работ: Wijk, Vries, I954; Rijtema, I966; I968; I970; Monteith, I973) вычислялась в виде:

$$ET = A * ETP ,$$

где A – редукционный параметр, зависящий от условий температуры, почвенной влаги и других факторов, определяющих транспирацию как физиологический процесс; ETP – испаряемость с поверхности, имеющей свойства для испарения, одинаковые с растительным покровом.

$$ETP = EWET - 0{,}18 * DELTA * RQ / (L * (DELTA + GAMMA)) + GAMMA * WINDV * HUMD * (FRGH - 0{,}182) / (DELTA + GAMMA) ,$$

где RQ – суммарная коротковолновая радиация; FRGH – функция шероховатости РП, FRGH = G * H ; G является функцией высоты РП (рис. I3), а H – скорости ветра (рис. I4). Редукционный фактор:

$$A = (DELTA + GAMMA) / (DELTA + GAMMA * (1 * FRGH * R)) ,$$

где R – кажущееся сопротивление к диффузии (apparent diffusion resistance; Rijtema,I965); упрощенно: R = RC + RL + RP. RC зависит от проективного покрытия почвы (рис. I5) и равняется нулю, когда доля РП менее 0,I. RL зависит от интенсивности радиации (рис. I6) и равняется нулю, когда RQ $\geq$ 0,265 кВт/м^2. RP зависит от потенциала почвенной влаги и при вычислении по-

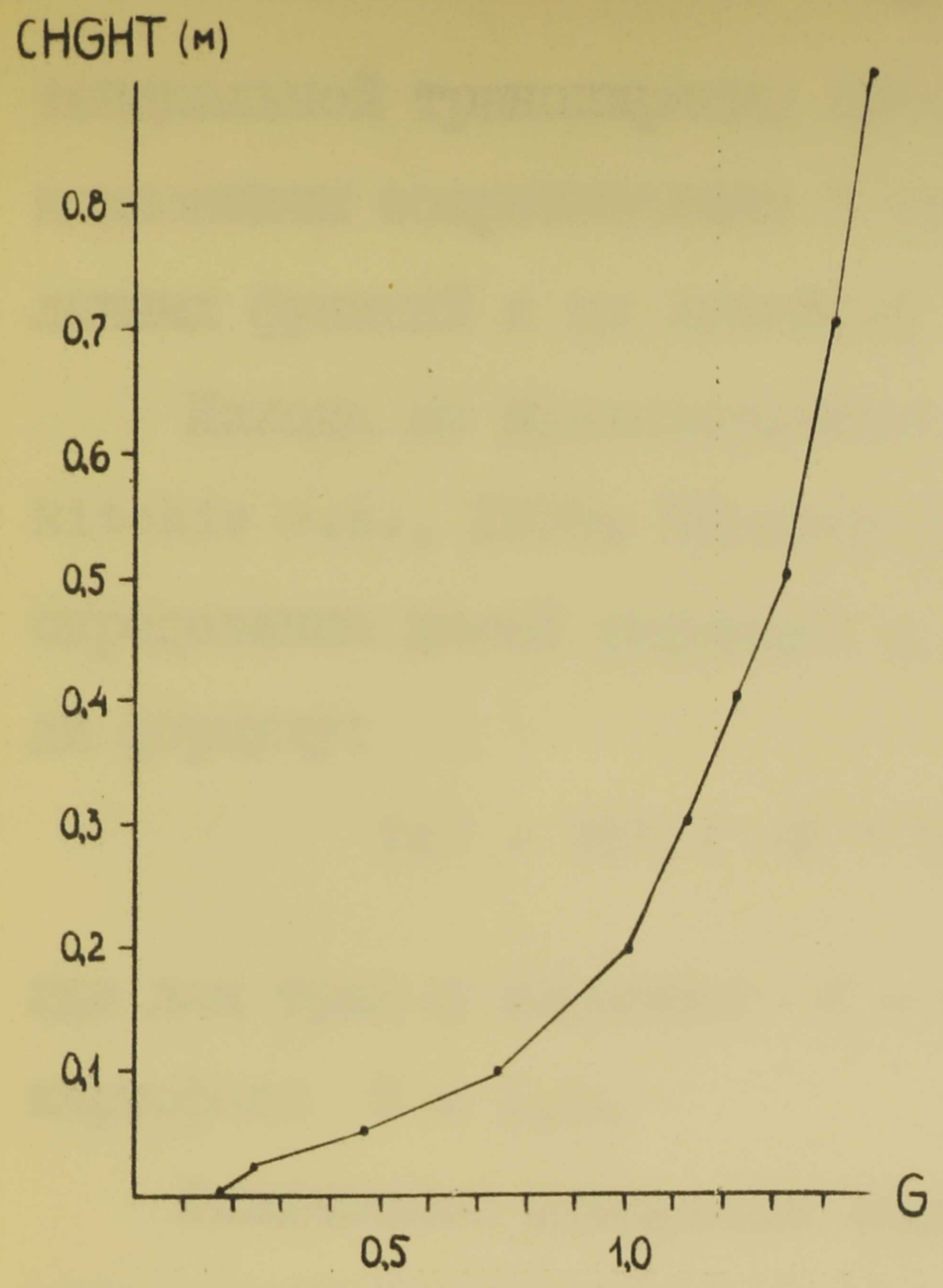


Рис. I3. Зависимость G от высоты растительного покрова (CHGHT)+.

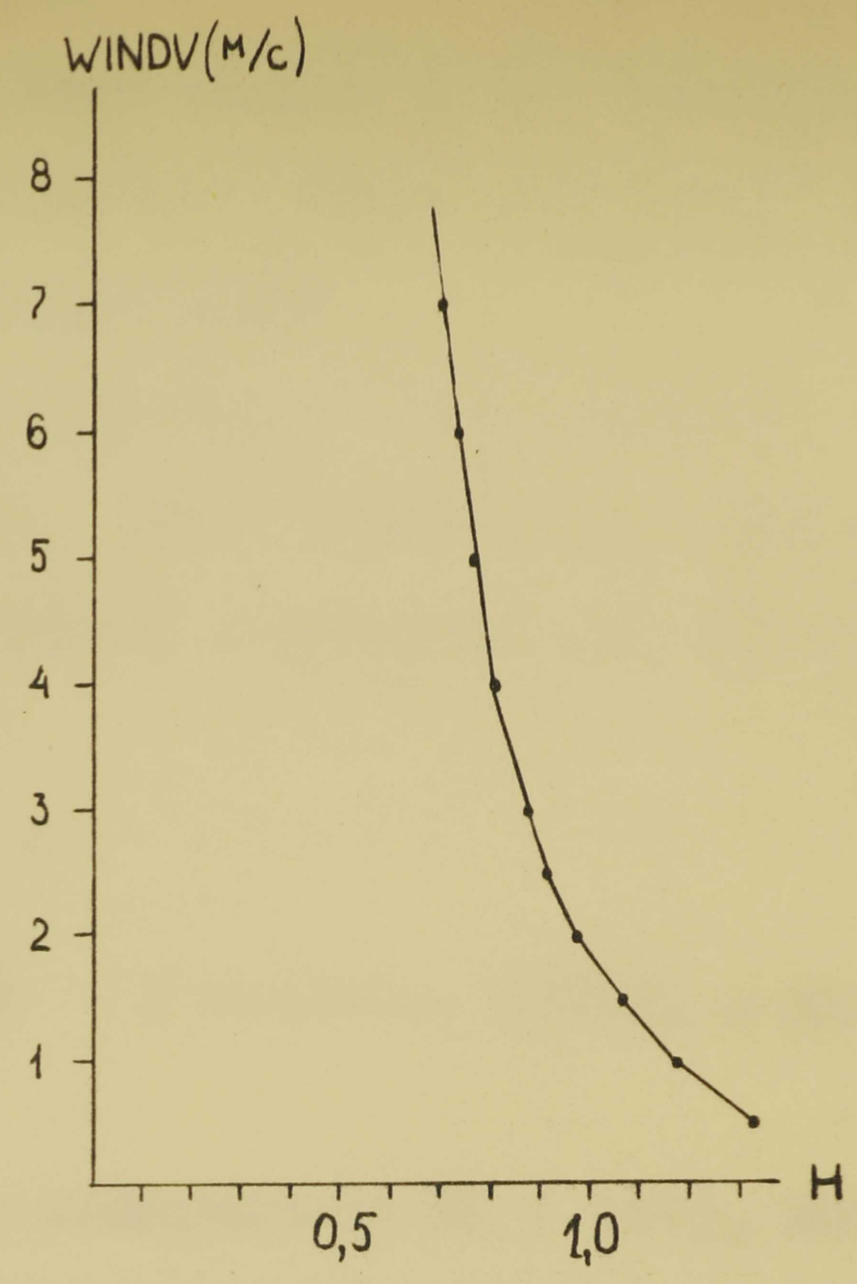


Рис. I4. Зависимость H от скорости ветра (WINDV);

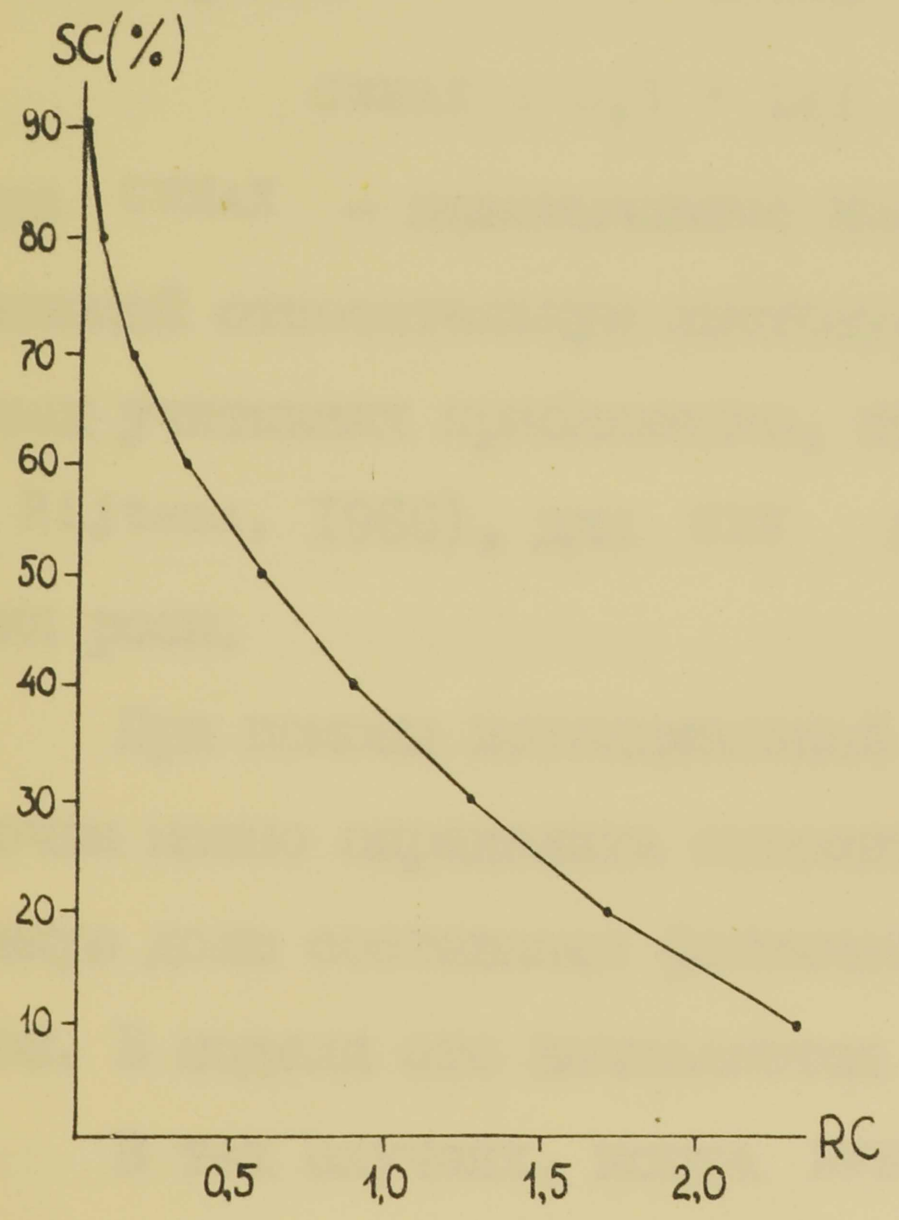


Рис. I5. Зависимость RC от проективного покрытия растительности (SC).

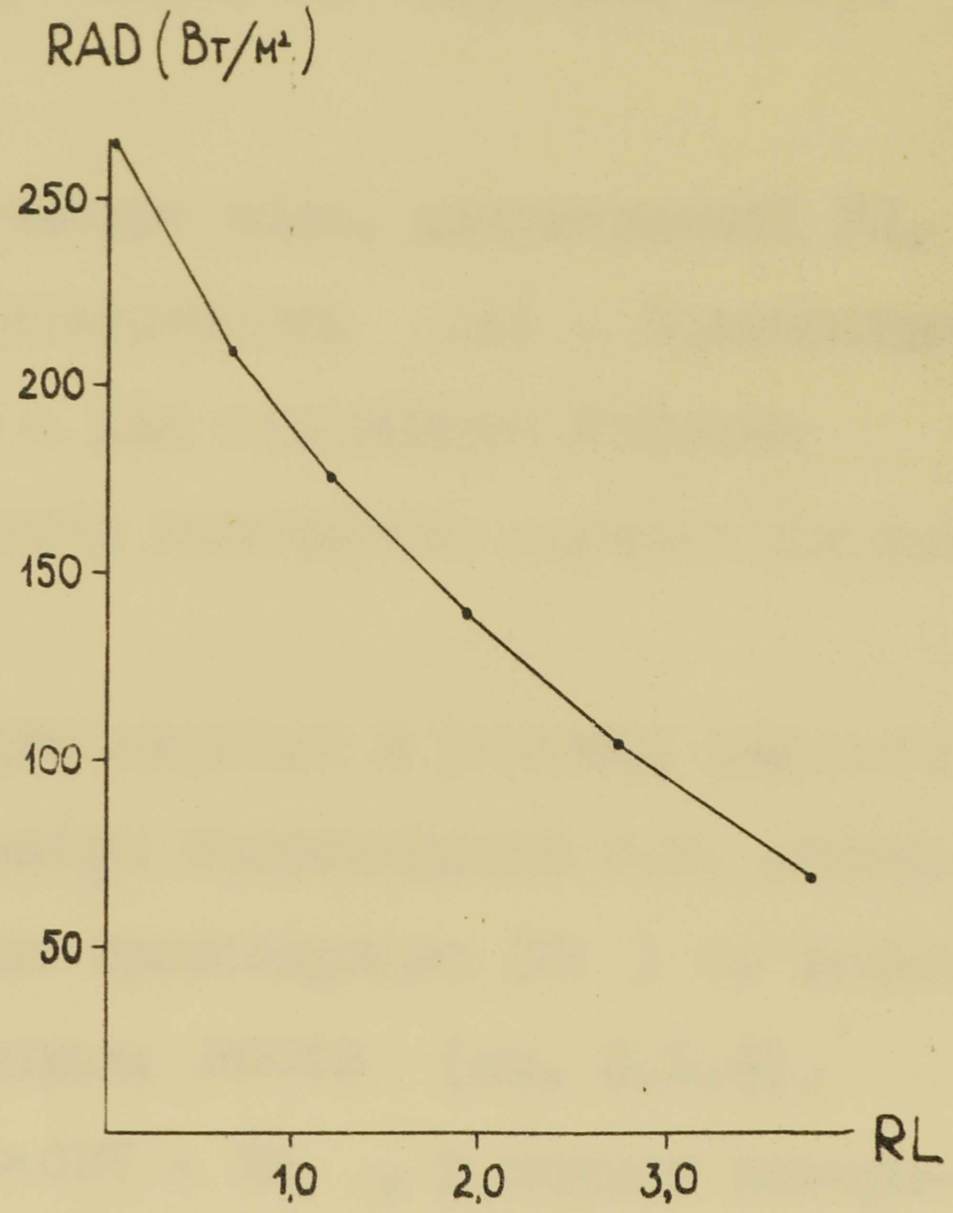


Рис. I6. Зависимость RL от интенсивности прямой радиации (RAD).

+Рисунки I3-I6 составлены по материалам работы Rijtema,1968.

тенциальной транспирации принят нами равной нулю. Названные компоненты сопротивления к транспирации найдем при помощи табличных функций и их линейной экстраполяции.

Исходя из представленных в литературе (Росс, I975; Ritchie e.a., I976; Нильсон и др., I977) зависимостей мы для определения долей радиации и осадков, полученных РП, применяли формулу:

$$TAU = EXP (-K * LAI) ,$$

где для трав и зерновых $K = 0,4$ (Ritchie, I972), а для картофеля $K = I,0$.

Физическое испарение воды с поверхности РП (CEV), которое - уменьшая транспирации - формируется из осадков, задержанных РП, и из росы, образовавшей на поверхности РП, принято (на основе работ Rijtema, I966; Сиротенко, Просвиркина, I979):

$$CWMAX = 0,1 * LAI ,$$

где CWMAX - максимальное количество воды, удерживаемой РП, имеющей относительную листовую поверхность LAI . Количество росы учитывали приближенно, ибо - как показывает Рийтема (Rijtema, I966), для CEV важнее количество случаев появления росы.

При помощи потенциальной транспирации и условий влажности почвы можно определить относительную транспирацию т.е. узнать, какую долю составляет фактическая транспирация (TR) от возможной. В модели это вычисляется блоком ROOTS (см. 3.5.4).

В тех случаях, когда $EWET > CEV + TR$, в модели испаряется оставшаяся еще на поверхности почвы свободная вода, а после этого происходит испарение из почвы (SEV), но уже в рамках постулата, что суммарное физическое испарение не больше

испаряемости.

При учете испарения из почвы на основе ряда моделей (Ritchie, I972; Hanks, I974; Kanemasu e.a., I976; Optimizing ..., I977; Rosenthal e.a., I977; Hill e.a.,I978) применен подход, при котором после последнего смачивания почвы испарение из нее SEV равняется максимально возможной до испарения определенного количества воды, а дальше до следующего смачивания SEV уменьшается по экспоненциальному закону.

Подробное описание подпрограммы ISPAR дано в приложении 4.

3.5. Продукционный процесс растений

Формирование урожая - это сложный процесс, при изучении которого географ должен понимать и учитывать биологию процессов, но одновременно он вынужден пойти на определенные упрощения, от целесообразности которых зависят географические результаты исследований. Упрощенный для нужд последующего математического моделирования продукционный процесс отдельного, т.н. среднего растения представлен в виде блок-схемы на рисунке I7. Подробная библиография о работах по моделированию на основе подобных схем приведена в монографии Х.Г.Тоомингa (I977) и в коллективной монографии эстонских биогеофизиков (Бихеле и др., I980).

Исходя из целей моделирования и степени агрегированности нашей модели, биоблок должен быть способным отражать динамику нескольких разных сельскохозяйственных культур для того, чтобы - помимо агрометеорологических - решать и географические задачи. Встречаемое на польдере все разнообразие культур от-

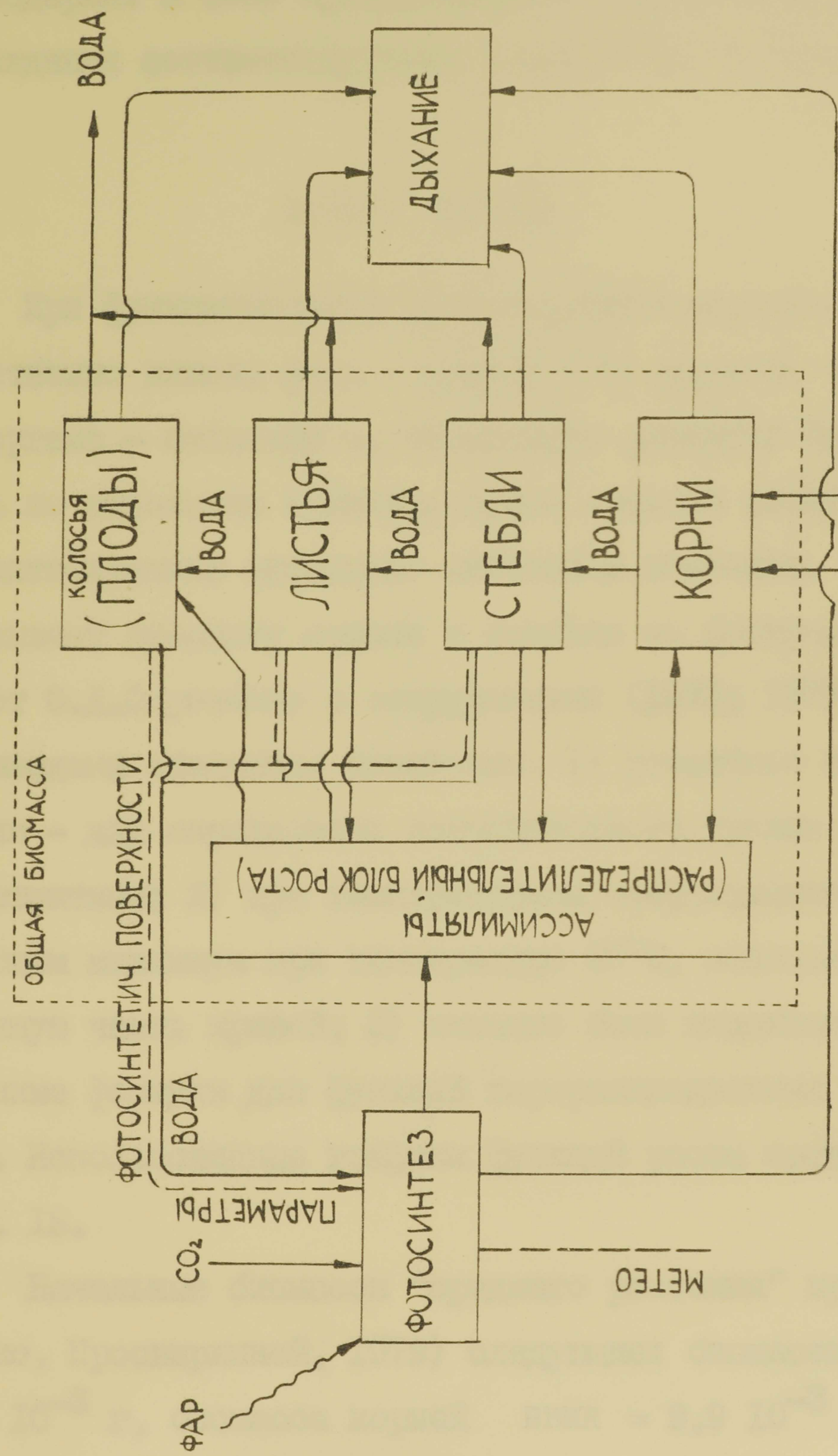


Рис. I7. Упрощенная блок-схема продукционного процесса злакового растения.

дельно моделировать нам по объему работы, очевидно, не под силу, да и не нужно. Мы выбирали три по нашему мнению главных типа культур: яровые зерновые, многолетние травы и пропашные культуры. Расширение и детализация списка моделируемых культур не содержит в себе принципиальных трудностей, требует только нахождения соответствующего эмпирического материала.

3.5.I. Ячмень

При функциональном моделировании зерновых, у которых хозяйственно важная доля - урожай - составляет часть определенного органа - колосьев -, необходимо динамику биомассы рассматривать по отдельным органам. Кроме листьев следует учитывать фотосинтетический потенциал стеблей и колосьев. Подблок зерновых описывает динамику ячменя и основан на биопродукционной части работ О.Д.Сиротенко с сотрудниками (I973; I977; I979). Нами были введены следующие изменения: I) устьичное сопротивление диффузии - для определения потенциального урожая - было принято константным; 2) при температурном коэффициенте фотосинтеза, имеющим максимум при температуре 27°С, использовали только восходящую часть кривой; 3) немного были видоизменены аппроксимационные формулы для функций перераспределения старых ассимилятов. Использованные графики функций роста представлены на рис. I8.

Начальные биомассы "среднего растения" приняты (по Сиротенко, Просвиркиной, I979) следующие: биомассы листьев BBML= $3{,}6\ 10^{-3}$ г, биомасса корней BBMR = $9{,}9\ 10^{-3}$ г, биомассы стеблей и колосьев - нулевые.

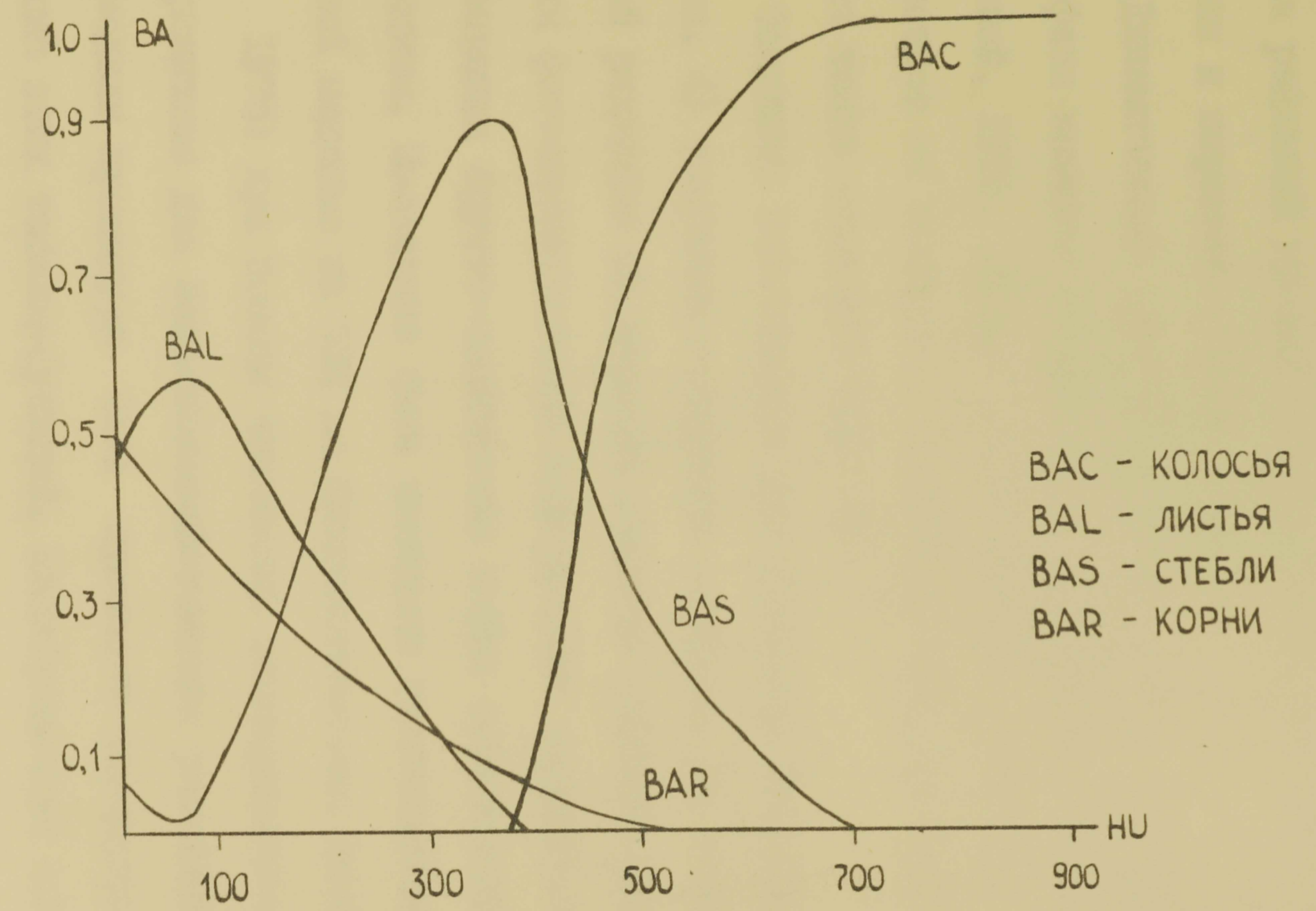


Рис. I8. Ростовые функции распределения свежих ассимилятов ячменя (BA) в зависимости от суммы активных температур (HU), считанных от дня появления всходов; по Сиротенко и Просвиркиной (I977,с.24).

3.5.2. Картофель

Картофель наиболее соответствует требованиям монокультуры. У него как отличительная сторона большое значение имеет отток старых ассимилятов из других органов в клубни. В условиях Эстонии на реальный урожай конкретного года сильно влияют также заморозки и поражение фитофторой.

Динамическая функциональная модель формирования урожая картофеля имеется в Институте Экспериментальной Метеорологии (Полевой, I978, I979), но отсутствие у нас численных значений параметров не позволило применять эту модель; заметными оказываются также сортовые различия.

Основные зависимости для подблока картофеля (остальные см. в прил. 4) получены следующим образом. На основе интенсивности прямой радиации на верхней границе растительного покрова и величины фотосинтетической поверхности определяли интенсивность образования брутто-количества новых ассимилятов по таблицам-функциям. Последние были выведены голландскими учеными имитационной моделью на ЭВМ по физиологическим данным пшеницы (Keulen, I975) при помощи численных экспериментов как практически инвариантные для сельскохозяйственных растений C_3-типа. В нашей модели процедура HGRA проводит двумерную линейную интерполяцию этих таблиц-функций. Калибровочный коэффициент к интенсивности фотосинтеза, полученный при помощи подобных таблиц-функций, интегрально учитывает различия в архитектонике растительного покрова и в коэффициентах поглощения ФАР для листьев. Эти различия имеют сезонный ход и поэтому поправочный коэффициент (EFFP) к интенсивности фотосинтеза должен отражать этот ход. Точные значения EFFP для картофеля мы определяли в ходе

численных экспериментов.

Темновую фиксацию CO_2 не учитывали. Дыхание определили по подходу Маккри; численные параметры получены из работы Бихеле и др. (I980), температура наземной биомассы считалась равной температуре воздуха.

Процессом распределения новых ассимилятов управляют в модели функции роста, представленные в ЭВМ в виде табличных функций, графики которых изображены на рисунке I9. Перераспределение старых ассимилятов состоит из оттока органического вещества из листьев, стеблей и корней в клубни в конце онтологического развития картофеля. Введены следующие формулы:

```
FOA(J) = A(J) * 10**(-4) * BM(J) * TB(J) ,
```

где FOA(J) – перераспределение старых ассимилятов из J -го органа; коэффициенты A(J) получены из работы А.Н.Полевого (I979) и составляют для листьев и корней A(J)=3 , для стеблей A(J) = 4 ; BM(J) – биомасса J -го органа. TB(J) – температура J -го органа, который для всех J принимаем равной температуре воздуха.

Для определения фотосинтезирующей площади используем переходные коэффициенты удельной поверхности листьев, найденные нами экспериментально (см. рис. I6). Поверхностную площадь стеблей не учитывали.

Конец вегетации у картофеля выражается в завядании ботвы и в оттоке части ассимилятов из листьев и стеблей в клубни. При болезнях, например, при фитофторе процесс происходит раньше, постепеннее, часто искаженно.

В модель сроки конца фотосинтетической деятельности листьев и завядании ботвы вводится как заданные значения. Уменьшение

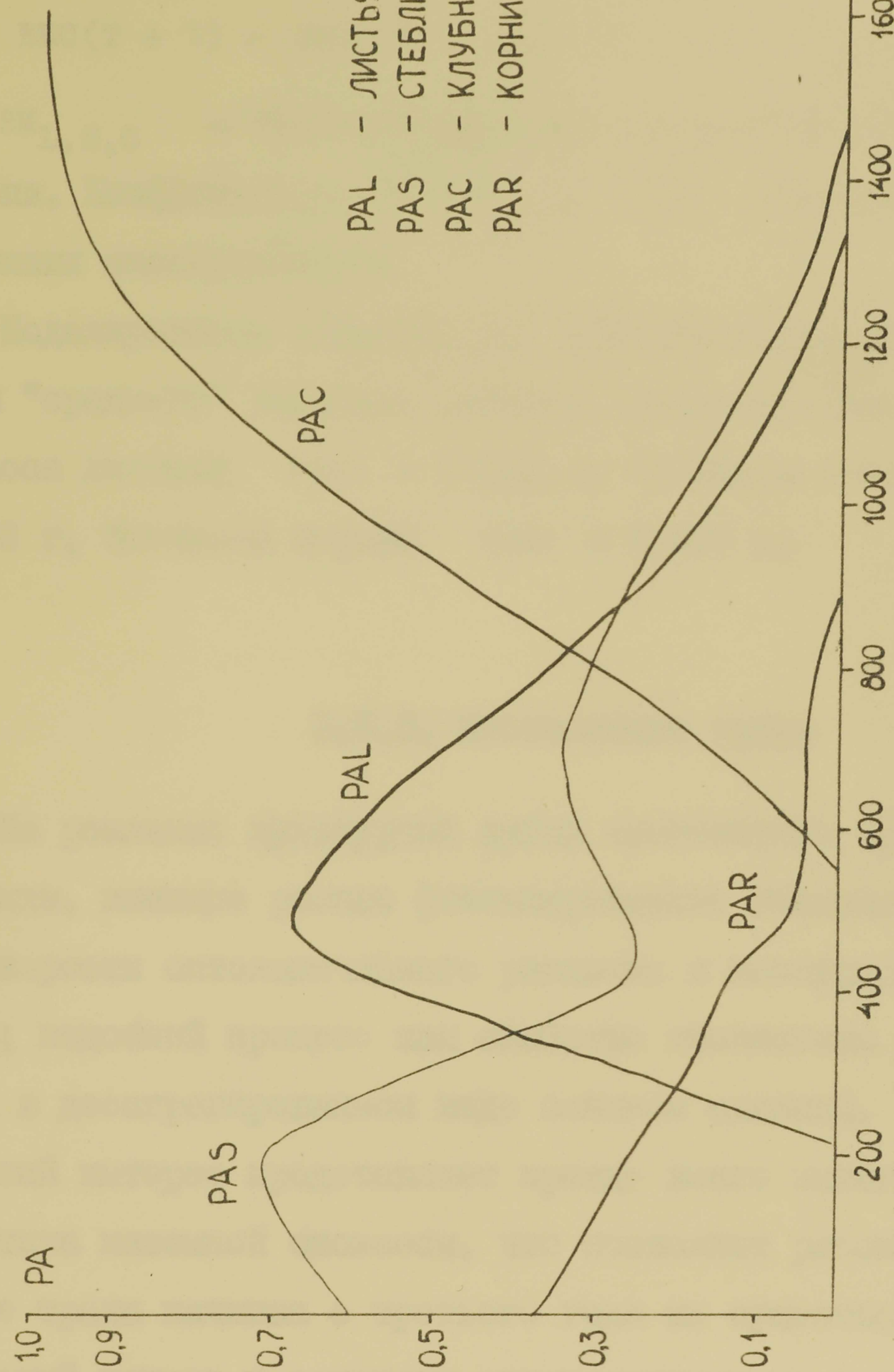


Рис. I9. Ростовые функции распределения свежих ассимилятов картофеля "Сулев" (РА) в зависимости от суммы послепосевных среднесуточных температур воздуха (THU); по: Программирование..., I978, с.II4 (пересчёт на THU сделан Ю.Сеппом).

биомассы листьев и стеблей и увеличение биомассы клубней происходит после вышеназванных сроков следующим образом:

$$D_{L,S} = \text{ОТТОК} * BM_{L,S} ;$$

$$BM_{L,S}(T + 1) = BM_{L,S}(T) - D_{L,S} ;$$

$$BMC(T + 1) = BMC(T) + \text{ZAVYA} * (D_L + D_S) ,$$

где $BM_{L,S,C}$ – биомассы листьев, стеблей и клубней, T – шаг времени. Коэффициенты ОТТОК и ZAVYA уточнялись во время численных экспериментов.

Моделирование начинается с момента появления всходов, параметры "среднего" растения приняты следующие (Полевой, I979): биомасса листьев PBML = 0,523 г, биомасса стеблей PBMS = =0,I58 г, биомасса корней PBMR = 0,600 г.

3.5.3. Многолетние травы

На реальных культурных лугах многолетних трав растут разные виды, имеющие разные фитометрические показатели, неодинаковые скорости онтологического развития и конкурирующиеся между собой; подобный процесс как свойство геосистемы для моделирования в десагрегированном виде слишком сложный. К счастью практический интерес представляет прежде всего интегральная характеристика наземной биомассы, что позволяет рассматривать многолетние травы начиная с третьего года их существования как растительный покров в основном стационарными из года в год параметрами. Для благоустроенных культурных лугов правомерно предполагать субоптимальность травосмеси (поле деятельности луговедения) и безконфликтную видово-возрастную структуру расти-

тельного покрова, позволяющей моделировать последнего как монокультуру.

Основной отличительной чертой подблока многолетних трав является изменение эффективности фотосинтетического аппарата из-за периодических косьб. Своевременное кошение позволяет ограничиваться рассмотрением только вегетативного развития трав.

Из литературы нам не удалось найти модели, которая могла бы быть включена в биоблок в качестве подблока многолетних трав. Близкая к нашим требованиям модель Карри (Curry, I969; Curry, Chen, I97I), но для реализации на ЭВМ недостает материалов об этой модели, в особенности для учета онтологического изменения ряда показателей.

Поэтому приходилось подблок для многолетних трав, в особенности в его ростовой части, создавать по частям самому автору. В основу легли материалы многолетних исследований Эстонской Агрометеорологической Лаборатории и Эстонского НИИ Земледелия и Мелиорации (Каринг, I970; I973; I974; Мяэталу, I97I; I974; Мяэталу, Каринг, I972; Тоомре, Рааве, I974; Каринг, Мяэталу, Лийв, I977; Олдер, Линнутая, I977; Тооминг, Каринг, I977; Mäetalu, Karing, I979), а также материалы по луговым растениям (Алексеенко, I976; Справочник..., I966; Устименко, Данильчук, Гвоздиковская, I975 и др.). Введенные в модель на основе качественных рассуждений параметры были уточнены в ходе численных экспериментов. Культурой была выбрана тимофеевка луговая, для которой имелись экспериментальные фитометрические данные в условиях оптимального водного режима и минерального питания.

Интенсивность фотосинтеза получена при помощи тех же таблиц-функций, которые мы использовали для подблока картофеля.

Калибровочный коэффициент (т.е. способность листьев к фотосинтезу, или интегральный коэффициент эффективности фотосинтеза трав - EFFG) связан с биологическим ритмом развития. В фазе генеративного роста эффективность фотосинтеза у трав падает. В режиме периодических скашиваний, когда наземная часть трав убирается в конце периода вегетативного роста, эффективность работы фотосинтетического аппарата по всей видимости падает таким образом, что после каждой косьбы восстановление листовой поверхности и образование новых ассимилятов происходит медленнее чем раньше. На основе этого коэффициент EFFG в модели изменяется дискретно после каждого кошения.

Дыхание определялось аналогично картофелю. Рост был разделен на два периода. Первый характеризуется слабостью фотосинтеза из-за маленькой фотосинтетической площади, и перераспределением старых ассимилятов: наземная фитомасса увеличивается за счет веществ, запасенных в корни, плети и в основания стеблевых побегов (в галлокормы) веществ. Этот процесс весной лимитируется температурой почвы. Летом скорость перераспределения старых ассимилятов после каждой косьбы по-видимому становится ниже предыдущей.

Второй период характеризуется интенсивным вегетативным ростом наземной массы и распределением новых ассимилятов в корни таким образом, чтобы были восстановлены вещества, взятые на первом периоде из корней; также в корни поступает свежее вещество взамен корневого опада и гелеобразных выделений корней (Самцевич, I966). Первый период переходит во второй при индексе листовой поверхности I,5-2,0 $м^2/м^2$ (Mäetalu, Karing, I979). Критерием в модели был принят I,75.

Таким образом, формула для перераспределения старых (за-

пасенных) ассимилятов FOAG :

$$FOAG = \begin{cases} 0, & \text{если } TSOIL < 3{,}5^{\circ} \text{ или } LAI > 1{,}75; \\ CFOAG * BMR * TSOIL / (NMOW + 1), \end{cases}$$

где CFOAG - коэффициент интенсивности перераспределения старых ассимилятов; NMOW - количество проведенных скашиваний.

Формулы для распределения новых ассимилятов:

$$GAR = MAX\ (0\ ;\ CGAR + (1 - BMR / BMRO))\ ;$$

$$GAC = MAX\ (0\ ;\ 1 - GAR)\ ,$$

где GAR и GAC - ростовые коэффициенты (функции роста) подземной и наземной фитомасс; CGAR - постоянная корневого опада и корневых выделений; BMRO - первоначальная (в начале вегетационного периода рассматриваемого года) подземная биомасса.

Площадь фотосинтетической поверхности определяется при помощи удельной поверхности наземной фитомассы (GLSDI):

$$LAI = BMC * GLSDI\ ,$$

где BMC - наземная фитомасса.

Следует обращать внимание на то, что GLSDI для всей наземной фитомассы связана с удельной поверхностью листьев весьма сложным образом и интегрально отражает также структуру растительных органов в наземной фитомассе. Мы пользуемся графиком (рис. 20), полученным на основе экспериментального материала, изложенного в работе (Mäetalu, Karing, I979).

Кривая удельной поверхности (GLSDI) связана с онтогенетическим развитием растительного покрова посредством биологического времени, которое мы аппроксируем (как при ячмене и картофеле) суммами активных температур. Конец вегетации осенью в модели определяет день, среднесуточная температура которого ниже нуля.

При косьбе убирается не вся наземная биомасса; оставшаяся часть имеет определенную фотосинтетическую площадь. Наблюдения на польдере Тамме показали, что оставшаяся часть биомассой 110-130 г/м^2 имеет фитоплощадь 1,0-1,2 м^2/м^2.

Подземная биомасса многолетних трав варьирует в значительных пределах. Опытами Р.Тоомре и Л.Рааве (1974) показано, что в условиях Эстонии нет никакой закономерной связи между массой корней и типом травостоя или способом его использования. Основным фактором, определяющим массу корней луга, является содержание в почве элементов минерального питания. При хорошей обеспеченности трав с начала их жизни питательными веществами соотношение сухой массы наземных частей и массы корней обычно равно от 1/1,5 до 1/3, причем биомасса корней составляет от 900 до 1500 г/м^2. При низком уровне минерального питания масса корней может достигать до 5000 г/м^2. В опытах с тимофеевкой биомасса корней на третьем году вегетации составляла 1120-1750 г/м^2 (Mäetalu, Karing, 1979).

Начальная биомасса корней в модели была приравнена 1500 г/м^2. Чувствительность урожая к этому параметру проверялась в ходе численных экспериментов. Начальная наземная биомаса весной в модели была нулевая.

3.5.4. Параметры корней и водопотребление растений

Целью этой части модели, выполняемой блоком ROOTS , является: 1) определение распределения корней по глубине при данной культуре с данной биомассой; 2) определение распределения по глубине той части влаги почвы, которая расходуется

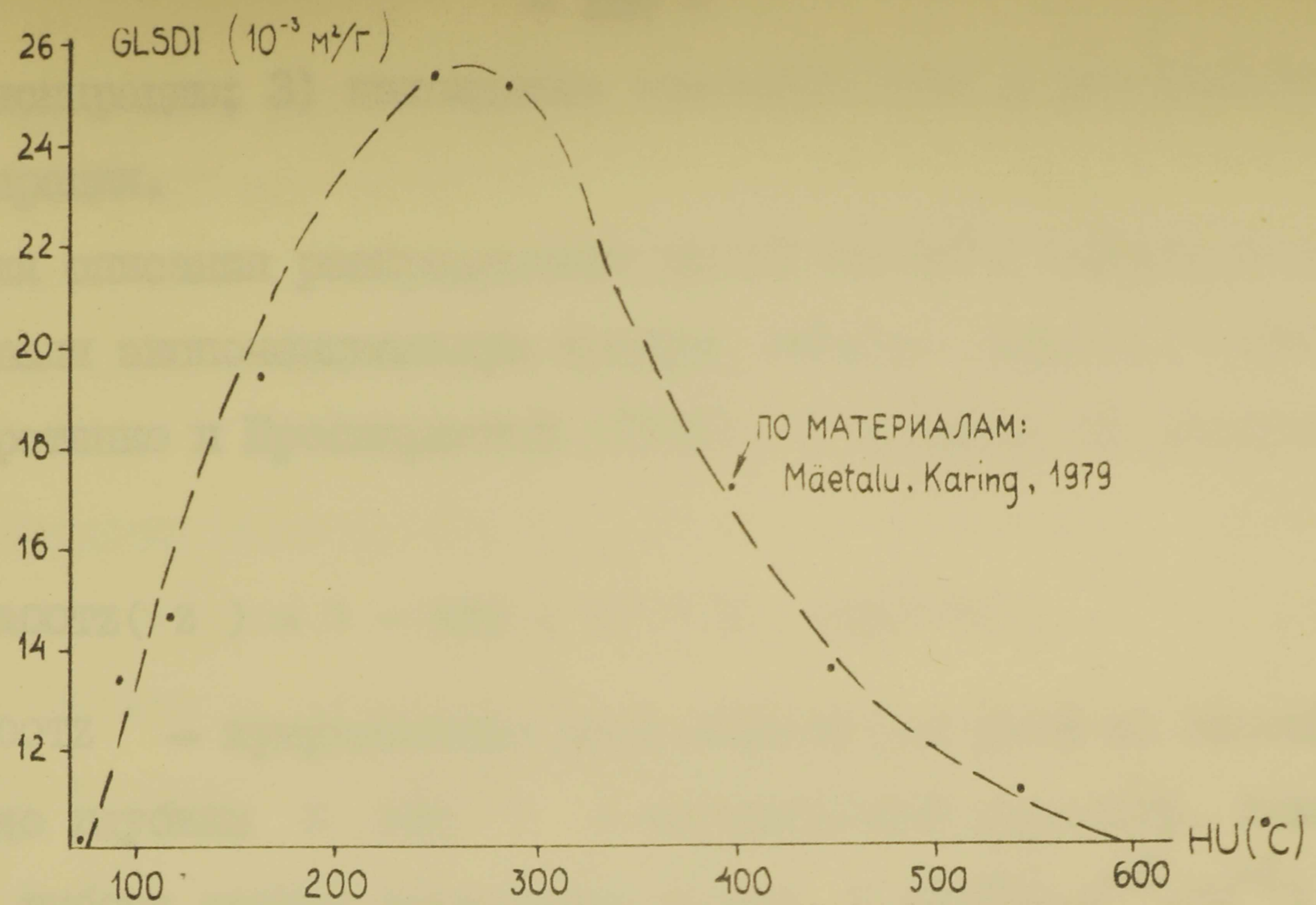


Рис. 20. Динамика удельной поверхности наземной фитомассы тимофеевки луговой при оптимальном режиме увлажнения и уравновешенном минеральном питании; HU - сумма активных температур.

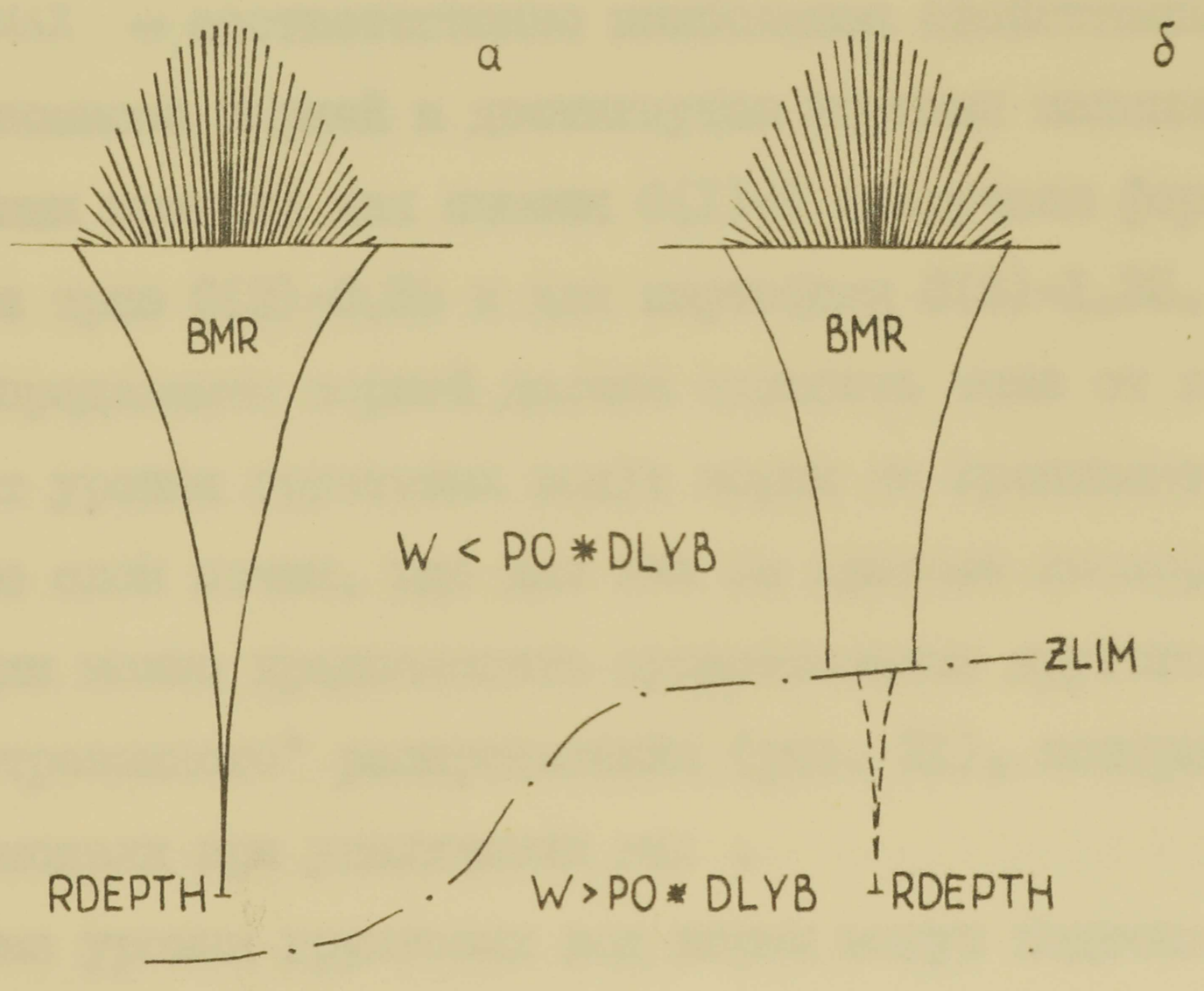


Рис. 2I. Формы распределения корней в зависимости от уровня грунтовых вод: а)влажность почвы (W) не ограничивает и б)влажность ограничивает максимальную глубину корневой зоны (RDEPTH) при экспоненциальном распределении корней.

:а транспирацию; 3) нахождение относительной и фактической :ранспирации.

Для описания распределения массы корней с глубиной мы ис-ользовали экспоненциальную кривую, обобщая формулу, применен-ую Сиротенко и Просвиркиной (I979), и придавая ей следующий вид:

$$ROOTZ(Z) = 1 - EXP(-B * Z / BMR^{**}C),$$

где ROOTZ – кумулятивная доля корней (от всей их массы) в почве до глубины Z см; B – эмпирический параметр, зависящий от выбора единиц измерения, у нас $B = 3{,}75 г.м^{-2}.см^{-1}$; BMR – биомасса корней ($г/м^2$); C – параметр вида растения, введенный нами. Этот параметр выбирался на основе равенства:

$$RMAX^{**}C = ZMAX,$$

где RMAX и ZMAX – соответственно наибольшая свойственная данному виду биомасса корней и достигнутая корнями максимальная глубина. Нами принят: для ячменя C(I)=I (получаем формулу Сиротенко), для трав C(2)=0,58 и для картофеля C(3)=I,35.

Форма распределения корней должна зависеть тоже от влажности почвы (от уровня грунтовых вод): корни не проникают в слишком влажные слои почвы, где для них не хватает кислорода. В такой ситуации можно предполагать существование другого, своего рода "отрезанного" распределения (рис. 2I), который учитывается в модели при увеличении BMR .

При подъеме уровня грунтовых вод корни могут подтопляться. В таких условиях у корней возникает голод кислорода, что приведет – как показывают опыты (Свердлова, I976а,б) – после кратковременного увеличения к уменьшению транспирации и далее к гибели корней. В модели мы принимаем, что если при подъеме

уровня грунтовых вод разница между фактическим RDEPTH и ZLIM будет больше I0 см, то биомасса корней подтопленного слоя уменьшается на I0%. Последнее соответствует вымиранию определенной части корней, которое влияет на ход биологических процессов.

Найденные вышесказанным образом доли корней в каждом слое почвы лежат в основе определения действительной транспирации (TR) и влажности почвы (W).

Как известно из литературы (Denmead, Shaw, I962; Будаговский, I964; Monteith, I973; Гильманов, I978 и др.), сравнительно инвариантным в отношении к второстепенным факторам является зависимость между относительной транспирацией (TR/ET) и относительной доступности почвенной влаги (рис. 22). Правда, место критических точек W_1 и W_2 зависит от потенциальной транспирации - чем выше потребность к транспирации, тем доступнее должна быть почвенная влага (рис. 23). W_3 по-видимому зависит в некоторой мере от температуры почвы. Влияние избыточной влажности на транспирацию гораздо меньше изучено (вид этой части кривой определен по Б.С.Маслову, I970, с. 72).

В модели мы применяем такие кривые в кусочно-линейном виде для к а ж д о г о с л о я (NZ) почвы, что позволяет индивидуализировать критические точки (рис. 24).

Следует обращать внимание на то, что суммированием по кривых, подобных представленной на рис. 24, получается интегральная кривая, близкая по форме кривой рис. 22.

Наконец, зная ET и TR/ET , определяем транспирацию и изменения влажности почвы из-за транспирации, что и является главной задачей описанного блока.

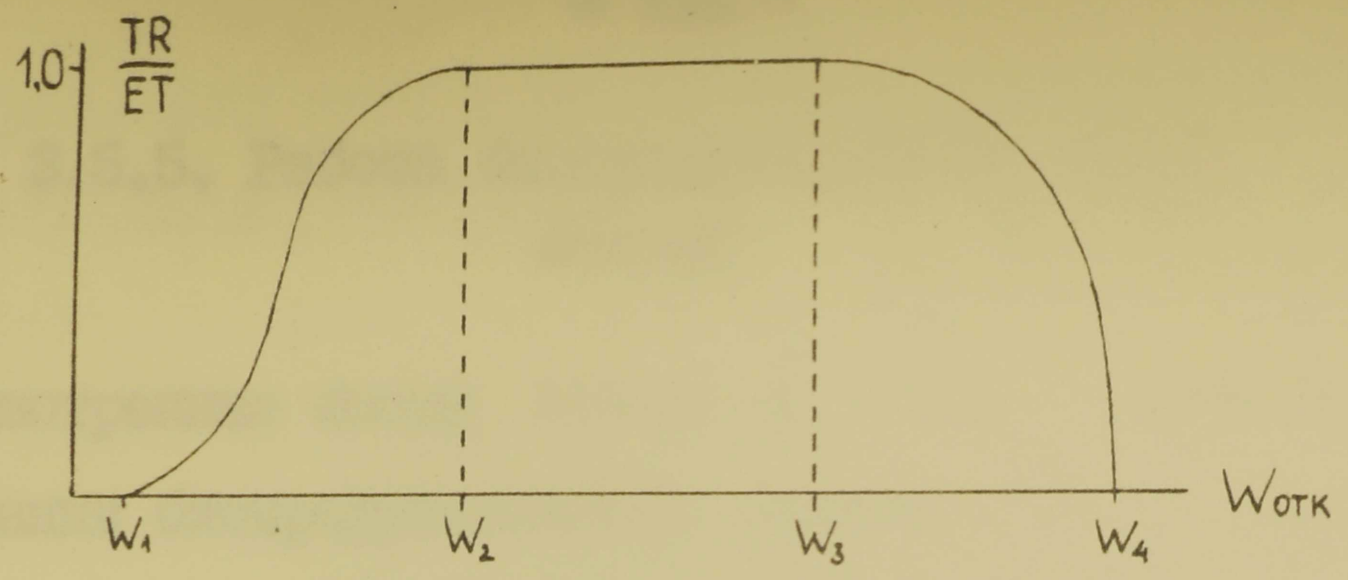


Рис. 22. Общий вид зависимости между относительной влажностью почвы ($W_{отн}$) и соотношением действительной (TR) и потенциальной транспирации (ET). $W_{1,2,3,4}$ - критические точки.

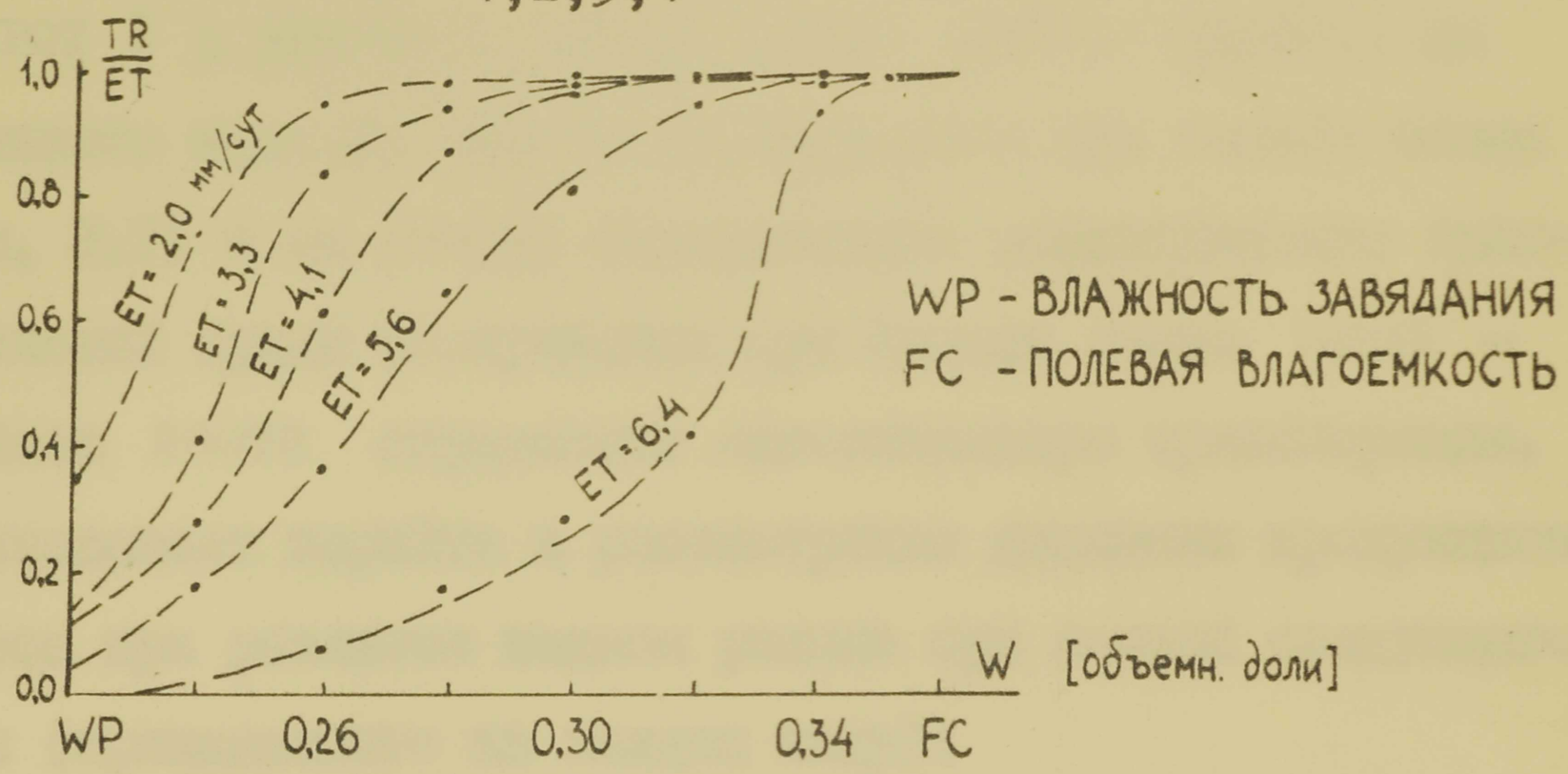


Рис. 23. Относительная транспирация при разной влажности почвы и потенциальной транспирации. По Denmead, Shaw, 1962, p.387.

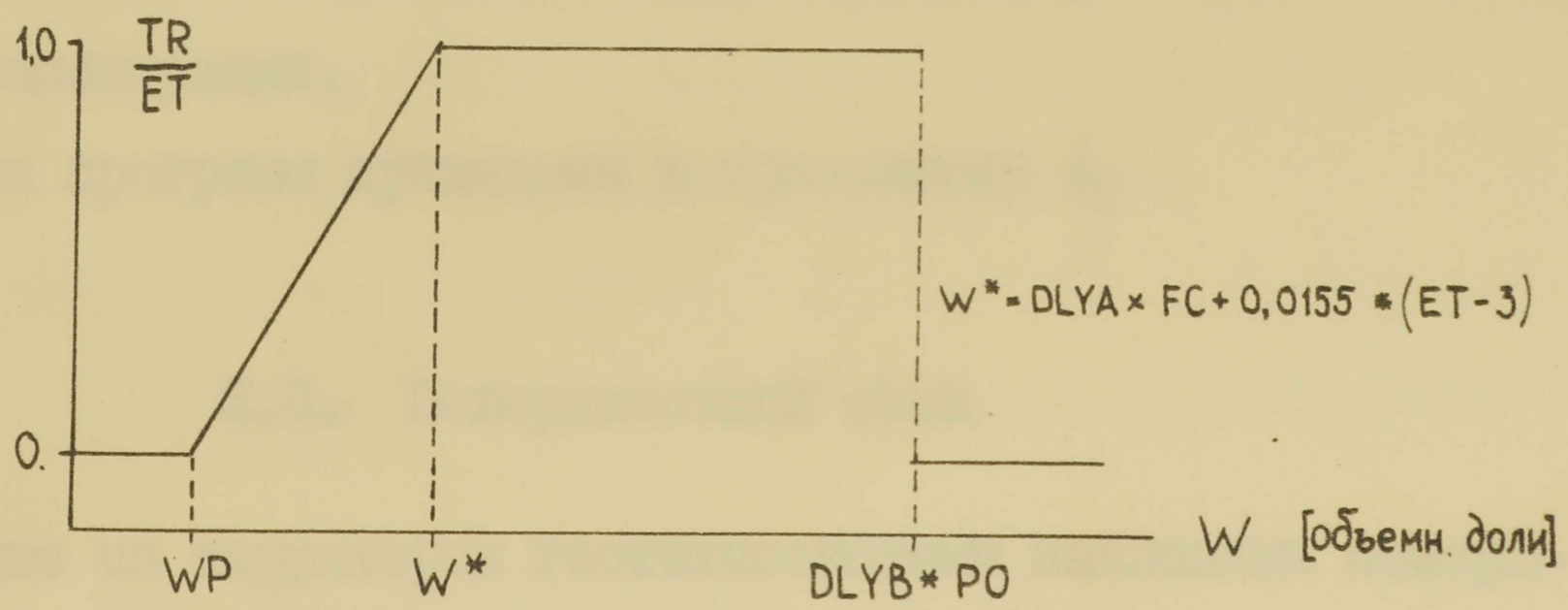


Рис. 24. Применяемый в модели для каждого слоя почвы вид зависимости для нахождения относительной транспирации (остальные обозначения в тексте).

3.5.5. Работа биопродукционного блока модели

Рассмотренные блоки BIOPOT и ROOTS взаимодействуют при моделировании биопродукционного процесса таким образом, чтобы на каждом шагу моделирования по времени и по территории максимально использовать общие для всех культур функциональные области в алгоритме модели.

В предыдущих разделах была описана работа подблоков биоблока (BIOPOT) в условиях оптимального водного режима. На основе реального водного режима (полученного при помощи блока SOIL - см. 3.7) и на основе определяющих потенциальную транспирацию условий среды (полученных при помощи блока ISPAR - см. 3.4), блок ROOTS определяет относительную транспирацию. Последняя позволяет перейти к рассмотрению динамики продукционного процесса при реальном водном режиме при помощи следующего соотношения (применяемого на каждом шагу):

PHINTR = PHINTRO * RELTR ,

где PHINTRO, PHINTR - интенсивности фотосинтеза соответственно при оптимальном и реальном водных режимах, RELTR - относительная транспирация.

Тексты программ приведены в приложении 4.

3.6. Поверхностный сток

Наличие на территории геотехносистемы наклонных поверхностей - хотя их мало и уклоны маленькие - приведет к перераспределению воды, имеющейся на поверхности почвы. Для учета в модели этого был создан подблок STOK .

Поверхностный сток воды и инфильтрация ее в почву происходит одновременно, причем характерные времена этих процессов имеют порядок I0 минут (Crawford, Donigian, I973). Возникает вопрос, как мы можем моделировать сток и инфильтрацию не имея материала о внутрисуточном распределении осадков (т.е. о интенсивности дождя). Очевидно, для этого следует принимать какое-нибудь внутрисуточное распределение осадков и самым естественным для этого является равномерное распределение. Тогда мы сможем итерационный шаг по времени выбирать просто по скорости стока и инфильтрации. Пропорции перераспределения воды получаются достоверные на уровне суток, а внутрисуточное распределение стока оказывается просто рабочим приемом, который не дает нам никакой информации о моделируемом объекте.

Само склоновое стекание воды как физический процесс будет на нашем уровне рассматриваться весьма интегрально. Мы основывались на работе Г.И.Швебса (I974). Проведя некоторые упрощения в формуле Бефани для условий сельскохозяйственных полей, он дает следующую, примененную в модели, рабочую формулу:

VST = M * C * H**0,6 * I**0,4 * L**0,5 ,

где VST - скорость поверхностного стока м/с, M - коэффициент, учитывающий шероховатость подстилающей поверхности, C - коэффициент, учитывающий предыдущие условия стока, H - скорость поступления осадков (водоотдача) мм/мин, I - крутизна склона $\%_0$, L - длина склона м. Предполагался ровный склон и полный сток.

От скорости VST мы переходили к определению относительного стока: RSTOK = TIME / L , где TIME - итерационный шаг по времени. Соответственно изменившиеся слои воды на по-

верхности почвы (SW) будут:

$$SWU(T+1) = SWU(T) * (1 - RSTOK(T)) ;$$

$$SWL(T+1) = SWL(T) + SWU(T) * RSTOK(T) * SU * (1 - Q) / SD ,$$

где SWU; SWL – слои воды соответственно на склоне и в ячейке, куда вода течет (SWU и SWL принадлежат смежным ячейкам); SU и SD – их площади; Q – часть воды, которая стекает из SWU не в SWL, а в слои других ячеек.

Обращаем внимание на то, что инфильтрация (определяемая в другом блоке модели) имеет приоритет в отношении поверхностного стока – за время итерационного шага стекает вода, которая не успела впитываться в почву. Слой воды на поверхности почвы внутри каждой ячейки принимался однородным.

Эмпирические коэффициенты M и C в работе Г.И.Швебс (1973) даны в виде описательных инструкций и оценочных таблиц по качеству поверхности и виду обработки земли. В модели мы описываем поверхность склона логическими операторами, значения которых – истина или ложь – дают информацию, при помощи которой ЭВМ на каждом вычислении значения VST составляет формулу для определения C и M .

Остальные параметры склоновых ячеек, которые получаются вычислительной машиной по кодовому номеру типа ячейки, определены картометрически и приведены в таблице II. Они в модели являются (кроме площадей ячеек) внутренними параметрами подпрограммы STOK.

Для получения реального распределения расхода воды на инфильтрацию и сток организовался итерационный цикл, описание которого излагается в пункте 3.7.3.

Таблица II

Характеристика территориальных ячеек, участвующих в процессе поверхностного стока

Склоновые ячейки - донор				Водополучатель - реципиент		
номер ячейки	длина склона (м)	крутизна склона %	площадь (га)	номер ячейки	площадь (га)	данной пары ячеек
I0	II0	55	3,48	20	2,50	0,32
I3	50	70	2,24	I5	6,75	I,00
I9	I35	30	2,04	2I	5,35	I,00
20	I25	40	2,50	22	9,03	I,00
40	2I0	29	6,59	43	2,63	I,00
44	75	53	I,05	30	20,60	I,00

3.7. Влажность почвы

3.7.I. Динамика почвенной влаги

Содержание воды в почве изменяется из-за I) потери влаги на испарение и транспирацию, 2) впитывания влаги с поверхности почвы, 3) грунтового оттока, 4) капиллярного подтока и 5) перераспределения воды между слоями почвы. Первый компонент мы уже учитывали в других блоках, а остальные должны определяться в почвенном блоке модели.

Определение влажности почвы внутри каждой ячейки можно рассматривать как одномерную задачу. Таким образом, динамика влажности почвы (в каждой ячейке) может быть вычислена на основе ее вертикального столбика с единичной площадью основания и при помощи параметров, полученных экспериментально при по-

мощи опорных почвенных шурфов. По литературным источникам (Dutt e.a., I972; Годунов, Рябенкий, I973; Мичурин, I975; Моделирование..., I976; Бондаренко, Коваленко, I979) был составлен алгоритм для моделирования движения почвенной влаги на основе обобщенного уравнения Дарси. Как показали проверочные расчеты, при нестационарности процесса (впитывание влаги в почву) требуется шаг по времени меньше минуты, а в почвах с горизонтами из песка - около секунды. Подобные результаты приводят также Х.Кеулен и К.Бек (Keulen,Beek, I97I). И.И.Судницын (I979) пишет, что для одного случая движения влаги требуется около часа времени ЭВМ.

Моделированию движения почвенной влаги посвящено огромное количество работ и существует немало моделей (например:Ashcroft e.a. , I962; Liakopoulos, I966; Судницын, I970; Кулик, I973; Lambert e.a. , I973; Nimah, Hanks, I973; Hansen, I975; Нерпин, Чудновский, I975; Мироненко, Паченская, I976; Hornung, I977; Olszta, I977; Денисов, I978). Но они оказываются слишком "точными" для практического использования в нашей модели для реальных почв польдера.

Необходимо разложить процесс движения воды на различные, более простые случаи, как сделано И.И.Судницыным (I979). Упрощенный подход, основанный на рассмотрении почвенной влаги как состоящей из разных видов почвенной воды, и на балансовые соотношения, голландцы применили в имитационных моделях конкретных территорий (Keulen, I975; Makkink, Heemst, I975).

Исходя из принципов и опытов, изложенных и обоснованных в вышеупомянутых работах, был составлен алгоритм для определения влажности почвы в нашей модели.

Глубину фронта смачивания (НАА), на основе которого в мо-

дели вычисляется инфильтрация, определили (на основе работ: Green, Ampt, I9II; Будаговский, I955; Судницын, I979):

HAA = 2 * CF * TIME / DELTAW ,

где CF - коэффициент фильтрации промоченного слоя; TIME - итерационный шаг времени; DELTAW - разница между полной влагоемкостью промоченного слоя почвы и ее первоначальной влажностью.

Грунтовый отток находят, удаляя из нижнего слоя каждой почвы "лишнюю воду". Последняя получается из следующих условий. Если капиллярный подъем воды не доходит до нижнего слоя почвы, то влажность этого слоя не будет больше полевой влагоемкости. Если нижний слой находится в капиллярной кайме, то его влажность равняется капиллярной влажности.

Характер капиллярного подтока зависит от скорости изменения уровня грунтовых вод (УГВ). Мы были вынуждены высоту капиллярной каймы CAP упрощенно принимать как константную и заданную для каждой конкретной почвы, основываясь на наблюдения по влажности почвы и на литературные источники (Eisen, I960a; Маслов, I970).

Капиллярную влажность, т.е. влажность почвы в капиллярной кайме определяли на основе формулы Аверьянова (по Ионат, I962):

WK(NZ) = PO(NZ)*(1-(L(NZ)/CAP)*(1-(FC(NZ)**2/PO(NZ)**2)**0,5),

где WK(NZ) - капиллярная влажность NZ -го слоя почвы, PO(NZ)и FC(NZ) - полная и полевая влагоемкость NZ -го слоя, L(NZ) - высота NZ -го слоя над УГВ.

Перераспределение почвенной влаги между слоями почвы про-

исходит под влиянием градиента потенциала почвенной влаги. В рассматриваемых нами условиях редко возникают ситуации, когда влага, находящаяся выше капиллярной каймы, движется вверх. Эти потоки в пределах точности почвенного блока модели можно не учитывать.

Следовательно, перераспределение почвенной влаги в модели заключается в движении из промоченного слоя вниз той части воды, которая превышает полевую влагоемкость промоченного слоя. Количество воды, которая успеет утечь за время TIME из промоченного слоя, и распределение влаги в этом слое определялось по формулам, найденным на основе подхода Дж.Б.Сиссона и др. (Sisson e.a., I980). Далее просочившаяся вода расходуется в нижних слоях почвы. Для этого мы пользовались следующими правилами: I) глубина перераспределения определяется средней влагопроводностью, найденной на основе формулы Каминского (Мадиссоон, I976) при помощи распространенной зависимости для влагопроводности K (W):

$$K(W) = CF * ((W - WHYGR) / (PO - WHYGR))^{**}N ,$$

где WHYGR – максимальная гигроскопичность; W – влажность почвы; параметр N = 3,5 (по Будаговский, I955); 2) вода – пока ее хватает – распределяется сверху вниз: вначале все слои до полевой влагоемкости, потом все слои до полной влагоемкости. Хотя такой прием кажется очень грубым, следует учитывать, что когда толщина слоя I0 см, то водовместимость слоя – 32–86 мм воды. Существующие количества инфильтрированной воды на порядок–полтора меньше.

3.7.2. Параметры и водно-физические константы почвы

При рассмотрении почвы мы ограничивались слоем толщиной I м и делили ее разрез на I0 слоев.

Для оценки влажности конкретной почвы и для ее вычисления необходимо было знать индивидуальные свойства почвы, которые следовало определить на основе экспериментального материала. Такой основой у нас служили почвенные шурфы в двенадцати характерных местах польдера. По этому материалу мы выделили 32 типовых горизонта, экспериментально определенные параметры которых являлись исходными (см. прил. 6).

Почвы модели "складываются" из типовых горизонтов. В ЭВМ для этого вводятся два кодовых числа для каждой ячейки. В первом из них хранится информация о списке горизонтов почвы данной конкретной ячейки, во втором - о глубинах нижних пределов этих же горизонтов. На их основе ЭВМ определяет для каждого горизонта почвы каждой ячейки нужные гидрофизические константы по т и п о в ы м объемным весам и удельным поверхностям, а после этого проводит интерполяцию по и н д и в и д у а л ь н ы м глубинам и получает для каждого показателя профиль по глубине с шагом I0 см, который является исходной информацией для функциональных блоков модели. Это выполняется подпрограммой SREDA .

Основными гидрофизическими характеристиками почвы приняты максимальная гигроскопичность (WHYGR), влажность завядания (WP), наименьшая (полевая) влагоемкость (FC) и полная влагоемкость (PO).

При нахождении конкретных формул для вычисления вышепри-

веденных показателей были использованы работы Э.Китсе (Китсе, I968; Китсе, Рейнтам, I973; Kitse, I978), где найдены для этого регрессионные уравнения по почвам Эстонии. Необходимые удельные поверхности почв определены на кафедре почвоведения Эстонской СХА по принятой там методике.

Найденные значения соответствуют полной удельной поверхности почвенных минералов и дают правдоподобные результаты для песков, супесей и суглинков. Глинистые минералы типа монтмориллонита и вермикулита имеют подвижную кристаллическую решетку и способны при раздвижении слоев пакетов поглощать молекулы воды. Для учета вышеизложенного мы уменьшали удельную поверхность глинистых почв пропорционально содержанию в них глинистых частиц (по данным Б.Н.Мичурина (I975), внутренняя поверхность глинистых минералов приблизительно равна их внешней удельной поверхности).

Полевая влагоемкость торфа определялась по корреляционному уравнению У. Томберга (I972б):

$$FC(NN) = 0,67 - 0,16 * VW(NN) ,$$

где VW – объемный вес (скелета); NN – индекс генетического горизонта.

Фильтрационные коэффициенты (м/с) для слоев почвы определили по формуле Козени, усовершенствованной Карманом (Мичурин, I975):

$$CF = 1,395 * 10**4 * (PO-WHYGR)**3 / (1-PO)**2 / SS**2 ,$$

где SS – удельная поверхность почвы ($м^2/г$).

Использованные остальные конкретные эмпирические формулы представлены в приложении 4 (в тексте подпрограммы SREDA).

При реализации модели на ЭВМ данные о параметрах почвы помещаются подпрограммой SREDA в именованную общую область (см. прил. I). Их конкретные численные значения представлены в приложении 6.

3.7.3. Взаимодействия подблоков, имитирующих движение воды

В предыдущих пунктах мы рассматривали отдельные процессы движения воды, провели своего рода анализ. Теперь следует объяснить, как в модели описывается движение воды целиком.

Блок-схема последовательности учета разных процессов представлена на рис. 25. Порядок вычислений определился прежде всего тем, что результаты имитации одних процессов являлись исходными для следующих. Они образуют вложенные друг в друга циклы (см. прил. I).

Указанное взаимодействие в модели охватывает несколько функциональных блоков и полностью реализуются в целостной модели (по техническим причинам по более сложной структуре, чем указано на рисунке). Например, условия инфильтрации (блок SOIL) зависят от того, промерзла ли к этому моменту почва (блок FROZEN).

Несколько комментариев к рисунку. Итеративный цикл распределения воды между почвой и поверхностным стоком происходит по времени. Шаг, который меньше суток, выбирается таким, чтобы относительный сток (см. 3.6) был меньше единицы. Все процессы движения влаги в почве состоят из цикла по слоям почвы. Инфильтрация, например, состоит в первую очередь из цикла вычислений по верхним слоям почвы (одновременно она входит в цикл

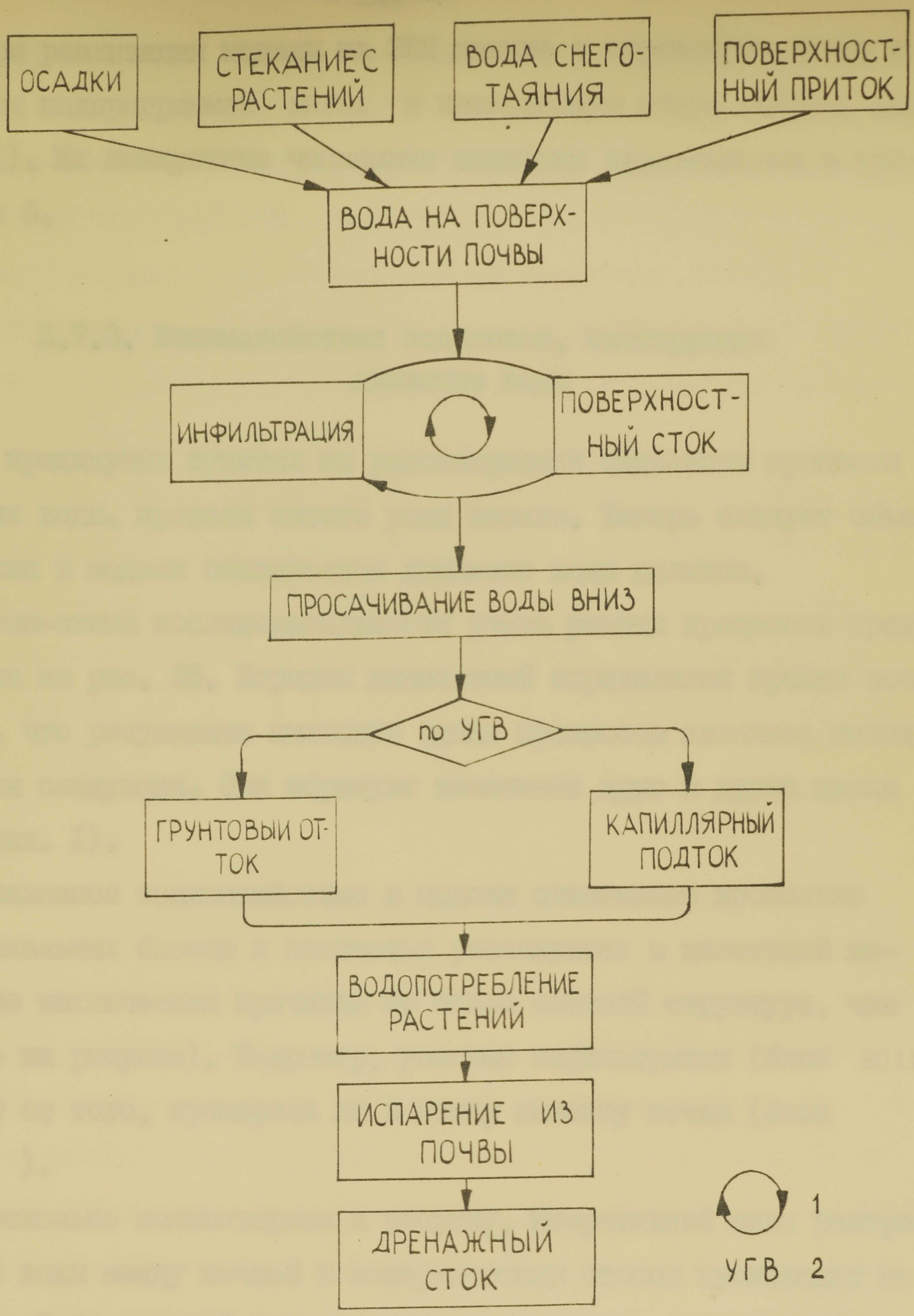


Рис. 25. Последовательность вычислений по движению воды в модели POLDER (в определенные сутки в определенных ячейках). I.Итеративный цикл. 2.Уровень грунтовых вод.

"сток-инфильтрация", в цикл по ячейкам и в цикл по суткам). Количество повторностей определяется либо количеством слоев почвы, находящихся выше уровня грунтовых вод, либо всей толщиной почвы, либо максимальной глубиной влияния рассматриваемого процесса (при инфильтрации - глубиной фронта смачивания).

Выбор грунтового оттока или капиллярного подтока - альтернативный и осуществляется на основе того, поднимается ли капиллярная кайма в рассматриваемую толщу почвы.

Растения имеют определенную инерцию водопотребления. В ходе реализации распределения воды в почве могут возникать также временные искажения действительной картины влажности почвы. Поэтому количество употребляемой растениями воды определено в начале каждого суточного временного шага, а удаляется эта вода из почвы в конце цепи действий данного шага.

3.8. Дренажный сток

Важный показатель осушительного действия дренажа - дренажный сток в модели POLDER оказывается периферийной характеристикой. Количество воды, отведенной дренажем интегрально отражает почвенный отток и подток в дренаж грунтовых вод. Если первый является выходом из нашей моделируемой системы, то второй - сильно зависящий от конкретных гидрогеологических условий - рассматривается как внешнее воздействие. Это следует из того, что режим УГВ (уровня грунтовых вод) мы не моделируем, а берем величины УГВ как входные данные. В этих случаях, когда оба процесса происходят одновременно, не удается определить количество дренажного стока на основе балансовых соотношений, а необходимо прибегать к методам расчета, которые использют-

ся при определении параметров дренажа.

Вопросы дренажного стока рассматривались в работах литовских исследователей (Шкинкис, I974; Опыт..., I975), но главное внимание там обращается на те стороны вопроса, которые важны для проектирования дренажа - на среднегодовые и максимальные модули стока. У нас возникает обратная задача: на основе заданных параметров дренажной системы и конкретных гидрогеологических условий найти модули дренажного стока - но уже не многодневные средние, а модули конкретных суток.

Как показали проверочные расчеты, формулы Ивицкого и Аверьянова (указанные Шкинкисом, I974, с. 68-69) применительно к суточным модулям дренажного стока не дают хороших результатов. При определении расчетных формул для дренажного стока мы использовали схемы, приведенные в виде методических руководств в работе А.И.Мурашко и Е.Г.Сапожникова (I978), и работы У.Томберга (Tomberg, I960; Томберг, I972а,б; I976; Б.С.Маслова, I970; И.Мадиссоона, I976). Фильтрационные сопротивления нашли на основе параметров дренажа из специальных таблиц (Мурашко, Сапожников, I978; Maaparanduse..., I960; Maaparanduse..., I977).

Проверочные расчеты показывали, что в условиях, когда отведенная дренажем за расчетный период (сутки) вода меньше десяти процентов от всей воды, которая была бы отведена при полном дренажном стоке, то методы неустановившеся и установившейся фильтрации дают лишь незначительные различия (~ 3%) в среднесуточном модуле дренажного стока. Поэтому мы использовали схему установившейся фильтрации.

Выбор расчетной схемы и нахождение параметров представлены на рисунке 26 на примере конкретной ячейки польдера (№ 23).

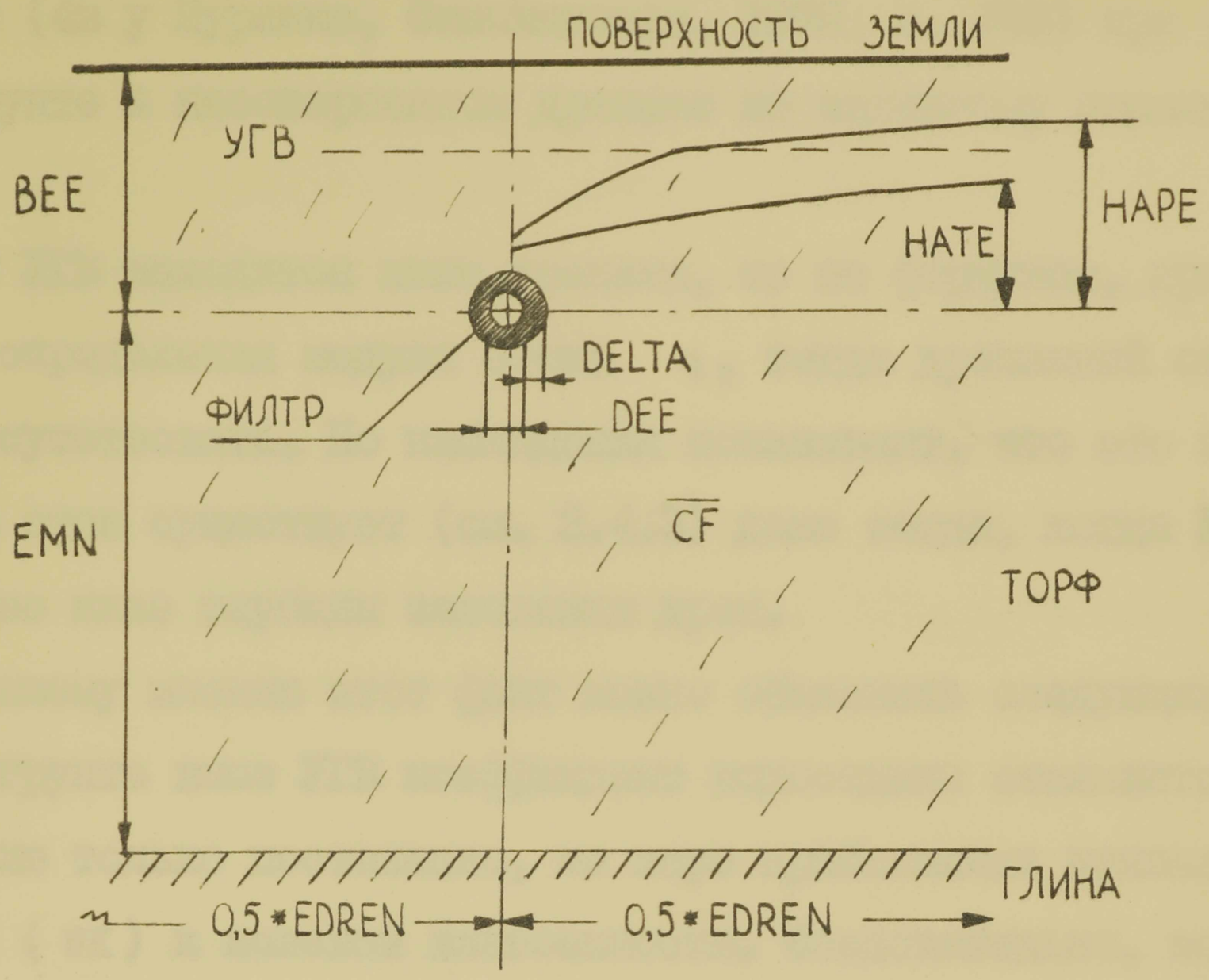


Рис. 26. Фильтрационная схема дренажа однородного грунта (при отсутствии напорности). DEE - наружный диаметр дренажной трубы; DELTA - толщина фильтра.

Это супераквальное поле со среднеразложенным торфом и закрытым дренажем (тип почвы 9, описывается наблюдательной скважиной УГВ № 2). Гидрогеологические условия соответствуют фильтрационной схеме (4в у Мурашко, Сапожникова, I978, с. I09) при однородном грунте и несовершенном дренаже по заданному понижению УГВ.

Если УГВ находится ниже дренажа, то по формулам, применяемым для определения модуля стока q, тогда дренажный сток должен отсутствовать. Но наблюдения показывают, что это не так. Дренажный сток существует (см. 2.4.3) даже тогда, когда УГВ значительно ниже глубины заложения дрен.

По нашему мнению этот факт можно объяснить следующим образом. В грунте выше УГВ коэффициент водоотдачи становится равным нулю только постепенно, по мере приближения капиллярной влажности (WK) к полевой влагоемкости. Следовательно, водоотдача в дрену и дренажный сток должны существовать до тех пор, пока капиллярная влажность настолько больше полевой влагоемкости, что превышает фильтрационные сопротивления.

В модели принят следующий вид зависимости для модуля дренажного стока:

$$q = C * \overline{CF} * HAPE * (WK - FC) / (PO - FC) ,$$

где C – констант условий дренажа (фильтрационные сопротивления, степень вскрытия пласта, расстояние до следующей дрены и т.д.); $\overline{CF}$ – средний коэффициент фильтрации; HAPE – расчетный напор:

$$HAPE = MAX (0,1 ; BEE - GWT) ,$$

где GWT – средний УГВ в данной ячейке, найденная по зависимости: GWT(J) = A(J) * UGV(I) + B(J); A(J), B(J) – эмпири-

ческие коэффициенты; UGV(I) - УГВ в опорной наблюдательной скважине.

Модули дренажного стока в модели вычисляют блок DRENA (см. прил. 4). Параметры фильтрационных сопротивлений считаются константными для всех дрен, параметры BEE, EMN, EDREN (см. рис. 26) константными для каждой ячейки. Параметры, изменяющиеся во времени - УГВ и WK - DRENA получает из других блоков.

Для оценки результатов определения q и сравнивания их с наблюдениями необходимо иметь значения q по дренажным системам польдера. Как было показано (см. 2.4.3), организация дренажной сети не согласуется с сельскохозяйственной организацией территории и дренажный сток, измеряемый в устье каждой дренажной системы, является суммой различных q. Поэтому мы в блоке DRENA найдем дренажный сток (DSYSQ) тех I0 дренажных систем (всего их на польдере 58), о которых имеем материалы наблюдений, следующим образом:

$$DSYSQ(L) = S(1) * q_1 + \ldots + S(K) * q_k + \ldots + S(N) * q_n ,$$

где DSYSQ(L) - модуль стока L-ой дренажной системы; S(K) - доля площади K -ой ячейки (с модулем стока q_k) из площади всей L -ой дренажной системы; максимальное количество площадей S_i , отличных от нуля, для одной дренажной системы - четыре. Всего на польдере 36 ячеек с дренажем.

3.9. Структура целостной модели

Блоки, которыми мы занимались до сих пор, описывают отдельные стороны функционирования геосистемы. Каждый функцио-

нальный блок является своего рода "специалистом" выполнения определенных операций. Но для того, чтобы блоки работали совместно и координированно, должен присутствовать "администратор" - управляющий блок, который определяет, какие функциональные блоки и в каком порядке должны работать, и обеспечивает их необходимой информацией.

3.9.I. Управляющий блок

Основой для взаимодействия блоков служат рассмотренные ранее балансовые соотношения и приоритеты геогоризонтов. В процессе функционирования вода не может (не учитывая фотосинтез) исчезать или возникать; сток может образоваться только после того, когда на поверхности почвы имеется достаточное количество свободной воды и т.п. Каждый функциональный блок преобразовывает участвующие в "его" процессе переменные таким образом, что выход из одного блока является входом в следующий блок.

"Следующий" работающий в модели блок определяется на основе трех условий:

I. Процесс, описываемый данным блоком, не принят константной (неизменной) для осуществляемого прогона модели. Например, фиксируя параметры испарения и влажности почвы, можно для конкретного численного эксперимента задать определенную интенсивность испарения и оптимальность почвенной влаги для растений. При моделировании зимних условий можно при помощи программных средств не внести в загрузочный модуль (см. прил. I) блоков, связанных с растительностью, что сэкономит оперативную память ЭВМ.

2. Процесс, описываемый блоком, имеет условия существо-

вания. Например, для вызова блока промерзания-оттаивания почвы необходимо, чтобы температура поверхности почвы была отрицательной или толщина промерзшего слоя была положительной.

3. Процесс, описываемый блоком, свойственен данной территориальной ячейке. Например, существование на поверхности почвы свободной влаги приведет к вызову блока стока только при склоновых ячейках.

Названные условия выражаются через логические операторы алгоритма. Они объединены в управляющий блок (DIRCTR), который кроме вызова подпрограмм также вычисляет некоторые универсальные для модели параметры.

Продолжительность дня определяется интерполяцией соответствующей таблицы-функции. График этой функции имеет синусоидальную форму и, составляя таблицу с шагом I5 суток, ошибка интерполяции будет незначительной. "Проведение" дождевания заключается в прибавлении к осадкам в определенный день определенного количества воды в тех ячейках, типовые номера которых соответствуют территории дождевания.

Посев, косьба и уборка урожая реализуются аналогично дождеванию на основе вводимой информации. В связи с этими воздействиями также изменяются параметры, характеризующие шероховатость поверхности для стока. Учет вспашки, боронования, окучивания и др. подобных мероприятий возможен через дополнительный ввод с перфокарт.

3.9.2. Обмен информации и обслуживающие подпрограммы

Вводимая для моделирования информация разделяется на две категории. Параметры конкретного прогона модели (конкретной

имитации) вводится с перфокарт (их список см. прил. 2). Они определяют режим работы имитационной системы. Функциональные блоки используют два вида параметров. Параметры-аргументы, как правило, изменяются из обращения в обращение к данному блоку и передается при вызове блока. Фиксированные параметры во время каждого прогона модели в ЭВМ не изменяются, или изменяются скачкообразно на основе заданных для этого прогона условий. На основе этой информации вводятся метеоданные, и данные об уровнях грунтовых вод.

Оформление (формат) выдаваемой печати может быть самым различным. Для того, чтобы более оперативно выбирать необходимую форму и содержание печати, подпрограмма вывода OUTPUT вводится с перфокарт и ее содержание варьируется из прогона в прогон. Управление передается в подпрограмму OUTPUT в конце каждого временного шага. Часть стандартных видов выдачи информации по ограниченному количеству территориальных ячеек, т.н. откладочные форматы печати встроены в некоторые блоки (ISPAR, BIOPOT, DRENA, SOIL и т.д.) и их использование указывается входными параметрами.

Кроме управляющей программы и функциональных блоков в программное обеспечение модели входят еще вспомогательные процедуры и модули (см. прил. 3). Для работы с моделью мы создали маленький пакет прикладных программ, который в ходе использования имитационной системы, естественно, будет пополняться. Туда входят одномодульные управляющие программы - дублеры головной программы модели - для автономной работы отдельными функциональными блоками; программа ANDMED для записи метеоданных на МД; программа DEPOO для записи на МД результатов имитации в виде 44xN матрицы литеров (N число суток), что-

бы потом по выбору можно было составлять АЦПУ-карты для некоторых, наиболее интересных суток; POLMAP - программа для печати АЦПУ-карт польдера.

3.9.3. Логическая структура имитационной системы

Для более компактного изложения сказанного представим логическую структуру модели в виде блок-схемы определенных действий (рис. 27). Как видно, данная схема не обязательно характеризует выполняемый на ЭВМ алгоритм, а может в принципе также служить схемой экспериментального исследования геотехносистемы польдера. Только вместо слов "моделирование", "печатать", "имитация", "МД" и "АЦПУ" будут соответственно "исследование", "писать", "наблюдение", "полевой дневник" и "отчет". Такая аналогия не случайная, а является отражением того, что процессы получения новых знаний из натурных экспериментов и из машинных экспериментов сходны. Разными оказываются проблемы их технического проведения, вопросы точности и адекватности исследуемому явлению.

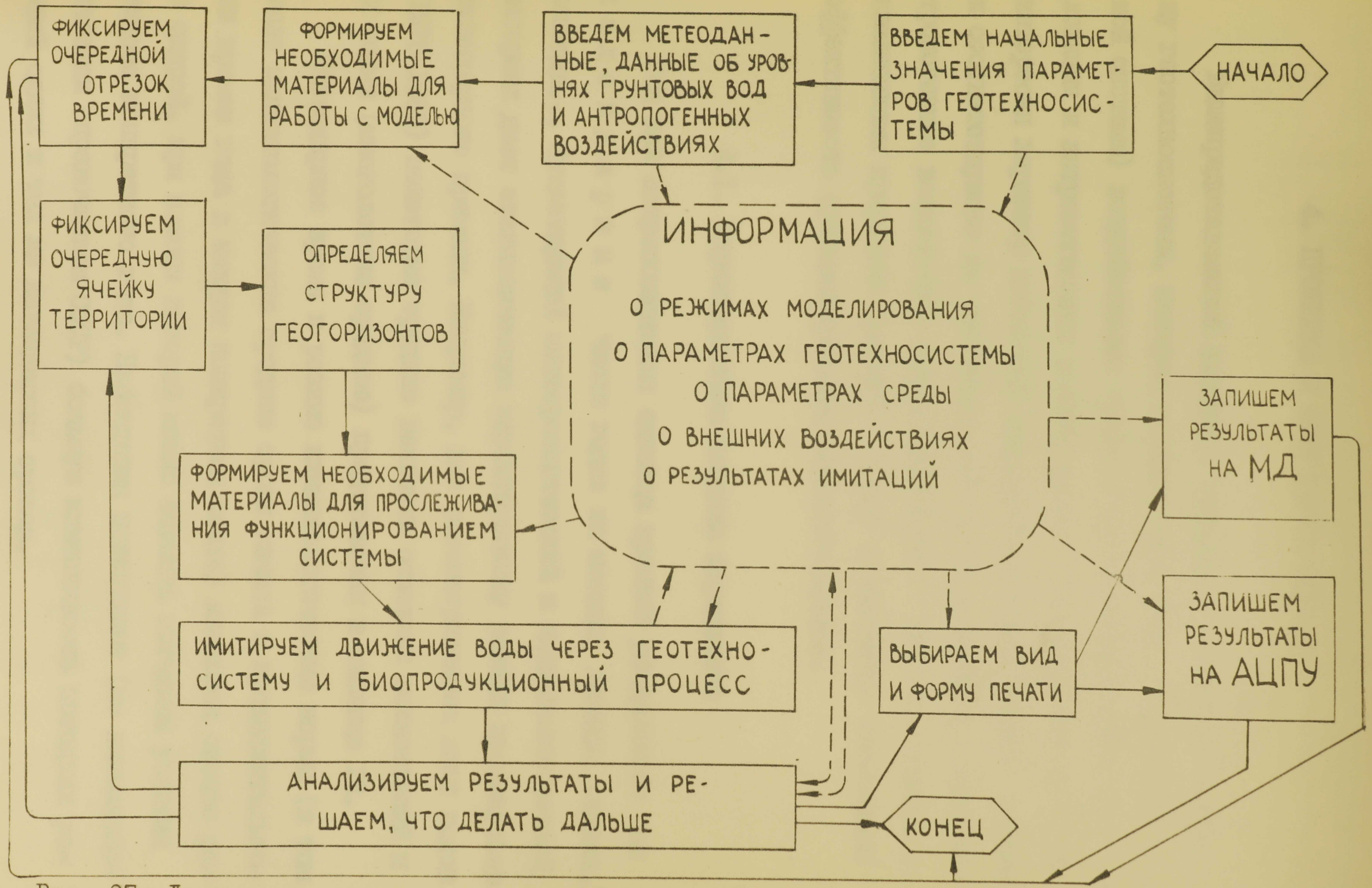


Рис. 27. Логическая структура модели. Прерывистые линии - передачи информации.

4. ПРОВЕРКА И ОБСУЖДЕНИЕ МОДЕЛИ

Вышепредставленный алгоритм позволяет имитировать динамику геотехносистемы, которая определяется (кроме структуры самой системы) воздействиями среды - гидрометеорологическими условиями и антропогенными воздействиями. Географу должен быть интересен характер изменений природных условий (среды системы) и соответствующие им изменения состояний геотехносистемы. Антропогенные воздействия должны учитывать и быть в согласии с изменениями природных условий - тогда достигается наибольшая эффективность функционирования геотехносистемы.

4.I. Характеристика входных переменных

Год как астрономическая единица времени разделяется на к а л е н д а р н ы е части года: на месяцы, декады, недели, пентады... Существующий метеорологический и климатологический материал дает статистическую характеристику разных промежутков календарного времени. Например, для рассматриваемых нами годов (I978-I980) некоторые средние величины основных показателей и их нормы (многолетние средние) представлены в таблице I2.

Календарное время и разные климатологические нормы (в том числе климатологические средние сроки начала и продолжительности времен года в каждом конкретном месте) являются своего рода опорой, при помощи которой можно оценить погодные условия каждого конкретного года. Наблюдения показывают (по климатологическим справочникам СССР) большую изменчивость погодных условий одних и тех же календарных сроков.

Таблица I2

Сравнение среднемесячных значений основных метеопоказателей с их нормами
(для актинометрической станции Тыравере)

Время	Температура (°С)				Осадки (мм)				Суммарная радиация (Мдж/м²)			
	норма	I978	I979	I980	норма	I978	I979	I980	норма	I978	I979	I980
Январь	-6,5	-5,7	-9,2	-8,6	34	2I,3	26,9	29,2	42	57	50	53
Февраль	-6,6	-I0,I	-9,0	-8,6	3I	28,5	32,3	I8,8	II3	I24	I28	97
Март	-3,2	-0,3	-I,0	-6,2	29	36,0	I0,8	I4,4	3I4	2I0	24I	329
Апрель	3,9	3,0	3,I	5,3	3I	36,I	I5,5	I8,5	402	365	427	348
Май	I0,6	I0,2	I2,9	7,4	44	32,7	5I,6	50,6	528	626	594	475
Июнь	I4,8	I4,2	I7,0	I7,3	67	58,9	25,4	45,9	620	600	679	645
Июль	I7,3	I5,5	I4,4	I6,5	77	99,9	87,2	38,2	582	528	486	547
Август	I5,5	I4,7	I6,6	I4,6	82	I84,2	44,8	84,6	432	4I8	4I0	365
Сентябрь	I0,8	9,0	I0,4	I0,8	6I	I48,2	60,6	49,0	28I	I92	26I	245
Октябрь	5,2	4,3	4,8	6,0	48	42,5	I0,8	86,2	I26	I32	I55	I08
Ноябрь	0,0	3,7	I,2	-I,6	46	I05,7	77,8	3I,9	46	37	37	58
Декабрь	-4,0	-I3,4	-2,5	-2,2	40	24,3	35,6	55,2	25	40	26	28
Г О Д	4,8	3,8	4,9	4,2	590	8I8	479	523	35II	3329	3494	3298

Следует заметить, что не всегда средние метеопоказания являются самыми информативными. Например, для зимних условий Эстонии распределение среднесуточных температур воздуха сильно асимметрично и многолетняя мода различается от многолетнего арифметического среднего до 6,5°. А вероятность, что среднесуточная температура определенных суток зимой равняется моде - два раза выше, чем вероятность того, что она равна арифметическому среднему (Kirde, I939). На необходимость использования для анализа изменений в природе не осредненного, а реального хода метеорологических элементов обратил внимание геоботаник В.Н.Хитров уже в I925 году (цит. по Галахову, I959). Главным источником получения метеоданных оказываются материалы государственной сети Гидрометслужбы, которые уточняются при помощи микроклиматических поправок (Методические..., I968; Каринг, Йыги, I974; Йыги, I977). Специальных наблюдений в экспедиционном порядке, тем более стационарных наблюдений слишком мало, чтобы на них можно построить географические модели.

Наша модель обеспечена метеоданными следующим образом. Примерно в I5 км от польдера находится актинометрическая станция Тыравере. Мы используем наблюдения этой станции по среднесуточной температуре воздуха и поверхности снега (зимой), по скорости и направлению ветра, по среднесуточному дефициту влажности (зимой - абсолютной влажности) и по наличию росы. Названные показатели получены на основе таблиц ТМ-I. Кроме того, мы используем значения суммарной радиации и радиационного баланса, измеренных на станции.

Следует подчеркнуть, что суммарную радиацию можно хорошо вычислить при помощи продолжительности солнечного сияния, данные о котором имеются в таблице ТМ-I. Как показывают исследо-

вания (Райк, I963; Пахапилл, I974), коэффициенты корреляции между этими показателями во всех регионах страны (кроме Заполярья и пустынь) имеют значения 0,9I-0,94. Радиационный баланс можно вычислить, зная альбедо поверхности, облачность, температуру и влажность воздуха.

Осадки как метеофактор с большой долей случайности необходимо измерить возможно ближе к моделируемому объекту. Нами были использованы материалы Курекюлаского агрометеорологического поста, находящегося в расстоянии I км от польдера.

В июле I979 года мы провели наблюдения для выяснения территориальной структуры распределения осадков на польдере, так как существовало предположение, что в приозерной полосе польдера должно быть осадков меньше. Оказалось, что хотя в отдельные сутки разницы в показаниях осадкомеров, находящихся друг от друга на расстоянии 300 м, могут достигать более 6 мм, в месячных суммах достоверных различий нет. Средняя месячная сумма осадков на территории польдера была 95% от суммы осадков агрометпоста. Заметная разница со станцией Тыравере была вызвана одним ливнем, давшим 4I мм осадков (40% месячной суммы Тыравере).

Среднесуточные значения скорости ветра найдены как арифметические средние срочных наблюдений; средние направления ветра найдены векторным сложением. Зимой средний дефицит влажности вычислен уравнением Магнуса на основе средней упругости водяного пара. Последняя зимой мало отличается от дневной упругости (Справочник..., I968) и мы аппроксимируем ее:

$$HUMMED = 0{,}96 * HUM15 ,$$

где HUM15 - значение упругости водяного пара в I5 часов;

HUMMED - среднесуточная упругость водяного пара в воздухе зимой.

Данные об уровнях грунтовых вод получены из наблюдений, проводимых гидрогеологической партией ГУ ЭССР, а для суток, не обеспеченных наблюдениями, вычислялись с помощью линейной экстраполяции.

Входные данные оформлены в виде файла прямого доступа на МД (см. прил. I), где записи соответствуют I сутки.

При изучении динамики гео- или экосистем интерес представляет не столько ход того или иного отдельного метеоэлемента, сколько совместное влияние всех компонентов погоды. Основоположник комплексной климатологии Е.Е.Федоров писал в I927 году: "Жизнь растения в условиях атмосферы является результатом сложного явления протекания погоды, а не одного, хотя бы самого важного элемента ее. Физиологический процесс в данный момент определяется не температурой, не влажностью, не осадками в отдельности, а совокупностью, как названных, так и остальных элементов - погодой, а результат процесса - последовательностью наступления фаз погоды. (---) Климат должен быть приравнен к растительному или животному миру. Как последние представляют комплексы р е а л ь н ы х объектов, так и климат состоит из реальных явлений - погод. Климат данного места есть совокупность наблюдающихся здесь погод. Классифицировать погоды приходится, конечно, по степеням метеорологических элементов, начиная с наиважнейших, по степеням температуры, влажности, облачности, силы ветра и т.п." (I927а, с. I7I, I73). Дальше Федоров (I927б) отмечает: то, что из картотечного каталога погод получается, так сказать, автоматически, потребовало бы у климатолога, оперирующего обычным методом средних, очень сложной

и искусной работы.

Дальнейшее развитие комплексной климатологии (Чубуков, I949; Вопросы..., I963; Материалы..., I976; I977; Проблемы..., I977; Hensel, Petrovic, I976 и др.) связано в основном со сравнительными исследованиями структуры климата в погодах разных территорий и с практическим применением ее в строительстве и в экологии человека. Для сельского хозяйства этот метод применил А.Д.Эйюбов (I975), а для графического анализа периодов погоды Е.М.Байбакова (I950), В.М.Жуков (I963) и др.

Сравнение рассматриваемых нами годов (I978-I980) по погодным условиям удобно осуществлять при помощи графиков структуры погоды (рис. 28, 29, 30), оформленных по методике комплексной климатологии. Для большей наглядности и с учетом конкретных географических условий Прибалтики, типы погоды Федорова-Чубукова объединены в классы.

Изменение метеоусловий как факторов среды влияет на геосистему и выражается прежде всего в закономерных изменениях в животном и растительном мирах. Но последние зависят не только от среды, а также от внутренней биоритмики. Поэтому целесообразно выделить еще б и о л о г и ч е с к у ю шкалу времени, сильно зависящую от погодного времени, но с ним не совпадающую (влияют сортовые, видовые, экотипные различия и другие, кроме метеорологических, факторы среды). Эту зависимость изучает фенология, рассматривая биоритмику живого компонента природы как индикатора изменения комплексных погодных условий (Шульц, Шамраевский, I94I; Rosenkranz, I948; Шнелле, I96I). Соответственно выделяются фенологические времена года (Seyfert, I960). По фенологическим наблюдениям имеются детальные материалы (Taimefenoloogilised..., I976), некото-

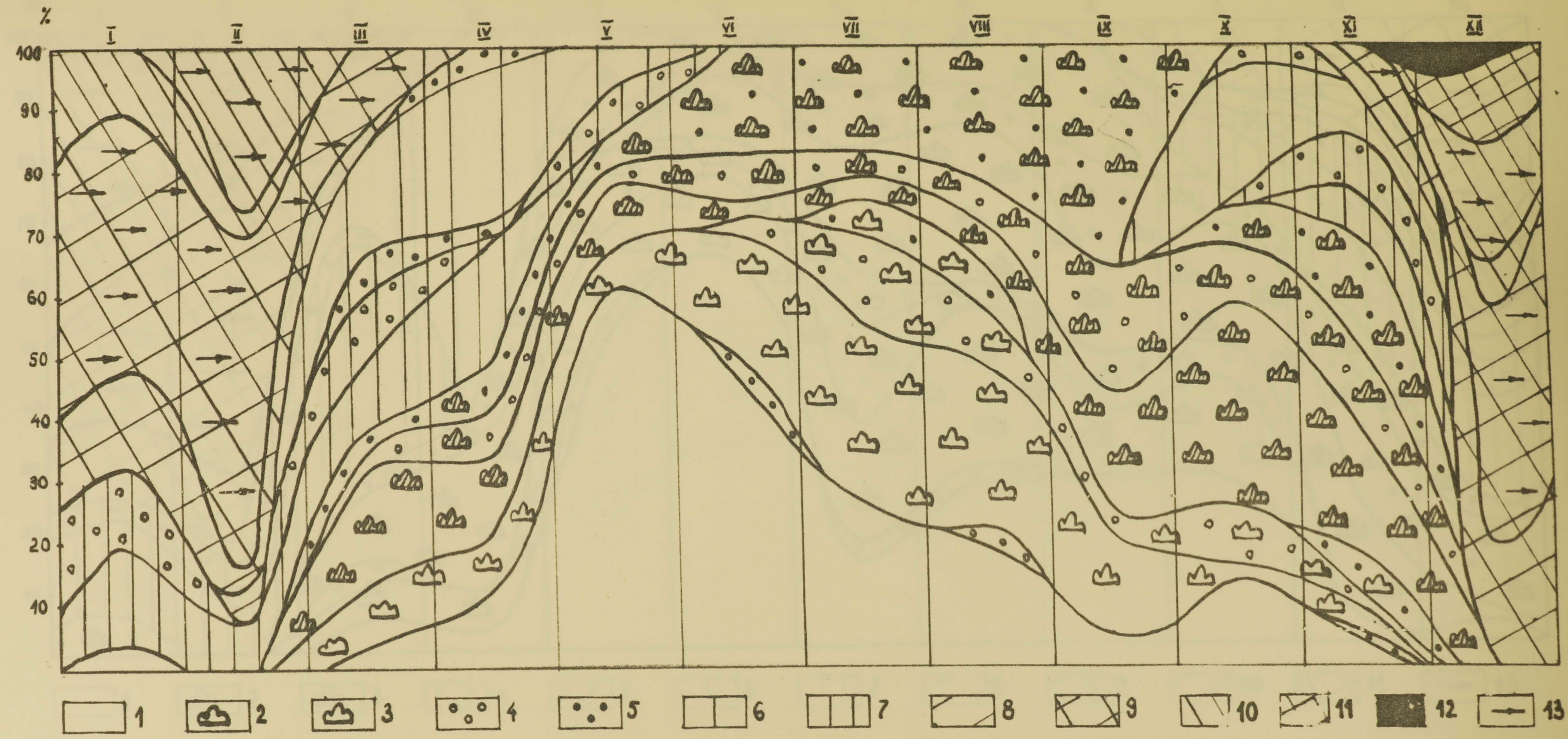


Рис. 28. Структура погод 1978 г.(по метеоданным Тыравере). Условные знаки: Погоды теплого времени года: I - солнечная (длительность солнечного сияния $\tau_{\odot} > 60\%$ от возможной), 2 - погода с облачностью ($\tau_{\odot}$=30-60% от возможной), 3 - пасмурная погода ($\tau_{\odot} < 30\%$ от возможной), 4 - погода с осадками (осадков до 5 мм), 5 - дождливая погода (осадков больше 5 мм). Погоды холодного времени года: погоды с переходом температуры воздуха через 0^{o}: 6 - солнечная погода ($\tau_{\odot} > 3$ часа), 7 - пасмурная погода ($\tau_{\odot} \leq 3$ ч.); окончание усл. обозначений см. рис.29.

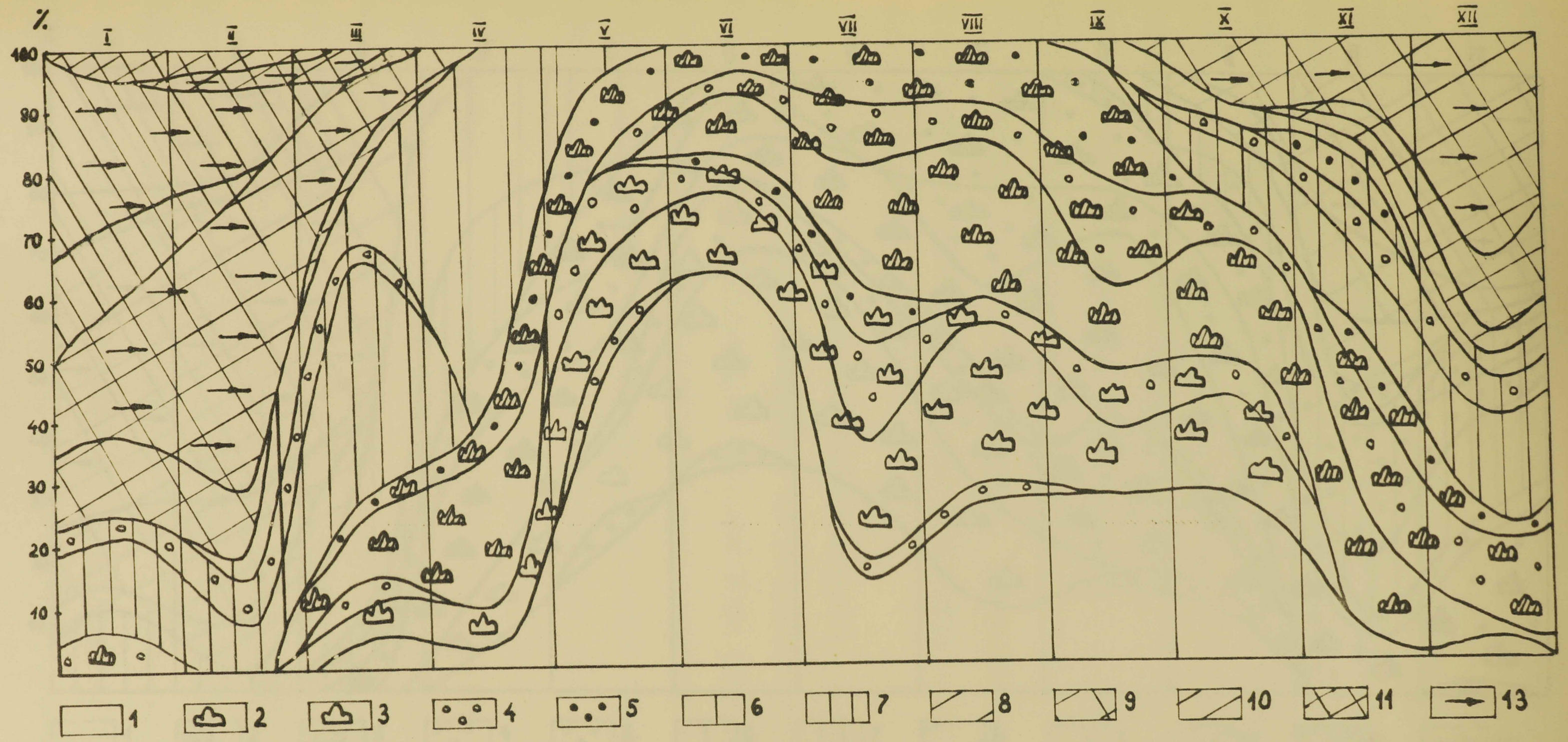


Рис. 29. Структура погод 1979 года (по метеоданным Тыравере). Условные знаки.Продолжение. Начало см.рис.28: морозные погоды: 8 - слабоморозная погода (среднесуточная температура воздуха $TC > -2,5^0$), 9 - умеренно морозная ($-2,5^0 \geqslant TC > -12,5^0$), 10 - значительно морозная погода ($-12,5^0 \geqslant TC > -22,5^0$), 11 - сильноморозная погода ($-22,5^0 \geqslant TC > -32,5^0$); окончание условных обозначений см. рис.30.

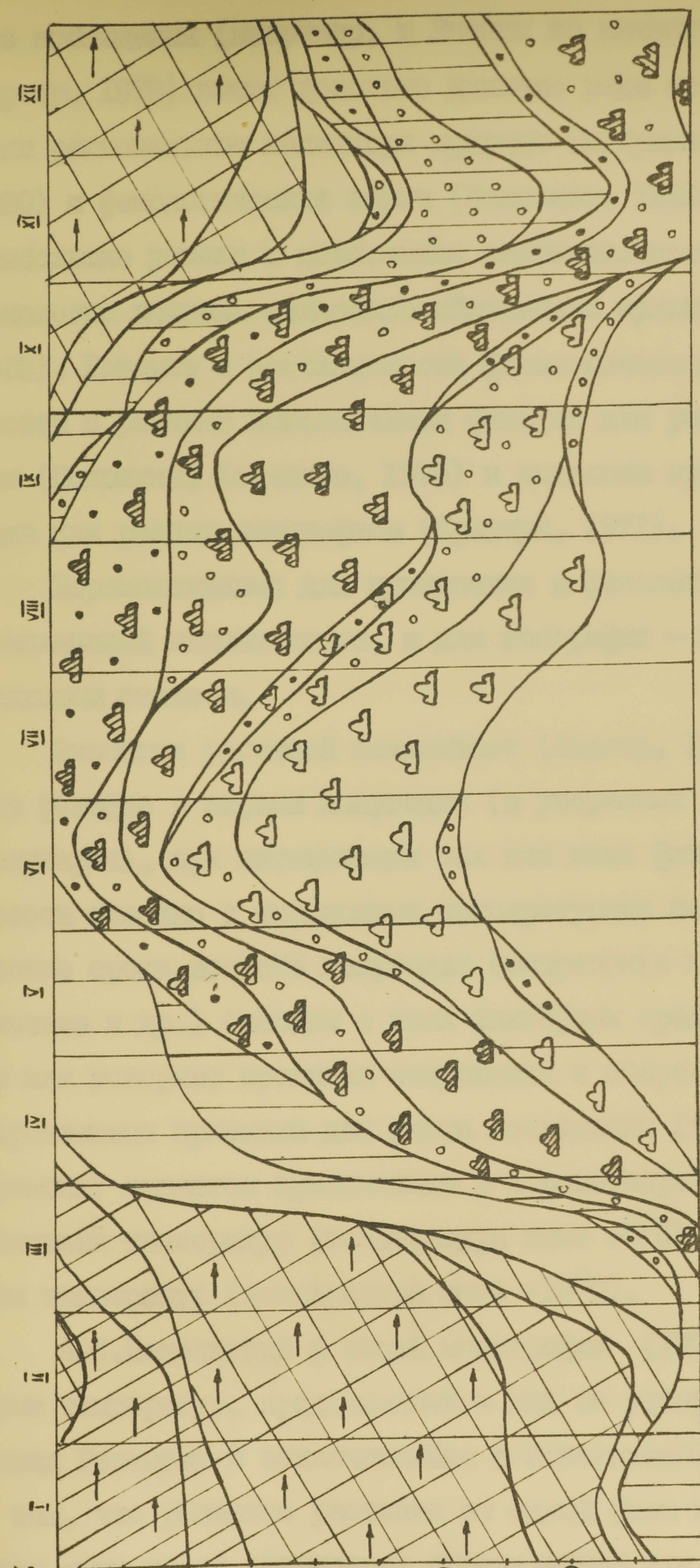


Рис. 30. Структура погоды (по метеоданным Тыравере). Условные знаки. Продолжение.
Начало см. рис. 28: I2 – жестоко морозная погода ($-32,5^{\circ} \geqslant TC > -42,5^{\circ}$), I3 – ветреные погоды (скорость ветра больше 2 м/с).

рые наблюдения (например, в Японии по началу цветения вишни - Лархер, I978) имеют довольно длинные ряды по времени. Составлены региональные календари природы (например, "Сезонная...", I980) и фенологические карты (Малышева, I968; Смирнов, I972). Наибольшие успехи и наибольшая систематичность достигнута в фенологии полевых сельскохозяйственных культур (Кротевич, I969). Говорят о необходимости фенологического изучения экосистем с разными показателями фенофаз для разных рангов экосистем (Полюшкин, Хомченко, I975) и выделены природные времена года для разных ландшафтов (Кравчук, I97I).

Перспективными для применения в фенологии являются идеи комплексной климатологии, а для географии - их объединение с подходом стексов.

Экология растений показывает (Лархер, I978), что наступление фенофаз в первом полугодии (в умеренных широтах северного полушария), при активизации тех или иных физиологических процессов связано с переходами температурных порогов. А фенологические сроки второго полугодия (созревание плодов, пожелтение листьев и др.) связаны с теми факторами среды, которые замедляют или ускоряют процессы созревания и старения. Самыми распространенными приемами для учета последнего (как биологического времени) являются применяемые в агрометеорологии методы суммы активных температур (температуры выше $+5^{\circ}C$) и суммы эффективных температур (температура выше $+I0^{\circ}C$).

А.С.Подольский в своей монографии (I974) критикует метод сумм температур, предложенный - как он утверждает - 230 лет назад Реомюром и заключающийся в использовании предположения о том, что развитие растения от одной фазы к другой завершается лишь после накопления определенной для него суммы сред-

несуточных температур. Действительно, попытки найти тесные связи между суммами активных температур и временами прохождения фенофаз Ф.Ф.Давитая (1964) не дали хороших результатов. Е.Ф. Тропова (1975) пишет по этому поводу, что некоторые виды фенологически устойчивы, другие фенологически неустойчивы, а некоторые виды фенологически устойчивы только при прохождении одной из фаз, понимая под фенологической устойчивостью неизменность суммы активных температур, накопленной растениями при прохождении фенофаз(ы). Г.Д.Уилямс (Williams, 1974) при рассмотрении фенологии ячменя в Канаде и Аргентине использует для определения (как он называет) биофототермической шкалы времени длину дня, минимальную и максимальную суточные температуры. Исследования, имеющие более экологический характер (Beddows, 1968; Benacchio, Blair, 1972) указывает на важность почвенных температур определенных глубин. Можно сделать вывод, что связь "показатель температуры - прохождение фенофаз" только первое, приближенное отражение соотношений биологического и погодного времен. Сказанное утверждают графики Х.Г.Штока (Stock, 1968), указывающие существенность вышеназванной связи у люцерна и клевера только в неоптимальных температурных условиях, и исследования И.Томкуса (1969), показывающие разные определяющие факторы в разных фенофазах (в общем-то давно известного в агрономии).

Кроме географических феноразличий и различий между видами, выделяются еще и индивидуальные феноразличия (Mandy, 1963), учет которых на обширных полях имеет большое значение при уборке урожая в сельском хозяйстве.

В то же время, несмотря на определенные недостатки способа сумм температур, пока не существует лучшего широко при-

менимого метода. На основе этого способа уже накоплен большой материал. Сумма активных температур - недостаточная, но необходимая, полезная и удобная характеристика для первоначального сравнения скоростей прохождения биологических процессов в разные годы. Применяемые за рубежом день-градусы (Nuttonson, I955) и единицы теплоты (Miller e.a., I97I) очень близки к активным или эффективным температурам.

Для сравнения разных годов мы определяли отклонение хода накопления тепла - суммы активных температур - конкретных годов от многолетнего среднего хода этой кумуляты. Также сравнивали скорости прохождения разных фенофаз. Результаты изображены графически на рисунке 3I. Видно, что I978 год был относительно холодным, I979 - теплым, а I980 - близким к норме. Одновременно нельзя не заменить множество сходных свойств кривых. Прежде всего выделяются периоды потеплений и похолоданий (им на рисунке соответствует подъем или спуск кривых) - их времена наступления и выраженность отличаются из года в год, но количество и последовательность удивительно сходные. Такие периоды, близкие к фазам Н.Н.Галахова (I959) или региональным ритмотипам Г.П.Колобкова (I979) появляются также зимой. Они находят свое выражение в изменениях состояний геосистемы.

4.2. Порядок проведения численных экспериментов

Имитационная система состоит из 24-х программных модулей. В ходе отладки и верификации их и экспериментировании с системой было проделано около полутысячи прогонов на ЭВМ (в начале на БЕСМ-6, потом на ЕС-I022) в вычислительных центрах Московского и Тартуского госуниверситетов. Требуемый объем оператив-

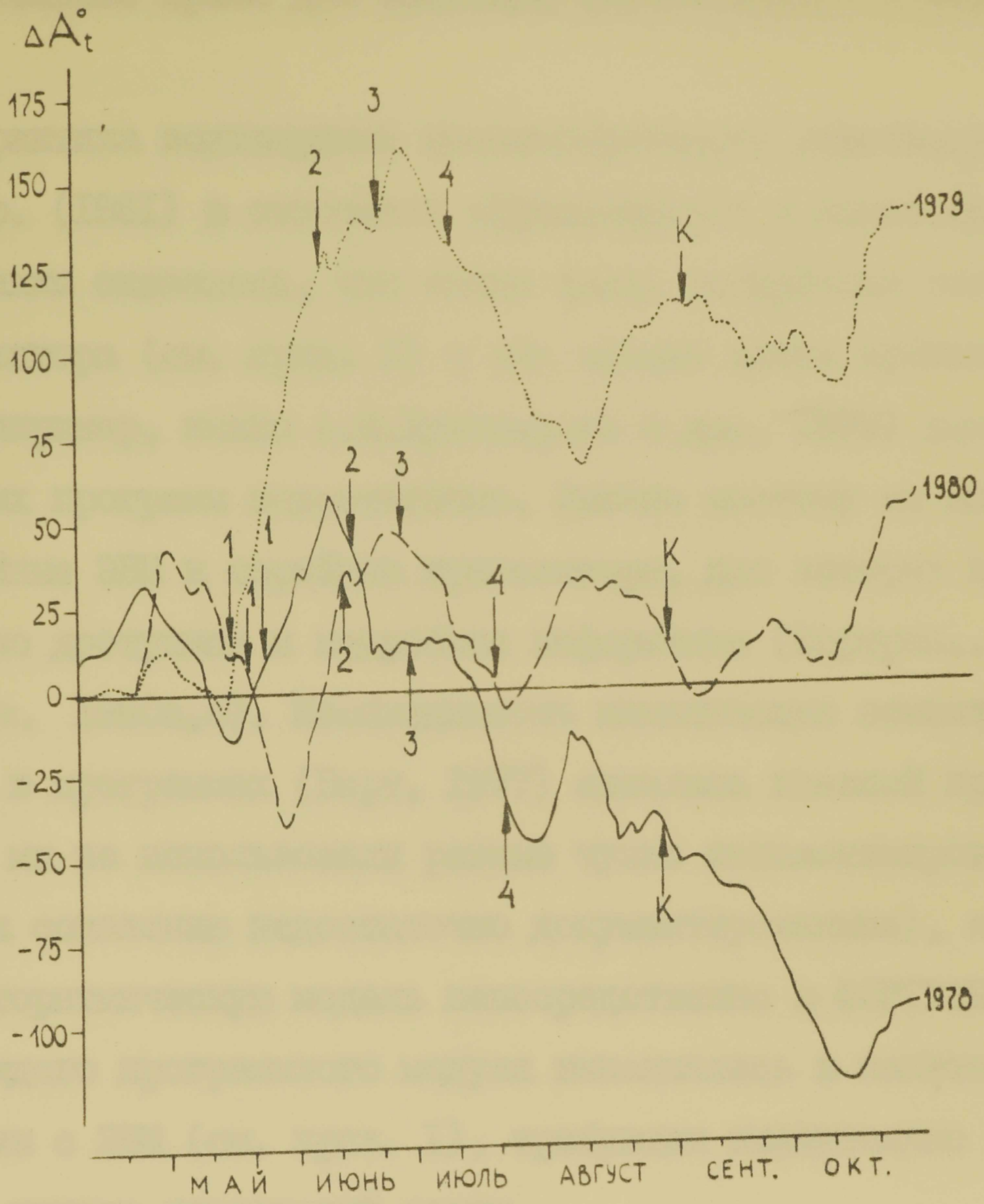


Рис. 3I. Сравнение хода накопления суммы активных температур (At) рассматриваемых годов (I978-I980) с климатически средним ходом накопления суммы активных температур (нулевая ось). Стрелками показаны следующие фенофазы: I - посев ячменя "Отра", 2 - его кущение, 3 - колошение, 4 - молочная спелость; К - завядание ботвы картофеля "Сулев".

ной памяти ЭВМ для работы с имитационной системой составляет (в зависимости от режима имитации) 55-I30 Кбайт. Ориентировочное вычислительное время для имитации одного года - I минута на ячейку.

Наша практика подтвердила целесообразность рекоменцаций Ч.Хьюза и др. (I98I) в отношении эффективности и изменяемости программ. Также оказалось, что важно знать конкретные особенности транслятора (см. прил. I) и что знание общих правил ФОРТРАНА (например, книга А.М.Бухтиярова и др., I979) для отладки сложных программ недостаточно. Именно поэтому мы использовали серийные ЭВМ и серийные трансляторы, для которых имеется достаточно доступная и подробная информация (Фортран... I978; Kaasik, I980а,б). Необходимость минимизации семантических ошибок в программах (Вирт, I977) являлась главной причиной, почему мы не использовали разные чужие каталогизированные программы (к сожалению недостаточно документированные), а реализовали алгоритмическую модель непосредственно в ФОРТРАНЕ. Откладка каждого программного модуля выполнялась в пакетном режиме работы с ЭВМ (см. прил. I), требующем значительно больше времени, нежели диалоговый режим.

При отладке, контроле и уточнении функциональной структуры блоков мы старались добиться того, чтобы характер и ход процессов качественно правильно имитировался на ЭВМ. После достижения этой цели мы провели анализ чувствительности результатов моделирования от начальных значений переменных состояния и от разных параметров в функциональных связях. Синтез из отдельных блоков целостной модели осуществлялся в виде нескольких последовательных операций в зависимости от взаимосвязей функциональных блоков. Наконец, вся имитационная система была

отлажена и полученные результаты сравнивались с наблюдениями, чтобы оценить точность этих результатов и объяснить причины локальных несоответствий между расчетными величинами и материалами натурных наблюдений.

Численные эксперименты были проведены при помощи выбора тех или иных параметров конкретной прогонки модели на ЭВМ (описание этих параметров см. в прил. 2). Они имитировали: а) изменения природных условий (выбор гидрометеоданных того или иного года), б) разные (или разновременные, или с разной интенсивности) антропогенные воздействия, в) изменения в свойствах геотехносистемы, г) оптимальность той или иной структурной части геотехносистемы.

Один аспект проблемы выбора начальных значений выражается в конкретном вопросе: с какого дня по календарному времени начинать имитацию. Очевидно, с I января это сделать невыгодно, потому что тогда мы должны ввести в модель значения высоты и плотности снежного покрова, содержания в нем незамерзшей воды, глубины промерзания и других параметров 3I декабря. Лучше подходит принцип выделения гидрологического года, имеющего начало в осенние месяцы, когда переходящие из года в год запасы влаги в речных бассейнах малы (Чеботарев, 1978). Нам кажется целесообразным начинать моделированные тогда, когда геогоризонтная структура имеет наименьшую сложность. В климатических условиях Прибалтики этому соответствует поздняя осень, когда вегетационный период окончен, но зимние геогоризонты еще отсутствуют. Влажность почвы описывается полевой влагоемкостью и капиллярной влажностью, испарение практически отсутствует. Поздней осенью можно найти день, когда осадки, поверхностный сток и инфильтрация отсутствуют. Такой день минимальной функциональ-

ной активности геотехносистемы мы считали подходящим для начала имитирования. Следовательно, выбор начального дня нельзя связывать каким-нибудь конкретным календарным сроком, а это зависит от погодных условий конкретного года. Для сравнения разных лет можно определенную начальную часть моделирования просто рассматривать как генерацию начальных значений и сопоставить между собой календарные годы, с которыми связана вся остальная географическая информация.

Учитывая пионерный характер модели, возможности использования ЭВМ и ограниченный объем эмпирического материала, мы не ставили перед собой оптимизационной задачи управления, так как для этого требуется дополнительные исследования по экономике. Но логическая структура имитационной системы и ее вычислительная программа позволяет легко присоединить к модели POLDER оптимизирующий блок, когда он будет создан, или имитировать функционирование геотехносистемы с оперативным управлением в диалоговом режиме, когда географ в ходе прохождения в модели процессов (результаты которых выдаются на дисплей) может выбирать те или иные антропогенные воздействия. Одновременно с уточнением функциональной структуры модели, оптимизация является следующим важным этапом исследования, требующим тесного сотрудничества с агрономами, мелиораторами и экономистами.

4.3. Обсуждение модели

Цель проведенных на модели расчетов заключалась в выяснении: I) насколько результаты имитации соответствуют реальной системе, 2) какова природа причин различий между наблюдениями и расчетами, 3) как влияют на ход процессов разные (в том чис-

ле управляемые) параметры.

Оценка точности модели затруднена тем, что результаты натурных наблюдений и результаты расчетов не полностью сравнимы. В материалах наблюдений присутствуют случайные, не учтенные в модели факторы. А сами наблюдения - средние значения изменчивых величин - определены с некоторой вероятной ошибкой. Поэтому на основе сравнения расчетов с наблюдениями не удается вывести строгих количественных показателей точности результатов моделирования.

Внутригодовая динамика польдера естественным образом разделяется на холодную (зима) и теплую части года. Первую характеризует наличие снежного покрова, который наименее зависит от других геогоризонтов.

Для проверки его динамики использовали наблюдения толщины снежного покрова, сделанные в актинометрической станции Тыравере. Для этого в модель были введены данные об осадках в Тыравере. Остальные входные данные (см. прил. 2) остались такими же, которыми мы пользовались для польдера. По условиям перераспределения снега в основу выбирали среднюю часть друмлина Тамме как возвышенную открытую местность, на первый взгляд похожую по условиям перераспределения снега около метеоплощадки в Тыравере. Действительное перераспределение снега в последнем не изучалось.

Результаты сравнения представлены на рис. 32. Соответствие в общем неплохое, особенно если анализировать причины расхождений в последней декаде декабря. Единственной причиной уменьшения толщины снежного покрова с I9 по 25 декабря в Тыравере может быть выдувание снега, которое в модели не учитывается.

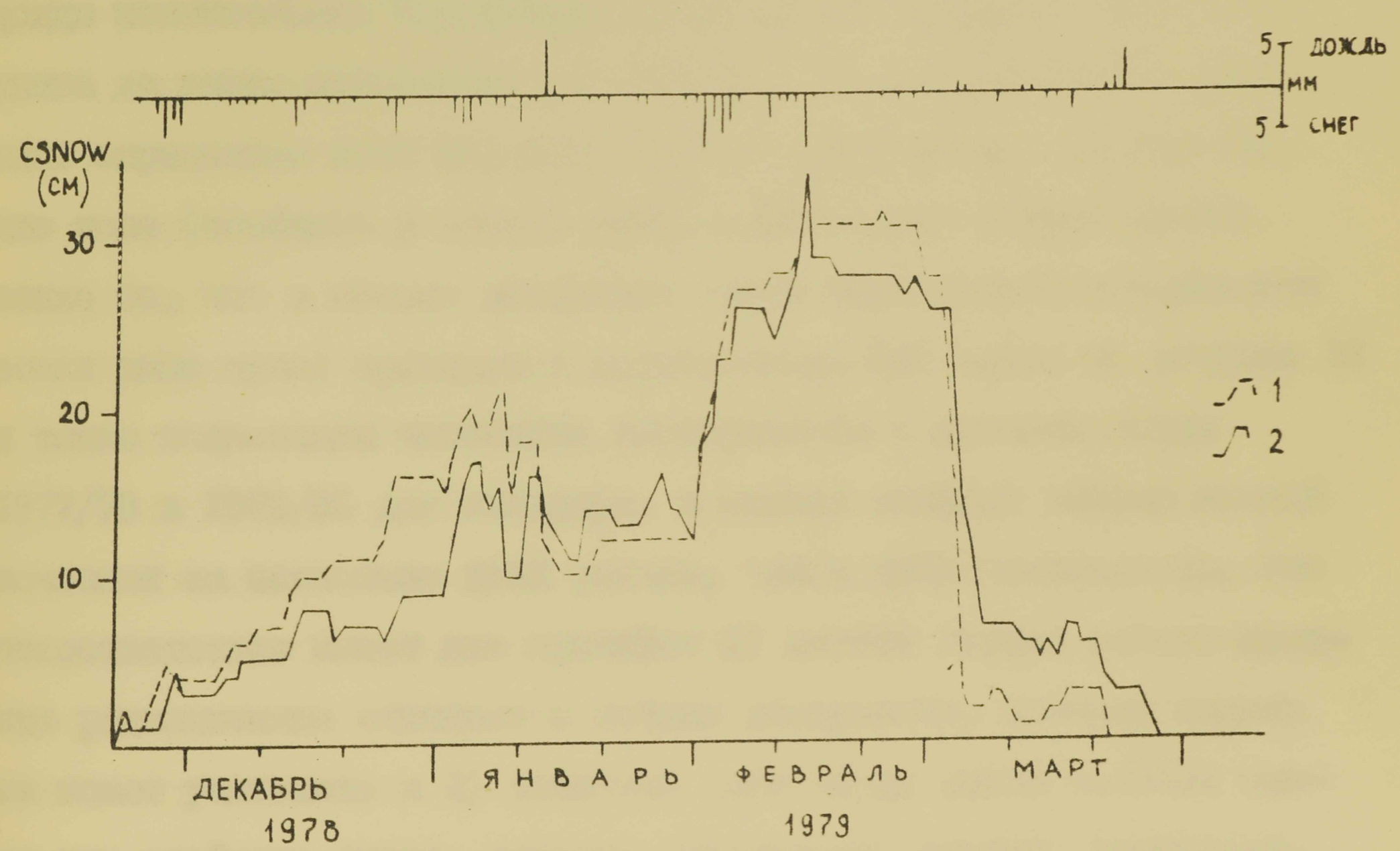


Рис. 32. Сравнение наблюдений и расчетов по толщине снежного покрова (CSNOW). I.Расчетная толщина. 2.Наблюденная толщина.

Анализ чувствительности хода динамики снежного покрова от входных данных показал, что формула снеготаяния П.П.Кузьмина весьма чувствительна к температуре поверхности снега, точнее к температурному градиенту над снежным покровом и этим лимитируется точность расчетов. Имитация показала, что снежный покров малой плотности обладает значительной буферной способностью относительно оттепелей, но при этом его плотность увеличивается и стабильность уменьшается. Чувствительность мокрого снега к дождю значительная и в природе изменение характера осадков от снега до дождя происходит постепенно. Но входные данные позволяют определить этот характер только качественно и дискретно, что тоже (особенно в начале зимы, когда может сильно влиять также то, что в момент выпадения снега температура поверхности земли выше нуля) приведет к неточностям. Как видно на рисунке 32 и также показывали численные эксперименты с данными годов 1977/78 и 1979/80 для польдера, в модели снежный покров весной исчезнет на несколько дней раньше, чем в действительности. Это несоответствие имеет две причины: 1) весной сильно влияют дневные радиационные оттепели и ночные замерзания, которые модель не может учитывать и 2) весенний снег перед самым таянием имеет уже свойства фирна, которые описываются другими формулами. Эмпирические коэффициенты функции перераспределения снега (см. прил. 5) были введены на основе оценочных баллов, с учетом природных условий польдера. В соответствии с выбранными параметрами были проведены расчеты, результаты сравнивались со снегомерными профилями 1980 года. По выявленным различиям корректировались коэффициенты уравнения и расчеты повторялись. Проведя два тура корректировки этой функции, мы добились точности, при которой средняя разница между расчетными и наблюденными

профилями снега была I8%. Проверка на независимом материале (данные зимы I978/79 по рейкам мерзлотомеров Данилина) дала среднюю ошибку 28% (~ 5,5 см). Это примерно соответствует среднеквадратичному отклонению в данных снегомерных съемок для одной ячейки, т.е. для гомогенной (в отношении модели) площадки.

Зимы I977/78 и I979/80 оказались противоположными по стабильности снежного покрова, что особенно сильно сказывалось в тех ячейках, где снежный покров был малой мощности. В I980 году с I января по 28 марта не было ни одной заметной оттепели, что является исключительным для Эстонии, и это несомненно облегчало выведение функции территориального перераспределения снега.

Промерзание почвы (его глубина) интегрально охватывает работу всей имитационной системы в зимнее время и испытывает сильное влияние толщины снежного покрова.

Для оценки правильности и работоспособности блока промерзания были вначале проведены отладочные расчеты на основе предположения об отсутствии снежного покрова. Они дали сильно повышенные результаты, но позволили вывести и уточнить алгоритм имитации промерзания почвы, который первоначально содержал гораздо меньше вспомогательных переменных для локальных времен длительности разных "подпроцессов" при промерзании-оттаивании. Необходимость более детального учета таких параметров выяснилась в ходе практической работы с изменчивыми природными условиями. Когда ход кривой промерзания почвы качественно правильно отражал изменение температуры на поверхности почвы, мы учитывали также снежный покров и изменение влажности почвы.

Сравнение наблюдений и расчетов для трех супераквальных

ячеек с разными почвами представлено в таблице 13. Видно, что для зимнего времени совпадения хорошие. В конце зимы в период схода снега модель плохо описывает ход действительных процессов. Во-первых, отсутствие снежного покрова в модели (при наличии его в действительности) приведет к заметным различиям в температурах на поверхности почвы и как следствие - чрезмерному увеличению глубины промерзания в модели (данные 21-го марта в табл. 13). Во-вторых, вода снеготаяния вносит в почву тепло, одновременно изменяя характер хода инфильтрации, и увеличивает скорость таяния почвы сверху.

Можно сделать вывод, что для удовлетворительного моделирования динамики геотехносистемы польдера в конце зимы - начале весны, когда наблюдаются специфические интенсивные процессы, необходимо учитывать дополнительные факторы. Для этого требуется проведение уже специальных отраслевых исследований и выработка подходящих формул количественного описания.

При сравнении результатов наблюдений и расчетов особый интерес представляет анализ тех случаев, когда появляются различия. Моделирование позволяет изучить зависимость этих различий от разных параметров. В качестве примера рассмотрим случай плохого совпадения сравниваемых материалов и попытки выявить причину этого несоответствия.

На рисунке 33 изображены точки наблюдений и кривые проведенных расчетов о промерзании в элювиальной ячейке с супесчаной почвой и маломощным снежным покровом. Начало зимы было в этом году (1978) исключительно холодным для Эстонии. Сток воды со снега до начала марта отсутствовал, а в марте был незначительным, поэтому влажность почвы в течение зимы мало изменялась. Следовательно, в таких условиях повысилась роль начальных ус-

Таблица I3

Сравнение глубин промерзания почвы, определенных экспериментально и при помощи модели (глубины в сантиметрах)

Ячейки / Срок	№ I7 наблюд.	№ I7 расчет	№ 24 наблюд.	№ 24 расчет	№ 39 наблюд.	№ 39 расчет
7/I2 I978 г.	–	5	I5	I0	9	7
I8/I2	–	8	20	I6	I3	II
29/I2	I3	I3	26	24	I5	I7
8/0I I979 г.	I8	I4	29	26	I7	I8
I8/0I	I5	I5	27	27	I9	I9
30/0I	I4	I7	28	32	I8	2I
7/02	I5	I7	29	32	2I	2I
I6/02	I5	I7	28	32	2I	2I
26/02	I6	I7	32	33	22	2I
7/03	6/I4+	2/I4	32	29	22	I8
. . . . .						
2I/03	I2	25	I8	42	2I	27
30/03	0	24	I7/27	5/40	2I	25
8/04	0	0	20/24	22/22	0	0

+ числитель указывает толщину верхнего талого слоя.

ловий и мы попытались найти такие начальные условия или параметры, которые описывали бы точки наблюдений наилучшим образом. На основе анализа рисунка можно сделать два вывода. Во-первых, ряд точек наблюдений не удалось объяснить. Не исключено, что столь быстрое увеличение глубины нулевой изотермы мерзлотомера Данилина вызвано плохой термоизоляцией конкретного мерзлотоме-

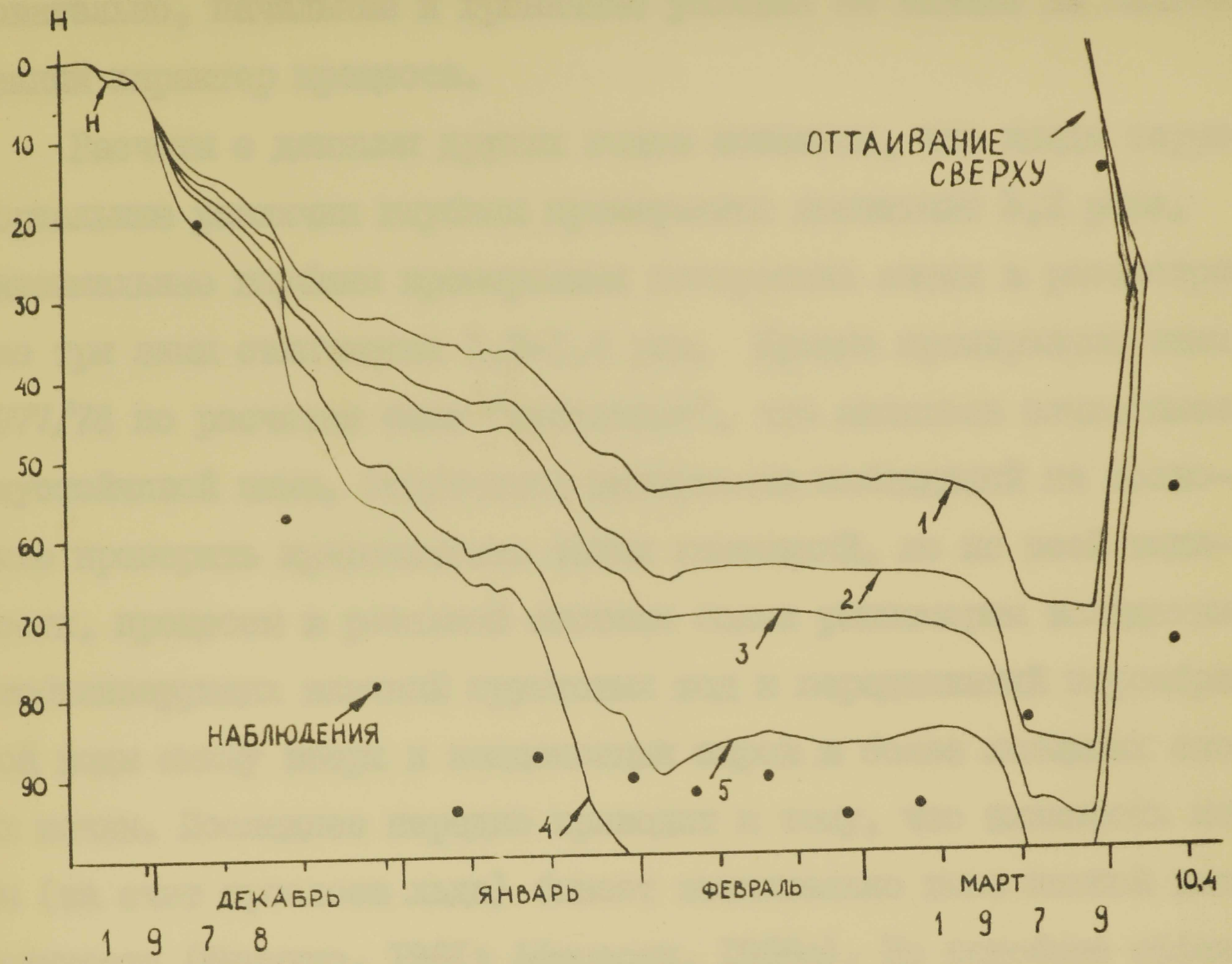


Рис. 33. Ход изменения глубины промерзания почвы зимой I978/I979 на вершинной части друмлина Тамме. Сравнение наблюдений с расчетными кривыми, полученными при следующих начальных условиях: I - влажность почвы (W_o) равняется полной влагоемкости, температура в глубине затухания сезонных колебаний (T2) равняется $6,0^o$; 2 - W_o равняется полевой влагоемкости, T2=$6,0^o$; 3 - W_o равняется полевой влагоемкости, T2=$4,8^o$; 4 - W_o равняется 60% от полевой влагоемкости, T2=$4,8^o$; 5 - то же, что при кривой I, но теплопроводность снега увеличена на два раза.

ра и его показания следует рассматривать как ошибку наблюдения. Во-вторых, все кривые моделирования имеют сходную форму - следовательно, начальные и граничные условия не влияют на качественный характер процесса.

Расчеты с данными других годов показали, что когда территориальные различия глубины промерзания достигают 5,2 раза, максимальные глубины промерзания конкретных ячеек в рассмотренные три зимы отличаются I,2-I,4 раз. Кривые промерзания зимы I977/78 по расчетам были "зубчатыми", что являлось следствием неустойчивой зимы. Отсутствие материалов наблюдений не позволило проверить правильность таких изменений, но по всей видимости, процессы в реальной системе более равномерны вследствие стабилизирующих влияний грунтовых вод и передвижений парообразной воды снизу вверх и конденсации паров в более холодных слоях почвы. Последнее нередко приводит к тому, что влажность почвы (за счет прослоев льда) бывает значительно выше полной влагоемкости (Шкинкис, I96I; Афанасик, I966а). Но подобные эффекты наша модель не может учитывать.

Проверка показала, что имитационная система позволяет характеризовать зимние состояния с достаточной точностью и в будущем целесообразно прибавить к модели подблок, учитывающий условия перезимовки озимых зерновых. Конец зимы требует для адекватной имитации специального подхода и дополнительных наблюдений для вывода вспомогательных эмпирических параметров. Заметное усложнение географической модели для этого короткого сильно нестационарного периода вряд ли оправдан. Последействие зимы на весну, заметное в Сибири (Крауклис, I979), является в климатических условиях Прибалтики незначительным. Учитывая также, что разница времени полного оттаяния почвы (меж-

ду моделью и наблюдениями) составила всего несколько дней, что начало вегетационного периода в действительности лимитировалось температурой воздуха, и что температура в почве для биопродукционного процесса расчиталась на основе температуры воздуха (по Keulen, 1975) можно заключить: точность имитации периода ранней весны не уменьшает точности имитации вегетационного периода.

Поверхностный сток тоже относительно мало зависит от процессов, которые имитировались другими блоками. О поверхностном стоке отсутствовали данные измерений. Оценочные глазомерные наблюдения на польдере показали, что поверхностный сток летом очень кратковременен и трудноизмеряем. При работе с блоком поверхностного стока главное внимание было обращено на определение длины итеративного шага по времени для расчета поверхностного стока.

В каждой склоновой ячейке при конкретных условиях, определяющих шероховатость подстилающей поверхности, скорость стока VST = const * H ** 0,6, т.е. при увеличении водоотдачи в два раза скорость стока увеличивается в полтора раза. Если относительный сток RSTOK<1 , вода начинает накапливаться в ячейках, что приведет к увеличению водоотдачи и т.д., пока при RSTOK = 1 вся поступившая вода стекает. С другой стороны, ситуация, при которой RSTOK>1 указывает на слишком длинный итеративный шаг по времени и в определенной степени искажает соотношение просочившейся и стекшей воды. Длина итеративного шага в модели на количество инфильтрированной воды практически не влияет, следовательно длину шага целесообразно выбирать такой, чтобы RSTOK≈1 . Этот шаг вместе с количеством осадков лимитирует водоотдачу H . В связи с этим представляет ин-

терес, при каких водоотдачах - назовем их критическими (Нкр) - относительный сток равняется единице.

Рассмотрим конкретный пример. Летом I980 года характер поверхностей склоновых ячеек и критическая водоотдача по данным численных экспериментов были следующими.

I. Зерновые культуры средней густоты, сеянные продольными рядами. Коэффициент шероховатости М=0,006, Нкр=0,I5 мм/сут.

2. Многолетние травы средней густоты; М=0,00I, Нкр=I,3I.

3. Многолетние травы средней густоты; М=0,00I, Нкр=24,7.

4. Многолетние травы средней густоты; М=0,00I, Нкр=I9,0.

5. Пропашные культуры (картофель) продольной обработки; М=0,0I75, Нкр=0,067.

6. Густой растительный покров из многолетних трав, имеются микровпадины; М=0,0005, Нкр=34,3.

Приведенные значения получены для условий отсутствия предшествовавшего стока; при наличии этого, критическая водоотдача уменьшается на 8-35%. Графическая зависимость относительного стока (RSTOK) от Н приведена на рисунке 34.

Можно сделать два вывода. Во-первых, Нкр различаются до 5I0 раз и в то время, когда при густой растительности многолетних трав внутрисуточные итерации практически не требуются, при пропашных культурах требуется весьма маленький шаг и вообще поверхностный сток при помощи нашей модели описывается плохо. Во-вторых, эти большие различия в основном определяются коэффициентом шероховатости, а последний в свою очередь известен только приближенно - следовательно, точное определение длины итеративного шага не увеличивает в действительности точность имитации поверхностного стока.

Суммарное испарение оказалось трудно проверяемым компонен-

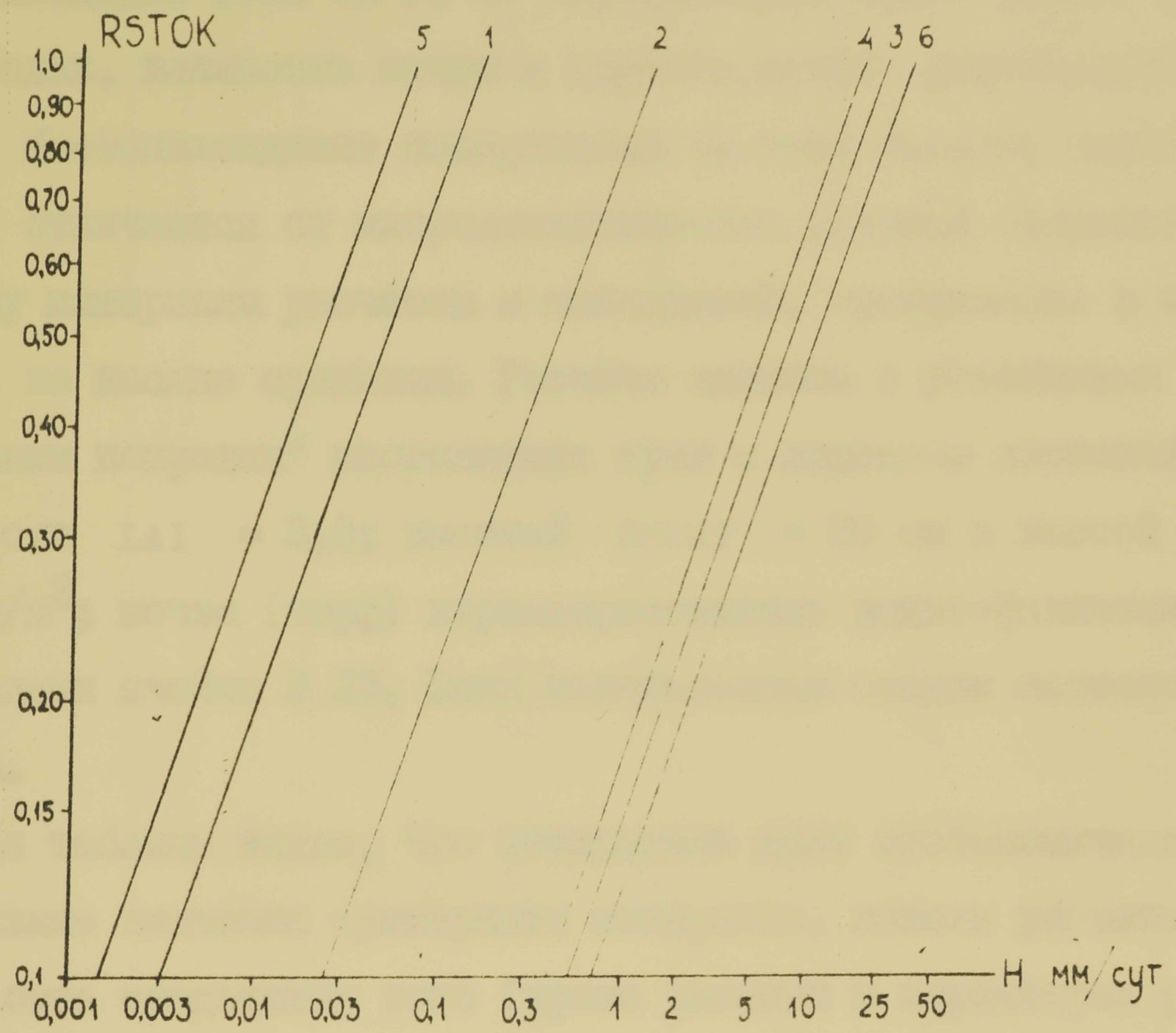


Рис. 34. Зависимость относительного стока (RSTOK) от водоотдачи (H) при условиях отсутствия предшествовавшего стока в склоновых ячейках польдера (их описание в тексте).

том круговорота воды. Оно как интегральный характеристик сильно зависит от параметров растительного покрова и влажности почвы. При наблюдениях, проводимых на польдере Тамме гидрогеологической партией Управления Геологии ЭССР двумя испарителями (один с минеральной почвой и площадью 500 $см^2$, другой с торфяной почвой и площадью I000 $см^2$), не определялись такие важные факторы как осадки, влажность почвы и характеристики растительного покрова. Местонахождение испарителей (в тени больших деревьев и домов) отличается от микроклиматических условий открытого поля. Поэтому материалы расчетов и наблюдений, приведенных в таблице I4, не вполне сравнимы. Расчеты сделаны с устойчивым "растительным покровом" многолетних трав с индексом листовой поверхности LAI = 3,0; высотой GHGHT = 30 см и массой корней I500 $г/м^2$; почва (торф) характеризовалась водно-физическими показателями ячейки № 23. Были использованы осадки метеопоста Курекюла.

Из таблицы видно, что испаритель дает систематически более низкие значения суммарного испарения, нежели расчеты. Это может быть следствием того (кроме разницы в параметрах растительного покрова и в метеоусловиях, в особенности в осадках), что почва в испарителе сохнет быстрее, чем естественная почва. При ливневых осадках (см. 6-I0 июля, I6-20 сентября в табл.I4) испаритель дает маловероятные данные. Расчетное суммарное испарение за весь рассматриваемый период (I/У-30/IX) было 36I,4 мм, наблюденное - 299,5 мм.

Относительную транспирацию мы попытались измерить на ячмене по методу И.И.Судницына (I979, с. I83-I85), проводя измерения утром (при росе) и в полдень ясного сухого и теплого летнего дня. Результаты оказались неудовлетворительными: по

Таблица I4

Сравнение расчетов (числитель) и наблюдений (знаменатель) I979 года
по суммарному испарению (в мм-ах) на торфяной почве с многолетними травами

Период времени	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь	
	расчет / наблюд.	осадки	расчет / наблюд.	осадки	расчет / наблюд.	осадки	расчет / наблюд.	осадки	расчет / наблюд.	осадки
I-5	7,4 / 4,I	I7,I	29,I / I7,0	0,0	I2,I / I2,0	I8,0	I3,8 / I6,I	2,I	9,I / 8,I	3,6
6-I0	I0,I / II,I	I5,I	I9,4 / I6,I	I,6	II,I / -4,3	25,2	I0,2 / I0,9	0,4	5,5 / 7,0	6,5
II-I5	I2,9 / 9,I	9,6	I6,7 / I4,8	23,3	I0,5 / 9,8	9,3	I2,7 / 5,3	0,8	6,0 / 7,9	3,9
I6-20	20,I / I3,8	5,3	I7,5 / II,5	0,5	I2,3 / I2,5	2,5	I3,0 / 8,8	I,3	5,I / I0,4	26,9
2I-25	22,3 / 9,0	0,0	2I,5 / I6,0	0,0	I3,I / 9,2	I2,2	5,4 / 5,8	27,3	3,8 / 3,4	5,9
26-30	I6,9 / I3,5	4,5	I2,4 / 8,9	0,9	II,9 / I2,0	20,0	7,3 / 7,9	I2,9	3,3 / II,8	I3,8

Примечания: 3I-ое число отнесено к началу следующего месяца.

всей видимости, требуются весы (в месте наблюдений) точностью более 0,05 г и с конструкцией, позволяющей измерить вес отдельного растения. Поэтому мы по компонентам суммарного испарения должны ограничиться качественными рассуждениями, отмечая, что примененные нами формулы были проверены и обсуждены в работах, указанных в п. 3.4.

Как общая тенденция отмечалась, что параметры растительного покрова, учитываемые зависимостями Рийтема (см. рис. I3-I6), увеличивают вариабельность потенциальной транспирации и делают ее весьма чувствительной к скорости ветра и дефициту влажности.

Таким образом, транспирация по модели в отдельные жаркие сухие дни с достаточным ветром достигает 7 мм/сут, а при тихой пасмурной погоде, при наличии достаточного количества воды на поверхности хорошо развитого (индекс листовой поверхности LAI I0) растительного покрова (РП) совсем отсутствует. Но таких крайних ситуаций немного. Модель показала значительное влияние количества воды на поверхности РП многолетних трав на их относительную транспирацию. Поэтому в дальнейшем целесообразно более дифференцированно учитывать появление росы в разных ячейках, используя для этого микроклиматические поправки.

Для испарения почвенной влаги вначале (на основе литературных источников) запас воды в верхних слоях почвы после смачивания ее был принят постоянным и равным I0 см (см. 3.4). Вода в модели испарялась с верхнего горизонта почвы толщиной I0 см. Расчеты на модели показали, что в таких условиях в начале лета (в июне) верхний горизонт почвы становится слишком сухим и молодые растения (ячмень, картофель), имеющие в эту пору неразвитую (неглубокую) корневую систему, не могут существовать в такой "почве". Поэтому запас воды для испарения из

почвы (после израсходования которого это испарение уменьшается по экспоненциальному закону) был поставлен в соответствии с осадками. Дополнительный учет влияния количества осадков на испарение в модели О.Д.Сиротенко, например, достигается при помощи эффективных осадков - последними для посевов ячменя считаются осадки, суточная сумма которых превышает 0,2 мм до колошения и 0,9 мм после колошения (Сиротенко, Просвиркина, I977).

По мере развития РП доля физического испарения быстро уменьшается и при LAI = 2-3 становится практически нулевой. Испарение с воды на поверхности почвы на вегетационных периодах рассматриваемых трех годов отсутствовало.

Влажность почвы на польдере по данным наблюдений характеризовалась большой изменчивостью и абсолютные их значения были мало обзорными. Для оценки материалов наблюдений и для нахождения обоснованных средних влажностей (на основе 4 проб каждой ячейки при каждом наблюдении) их обработка была проведена графически. Оказалось, что просто арифметические средние по пробам не всегда дают правильные результаты. Дело в том, что при весовом методе определения влажности мы, строго говоря, каждый раз определяем влажность разной почвы. Хотя места взятия проб удалены друг от друга всего на несколько метров, возникают случаи, подобные изображенным на рисунке 35а. Но эти различия обычно не появляются в таком явном вида и без графического анализа их не удается учитывать. При обработке данных наблюдений по влажности почвы мы основывались на опорные почвенные шурфы (для рис. 35 см. фотографию I) и на логический анализ. Поэтому, при представленном на рис. 35а случае данные кривых I и 2 (испытывающие, по-видимому, влияние более глинистых прослоев) исключились из рассмотрения и осредненный профиль влажности оп-

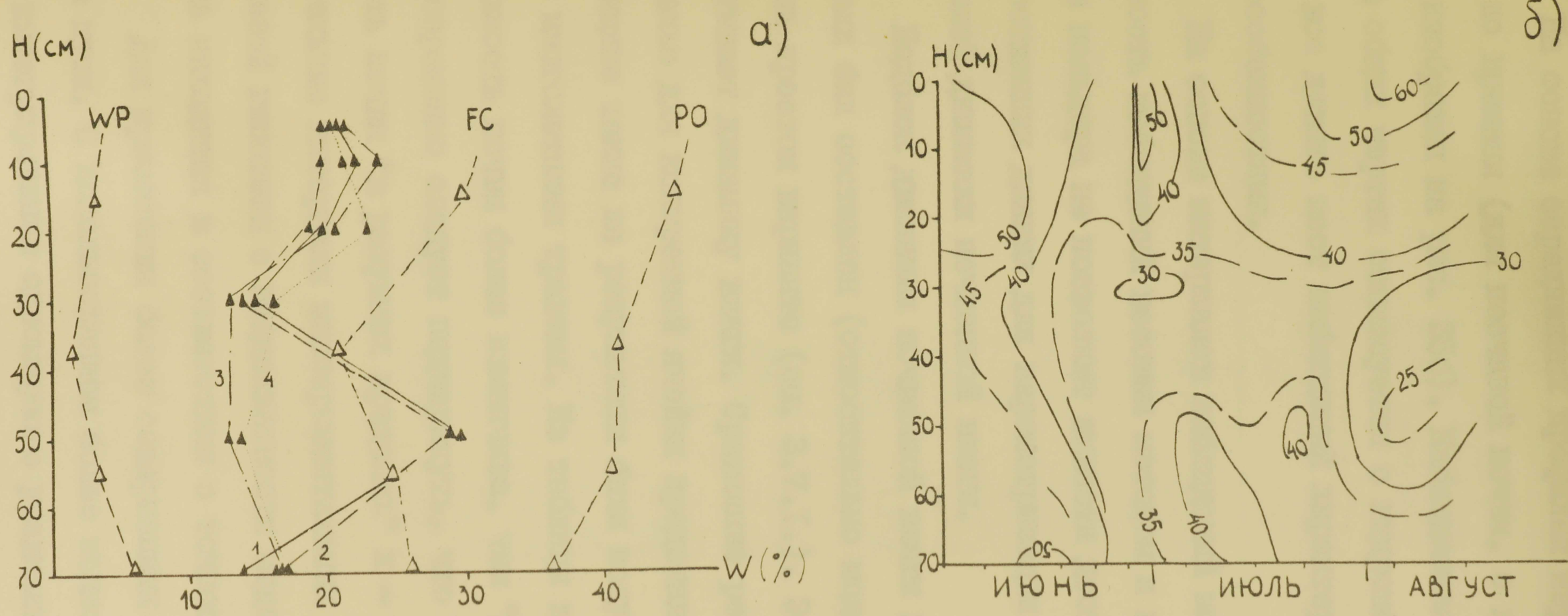


Рис. 35. Динамика влажности почвы по наблюдениям 1980 г. (описание профиля см. фото I); а) изменение влажности по глубине (в объемных процентах) I5/УII; б) изменение влажности почвы по времени (в процентах от полной влагоемкости). WP - влажность завядания; FC - полевая влагоемкость; PO - полная влагоемкость.

ределялся по кривым 3 и 4.

На основе осредненных профилей изучалась динамика влажности по времени (для песчаной почвы, о которой шла речь, такой ход изображен на рис. 35б). Наблюдаемая динамика влажности почвы в общих чертах согласуется с гидрометеоусловиями. Но в деталях все девять мест наблюдений характеризовались индивидуальными особенностями.

На основе материалов наблюдений можно делать вывод, что точность наблюдений весовым методом и изменчивость реальных почв польдера не позволяют вывести достаточно обоснованных количественных данных для параметризации и контроля математических моделей динамики почвенной влаги.

Подблок движения почвенной влаги в окончательном варианте модели был составлен (относительно моделей физики почвы) в очень простом варианте (см. 3.7.I.). Этот блок довольно "жестко" учитывает динамику влаги. Сравнение результатов наблюдений с моделью для конкретной ячейки представлено в таблице I5. В принципе такие же результаты были получены в ячейках с ячменем и с многолетними травами. Из таблицы видно, что действительная влажность почвы более изменчива, чем "влажность" в модели. Но одновременно следует подчеркнуть, что модель поддерживает влажность почвы "в разумных пределах" и - что самое главное - доверительные интервалы экспериментальных данных не подтверждают нулевой гипотезы о неадекватности модели. Другими словами - модель находится в соответствии с точностью наблюдений.

Для применения более совершенных подмоделей почвы имеется два пути. С использованием более мощной ЭВМ можно по численному интегрированию одномерного уравнения потока для польдера получить "точные" профили влаги. Но тогда более 99% машинного

Таблица I5

Сравнение расчетов (числитель) и наблюдений (знаменатель) по влажности почвы (ячейка № 37, посеяна картофелем "Сулев" 9/У I980 густотой 4,44 раст/м^2)

Срок	Глубина				
	I0	20	30	50	70
I8/06 80 г.	0,52	0,59	0,59	0,73	0,94
	0,42	0,47	0,33	0,7I	0,87
25/06	0,59	0,59	0,59	0,73	0,92
	0,42	0,46	0,47	0,78	0,84
4/07	0,23	0,58	0,59	0,73	0,73
	0,39	0,42	0,50	0,75	0,79
I5/07	0,45	0,50	0,58	0,73	0,73
	0,44	0,47	0,40	0,77	0,89
23/07	0,44	0,47	0,59	0,73	0,73
	0,36	0,40	0,4I	0,69	0,8I
4/08	0,53	0,42	0,59	0,73	0,73
	0,39	0,30	0,29	0,56	0,84
I4/08	0,57	0,58	0,59	0,73	0,73
	0,42	0,40	0,36	0,64	0,86
Полевая влагоемкость	0,59	0,59	0,59	0,73	0,73
Полная влагоемкость	I,00	I,00	I,00	I,00	I,00

расчетного времени тратится на определение коэффициентов влагопроводности и капиллярной диффузии почвы. Вряд ли это целесообразно; а на более обширных территориях опять появляется проблема времени. Второй, по нашему мнению более правильный путь, требует нахождения таких (упрощенных и полуэмпирических в смысле почвенной физики) алгоритмов, которые пригодны к практичес-

кому использованию в географических имитационных моделях. Очевидно – это задача доступна только специалисту по почвам.

Дренажный сток в модели характеризовалось недостаточным количеством эмпирического гидрогеологического материала. Основные определяющие факторы дренажного стока – коэффициенты фильтрации и уровни грунтовых вод. Первые оказываются сильно изменчивыми и, как показали расчеты с блоком DRENA , определяют порядок величин дренажного стока. Поэтому не следовало ожидать высоких точностей от расчетов дренажного стока. Сравнение имеющихся наблюдений с расчетными величинами показало, что для тех немногих дренажных систем, которые целиком находились в пределах однотипной почвы (у нас – в торфянике) алгоритм, представленный в п. 3.8., дает удовлетворительные данные. Для других дренажных систем модель дала повышенные значения. Для более детального анализа этого блока требуется дополнительный эмпирический материал.

Имитация биопродукционного процесса интегрировала в себе все блоки теплого времени года модели и таким образом характеризует работу всей модели.

Ячмень был представлен в модели подробным алгоритмом и на поле были получены достаточно полные материалы наблюдений, которые при отладке подблока не использовались. Сравнение хода фотосинтетической поверхности ячменя по расчетам и по наблюдениям приведено на рис. 36. Этот ход в шкале активных температур наилучшим образом позволяет судить о возможных сортовых различиях.

На рисунке видно, что длины онтологического развития совпадают очень хорошо+. По абсолютному значению фотосинтетической

+ Расчеты показали, что удлинение периода вегетации ("вытягивание" биофункций) пропорционально увеличивает урожай.

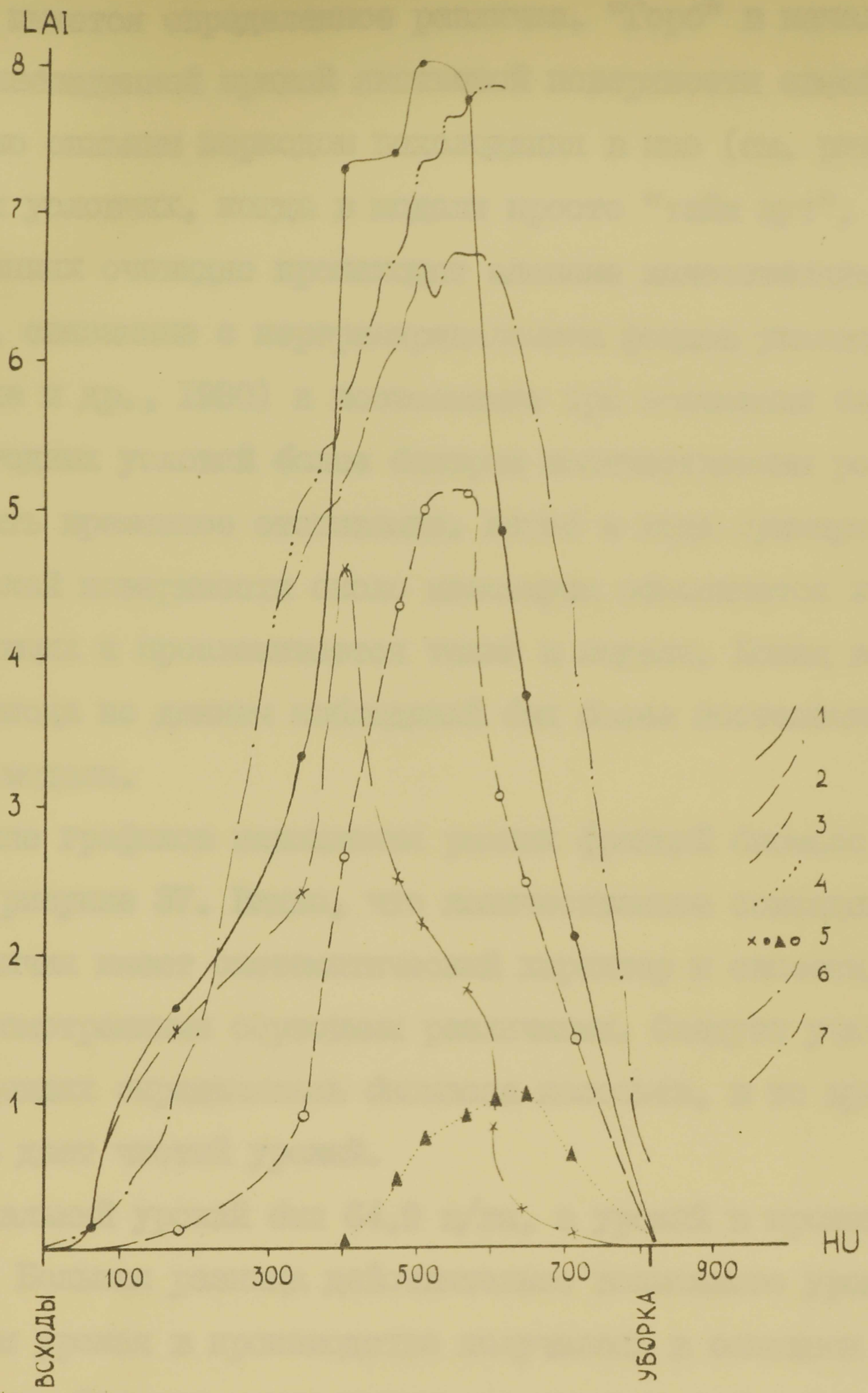


Рис. 36. Изменение относительной фотосинтетической поверхности (LAI) ячменя "Отра" по мере накопления суммы активных температур (HU). Сравнение данных наблюдений 1980 г. с расчетами. Наблюдения: I - суммарная зеленая поверхность, 2 - листья, 3 - стебли, 4 - колосья, 5 - фактические точки наблюдений; расчеты: 6 - суммарная зеленая поверхность, 7 - общая поверхность. (зеленая и пожелтевшая)

поверхности имеется определенное различие. "Горб" в начале вегетации на наблюденной кривой листьевой поверхности связан с исключительно сильным периодом похолодания в мае (см. рис. 30 и 3I). В таких условиях, когда в модели просто "тайм аут", в реальных растениях очевидно происходят сложные качественные процессы роста, связанные с перераспределением фондов углеводов и азота (Бихеле и др., I980) и позволяющие при появлении благоприятных погодных условий более быстрым количественным ростом компенсировать временное отставание. Изгиб в ходе суммарной фотосинтетической поверхности около максимума объясняется ходом его составляющих и прослеживается также в модели. Конец вегетационного периода по данным наблюдений был более постепенный, чем то же в модели.

Сравнение графиков накопления разных фракций биомасс представлено на рисунке 37. Видно, что количественное совпадение неплохое. Различия имеют систематический характер и связаны, очевидно, с рассмотренными сортовыми различиями. Следует учитывать, что в наблюдениях определялась биомасса колосьев, в то время когда модель дает чистый урожай.

Потенциальный урожай был 64,9 ц/га, а урожай в производстве - 24,5 ц/га. Большая разница действительно возможного урожая (44,9 ц/га) и урожая в производстве получалась в основном за счет полегания. Следует также учитывать влияние уменьшения урожая на краях извилистого поля. Но как показывают наблюдения агрометпостов, это разница при любых природных условиях заметна и первостепенный резерв сельского хозяйства именно там.

Картофель. Калибровка подблока картофеля была проведена на основе материалов работ (Программирование..., I978; Тооминг, Кыйва, I979). Этим исключались сортовые различия.

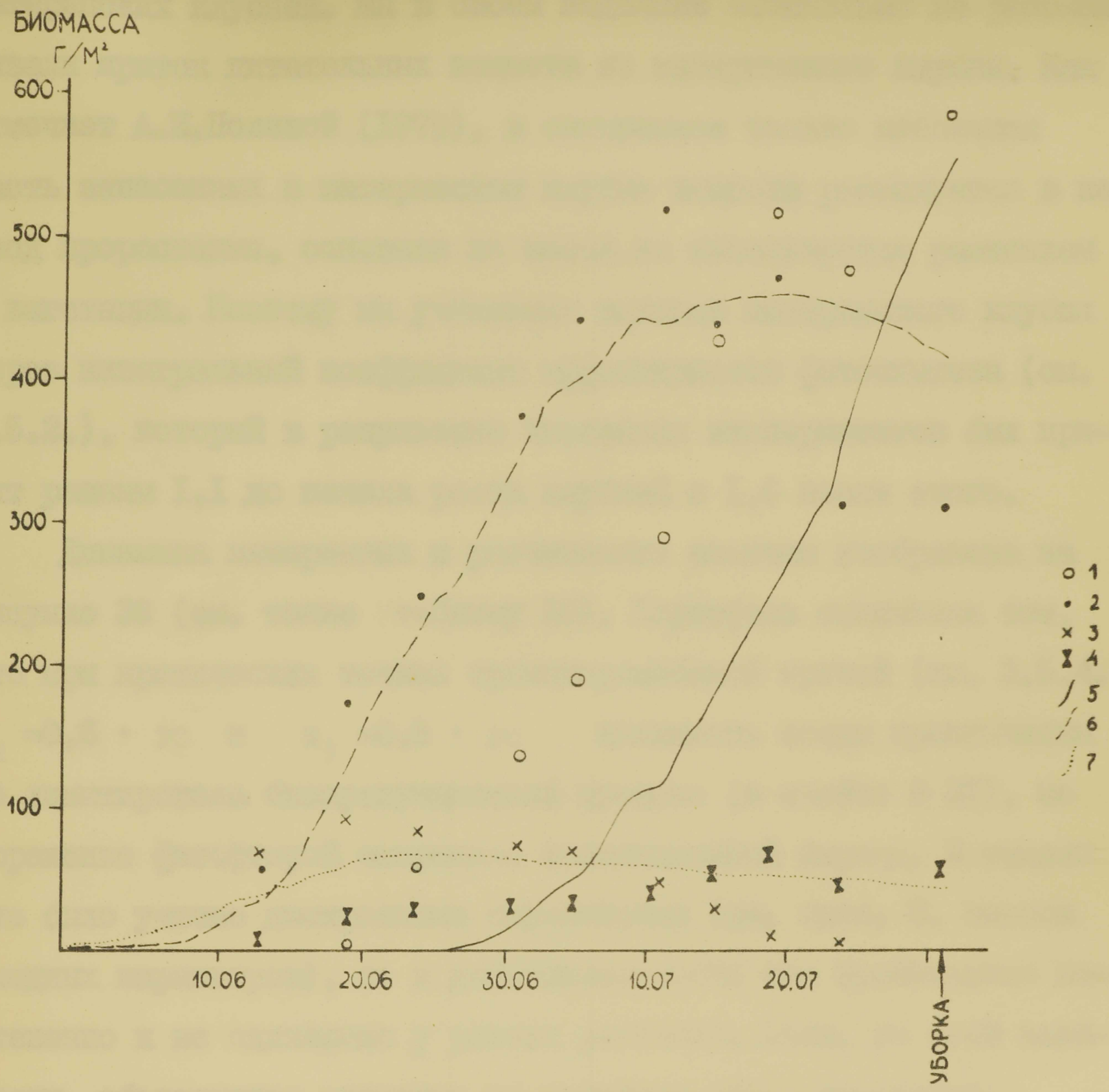


Рис. 37. Ход накопления биомассы ячменя "Отра" I980 г. Наблюдения: I - колосья, 2 - стебли, 3 - зеленые листья, 4 - желтые листья; расчеты: 5 - урожай, 6 - стебли, 7 - листья.

Известно, что на урожай картофеля заметно влияет качество материнских клубней. Мы в своем подблоке специально не рассматривали приток питательных веществ из материнского клубня. Как отмечает А.Н.Полевой (I979), в онтогенезе только небольшая часть запасенных в материнском клубне веществ расходуется в период прорастания, основная же масса их используется растением в вегетации. Поэтому мы учитывали влияние материнского клубня через интегральный коэффициент эффективности фотосинтеза (см. 3.5.2.), который в результате численных экспериментов был принят равным I,I до начала роста клубней и I,0 после этого.

Динамика измеренных и расчитанных величин изображена на рисунке 38 (см. также таблицу I0). Картофель отличился тем, что при критических точках транспирационной кривой (см. 3.5.4.) $W_2 = 0,6 * FC$ и $W_3 = 0,9 * PO$ влажность почвы практически не лимитировала биопродукционный процесс (в ячейке № 37), но поражение фитофторой сокращало вегетационный период. В модели это было учтено дискретными параметрами (см. прил. 2, список входных параметров), но в действительности это происходило постепенно и не одинаково у разных растений. Этим, по всей видимости, объясняются различия на конечном этапе вегетации.

Различия между действительно возможным урожаем (рассматриваемого нами) и урожаем в производстве оказались значительными.

Многолетние травы. При калибровке подблока многолетних трав мы основывались на данных потенциального годового урожая многолетних трав, который для Эстонии составляет I40-I62 ц/га (Тооминг, Каринг, I977) и на опыты в Саку с тимофеевкой луговой (Mäetalu, Karing, I979), когда в оптимальных условиях минерального питания и водного режима был в теплом I968 году по-

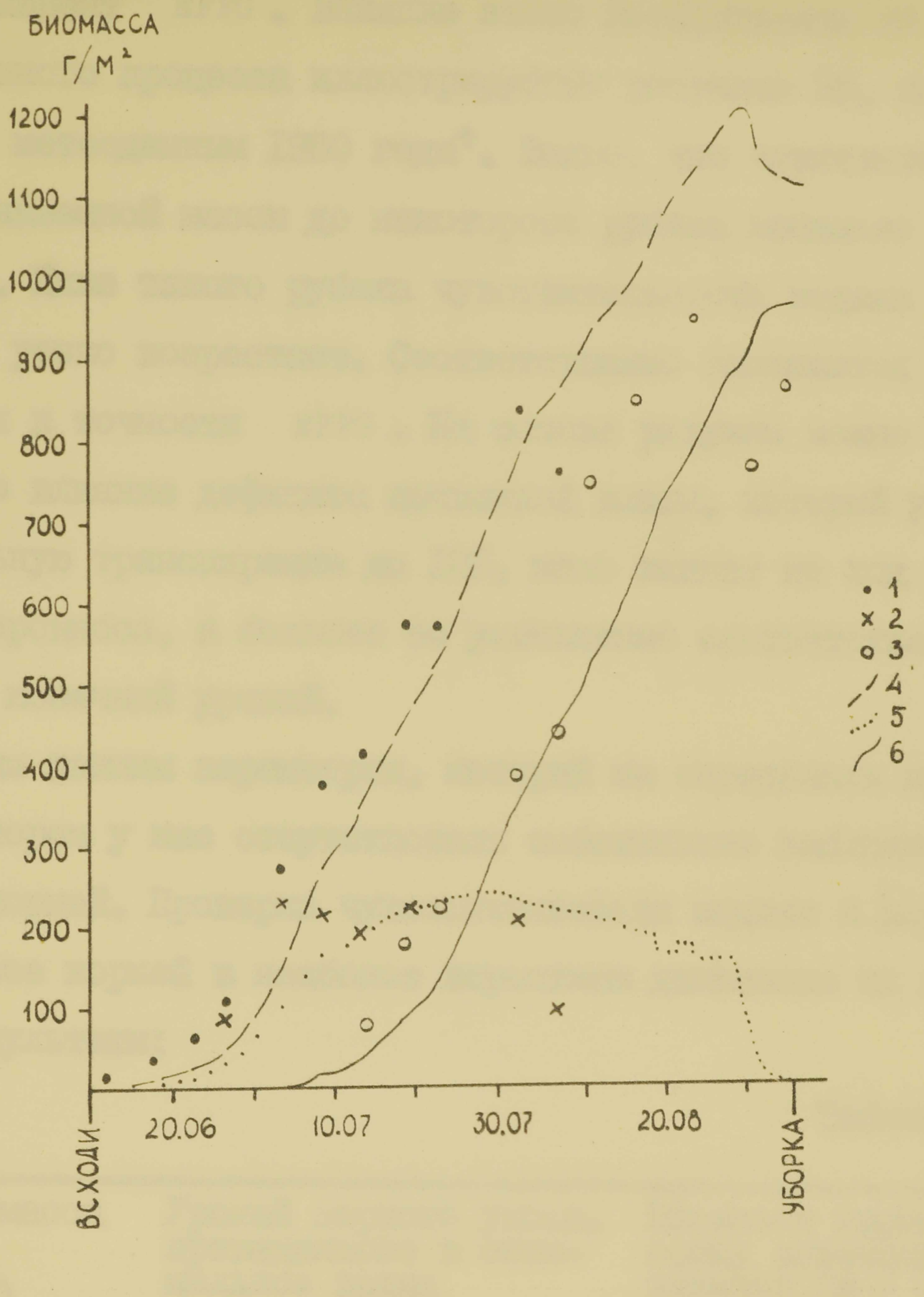


Рис. 38. Ход накопления биомассы картофеля "Сулев" I980 году. Наблюдения: I - суммарная биомасса (без корней), 2 - листья, 3 - клубни; расчеты: 4 - суммарная биомасса (без корней), 5 - листья, 6 - клубни.

лучен урожай первого укоса I06 ц/га. Как было указано (см. 3.5.3), в формуле фотосинтеза многолетних трав мы используем калибровочный коэффициент EFFG . Влияние этого коэффициента на ход биопродукционного процесса иллюстрируется рисунком 39, которая получена по метеоданным I980 года+. Видно, что чувствительность прироста наземной массы до некоторого рубежа несильно зависит от EFFG . Ниже такого рубежа чувствительность модели к этому параметру резко возрастает. Соответственно изменяется роль и требования к точности EFFG . На основе рисунка можно сделать вывод, что влияние дефицита почвенной влаги, который уменьшает относительную транспирацию до I0%, мало влияет на ход биопродукционного процесса, а большее ее уменьшение соответственно резко уменьшает конечный урожай.

Другим важным параметром, который мы определили приближенно и о котором у нас отсутствовали собственные наблюдения, была биомасса корней. Проверка чувствительности модели к первоначальной биомассе корней в наиболее вероятном диапазоне их дала следующие результаты:

Таблица I6

Начальная масса корней ($г/м^2$)	Урожай первого укоса, проведенного в оптимальное время (ц/га)	Биомасса корней к концу вегетационного периода (в % от начального)
I700	I00,9	93,6
I500	I02,6	95,7
I300	I04,I	96,0

+ Потенциальный урожай I978 и I979 годов был соответственно II0,8% и I03,5% от урожая I980 года, ход кривых аналогичным.

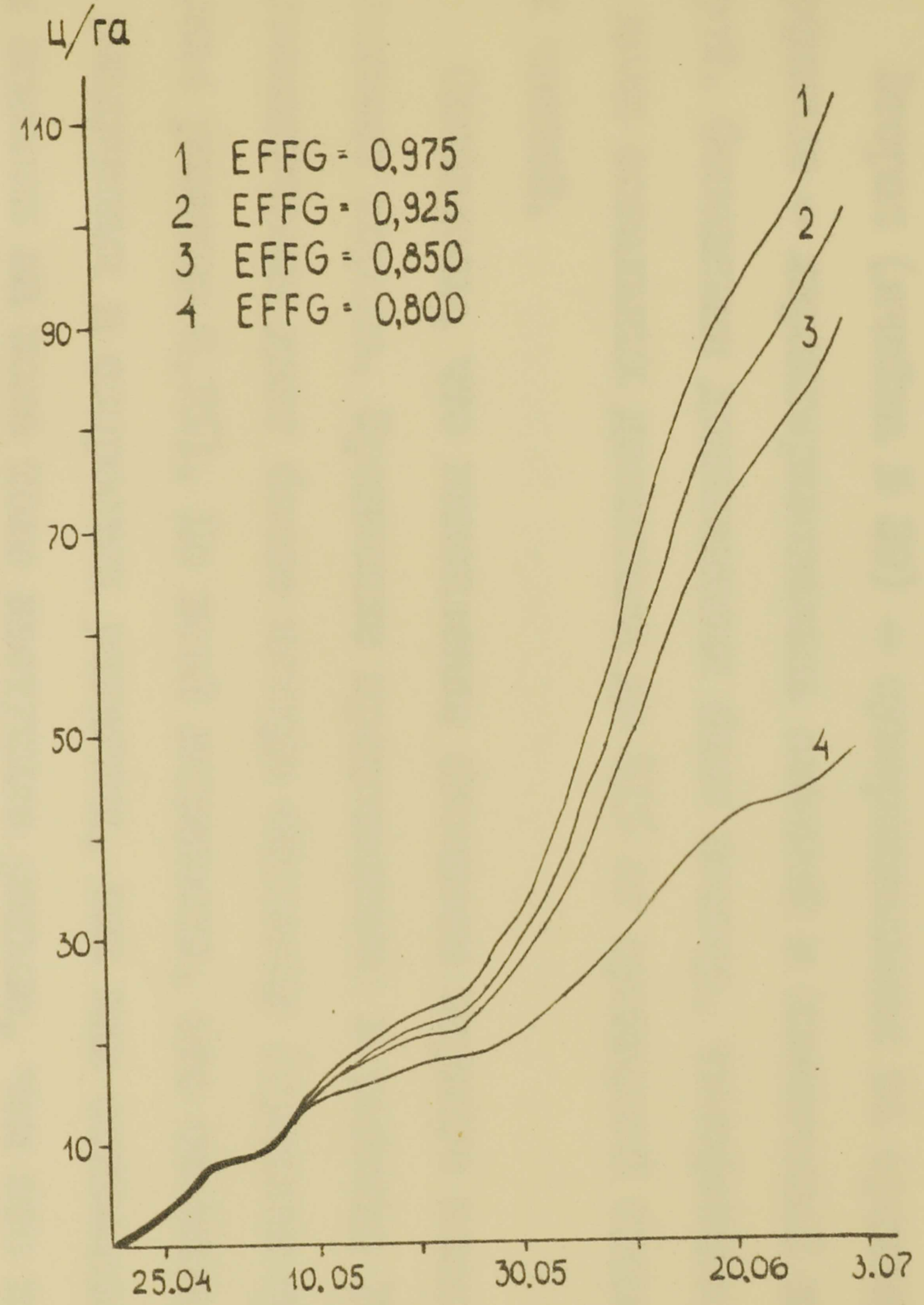


Рис. 39. Зависимость урожая первого укоса многолетних трав от коэффициента интегральной эффективности фотосинтеза (EFFG).

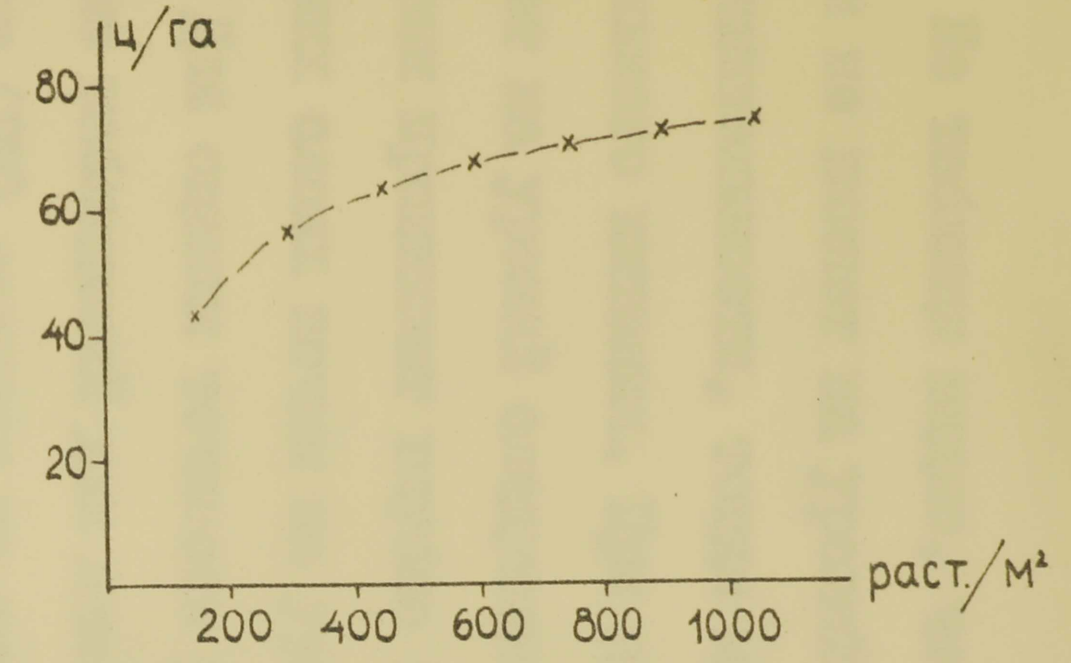


Рис. 40. Влияние увеличения густоты посева на потенциальный урожай ячменя по метеоданным 1980 года; дата появления всходов 23 мая (соответствует 50% обеспеченности по "Агроклиматические...",1974 и фактическому дню появления всходов на наблюденном поле); сорт "Отра".

(метеоусловия I980 года, постоянная корневого опада CGAR =0,05; интегральный коэффициент эффективности фотосинтеза EFFG =0,9).

Из таблицы видно, что количество корневой массы в модели почти не влияет на урожай при оптимальном водном режиме. В действительности, тогда масса корней определяется условиями минерального питания. При недостатке влаги в почве масса корней влияет на урожай следующим образом: при увеличении массы корней они проникают глубже в почву и влияние низкой влажности в верхних слоях почвы на урожай уменьшается.

Для оценки точности расчетов накопления биомассы имелись данные наблюдений для ячеек № I и № 39. В первой растительный покров (РП) состоял из ежи (в начале вегетации 70% от всего РП, в конце - 30%) и из люцерны (в начале - 29%, в конце - 65%); остальных видов было менее 5%. Ячейка элювиальная, с супесчаной почвой.

Вторая (ячейка № 39) - супераквальная на среднеразложенном торфянике - характеризовалась сложной и изменчивой видовой структурой. Основными доминантами были костер, тимофеевка и мятлик, но доля остальных достигала до 5I% от суммарной биомассы наземных частей.

Оказалось, что накопление биомассы первого поля модель описывает хорошо. Сравнение представлено в таблице I7. Модель систематически дает более низкую биомассу (средняя систематическая разница 8,3%). По всей видимости, это связано с видовыми различиями в скоростях развития, так как оптимальное время для кошения на поле тоже наступило раньше, чем это предсказывалось моделью.

Накопление биомассы на втором поле описывалось моделью не-

Таблица I7

Сравнение расчетов и наблюдений по накоплению наземной биомассы ($г/м^2$) многолетних трав в I980 году (ячейка № I)

Срок	Наблюдение	Расчет	Относит. ошибка (%)	Потенциальный урожай	Недобор урожая (%)
5/06	387	352	-9,0	409	I3,9
II/06	564	474	-I6,0	566	I6,3
I6/06	686	592	-I3,7	749	2I,0
I-е кошение	-	8I4	-	I052	22,6
7/07	I63	I74	6,7	I90	8,4
I4/07	2I7	205	-5,5	234	I2,4
I9/07	265	234	-II,7	278	I5,8
24/07	3I0	282	-9,0	368	23,4
2-е кошение	-	42I	-	645	34,7

удовлетворительно. В то время, когда там вода (влажность почвы) почти не лимитировала продукционный процесс, фактическая надземная биомасса была ниже потенциального до 2,5 раз. РП был разреженный и высокий (проективное покрытие 5-6), поверхность земли - обомшелая. В таких условиях, очевидно, на многолетние травы влияют прежде всего биологические лимитирующие факторы, связанные с взаимодействием разных видов, а может быть также недостаточность некоторых видов питательных элементов.

Представляет интерес, как ход биопродукционного процесса зависит от таких управляемых параметров как время и густота посева. Можно думать, что если мы начальную биомассу определяем как умножение массы одного растения на густоту посева, то

увеличение последней в модели два раза увеличивает и урожай в два раза. Оказывается, это не так. Действительная картина на примере ячменя по метеоданным 1980 года+ представлена на рисунке 40.

Интересными получились численные эксперименты с варьированием $д_н$ появления всходов у картофеля. Были выбраны метеоданные 1980 года и густота посева, соответствующая наблюдаемой на поле. Дни появления всходов выбирали: 1) ранний, соответствующий 5% обеспеченности, 2) день появления всходов на наблюденном поле, соответствующий 30% обеспеченности и 3) поздний, соответствующий 80% обеспеченности (по данным справочника "Агроклиматические..." 1974). Оказалось, что ходы накопления биомассы качественно различаются, что хорошо иллюстрируется динамикой относительной листовой поверхности (рис. 41). Причина такого хода вероятно заключается во влиянии хода накопления суммы активных температур (см. рис. 31), которые управляют в модели онтогенетическим развитием картофеля. Во втором и третьем случаях период максимального увеличения листовой поверхности совпадает с потеплением в конце июля, что приведет к более быстрому прохождению этой фазы и к началу образования клубней. Из-за позднего начала вегетации в третьем случае начальный период репродукционного роста затягивается на прохладный конец августа. Окончание вегетации и количество урожая определяется еще временем завядания ботвы (последнее на рисунке не показано).

На отрицательное влияние слишком высокой температуры в середине лета и на необходимость в тепловом мелиорации для картофеля обращает также внимание В.В.Шабанов (1973) на основе материалов БССР.

+ Потенциальный урожай 1978 и 1979 года был соответственно 102,8% и 95,5% от урожая 1980 года, а ход кривых аналогичным.

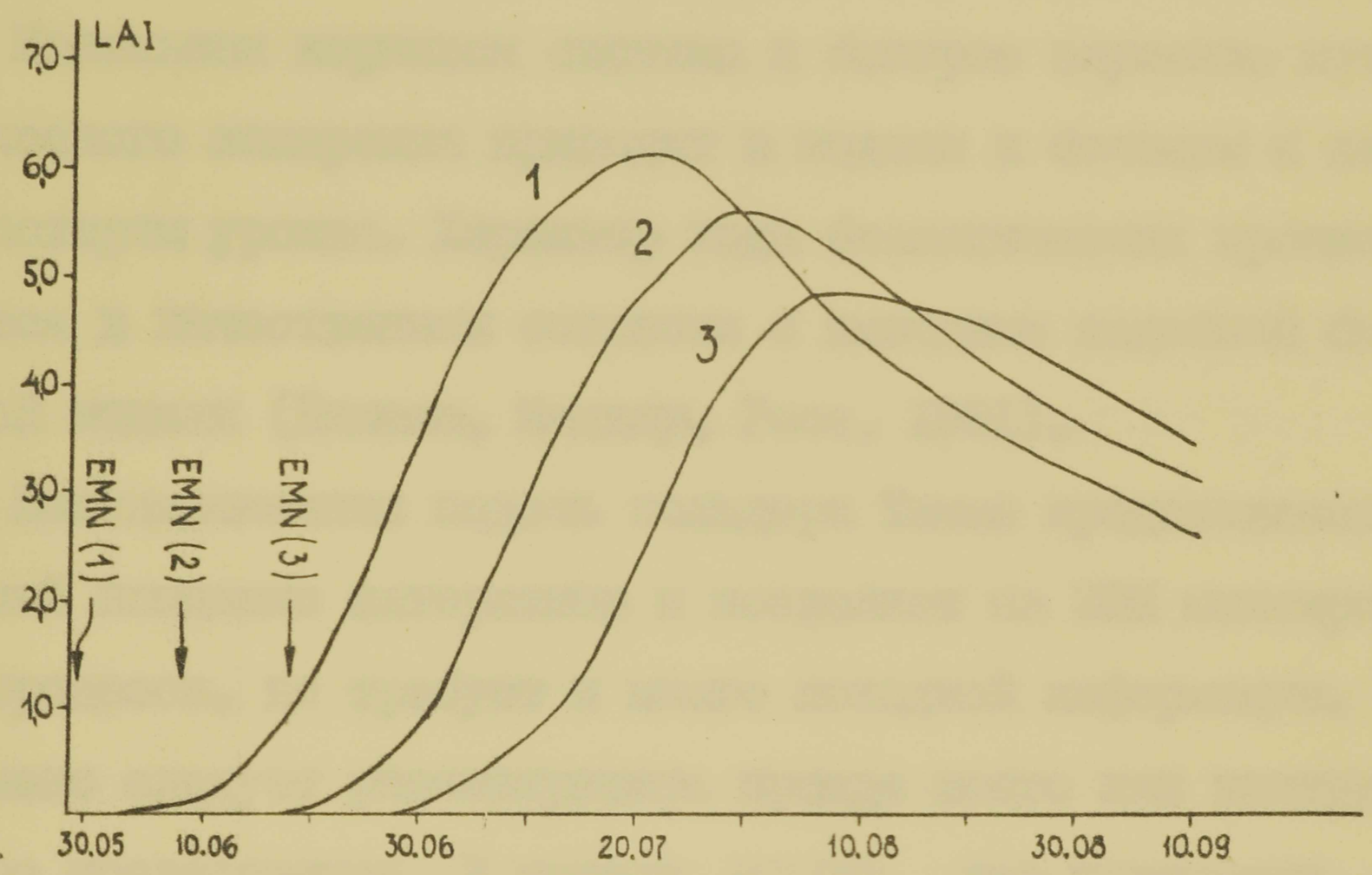


Рис. 4I. Влияние времени начала вегетативного роста на характер динамики относительной листовой поверхности картофеля. Метеоданные I980 года, густота посева 4,44 растений на $м^2$.

Подведя итоги моделированию биопродукционного процесса, можно заключить, что модель достаточно отражает отмеченные при наблюдениях явления. Модель показывает, что растительный покров мало реагирует на маленький недостаток почвенной влаги, а дальнейшее уменьшение относительной транспирации приводит к резкому уменьшению биомассы. В модели однолетние культуры оказываются очень чувствительными к недостатку влаги в начале вегетации. Маленькая корневая система и быстрое осушение почвы из-за физического испарения приводит в модели к большим и непоправимым потерям урожая. Характер хода биологических процессов находится в качественном согласии с выводами подобной биофизической модели (Бихеле, Молдау, Росс, I98I).

Вышеизложенная модель польдера Тамме представляет собой сложный комплекс алгоритмов и позволяет на ЭВМ имитировать многие процессы, но требует и много исходной информации. Такой комплекс следует рассматривать прежде всего как инструмент научного исследования. В модели POLDER все параметры, постоянные для польдера Тамме, являются внутренними параметрами блоков и присваиваются транслятором при предварительной установке (см. прил. I). Такими оказываются, например, коды типовой и территориальной структуры, площади ячеек, крутизны склонов, часть таблиц-функций эмпирических кривых и т.п.

При расширении применения модели, при включении ее в систему более высокого порядка можно довольно легко сделать внутренние параметры изменяемыми, преобразовать их в фиксированные параметры. Тогда можно при включении блоков модели в пакеты программ определенной геоинформационной системы использовать входную информацию, получаемую из баз данных, для моделирования других мелиоративных объектов, изоморфных с польде-

ром Тамме (как тестовым участком) в некоторых отношениях.

До сих пор модель была использована для имитации детерминированных процессов. Но, как известно, характер процессов, рассмотренных выше, имеет и случайные черты. Прежде всего это относится к осадкам. Кроме территориально случайного характера их, следует учитывать, что в агрометпостах осадки измеряются один раз в сутки - в девять часов утра. Поэтому отсчет осадков имеет сдвиг относительно других метеоданных, что следует учитывать при оценке результатов, так как при некоторых резких изменениях погоды могут возникать искаженные описания метеообстановки.

Поэтому в дальнейшем целесообразно провести численные эксперименты не только на основе ряда метеоданных конкретных годов, а также варьировать входными данными, составляя сезоны, периоды похолоданий, засухи и т.д. по усмотрению исследователя.

Метеоданные зависимы друг от друга, поэтому возникают трудности при генерации их на основе реальных статистических распределений с применением метода Монте-Карло. Среди случайных совокупностей метеоданных бывают "уродливые" сочетания, не встречающиеся в действительности и искажающиеся впоследствии моделируемые процессы. Трудной проблемой оказывается опознавание их вычислительной машиной. Поэтому нам кажется более целесообразным синтез режима погоды - так сказать, складывание мозаики - из осколков реального хода погод: из суток, из пентад, из периодов погоды. Правда, этим приемом в принципе проблема не устраняется, но вопросы несовместимости возникают уже в другом временном масштабе, который мало влияет на модель и при котором легче указывать правила выбора (браковки).

Имитационная система геотехносистемы интенсивного земле-

делия, представленная в настоящей работе, несомненно имеет свои недостатки. По всей видимости, не "все" учтено. То или другое, в модели, наверное, большой коллектив специалистов сделал бы более глубоко. Такая модель, подобно городу, никогда не будет полностью "готова". Но определенный шаг в имитационном моделировании геосистем совершен и автор рад, если это может помочь другим сделать следующий, вероятно более значительный шаг.

З А К Л Ю Ч Е Н И Е

Анализ существующих публикаций и наблюдения на объекте исследования показали, что польдеры, их проектирование и эксплуатация, характеризуются свойствами, подобными природным геосистемам. Это позволяет рассматривать польдеры (и др. мелиоративные объекты с двусторонним регулированием водного режима) как управляемые геотехнические системы. Учет различий географических условий и использование знаний учения о геосистемах может помочь более рационально использовать польдеры. Польдер как объект географических исследований и имитационного моделирования имеет ряд преимуществ: устойчивость, достаточность внесенных удобрений, канализованность водных потоков, простую видовую структуру растительного покрова.

В диссертации предложена модель-представление геотехносистемы интенсивного земледелия, основывающая на современном уровне ландшафтоведения и позволяющая применять ЭВМ для исследования динамики сложных геотехносистем. Учет территориальной структуры и изменений в функциональной структуре делает возможным применение предложенной модели-представления в составе имитационных систем регионального уровня. Изучение взаимосвязей между элементами геотехносистемы польдера и существующих "отраслевых" математических моделей компонентов показало, что вполне реально комплектовать "целостную" модель без проведения долгосрочных стационарных наблюдений на объекте исследований. Для этого требовалось согласование "отраслевых" моделей между собой и экспериментальное определение некоторых параметров на объекте исследования.

В диссертации построена, реализована на ЭВМ, отлажена и введена в действие имитационная система геотехносистемы интенсивного земледелия (на примере польдера Тамме). Она позволяет количественно оценить влияние на разные элементы системы (в том числе на с/х урожай) изменений: а) природных (главным образом гидрометеорологических) условий, б) антропогенных воздействий и в) изменений в самой геотехносистеме. Последние позволяют применить имитационную систему в качестве координатора последующих полевых исследований (указывая параметры, уточнение которых наиболее улучшает наше понимание о реальной системе) и как генератор информации о параметрах, которые в натуре трудноизмеряемы.

Имитационная система была обеспечена необходимой входной информацией трех, агрометеорологически достаточно различных годов и проверена на материале натурных наблюдений. Было показано, что она дает достаточно точные для уровня современных физико-географических наблюдений данные.

Внутригодовой динамике рассмотренной польдерной геотехносистемы характерна периодичность, связанная с гидрометеорологическими (входными) условиями. Наиболее изменчивым и трудно поддающимся моделированию периодом оказалось время исчезновения снежного покрова весной. Простая геогоризонтная структура и наименьшая функциональная активность геотехносистемы поздней осенью показали, что этот период подходит для определения начальных значений исследуемых параметров.

Натурные наблюдения показали, что существующий режим откачки воды с польдера Тамме обеспечивает осушительное действие дренажа. По сравнению с осадками коэффициенты откачки имели запаздывания. Свойства почв характеризовались большой территори-

альной изменчивостью. Наблюдения не выявили хороших временных закономерностей в динамике почвенной влаги. Динамика фитоплощади и биомассы исследованных с/х культур имела закономерный ход.

Численные эксперименты выявили неодинаковую чувствительность геотехносистемы к различным его параметрам как в функциональном, так и во временном и территориальном отношениях. В частности, отмечалась неодинаковая роль снежного покрова при разных его толщинах, самостабилизирующая роль растительного покрова в отношении густоты посева и большая зависимость хода накопления биомассы однолетних культур от начала и длины вегетационного периода.

Сравнение наблюдений и расчетов для исключительно холодной весны (май 1980 г.) показало, что в посеве происходят при низких температурах сложные процессы, создающие предпосылки при появлении благоприятных погодных условий для более быстрого роста, что компенсирует временное отставание на предыдущем этапе.

Выработаны рекомендации по дальнейшему совершенствованию и развитию имитационного моделирования геотехносистем интенсивного земледелия ландшафтного уровня.

Предложенная в настоящей работе имитационная система может найти применение в составе прикладных программ при региональных базах данных вычислительных систем (автоматизированн информационные системы).

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. М.В.ЛОМОНОСОВА

Географический факультет

Кафедра физической географии СССР

На правах рукописи

Р о о с а а р е Юри Михкелевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИГОДОВОЙ ДИНАМИКИ ПОЛЬДЕРНЫХ ГЕОТЕХНОСИСТЕМ

II.00.0I. – физическая география, геофизика и геохимия ландшафтов

Д И С С Е Р Т А Ц И Я

на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель

доктор географических наук
профессор Ю.Г.СИМОНОВ

М о с к в а – I982

Л И Т Е Р А Т У Р А

I. Материалы XXУI съезда КПСС. - Москва: Изд-во Пол.лит-ы, I98I. - 223 с.

2. Речь товарища Л.И.Брежнева на Пленуме ЦК КПСС I6 ноября I98I года. - Коммунист, I98I, № I7, с. 4-I2.

3. Агроклиматические ресурсы Эстонской ССР. - Л.: Гидрометеоиздат, I974. - I74 с.

4. Алгоритм и программа для расчета динамики промерзания и протаивания грунтов. - Иркутск: Б.И., I970. - 33 с.

5. Алексеенко Л.Н. Водный режим луговых растений в связи с условиями среды. - Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, I976. - I99 с.

6. Алпатьев А.М. Влагообороты в природе и их преобразования. - Л.: Гидрометеоиздат, I969. - 323 с.

7. Арманд Д.Л. Объективное и субъективное в природном районировании. - Изв. АН СССР. Сер. геогр., I970, № I, с. II5-I29.

8. Арманд Д.Л. Наука о ландшафте. - М.: Мысль, I975. - 287 с.

9. Афанасик Г.И. Исследование водно-теплового режима торфяников в зимний период. - В кн.: Вопросы двустороннего регулирования водного режима почв. - Вильнюс: Газ.-журн. изд-во, I966а, с. I3-23.

I0. Афанасик Г.И. Тепло- и влагоперенос при промерзании торфозалежи с неглубоким залеганием уровней грунтовых вод. - Труды БелНИИ-МиВХ, I966б, т. I4, с. 40-47.

II. Байбакова Е.М. Динамика местной погоды при холодных вторжениях в долинах рек Рионы и Куры зимой и летом. - Труды Ин-т географии, I950, вып. 48, с. 3-3I.

I2. Беляев В.И. Теория сложных геосистем. - Киев: Наукова Дум-

ка, I978. - I56 с.

I3. Беручашвили Н.Л. Об исследовании структуры и функционирования фаций на Марткопском стационаре. - Докл. /Ин-т Геогр. Сиб. и Дальн. Вост., I97I, вып. 30, с. 5I-55.

I4. Беручашвили Н.Л. Ландшафтные исследования на Марткопском стационаре. - Тбилиси: Изд-во ТГУ, I976. - 5I с.

I5. Беручашвили Н.Л. Объяснительная записка к ландшафтной карте Кавказа. - Тбилиси: Изд-во ТГУ, I980. - 54 с.

I6. Бихеле З.Н., Молдау Х.А., Росс Ю.К. Математическое моделирование транспирации и фотосинтеза растений при недостатке почвенной влаги. - Л.: Гидрометеоиздат, I980. - 223 с.

I7. Бондарев Л.Г. Суша, отвоеванная у моря. - М.: Мысль, I979. - 85 с.

I8. Бондаренко Н.Ф., Коваленко Н.П. Водно-физические свойства торфяников. - Л.: Гидрометеоиздат, I979. - I60 с.

I9. Борматенков О.А. Действие минеральных удобрений на урожайность бобово-злаковой травосмеси на польдерных землях. - Кормопроизводство, I98I, № 2, с. 24-25.

20. Будаговский А.И. Впитывание воды в почву. - М.: Изд-во АН СССР, I955. - I40 с.

2I. Будаговский А.И. Испарение почвенной влаги. - М.: Наука, I964. - 244 с.

22. Бусленко В.Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. - М.: Наука, I977. - 239 с.

23. Бухтияров А.М., Маликова Ю.П., Фролов Г.Д. Практикум по программированию на фортране. - М.: Наука, I979. - 304 с.

24. Ватутин Г.И. Особенности природных условий и некоторые вопросы мелиорации польдерных земель Калининградской области. - В кн: Природные условия мелиорации

земель Калининградской области. - Калининград: Изд-во Калининигр. ун-та, I977, с. I5-28.

25. Вирт Н. Систематическое программирование. Введение. - М.: Мир, I977. - I83 с.

26. Виссмен У. мл., Харбаф Т.И., Кнэпп Д.У. Введение в гидрологию. - Л.: Гидрометеоиздат, I979. - 470 с.

27. Волков Р.И. Использование машинного водоподъема для осушения земель Нечерноземной зоны РСФСР. - В кн.: Современные проблемы мелиорации и пути их решения. - М.: Б.И., I975, вып. 3, с. I4-I9.

28. Волков Р.И., Пулькин В.И. Осушение земель с помощью машинного водоподъема. - Гидротехника и Мелиорация, I979, № 7, с. 54-56.

29. Вопросы комплексной климатологии. - М.: Изд-во АН СССР, I963. - 207 с.

30. Вотякова Н.И. Сравнительная оценка формул для расчета глубины сезонного промерзания-протаивания грунта. - В кн.: Экспериментальные исследования процессов теплообмена в мерзлых горных породах. - М.: Наука, I972, с. I46-I53.

3I. Гаврильев Р.И., Елисеев С.В. Тепловые свойства торфа. - В кн.: Методы определения тепловых свойств горных пород. - М.: Наука, I970, с. I39-I54.

32. Галахов Н.Н. Изучение структуры климатических сезонов года (опыт типизации климатического режима во времени в пределах умеренных широт СССР). М.: Изд-во АН СССР, I959. - I83 с.

33. Галковский В.Ф., Полевой В.А. Осушительно-увлажнительные польдерные системы в Белорусском Полесье. - В кн.: Машинное осушение в зоне затапливаемых земель. - Л.: Б.И., I980, с. 90-I00.

34. Галямин Е.П. О построении динамической модели формирова-

ния урожаев агроценозов. - В кн.: Биологические системы в земледелии и лесоводстве. - М.: Наука, I974, с. 70-83.

35. Гвоздецкий Н.А. Основные проблемы физической географии. - М.: Высш. школа, I979. - 222 с.

36. Герасимов И.П. Советская конструктивная география. - М.: Наука, I976. - 207 с.

37. Гидромелиоративные работы и исследования в Нидерландах. Обзорная информация /сост. Голованов А.М. - М.: ВНИИТЭИСХ, I97I. - I03 с.

38. Гильманов Т.Г. Математическое моделирование биохимических циклов в травяных экосистемах. - М.: Изд-во Моск. ун-та, I978. - I68 с.

39. Глазовская М.А. Актуальные проблемы теории и практики геохимии ландшафтов. - Вестн. Моск. ун-та. Сер. геогр., I976, № 2, с. I0-I9.

40. Годунов С.К., Рябенький В.С. Разностные схемы. Введение в теорию. - М.: Наука, I973. - 400 с.

4I. Горстко А.Б. Математическое моделирование и проблемы использования водных ресурсов. - Ростов: Изд. Ростовск. ун-та, I976. - 63 с.

42. Давитая Ф.Ф. Прогноз обеспеченности теплом и некоторые проблемы сезонного развития природы. - М.: Гидрометеоиздат, I964. - I32 с.

43. Денисов Ю.М. Математическая модель переноса влаги, тепла и солей в почво-грунтах. - Метеорология и Гидрология, I978, № 3, с. 7I-79.

44. Директор С., Рорер Р. Введение в теорию систем. - М.: Мир, I974. - 464 с.

45. Дьяконов К.Н. Становление концепции геотехнической системы. - В кн.: Вопросы географии. - М.: Мысль, I978,

сб. I08, с. 54-63.

46. Дьяконов К.Н. Географические проблемы изучения мелиоративных осушительных систем. - Вестн. Моск. ун-та. Сер. геогр., I979, № 6, с. 7I-80.

47. Емельянова И.М., Малышева Г.А. Опыт программирования урожаев на польдерных землях Костромской низины. - В кн.: Машинное осушение в зоне затопляемых земель. - Л.: Б.И., I980, с. I30-I38.

48. Жуков В.М. Формирование местных погод в Забайкалье в условиях Сибирского антициклона. - В кн.: Вопросы комплексной климатологии. - М.: Изд-во АН СССР, I963, с. 32-44.

49. Зеленка Л.П., Юшкаускас Ю.А. Польдерные системы осушения. - М.: Колос, I969. - II2 с.

50. Иванов Н.С., Гаврилов Р.И. Теплофизические свойства мерзлых горных пород. Справочное пособие. - М.: Наука, I965. - 73 с.

5I. Имитационное моделирование экономических систем /под ред. К.А.Багриновского. - М.: Наука, I978. - 22I с.

52. Инт Л. О тепловом балансе и влагообеспеченности культур на осушенных минеральных почвах Эстонской ССР. - В кн.: Статьи по гидрометеорологии IУ. - Вильнюс: Периодика, I97I, с. I79-I84.

53. Инт Л., Каринг П.Х. Особенности теплового баланса территории Эстонской ССР в связи с проблемами мелиорации. - В кн.: Влияние мелиорации на водный режим и климатические условия. - Таллин: Валгус, I973, с. I94-20I.

54. Исаченко А.Г. Основы ландшафтоведения и физико-географическое районирование. - М.: Высш. школа, I965. - 327с.

55. Йыги Я.О. Основные типы микроклимата почв сельскохозяйственных угодий Юго-запада Эстонской ССР. - Труды/ГГО, I977, вып. 385, с. 94-I0I.

56. Кадревич Т.А. Водобалансовые расчеты при проектировании польдеров в Прибалтике. - Труды/Латв.сель.-хоз.акад., 1970, вып. XXXI, с. 20-27.

57. Кадревич Т.А. К вопросу гидрологии польдеров. Труды/Латв. сель.-хоз.акад., 1976, вып. 117, с. 19-26.

58. Кадревич Т.А. Развитие научных исследований польдерного осушения. Труды/Латв.сель.-хоз.акад., 1980, вып.178, с. 3-6.

59. Кадревич Т.А., Клявиньш У. Режим влажности польдерных почв и принципы его регулирования. - Труды/Латв.сель.-хоз. акад., 1976, вып. 99, с. 16-24.

60. Капица А.П., Симонов Ю.Г. Основные проблемы регионального географического прогноза. - Докл./Ин-т геогр. Сиб. и Дальн.Вост., 1974, вып. 43, с. 16-24.

61. Каринг П.Х. Некоторые особенности радиационного режима многолетних трав в условиях Эстонской ССР. - Труды/ТГО, 1970, вып. 264, с. 104-111.

62. Каринг П.Х. О влиянии климата почвы на рост многолетних трав. - Труды/ТГО, 1973, вып. 306, с. 26-38.

63. Каринг П.Х. Оценка влагообеспеченности многолетних трав на легких минеральных почвах Эстонской ССР. - Труды/ТГО, 1974, вып. 339, с. 48-57.

64. Каринг П.Х., Йыги Я.О. К методике составления и анализа крупномасштабных комплексных микроклиматических карт при помощи ЭВМ. - Труды/ТГО, 1974, вып. 339, с. 3-16.

65. Каринг П., Мяеталу Х., Лийв Я. Влияние микроклимата на продуктивность многолетних трав. - Сб.научн.трудов / ЭстНИИЗиМ, 1977, сб. 41, с. 156-171.

66. Китсе Э. Некоторые данные о водно-физических свойствах подзолистых почв Южной Эстонии. - В кн.: Третий делегатский съезд почвоведов. - М.:Б.И., 1968, с. 9-11.

67. Китсе Э., Рейнтам Л. О возможностях применения регрессионного анализа в почвоведении. - В кн.: Применение математических методов и ЭЦВМ в почвоведении. - М.: Наука, I973, с. 29-32.

68. Климко А., Паленов А., Хрисанов Н. Состояние и перспективы польдерного осушения в Нечерноземной зоне РСФСР. - В кн.: Машинное осушение затапливаемых пойменных земель (польдерные системы осушения вып. I). - Елгава: ВНИИВодполимер, I976, с. 4-I0.

69. Колобков Г.П. Сезонная динамика и цикличность жизнедеятельности растительности в средней тайге Западной Сибири. - В кн.: Моделирование и прогноз динамики геосистем. - Иркутск, Б.И., I979, с. 50-56.

70. Кравчук Г.Л. Природные времена года ландшафтов Львовской области. - В кн.: Доклады и сообщения Львовского отд.Геогр. общества УССР I968-I969. - Львов: Б.И., с. 4I-45.

7I. Крауклис А.А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. - Новосибирск: Наука, I979. - 233 с.

72. Кротевич М.В. Фенология полевых культур. - Кишинев: Картя Молдовеняскэ, I969. - 5I с.

73. Кузьмин П.Н. О методике исследования и расчета испарения с поверхности снежного покрова. - Труды/ГГИ, I953, вып. 4I, с. 34-52.

74. Кузьмин П.П. Физические свойства снежного покрова. - Л.: Гидрометеоиздат, I957. - I79 с.

75. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. - Л.: Гидрометеоиздат, I96I. - 345 с.

76. Кулик В.Я. О математических моделях движения почвенной влаги на мелиорируемых территориях. - В кн.: Физическое и математическое моделирование в мелиорации. - М.: Колос, I973, с. I54-I66.

77. Куртенер Д.А., Чудновский А.Ф. Расчет и регулирование теплового режима в открытом и защищенном грунте. - Л.: Гидрометеоиздат, I969. - 298 с.

78. Куртенер Д.А., Чудновский А.Ф. Агрометеорологические основы тепловой мелиорации почв. - Л.: Гимиз, I975. - 23I с.

79. Лаврик Н.Ф. Получение запрограммированных урожаев овощных культур и картофеля на польдерных землях Костромской низины. - В кн.: Программирование урожаев на мелиорируемых землях. - Л.: Б.И., I978, с. I34-I39.

80. Лархер В. Экология растений. - М.: Мир, I978. - 384 с.

8I. Лукянене Д.И. Исследование режима откачки на польдерах Литовской ССР. - В кн.: Машинное осушение в зоне затопляемых земель. - Л.: Б.И., I980, с. 8I-90.

82. Мадиссоон И. Методика определения притока грунтовых вод к низинным болотам. - Сб. научн.трудов/ЭстНИИЗиМ, I976, вып. 39, с. 40-46.

83. Маланкина Ю. Технико-экономические показатели польдерных систем в Белорусской полесье. - В кн.: Машинное осушение затапливаемых пойменных земель (польдерные системы осушения вып. I). - Елгава: ВНИИВодполимер, I976, с. II-I8.

84. Малышева Г.С. Методическое руководство по составлению фенологических карт. - Л.: Наука, I968. - 63 с.

85. Маслов Б.С. Режим грунтовых вод переувлажненных земель и его регулирование. - М.: Колос, I970. - 232 с.

86. Математика и кибернетика в экономике. - М.: Экономика, I975. - 700 с.

87. Материалы метеорологических исследований. Исследования структур климата в погодах. Циркуляция атмосферы и климат. Ч.I. - М.: Б.И., I976. - I54 с.

88. Материалы метеорологических исследований. Исследования

структур климата в погодах. Циркуляция атмосферы и климат. Ч. 2. - М.: Б.И., I977. - I64 с.

89. Мелиорация земель в зоне влияния равнинных водохранилищ. - М.: Колос, I974. - 255 с.

90. Методические указания по составлению микроклиматических карт территорий колхозов и совхозов. - М.: Гидрометеоиздат, I968. - 75 с.

9I. Мильков Ф.Н. Человек и ландшафты. - М.: Мысль, I973. - 223 с.

92. Мироненко Е.В., Паченская Я.А. К теории переноса влаги и солей в зоне аэрации. - В кн.: Моделирование почвенных процессов и автоматизация их исследований. - М.: Наука, I976, с. 69-79.

93. Михайлов Ю.П. О системном подходе в географии и термине "геосистема". - В кн.: Теоретические проблемы географии. - Рига: Изд-во Рижск. ун-та, I976, с. 32-43.

94. Мичурин Б.Н. Энергетика почвенной влаги. - Л.: Гидрометеоиздат, I975. - I40 с.

95. Многоязычный технический словарь по ирригации и дренажу. - М.: Русск. яз., I978. - 543 с.

96. Моделирование водно-солевого режима почво-грунтов с использованием ЭВМ. - М.: Наука, I976. - I23 с.

97. Муотиала С. Польдерное осушение в Финляндии. - В кн.: Проектирование, строительство и эксплуатация польдерных систем. - Елгава: Б.М., I972, с. I4-2I.

98. Мурашко А.И., Сапожников Е.Г. Защита дренажа от заиления. - Минск: Ураджай, I978. - I68 с.

99. Мухина Л.И. Принципы и методы технологической оценки природных комплексов. - М.: Наука, I973. - 94 с.

I00. Мяги Х. Определение зеленой площади фитоэлементов в посеве ячменя по эффективному растению. - Сборник научн.

трудов/Эстонск.сель-хоз.акад., 1971, № 67, с. 152-162.

101. Мяги Х., Росс Ю. Фитометрические характеристики и фотосинтетическая продуктивность посева ячменя. I. Агрометеорологическая характеристика и геометрическая структура посева. - В кн.: Фотосинтетическая продуктивность растительного покрова. - Тарту: Б.И., 1969а, с. 102-143.

102. Мяги Х., Росс Ю. Фитометрические характеристики и фотосинтетическая продуктивность посева ячменя. II. Динамика роста ассимилирующей площади и накопления фитомассы посева. - В кн.: Фотосинтетическая продуктивность растительного покрова. - Тарту: Б.И., 1969б, с. 144-173.

103. Мяэталу Х.И. Формирование урожая многолетних трав в зависимости от азотного и водного питания на осушенных минеральных почвах в условиях Эстонии. - В кн.: Климат почвы. - Л.: Гидрометеоиздат, 1971, с. 185-196.

104. Мяэталу Х.И. Влияние увлажнения почвы и азотного питания на ассимиляцию элементов минерального питания в почвах тимофеевки луговой. - Труды/ГГО, 1974, вып. 339, с. 58-62.

105. Мяэталу Х.И., Каринг П.Х. Влияние дождевания на элементы продуктивности многолетних трав. - Сборник работ/ Таллинская ГМО, 1972, вып. 8, с. 14-33.

106. Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Энерго- и массообмен в системе растение-почва-воздух. - Л.: Гидрометеоиздат, 1975. - 358 с.

107. Нильсон Т., Росс В., Росс Ю. Некоторые вопросы архитектоники растений и растительного покрова. - В кн.: Пропускание солнечной радиации растительным покровом. - Тарту: Б.И., 1977, с. 71-144.

108. Ничипорович А.А. Фотосинтез и теория получения высоких

урожаев. - В кн.: XУ Тимирязевское чтение. - М.: Изд-во АН СССР, 1956, с. 1-93.

109. Олдер Х., Линнутая А. Урожайность и переваримость (in vitro) трав в зависимости от фазы развития и частоты уборки. - Сб. научн. трудов/ЭстНИИЗиМ, 1977, сб. 41, с. 137-147.

110. Ольдекоп Э.М. Об испарении с поверхности речных бассейнов. Юрьев: Б.И., 1911. - 87 с.

111. Опыт осушения земель закрытым дренажем /под ред. Лукянаса А.Л. - М.: Колос, 1975. - 320 с.

112. Орошение и осушение в странах Мира /под ред. Алексеевского Е.Е. - М.: Колос, 1974. - 527 с.

113. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях /под ред. Кудрявцева В.А. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974. - 431 с.

114. Палагин Э.Г., Мосейчик В.А. Методика расчета на ЭВМ термического режима почвы. - Л.: Гидрометеоиздат, 1978. - 37 с.

115. Панасин В.И., Борматенков О.А. Польдерные земли Калининградской области. Распространение, история освоения, свойства, удобрения, рекомендации. - Калининград: Книжн. изд-во, 1969. - 31 с.

116. Пахапилл Л. Определение суточных сумм солнечной радиации по продолжительности солнечного сияния. - Уч. зап./ Тартуск. ун-т, 1974, вып. 317, с. 47-52.

117. Пихо А.П. Почвенные условия, эффективность применения и распределение минеральных удобрений под полевые культуры в севообороте в Эстонской ССР. - Таллин: Б.И., 1974. - 107 с.

118. Подольский А.С. Фенологический прогноз (Математический прогноз в экологии). 2-е изд. - М.: Колос, 1974. - 287 с.

II9. Полевой А.Н. Агрометеорологические условия и продуктивность картофеля в Нечерноземье. - Л.: Гидрометеоиздат, I978. - II8 с.

I20. Полевой А.Н. Методическое пособие по составлению агрометеорологического прогноза средней областной урожайности картофеля в Нечерноземной зоне ЕТ РСФСР. - М.: Гидрометеоиздат, I979. - 22 с.

I2I. Полынов Б.Б. Избранные труды. - М.: Изд-во АН СССР, I956. - 75I с.

I22. Полюшкин Ю.В., Хомченко С.И. Фенология экосистем - определение, предмет, задачи и методические приемы. - В кн.: Ритмы природы Сибири и Дальнего Востока II. - Иркутск: Б.И., I975, с. I38-I53.

I23. Преображенский В.С. Беседы о современной физической географии. М.: Наука, I972. - I67 с.

I24. Приборы для определения сроков и норм полива. - Л.: СевНИИГиМ, I979. - 9 с.

I25. Природа, техника, геотехнические системы. - М.: Наука, I978. - I5I с.

I26. Проблемы комплексной климатологии /Моск.фил.Геогр. о-ва СССР. - М.: МФГО, I977. - I52 с.

I27. Программирование максимальных урожаев картофеля. - Вестн. с/х науки, I978, № 2, с. II0-II7.

I28. Прокаев В.И. Основы ландшафтоведения и физико-географическое районирование. Ч. I. - Свердловск: Изд-во Свердловск. пед. ин-та, I973. - I27 с.

I29. Промерзание, оттаивание и водно-физические свойства мерзлых грунтов. - Л.: Б.И., I977. - 2I8 с.

I30. Райк А.А. О применении косвенной характеристики радиационного режима при типизации погоды. - Уч. зап./Тартуск. ун-т, I963, вып. I44, с. 23-30.

131. Раунер Ю.Л. Тепловой баланс растительного покрова. - Л.: Гидрометеоиздат, 1972. - 210 с.

132. Рекомендации по польдерному осушению в Белорусском Полесье. - Минск: БелНИИМиСХ, 1979. - 60 с.

133. Ретеюм А.Ю. Физико-географические исследования и системный подход. - В кн.: Системные исследования. - М.: Наука, 1972, с. 90-110.

134. Ретеюм А.Ю. Управление природной средой в техно́итах. - В кн.: Проблемы оптимизации в экологии. - М.: Наука, 1978, с. 205-212.

135. Ретеюм А.Ю., Дьяконов К.Н., Куницын Л.Ф. Взаимодействие техники с природой и геотехнические системы. - Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1972, № 4, с. 46-55.

136. Римидис А. Возможность регулирования водного режима на летних польдерах нормированной откачкой. - В кн.: Вопросы регулирования водного режима избыточно увлажненных земель. - Елгава: ЛатНИИГиМ, 1974, с. 79-87.

137. Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге. Ч. 1. - Л.: Гидрометеоиздат, 1965. - 663 с.

138. Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге. Ч. 2. - Л.: Гидрометеоиздат, 1969. - 288 с.

139. Романова Н.А. О режиме откачек с обвалованных сельскохозяйственных земель. - Гидротехника и Мелиорация, 1973, № 6, с. 22-24.

140. Росс Ю.К. Радиационный режим и архитектоника растительного покрова. - Л.: Гидрометеоиздат, 1975. - 342 с.

141. Руководство по производству наблюдений за отдельными элементами водного баланса (для наблюдателей экспедиций ГГИ). - Л.: ГУГМС, 1970. - 155 с.

142. Рябкова Г.А. Водный баланс польдера (на примере польдера Русне Литовской ССР в годы 1965-1967). - Гидротех-

ника и Мелиорация, I970, № I0, с. 22-26.

I43. Самцевич С.А. Гелеобразные выделения корней растений и их влияние на микроорганизмы. - В кн.: Физиолого-биохимические основы взаимного влияния растений в фитоценозе. - М.: Наука, I966, с. 254-260.

I44. Свердлова Е.Л. Некоторые особенности водного режима картофеля при действии избыточного увлажнения. - В кн.: Рост, развитие и урожайность растений в условиях Европейского северо-востока РСФСР. - Вологда: Б.И., I976а, вып. 4, с. 50-60.

I45. Свердлова Е.Л. Связь процессов клубнеобразования с ростом надземной части картофеля. - В кн.: Рост, развитие и урожайность растений в условиях Европейского северо-востока РСФСР. - Вологда: Б.И., I976б, вып. 4, с. 47-49.

I46. Сезонная жизнь природы Русской равнины. Календари природы южной части ЕТС. - Л.: Наука, I980. - II2 с.

I47. Симонов Ю.Г. Пространственно-временный анализ в физической географии. - Вестн. Моск. ун-та. Сер. геогр., I977, № 4, с. 22-29.

I48. Симонов Ю.Г., Зейдис И.М. Эффект структурной памяти в динамике географических исследований. - Вестн. Моск. ун-та. Сер.геогр. I980, № 4, с. 2I-26.

I49. Сиротенко О.Д. Предпосылки построения комплексной динамической модели "погода-урожай". - В кн.: Математические методы в агрометеорологии. - Труды/ИЭМ, I973, вып. 3(40), с. I8-3I.

I50. Сиротенко О.Д., Просвиркина А.Г. Метод количественной оценки агрометеорологических условий формирования урожая ярового ячменя (для Нечерноземной зоны ЕТС). - М.: ГУГМС, I977. - 57 с.

I5I. Сиротенко О.Д., Просвиркина А.Г. Метод количественной оцен-

ки агрометеорологических условий формирования урожая ярового ячменя. Для Нечерноземной зоны Европейской территории СССР. Методическое пособие. - М.: Гидрометеоиздат. Моск. отд-е, I979. - 33 с.

I52. Слейчер Р. Водный режим растений. - М.: Мир, I970. - 364 с.

I53. Смирнов В.А. Опыт фенокліматографии СССР. - В кн.: Фенологические особенности растений в связи с их географией и продуктивностью. - Л.: ГО СССР, I972, с. I23-I27.

I54. Солнцев В.Н. Формы упорядоченности физико-географической структуры. - В кн.: Новое в физической географии. - М.: МФГО, I975, с. 84-93.

I55. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. - Новосибирск: Наука, I978. - 3I9 с.

I56. Справочник по климату СССР. - Вып. 4, ч. 4. - Л.: Гидрометеоиздат, I968. - 227 с.

I57. Справочник по сенокосам и пастбищам. - 2-е изд. - М.: Колос, I966. - 504 с.

I58. Судницын И.И. Количественная модель передвижения воды в системе растение-почва-атмосфера. - Почвоведение, I970, № II, с. 24-29.

I59. Судницын И.И. Движение почвенной влаги и водопотребление растений. - М.: Изд-во Моск. ун-та, I979. - 255 с.

I60. Сыроежкин М.И. Польдер как элемент водохозяйственного комплекса. - Гидротехника и Мелиорация, I978, № 4, с. 88-95.

I6I. Тамм В.В. Простой метод определения сроков полива культурных пастбищ. - В кн.: Вопросы мелиорации и водного хозяйства. - Тарту: Изд-во Эст.сель-хоз. акад., I972, вып. II, с. 79-88.

I62. Томберг У. Формулы для определения величины осадки торфа при осушении болот. - Сборник научных трудов/ЭниИЗиМ,

1972а, сб. 29, с. 46–57.

163. Томберг У. Уточненные данные о водопроницаемости торфов. – Сборник научных трудов/ЭстНИИЗиМ, 1972б, сб. 29, с. 58–68.

164. Томберг У. Расстояния между дренами при напорно-грунтовом питании. – Сборник научных трудов/ЭстНИИЗиМ, 1976, сб. 39, с. 54–70.

165. Томкус И. О связи фитофенофаз с гидротермическим режимом в отдельные сезоны. – В кн.: Гидрометеорологический режим и агроклиматические ресурсы. Труды У республиканской конференции. – Вильнюс: Минтис, 1969, с. 199–204.

166. Тооминг Х.Г. Солнечная радиация и формирование урожая. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 199 с.

167. Тооминг Х.Г., Каринг П.Х. Агроклиматическая оценка потенциального урожая многолетних трав и недоборки урожая, обусловленного дефицитом влаги. – Метеорология и Гидрология, 1977, № 2, с. 81–86.

168. Тооминг Х.Г., Кыйва П.Х. Агроклиматическая оценка потенциального и действительно возможного урожая картофеля. – Метеорология и Гидрология, 1979, № 7, с. 105–110.

169. Тоомре Р., Рааве Л. О массе корней луговых растений на сенокосах и пастбищах. – Сборник научных трудов/ЭстНИИЗиМ, 1974, сб. 33, с. 65–80.

170. Тропова Е.Ф. Зависимость сроков цветения и созревания семян от температурных условий. – В кн.: Сезонное развитие природы. – М.: Б.И., 1975, с. 16–18.

171. Турбин В.Н. Двустороннее регулирование водного режима почв. – М.: Россельхозиздат, 1977. – 71 с.

172. Указания по производству наблюдений за водным режимом на осушительных системах. – Киев: Урожай, 1964. – 88 с.

I73. Указания по производству снегомерных наблюдений на гидрометеорологических станциях и постах. - Л.: Гидрометеоиздат, I965. - 52 с.

I74. Успенский С.М. Мелководья и подтопленные земли - мелиоративный фонд для сельского хозяйства. - В кн.: Мелиорация земель в зоне влияния равнинных водохранилищ. М.: Колос, I974, с. 5-2I.

I75. Устименко А.С., Данильчук П.В., Гвоздиковская А.Т. Корневые системы и продуктивность сельскохозяйственных растений. - Киев: Урожай, I975. - 368 с.

I76. Федина А.Е. Физико-географическое районирование. М.: Изд-во Моск. ун-та, I973. - I96 с.

I77. Федоров Е.Е. Климат в виде совокупности погод. - Научно-агрономический журнал, I927а, № 3, с. I7I-I90.

I78. Федоров Е.Е. Опыт сопоставления быстроты развития растения с типами погоды. - Научно-агрономический журнал, I927б, № 7-8, с. 429-438.

I79. Филатов В.А. Режим работы насосных станций при осушении польдерных земель. - Калининград: Книжн. изд-во, I965. - 46 с.

I80. Филатов В.А. Опыт осушения польдерных земель Калининградской области. - В кн.: Мелиорация земель в зоне влияния равнинных водохранилищ. - М.: Колос, I974, с. I69-I83.

I8I. Фитоактинометрические исследования растительного покрова. - Таллин: Валгус, I967. - I80 с.

I82. Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия. - М.: Прогресс, I97I. - 340 с.

I83. Фортран ЕС ЭВМ/Брич З.С., Капилевич Д.В., Котик С.Ю., Цагелевский В.И. - М.: Статистика, I978. - 264 с.

I84. Фотосинтез и продуктивность растительного покрова. - Тар-

ту: Б.И., 1968. - 134 с.

185. Хьюз Ч., Пфлигер Ч., Роуз Л. Методы программирования: курс на основе Фортрана. - М.: Мир, 1981. - 331 с.

186. Циприс Д.Б., Саноян М.Г. Двустороннее регулирование водного режима почв. Агрометеорологические аспекты. - Л.: Гидрометеоиздат, 1978. - 184 с.

187. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. - Л.: Гидрометеоиздат, 1978. - 308 с.

188. Чубуков Л.А. Комплексная климатология. - М., Л.: Изд-во АН СССР, 1949. - 96 с.

189. Шабанов В.В. Биоклиматическое обоснование мелиораций. - Л.: Гидрометеоиздат, 1973. - 165 с.

190. Шатилов И.С., Каюмов М.К. Использование питательных веществ почвы и минеральных удобрений посевами пшеницы. - Известия ТСХА, 1971, № 5, с. 18-23.

191. Швебс Г.И. Формирование водной эрозии стока наносов и их оценка (на примере Украины и Молдавии). - Л.: Гидрометеоиздат, 1974. - 183 с.

192. Шевелев Я., Ломакин В. Новые мелиоративные системы. - Земля родная, 1978, № 9, с. 12-15.

193. Шкинкис Ц. Об эффективности действия дренажа в зимний период. - Рига: Б.И., 1961. - 35 с.

194. Шкинкис Ц.Н. Проблемы гидрологии дренажа. - Л.: Гидрометеоиздат, 1974. - 347 с.

195. Шнелле Ф. Фенология растений. - Л.: Гидрометеоиздат, 1961. - 259 с.

196. Шульц Г.З., Шамраевский В.Б. Фенологические наблюдения. Практическое руководство к производству наблюдений над сезонными явлениями живой природы. - Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1941. - 88 с.

197. Шумаков Б.Б. Советская мелиоративная наука на подъеме. - Вестн. с.-х. науки, 1977, № 11, с. 125-132.

198. Эйюбов А.Д. Бонитировка климата Азербайджанской ССР. - Баку: Элм, 1975. - 148 с.

199. Эксплуатация польдерных систем /под ред. Ю.А.Юшкаускаса. - М.: Колос, 1981. - 176 с.

200. Энно Ю.П. Увлажнение песчаных почв путем подпочвенного орошения в Эстонской ССР. - В кн.: Эксплуатация мелиоративных систем в зоне избыточного увлажнения. - Минск: Б.И., 1974, с. 83-92.

201. Юрченко Л.В. О регулировании водного режима в замыкающем створе Золотоношской осушительной системы. - Мелиорация и Водн. хоз-во. - Киев: Урожай, 1978, вып. 44, с. 69-74.

202. Юшкаускас Ю. Влияние степени осушения на водный режим аллювиальных почв в условиях зимних польдеров низовья реки Нямунас. - В кн.: Вопросы двустороннего регулирования водного режима почв. - Вильнюс: Газетно-книжн. изд-во, 1966, с. 137-146.

203. Юшкаускас Ю.А. Польдерное осушение в Литовской ССР (технико-экономические показатели). - Вильнюс: Периодика, 1974. - 153 с.

204. Яковлев Е.И. Машинная имитация. - М.: Наука, 1975. - 158 с.

205. Ashcroft Y.D.,Donald D.M.,Evans D.D. Numerical method for solving the diffusion equation.-Soil Sci.Soc.Amer. Proc.,1962,vol.25,N6,p.522-525.

206. Beddows A.R. Head emergence in forage grasses in relation to February-May temperatures and the predicting of early or late springs.-J.Brit.Grassland Soc.,1968, vol.23,N1,p.88-97.

207. Benacchio S.S.,Blair B.O. A new approach to phenological research - relationships between environmental fac-

tors and days to the appearance of the first leaf in four perennial species.-Agron.J.,1972,vol.64, N3,p.297-302.

208. Chorley R.J.,Kennedy B.A. Physical geography. A systems approach.-London:Prentice-Hall intern.,1971.-370p.

209. Computer simulation of snowmelt/Solomon R.M.,Ffolliott P. F.,Baker M.B.jr.,Thompson J.R.-USDA Forest Service Research Paper RM-174,1976.-8 p.

210. Crawford N.H.,Donigian A.S. Pesticide transport and runoff model for agricultural lands.-Washington:Gov.print. off.,1974.-211 p.

211. Crawford N.H.,Linsley R.K.jr. Digital simulation in hydrology: Stanford watershed model IV.-In:Technical Report/Department of Civil Engineering,Stanford University,1966,N39.

212. Curry R.B. Dynamics simulation of plant growth. I.Development of a model.-Trans.ASAE,1971,vol.14,N5,p.946-949

213. Curry R.B.,Chen L.R. Dynamic simulation of plant growth. II.Incorporation of actual daily weather data and partitioning of net photosyntete.-Washington,1971. -26 p.

214. Denmead O.T.,Shaw R.H. Avaiability of soil water to plants, as affected by soil moisture content and meteorological conditions.-Agron.J.,1962,vol.54,N5,p.385-390.

215. Dent J.B.,Blackie M.J. Systems simulation in agriculture.-London:Applied Sc.Publishers Ltd.,1979.-180 p.

216. Drenaazi projektparameetrite määramise juhend.-Tallinn: Bit,1979.-12 lk.

217. Duensing G. Der Einfluss des Grundwasserstandes auf des Frostrisiko.-Mitt.Obstbauversuchringes Alten Landes, 1972,Jg.27,H.4,S.99-114.

218. Dutt G.R.,Shaffer M.J.,Moore W.J. Computer simulation model of dynamic bio-physiochemical processes in soils.-Technical Bulletin/Dept.of Soils,Water and Engin.Agr.Exper.Stat.,University of Arizona,Tucson, 1972,N196.-101 p.

219. Dyne van G.M.,Abramsky Z. Agricultural systems models and modelling: a overview.-In:Study of agricultural systems.-London:Applied Sc.Publishers,1975,p.23-106.

220. Eisen I. Kuivenduse intensiivsuse mõju turvasmullale ja taimekasvule.-Rmt.:50 aastat sookultuuri-alast uurimistööd Eestis.-Tallinn:ERK,1960a,lk.120-164.

221. Eisen I. Taimekasvutingimused iseärasustest keskmiselt ja hästilagunenud turvasmullal.-Rmt.:50 aastat sookultuuri-alast uurimistööd Eestis.-Tallinn:ERK,1960b, lk.191-213.

222. Glopper de R.J.,Smits H. Reclamation of land from the sea and lakes in the Netherlands.-Outl.on Agric.,1974, vol.8,N3,p.148-155.

223. Goodman M.R. Study notes in system dynamics.-Cambridge: Wright-Allen-Press,Inc.,1974.-320 p.

224. Green W.H.,Ampt G.A. Studies on soil physics.-Agron.J., 1911,vol.4,p.1-24.

225. Haase G. Die Arealstruktur chorischer Naturräume.-Peterm. Geogr.Mitt.,1976,Jg.120,H.2,S.130-135.

226. Haldre H.,Maastik A. Polderkuivendus.-Tartu:EPA,1963.-65p.

227. Hanks R.J. Model for predicting growth as influenced by evapotranspiration and soil water.-Agron.J.,1974, vol.66,N5,p.660-665.

228. Hansen G.K. A dynamic continous simulation model of water state and transpiration in the soil-plant-atmosphere system.-Acta Agric.Scandinavica,1975,vol.25,N2, p.129-149.

229. Hensel J.,Petrovic S. Klimatografia kupelnych a vybranych miest Slovenska.-Vydavatelstvo Osveta,1976.-419 p.

230. Hill R.W., Hanks R.J. A model for predicting crop yields from climatic data.-ASAE Technical Paper N78-4030, 1978.-23 p.

231. Hornung U. A numerical method for the simulation of unsteady ground-water flow in both saturated and unsaturated soils.-Soil Sc.,1977,vol.124,N3,p.140-144.

232. Int L. Melioreeritud muldade soojusfüüsikalistest omadustest.-Teaduslike tööde kogumik/Eesti Maavilj.ja Maapar.TUI,1970,kd.19,lk.160-163.

233. Jannermann G.,Fuhrmann U.,Rissler R. Fragen des effektiven Einsatzes von Meliorationsanlagen.-Kooperation,1977, Jg.11,H.8,S.344-346.

234. Juhend hüdrometeoroloogiajaamadele ja postidele.-11 kd.-Tallinn:Hüdrometeorol.Kirjast.,1977.-296 lk.

235. Kaasik Ü. Algoritmikeele FORTRAN põhimõisted.-Tartu:TRÜ, 1980a.-80 lk.

236. Kaasik Ü. Algoritmikeele FORTRAN kasutamine arvutil EC-1022. -Tartu:TRÜ,1980b.-96 lk.

237. Kaljumäe H.,Koskor I. Võrtsjärve veereziimi reguleerimise võimalustest.-Rmt.:Eesti NSV pinnavete kasutamine ja kaitse.-Tallinn:Valgus,1980,lk.104-111.

238. Kanemasu E.T.,Stone L.R.,Powers W.L. Evapotranspiration model tested for soybean and sorghum.-Agron.J.,1976, vol.68,N4,p.569-572.

239. Keulen van H. Simulation of water use and herbage growth in arid regions.-Wageningen:Pudoc,1975.-184 p.

240. Keulen van H.,Beek van C.G.E.M. Water movement in layered soils a simulation model.-Neth.J.Agric.Sc.,1971,

vol.19,N3,p.138-154.

241. Kink H. Hüdrogeoloogiliste uurimistööde aja sõltuvus põhjaveega toituvate liigniiskete maade veereziimist.-Teaduslike tööde kogumik/Eesti Maavilj. ja Maapar. TUI,1973, kd.29,lk.79-94.

242. Kirde K. Andmeid Eesti kliimast.-Tartu Ülikooli Meteoroloogia Observatooriumi Teaduslikud Väljaanded, 1939, Nr.3.-152 lk.

243. Kitse E. Mullavesi.-Tallinn:Valgus,1978.-142 lk.

244. Krcho J. Cybernetic modelling of geosystems.-Bratislava: Cominiys University,1976.-30 p.

245. Lambert J.R.,Penning de Vries F.W.T. Dynamics of water in the soil-plant-atmosphere system: a model named TROIKA.-In:Ecological Studies.Analysis and synthesis /ed. by A.Hadas.-Berlin,Heidelberg,N.Y.: Springer-Verlag,1973,vol.4,p.257-273.

246. Lehtveer R.,Mäe U. Muldade soojusmahutuvusest.-Rmt.:EGS Aastaraamat 1978.-Tallinn:Valgus,1979,lk.40-47.

247. Liakopoulos A.C. Theoretical approach to solution of the infiltration problem.-Bull.of the Intern.Assoc.of Sc.Hydrol.,1966,vol.11,N1,p.69-110.

248. Maaparanduse käsiraamat.1.Maaparanduse alused.-Tallinn:ERK, 1962.-472 lk.

249. Maaparanduse kursuseprojekti juhend.-Tartu:EPA,1977.-77 lk.

250. Mäetalu H.,Karing P. Heintaimede saagi intensiivne reguleerimine.-Tallinn:Valgus,1979.-63 lk.

251. Makkink G.F.,Heemst H.D.J. Simulation of the water balance of arable land and pastures.-Wageningen:Pudoc, 1975.-79 p.

252. Mandy G. Ecological and practical relations of the fluctu-

ation in the values of phenological phenomena.-Acta Bot.Akad.Sc.Hung.,1963,T.9,F.1/2,p.95-103.

253. Masing V. Linn kui ökosüsteem.-Eesti Loodus,1979,Nr.1-2, lk.6-11;67-73.

254. Miller M.E.,Mederski H.J.,Weaver C.R. Heat units and corn maturity.-Final report to NOAA,Contract NE-226-29(N), -Wooster Ohio Agric.Res.and Developm.Cent.,1971.- cit:Curry,Chen,1971.

255. A Model for computation of drainage costs.-In:Intern.Inst. for Land Reclamation and Improve,1977,p.42-44.

256. Monteith J.L. Principles of environmental physics.-London: Ed.E.Arnold,1973.-179 p.

257. Nimah M.N.,Hanks R.J. Model for estimating soil, water, plant and atmospheric irrelations.1.Description and sensitivity.-Soil Sc.Soc.Amer.Proc.,1973,vol.4, p.522-527.

258. Nõges T. Uurimistulemusi soo-kultuurniitude alalt.-Rmt.:50 aastat sookultuuri-alast uurimistööd Eestis.-Tallin:ERK,1960,lk.214-249.

259. Nuttonson M.Y. Wheat-climate relationships and the use of phenology in ascertaining the termal and photothermal requirements of wheat.-Washington,1955.-388 p.

260. Odle J. Pumping water with the sun.-Progressive Farmer, 1977,vol.92,N10,p.41-44.

261. Olszta W. Simulation of dynamic soil moisture under conditions of constant evapotranspiration and constant water table depth.-In:Basic problems of soil environment.-Lublin,1977,p.51-68.

262. Optimizing crop production trough control of water and salinity levels in the soil.-Utah Water Res.Lab. e.a., 1977.-191 p.

263. Penman H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass.-Proc.Roy.Soc.,1948,ser.A,vol.193,p.120-145.

264. Puri B.R.,Murari K. Studies in surfice area measurements of soils.2.Surfice area from single point on the water isoterm.-Soil Sc.,1964,vol.97,N5,p.341-343.

265. Radcenko J. Automatika regulacna drenaz a podpovrchove zavlazovanie.-Vodni hospodarstvi,1977,vol.27,N10,p.261-265.

266. Rijtema P.E. An analysis of actual evapotranspiration.-Wageningen:Pudoc,1965.-107 p.

267. Rijtema P.E. Derived meteorological data:transpiration.-In:Proc.Symposium on Methods on Agroclimatology Reading.-Paris:UNESCO,1966,p.55-72.

268. Rijtema P.E. On the relation between transpiration, soil physical properties and crop production as a basis for water supply plans.-In:Technical Bull.of the Inst. f.Land a.Water Managem.Res.-Wageningen,1968,N58, p.28-58.

269. Rijtema P.E. The effect of light and water potential on dry matter production of field crops.-Paris:UNESCO, 1970,Reports 44/6.-12 p.

270. Ritchie J.R. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover.-Water Resourc.Res.,1972, N8,p.1204-1213.

271. Ritchie J.R.,Rhoades E.D.,Richardson C.W. Calculating evaporation from native grassland watersheds.-Trans.ASAE, 1976,vol.19,N6,p.1098-1103.

272. Rosenkranz F. Die bedeutung der Phänologie für die Landwirtschaft.-Hochschule für Bodenkulture,1948,Bd.1,H.2, S.57-66.

273. Rosenthal W.D.,Kanemasu E.T.,Raney R.J. Evaluation of an

evapotranspiration model for corn.-Agron.J.,1977,vol. 69,N3,p.461-464.

274. Seyfert F. Phänologie.-Wittenberg-Lutherstadt:Ziemsen,1960. -103 S.

275. Sisson J.B.,Ferguson A.H.,Genuchten van,M.Th. Simple method for predicting drainage from field plots.-Soil Sc.Soc.Amer.J.,1980,vol.44,N6,p.1147-1152.

276. Sokolowski I. Zagadnienia odwaniania, terenow przylegtych do zbiornikow nizinnych.-Wiad.melior.Lakarsk.,1977, vol.20,N5,p.120-122.

277. Stock H.-G. Prüfung der phänometrischen Arbeitsweise zur Erfassung des Witterungseinflusses auf die Ertragsbildung von Rotklee und Luzerne.-Albrecht-Thaer.Arch., 1968,Bd.12,H.8,S.769-772.

278. Sulger A. Niisutussüsteemide majandamine.-Sotsialistlik põllumajandus,1978,Nr.19,lk.894-896.

279. Taimefenoloogilised vaatlused Eesti NSV-s.Abiks loodusvaatlejale nr.71/koost. E.Lellep.-Tartu,1976.-109lk.

280. Tamm V.,Roostalu H. Kastmisreziim vihmutamisel.-Sotsialistlik Põllumajandus,1978,Nr.13,lk.593-596.

281. Tomberg U. Soode kuivendamine drenaaziga.-Rmt.:50 aastat sookultuuri-alast uurimistööd Eestis.-Tallinn:ERK, 1960,lk.165-190.

282. Tomberg U. Polderkuivenduse-alane sümpoosion Eestis.-Sotsialistlik Põllumajandus,1971,Nr.16,lk.767.

283. Valing O. Poldrid Võrtsjärve-mail.-Sotsialistlik Põllumajandus,1978,Nr.7,lk.316-318.

284. Varep E. The landscape regions of Estonia.-Toimetised/TRÜ, 1964,kog.156,lk.3-28.

285. Weichkart P. Geographie im Umbruch.-Wien:Franz Deutiche, 1975.-150 S.

286. Wijk van,W.R.,Vries De D.A. Evapotranspiration.-Neth.J. Agric.Sc.,1954,N2,p.105-119.

287. Williams G.D.V. A Critical evaluation of a biophotother-mal time scale for barley.-Intern.J.Biometeorol., 1974,vol.18,N4,p.259-271.

288. Wit De, C.T. Transpiration and crop yields.-Gravenhage: Versl.Landbouwk.Onderz.,1958,Agric.Res.Rep.,N64.6. -88 p.