К. Т. ХОММИК

ОСНОВЫ РАСЧЕТА ОСУШИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

ПО МАТЕРИАЛАМ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЭСТОНСКОЙ ССР

ТАЛЛИН
1966

ARH

203893

A-4951

ЭСТОНСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЗЕМЛЕДЕЛИЯ И МЕЛИОРАЦИИ

К. Т. ХОММИК

ОСНОВЫ РАСЧЕТА ОСУШИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

(ПО МАТЕРИАЛАМ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЭСТОНСКОЙ ССР)

БЮРО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
МИНИСТЕРСТВА СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ЭСТОНСКОЙ ССР
ТАЛЛИН 1966

UDK 626.86.001.24

Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
203893

ARHIIVKOGU

ПРЕДИСЛОВИЕ

Осушение избыточно увлажненных земель требует больших капиталовложений, что оказывает значительное влияние на себестоимость сельскохозяйственной продукции. В ряде случаев реализационная стоимость продукции, полученной с участка, осушенного недостаточно интенсивно, может оказаться ниже себестоимости. При такой интенсивности осушения хозяйство будет убыточным. С другой стороны, излишнее загущение регулирующей сети приводит к увеличению капитальных вложений. Таким образом, определение оптимальной интенсивности осушения земель, предназначенных для выращивания различных культур, приобретает весьма важное значение.

Основные положения, базируясь на которые проектируются осушительные системы, установлены, как правило, на основании практических данных строительства и эксплуатации этих систем.

Для определения расстояния между осушителями в различных почвенных и климатических условиях составлены соответствующие таблицы или графики.

При использовании формул для определения расстояния между дренами расчетные величины стока или скорости понижения грунтовых вод, входящие в эти формулы, принимаются обычно без экономического обоснования.

Диаметр дренажных труб определяется по модулю стока, также получаемого на основе таблиц, хоть и составленных по фактическим данным, однако не имеющих твердого обоснования.

Экономически еще менее обоснованы модули стока, используемые при проектировании водоприемников и отводящих каналов.

Интенсивность осушения, отвечающую требованиям сельскохозяйственного производства, можно непосредственно исследовать на опытных участках, где при более или менее однородных почвенных условиях осушители расположены на разных расстояниях. Применяя одинаковую агротехнику, можно для отдельных культур определить расстояние между осушителями,

дающее наибольший экономический эффект для данного случая. Однако естественно, что оптимальная интенсивность осушения, определенная таким образом, действительна только для почвенных, гидрогеологических, геологических и климатических условий, существующих на данном опытном участке.

Для использования данных, полученных на опытных участках, в других физико-географических условиях, требуется разработка соответствующей методики. В настоящей работе представлены результаты исследования определения интенсивности осушения сельскохозяйственных земель в условиях Эстонской ССР.

За экономически обоснованную интенсивность осушения принята такая интенсивность, при которой себестоимость продукции и срок окупаемости капиталовложений являются минимальными.

Увеличение себестоимости продукции на осушенных землях при одной и той же агротехнике зависит, главным образом, от двух категорий расходов. Во-первых, от годовых амортизационных и эксплуатационных затрат на осушение и, во-вторых, от потерь урожая, обусловленных избытком влаги при данной интенсивности осушения. Очевидно, что себестоимость продукции будет минимальна при такой интенсивности осушения, когда потери урожая, сложенные с расходами на осушение, будут минимальны. Отсюда следует, что для определения оптимальной интенсивности осушения необходимо определить минимум суммы годовых расходов на осушение и убытков от потерь урожая.

Годовые расходы на осушение можно определить по строительной стоимости осушительных систем. Такие же годовые эксплуатационные расходы по осушительной системе можно представить в виде определенного процента от ее строительной стоимости.

Значительно сложнее оценить потери урожая при различной интенсивности осушения. Для определения потерь урожая в зависимости от избыточной влажности почвы необходимо знать ее водный режим при различной интенсивности осушения. Водный режим почвы связан с режимом осадков и испарения данной местности. Режим осадков и испарение, в свою очередь, характеризуются режимом стока. Таким образом, для определения потерь урожая в зависимости от интенсивности осушения необходимо определить режим стока в осушительных системах. Поэтому большая часть работы посвящена определению режима стока с речных водосборов и осушительных систем.

Для характеристики режима стока в осушительных системах разработаны формулы кривых обеспеченности среднемесячного и среднесуточного стока для каждого месяца вегетационного периода (май—октябрь) и кривых обеспеченности весеннего и летне-осеннего максимального стока. Путем умножения фор-

мул кривых обеспеченности среднемесячного и среднесуточного стоков получены формулы поверхности обеспеченности стока, позволяющие с достаточной точностью осветить условия стока данного месяца. Все формулы представлены в единицах от среднего многолетнего стока. Таким образом, зная средний многолетний сток, полученные формулы можно применять и в других районах, климатические условия которых аналогичны условиям Эстонии.

На основе режима стока определены водный режим и потери урожая от избытка влаги в осушительных системах при различной интенсивности осушения. По потерям урожая и расходам на осушение разработаны показатели интенсивности осушения для различных культур, выращиваемых в различных почвенных условиях.

Базируясь на величинах показателя интенсивности осушения, разработаны расчетные величины стока для определения расстояния между дренами, диаметра дренажных труб и поперечных сечений водоприемников и проводящих каналов.

Анализ интенсивности осушения, применяемой в различных странах, показывает, что рекомендуемые расчетные величины стока соответствуют реальным условиям.

Автор выражает глубокую благодарность рецензентам рукописи профессору П. Д. Глебову и профессору Д. Л. Соколовскому за сделанные ими замечания и ценные указания.

Все отзывы и замечания по настоящей работе просим направлять по адресу: Эстонская ССР, Харьюский район, почт. отд. Саку, Эстонский научно-исследовательский институт земледелия и мелиорации.

ВВЕДЕНИЕ

При разработке проблемы экономически обоснованной интенсивности осушения сельскохозяйственных земель необходимо в первую очередь иметь данные о требовании выращиваемых растений к водно-воздушному и тепловому режиму почвы.

По вопросу урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от срока весеннего посева имеются результаты исследований, полученные Н. Роотси на опытной базе «Раади», М. Пиллем на Йыгеваской селекционной станции и Э. Халлером [46] на опытной базе «Куузику» в Эстонской ССР.

Для определения влияния продолжительности затоплений поверхностных вод на урожай полевых культур использованы материалы опытов, проведенных Северным научно-исследовательским институтом гидротехники и мелиорации в колхозах «Кудрова» и «Красный восход» [18], и данные, полученные от опытных баз Эстонского научно-исследовательского института земледелия и мелиорации.

Зависимость урожая различных культур от водно-воздушного режима почвы исследована И. Эйзеном [43] на опытной базе «Тоома» в Эстонской ССР. На основе этих данных оказалось возможным установить потери урожая от избытка влаги в начале вегетационного периода.

Потери от запаздывания уборки определены по данным хозяйств, в которых уборка производилась в разные сроки после созревания урожая.

Весенний посев, как и уборка урожая, могут запаздывать вследствие высокого уровня грунтовых вод на осушенной территории. Потери урожая от вымочек и высокой влажности почвы также связаны с высоким стоянием грунтовых вод. Таким образом, на основе данных об уровне грунтовых вод в осушительных системах можно определить потери урожая вследствие избытка влаги в этих системах.

Уровни грунтовых вод в осушительных системах при различной интенсивности осушения можно, в свою очередь, определить по стоку. Известно, что зависимость между уровнем грунтовых вод и стоком в тяжелых суглинистых почвах изменяется

в разные периоды действия дренажа [31]. Однако такое изменение нам не мешает, так как используемая осредненная зависимость достаточно стабильна.

Для исследования режима стока требуются многолетние гидрометрические наблюдения на осушительных системах в разных климатических и почвенных условиях. Такими данными мы, к сожалению, не располагаем. Многолетние гидрометрические данные имеются преимущественно по крупным и средним рекам. На отдельных осушительных системах ведутся только кратковременные наблюдения. Поэтому при определении кривых обеспеченности максимального стока и стока различных месяцев вегетационного периода использованы гидрометрические данные Управления гидрометеорологической службы Эстонской ССР, опубликованные в ее Гидрологических ежегодниках.

Известно, что режим стока крупных рек отличается от такового в малых ручьях и осушительных системах. В водосборах крупных рек суммируется влияние всех факторов. Малый же водосбор может характеризоваться преобладающим влиянием одного фактора, например, может быть полностью занят болотом низинного или другого типа и режим стока притока может сильно отличаться от режима главной реки. Кроме того, могут иметь место изменения в режиме стока, обусловленные влиянием осушительных работ. Вследствие разнообразия факторов, воздействующих на процессы формирования стока, изучение влияния отдельных факторов является сложной и трудной задачей. Имеющиеся результаты обычно позволяют делать только качественные заключения. Для практических решений требуются специальные исследования, позволяющие определить количественные параметры стока в местных условиях.

Детальный анализ гидрологической литературы по вопросу о влиянии различных факторов на режим стока сделан Д. Л. Соколовским в 1959 г. [33]. Например, на основе анализа работ А. Д. Дубаха (1936 г.), К. А. Клюевой [21], К. Е. Иванова [14] и других авторов Д. Л. Соколовский пришел только к выводу, «... что в условиях избыточного и достаточного увлажнения болота не уменьшают величину среднего годового стока рек и несколько регулируют внутригодовой ход стока ...» (стр. 60).

Более детальные приемы расчета стока с болотных массивов изложены в книге «Гидрологические расчеты при осушении болот и заболоченных земель», составленной под редакцией К. Е. Иванова в 1963 г. На основе данных, представленных в этой работе, можно в значительной мере уточнить определение режима стока с болот и заболоченных земель (в особенности с верховых болот разного типа).

Значительные исследования по стоку с дренированных минеральных земель проведены в Латвийской ССР. В работе Ц. Н. Шкинкиса (1962 г.) освещается влияние глубины укладки

дрен на режим дренажного стока. В исследованиях Я. Е. Уйска (1955 г.) и П. Б. Свиклиса (1965 г.) представлены многолетние данные о стоке с дренированных участков на Петерлаукской мелиоративно-опытной станции. Л. С. Аносова [6, 7] посвятила свои работы исследованию среднего многолетнего посевного и весеннего максимального стока в Латвийской ССР. Большая работа по исследованию стока с водоприемников проделана Б. Я. Сармы (1965 г.).

Много ценного фактического материала по мелиоративной гидрологии содержат также работы, проделанные в Литве (И. И. Мацевичус, В. И. Маченас, А. Л. Пошка), в Белоруссии (А. И. Ивицкий, Б. И. Яковлев, В. Ф. Шебеко) и во многих других республиках и областях СССР.

Все эти материалы позволяют более точно определять величину стока в водоприемниках в весенние и летние периоды. Однако для решения вопроса об интенсивности осушения необходимо иметь по возможности полное представление о режиме стока осушительных систем в каждом интервале вегетационного и осеннего периодов.

С этой целью исследовано влияние различных физико-географических факторов на величину среднего годового стока, на весенний и летне-осенний максимальный сток, на средний летний и средний осенний сток. Разработаны формулы для определения кривых обеспеченности весеннего и летне-осеннего максимального стока, среднего летнего и среднего осеннего стока в реках и каналах. На основе полученных формул и кратковременных гидрологических наблюдений, проведенных на осушительных системах, разработаны формулы кривых обеспеченности месячного и суточного стока для каждого месяца вегетационного периода (май—октябрь) в осушительных системах.

Используя формулы кривых и поверхности обеспеченности стока, формулы, характеризующие зависимость между уровнем грунтовых вод и стоком, и формулы, оценивающие потери урожая, можно определить кривые обеспеченности потерь урожая в зависимости от интенсивности осушения. На основе полученных потерь урожая и расходов на осушение при различной интенсивности осушения решается вопрос об экономически обоснованной интенсивности осушения и о расчетных величинах стока для проектирования осушительных систем.

Учитывая сказанное выше, в первой главе настоящей работы приводятся данные исследования режима стока рек Эстонской ССР.

ГЛАВА I

РАСЧЕТ СТОКА РЕК ЭСТОНСКОЙ ССР И ВЛИЯНИЕ ОСУШЕНИЯ НА РЕЖИМ СТОКА

§ 1. СРЕДНИЙ ГОДОВОЙ СТОК

В ходе дальнейшего исследования режима максимального стока и среднего стока в отдельные фазы вегетационного периода мы будем выражать сток в долях от среднего многолетнего годового стока. Такой прием применяется с целью исключения из гидрометрических данных влияния неточностей, которые возникают при определении площади водосборов и которые, в свою очередь, не позволяют с достаточной точностью определить величины модулей стока. Известно, что подземный водораздел не всегда совпадает с поверхностным. Кроме того, часто возникают затруднения при определении линии водораздела, в особенности на водосборах с равнинными и заболоченными площадями.

Применением относительных величин стока в долях от среднегодового можно в значительной мере сгладить влияние таких климатических факторов, как осадки и испарение.

Таким образом, оперируя относительными величинами, легче исследовать влияние различных факторов на режим стока.

Зная характер действия отдельных факторов, можно вычислить сток для любого водосбора, по которому нет данных наблюдений. Однако для перевода относительных чисел в модули стока или в расходы воды необходимо знать величину среднего многолетнего годового стока в интересующем нас водосборе. Обычно для определения этой величины используют соответствующие картограммы изолиний. Такие картограммы составляются на основании гидрометрических данных по главным водотокам и показывают среднюю величину стока с этих (больших) водосборов. Осушаемые участки расположены обычно только на небольших частях водосбора, где в зависимости от характера растительного покрова, водопроницаемости почвогрунтов, рельефа и т. п. могут быть совсем другие условия стока, чем в среднем на всей площади водосбора. Поэтому необходимо составить такую картограмму, по которой можно было бы определить средний многолетний сток для любого малого водосбора. С этой целью на основе многолетних данных об осадках и дефицита влажности воздуха была составлена карто-

грамма так наз. климатического стока для Эстонской ССР. На основе формулы испарения Э. М. Ольдекопа были вычислены средние многолетние суммы испарения. Вычитая из средних годовых сумм осадков сумму испарения, получим среднее значение годового стока за многолетний период.

Формула Ольдекопа, использованная для вычисления годовой суммы испарения, имеет следующий вид:

$$z = z_{max} \operatorname{th} \frac{x}{z_{max}},$$

где z — годовая сумма испарения, *мм*;
z_{max} — максимальное испарение, *мм*;

$$z_{max} = \alpha d;$$

α — постоянный коэффициент для заданного периода;
d — среднегодовая величина дефицита влажности воздуха, *мм*;
x — сумма годовых осадков, *мм*;
th — символ гиперболического тангенса.

Формула Ольдекопа проверена в Эстонской ССР, где она дает удовлетворительные результаты при условии, если коэффициент α вычисляется по гидрометеорологическим наблюдениям для каждого данного расчетного периода. Только в случае, если продолжительность периода превышает 20 лет, то коэффициент α является постоянным и в условиях Эстонской ССР равен 205 [40].

При вычислении размера испарения на основе осадков и дефицита влажности воздуха большое значение имеет точное определение суммы осадков. Как известно, особенно неточно измеряются снеговые осадки на открытых, незащищенных от ветра площадках, где дождемеры неполностью захватывают выпадающий снег.

С целью уточнения данных, собранных в ходе наблюдений за осадками, были составлены картограммы изогиет теплого и холодного периодов. При составлении картограмм осадков теплого периода приняты данные по всем пунктам измерения, а для картограммы осадков холодного периода только данные защищенных от ветра пунктов наблюдений. На картограмме осадков холодного периода, составленной по отдельным пунктам, найдены поправки для остальных пунктов. По исправленным таким образом данным были составлены картограммы годовых осадков для данного многолетнего периода [49].

Для вычисления испарения (и стока) необходимо, кроме осадков, иметь данные о среднесуточном дефиците влажности воздуха за рассматриваемый период. Составление картограммы изолиний дефицита влажности воздуха на основе данных

наблюдений на 30 метеорологических станциях, расположенных в примерно однородных микроклиматических условиях, т. е. на открытых, незащищенных площадках, не представляло особых затруднений [40].

Величина стока вычислялась для каждого пункта, где имелись многолетние (с 1891 по 1950 г.) данные по осадкам. На основе таких расчетов была составлена картограмма климатического стока Эстонской ССР [40], по которой можно определить сток для любого малого водосбора. Однако величина стока, вычисленная по климатическим факторам, требует корректировки, учитывающей влияние разницы в строении почвы и характера растительного покрова отдельных водосборов. При определении величины этих поправок были использованы гидрометрические наблюдения на различных водосборах, но уже с более коротким (однолетним и четырехлетним) периодом наблюдений. Для этого короткого периода был вычислен климатический сток. По разности между фактическим и вычисленным стоком можно было судить о влиянии на величину среднего годового стока различных характерных для данного водосбора условий.

Следует, однако, иметь в виду, что в годовом слое стока, определенном по гидрометрическим данным, могут встречаться значительные ошибки, обусловленные, как указывалось выше, неточностью определения величины водосбора. С целью выяснения этих ошибок было проведено сравнение объема стока выдающегося весеннего паводка 1951 г. с объемами осадков, образующих этот паводок. Сравнение показало, что в некоторых случаях слой стока больше, чем запас воды на водосборе. Отрицательная разность между осадками и стоком физически не объяснима и может быть обусловлена лишь ошибками при определении площади водосбора, величины осадков, стока, испарения и запасов воды, принимающих участие в кругообороте влаги. Такие неточные данные наблюдений пришлось исключить из расчета.

В некоторых случаях разность между слоем осадков и стоком весеннего паводка 1951 г. оказалась слишком большой (более 45 *мм*), что может быть связано, главным образом, с неточным определением площади водосбора. Эти водосборы также были исключены из расчета.

Корреляция разности между фактическим и вычисленным стоками дала возможность получить формулу для вычисления поправки, вводимой в слой стока, определенного по климатическим данным.

В климатических условиях Эстонской ССР для поправки величины годового слоя стока обеспеченностью в 5% было получено следующее выражение [41]:

$$\Delta y = 1{,}81\, c + 5{,}23 q_{95\%} - 63{,}4,$$

где Δy — поправка к величине слоя годового стока обеспеченностью в 5%, *мм*;

c — процент избыточно увлажненных земель в водосборе с кустарниково-лесным покровом;

$q_{95\%}$ — модуль суточного стока с обеспеченностью в 95%, *л/сек км*^{2}.

При обеспеченности годового стока в 50%

$$\Delta y = 0{,}80\,c + 15{,}7\,q_{95\%} - 51{,}4$$

и при обеспеченности в 95%

$$\Delta y = 0{,}27\,c + 21{,}2 q_{95\%} - 17{,}5.$$

Приведенные уравнения показывают, что заболоченные и закустаренные земли по-разному влияют на величину испарения и стока. Если в многоводном году заболоченные земли с кустарниково-лесным покровом заметно уменьшают испарение и увеличивают сток, то в маловодном году их влияние ощущается слабо и наблюдается обратное явление, т. е. заболоченные земли испаряют несколько больше влаги, чем суходольные открытые поля и сенокосы. Большое влияние на величину годового стока в маловодном году оказывает сток грунтовых вод, характеризуемый минимальным или суточным стоком с обеспеченностью в 95% ($q_{95\%}$).

Отмечается следующая связь между процентом обеспеченности годового стока и численным коэффициентом перед членом c в уравнениях для определения Δy:

$$a = -0{,}023\,P + 1{,}94,$$

где a — численный коэффициент перед членом c в уравнениях для определения Δy;

P — процент обеспеченности годового стока.

После осушения и расчистки заболоченных земель от кустарниковой и древесной растительности можно ожидать уменьшения годового стока за счет увеличения транспирации и усиления испарения с открытых осушенных территорий в результате улучшения обмена воздуха над поверхностью, испаряющей влагу. Есть основания полагать, что величина испарения с хорошо осушенных участков не будет значительно отличаться от таковой с открытых суходольных полей и лугов. В таком случае уравнения для определения Δy можно использовать и для определения влияния осушения на величину годового стока.

Если до осушения изменение годового стока под влиянием физико-географических факторов, при обеспеченности в 50%, определяется по уравнению

$$\Delta y = 0{,}80\,c + 15{,}7\,q_{95\%} - 51{,}4$$

и после осушения по уравнению

$$\Delta y_1 = 0{,}80\, c_1 + 15{,}7\, q_{95\%} - 51{,}4,$$

то изменение стока в результате осушения равно

$$\Delta y_1 - \Delta y = 0{,}80(c_1 - c),$$

где c_1 — процент заболоченных земель в водосборе после осушения.

Заменяя численный коэффициент в последнем уравнении значением a, получим

$$\Delta y_1 - \Delta y = (1{,}94 - 0{,}023\, P)\ (c_1 - c).$$

При полном осушении $c = 100$, $c_1 = 0\%$ и

$$\Delta y_1 - \Delta y = 2{,}3\, P - 1{,}94. \qquad (1)$$

Результаты непосредственных измерений испарения на осушенных и неосушенных торфянисто-болотных, торфянисто-глеевых и дерново-глеевых почвах показаны в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерения испарения, произведенного методом теплового баланса, по данным Э. И. Тамм (ЭНИИЗиМ)

Почва и место измерения	Период измерения	Обеспеченность годового стока P %	Испарение за период измерения, *мм*		Разность испарения $z_1 - z$	Разность стока $\Delta y_1 - \Delta y$ по формуле (1)
			с осушенного участка z_1	с неосушенного участка z		
Торфянисто-болотные почвы совхоза «Ойдрема»	1/V—31/X 1957	10	430	315	+115	−171
Торфянисто-глеевые почвы совхоза «Ойдрема»	1/V—30/IX 1963	90	165	200	−35	+13
Дерново-глеевые тяжело-суглинистые почвы совхоза «Лихула»	1/VI—30/IX 1963	90	167	186	−19	+13

Из табл. 1 видно, что расхождение в величинах испарения с осушенных и неосушенных участков, определенное по методу теплового баланса и по слою стока, вычисленного по формуле (1), несущественно. Абсолютное значение разности $\Delta y_1 - \Delta y$,

вычисленное по формуле (1), при обеспеченности в 10% больше, а при обеспеченности в 90% меньше, чем по данным измерений испарения. Следует, однако, учитывать, что по формуле (1) вычисляется годовой слой изменения стока, а данные измерения испарения относятся к вегетационному периоду. Весной и осенью, когда почвы обычно переувлажнены, испарение с поверхности открытых осушенных участков всегда больше, чем с закустаренных и неосушенных территорий. Поэтому под влиянием осенней и весенней влажности почвы годовые изменения испарения и стока в маловодном году меньше, чем за вегетационный период.

Данные измерения стока с осушенных низинных торфяных водосборов в Эстонской ССР показывают, что годовой слой стока с таких водосборов не меньше, а в среднем приблизительно на 40 *мм* больше, чем с неосушенных болот [40]. Такое увеличение стока объясняется увеличением притока напорных грунтовых вод. Вследствие этого в уравнениях поправок для стока Δy вместо члена c необходимо принимать $c=c_1+c_2$, где c_1 — процент избыточно увлажненных земель с лесо-кустарниковым покровом и c_2 — процент осушенных земель с притоком грунтовых вод (низинных болот). Имея в виду, что средняя за многолетний период поправка соответствует поправке стока с обеспеченностью приблизительно в 50%, получим для определения влияния физико-географических факторов и осушения на величину годового слоя стока (в миллиметрах) следующую формулу:

$$\Delta y=0{,}80\,(c_1+c_2)+15{,}7\,q_{95\%}-51{,}4. \qquad (1а)$$

Если годовой сток выражен в *л/сек км*^{2}, то формула (1а) принимает вид:

$$\Delta q=0{,}025\,(c_1+c_2)+0{,}50\,q_{95\%}-1{,}64. \qquad (1б)$$

Следует отметить, что формула (1а) не может полностью охарактеризовать столь сложное явление, как влияние различных факторов на величину годового стока и испарения. В ней не учитывается влияние таких важных факторов, как влажность почвы, состав и состояние растительного покрова, рельеф местности и т. п.

Данные измерения испарения с торфяных и минеральных почв показывают, что в условиях Эстонской ССР суммарное испарение с осушенных торфяных почв (при равных условиях растительности) за вегетационный период в среднем приблизительно на 100 *мм* больше, чем с минеральных. Однако на низинных торфяных почвах после осушения увеличение испарения компенсируется увеличением притока напорных грунтовых вод. При осушении верховых болот, где отсутствует приток грунтовых вод, по-видимому, необходимо уменьшить сток в такой

степени, как этого требуют формулы (1а) или (1б) (при $c_1=0$ и $c_2=0$). Однако для подтверждения такого предположения пока отсутствуют экспериментальные данные.

§ 2. СРЕДНИЙ МИНИМАЛЬНЫЙ СТОК

Водопроницаемость почв, оказывающая существенное влияние на режим стока, может быть охарактеризована стоком грунтовых вод или средним минимальным стоком. Под средним минимальным стоком здесь подразумевается ордината обобщенной кривой обеспеченности суточного стока, абсцисса которой равна 95%, т. е. суточный сток с обеспеченностью в 95%.

Уже при рассмотрении вопроса о среднем годовом стоке мы столкнулись с оценкой влияния водопроницаемости почв и среднего минимального стока. Еще большую роль играет водопроницаемость почво-грунтов при исследовании максимального стока и стока разных периодов. Кроме того, минимальный сток — хороший показатель характера распределения суточных расходов и объема запасов воды, регулирующих сток в водосборе.

Коэффициент вариации C_v распределения суточных расходов находится в следующей зависимости от среднего минимального стока [40]:

$$C_v=1{,}23\,(1{,}0-k_{95\%})^{1{,}62},$$

где $k_{95\%}$ — средний минимальный или суточный сток с обеспеченностью в 95%, в долях от среднего годового стока.

По среднему минимальному стоку можно судить также о величине водных запасов, регулирующих сток с водосбора. Очевидно, чем большее значение имеет минимальный сток, тем больше объем запасов воды, принимающих участие в формировании стока водосбора. Для оценки запасов воды, питающих речной сток, используются гидрографы периода отсутствия дождей. В сухой период сток формируется за счет запасов грунтовых вод, и площадь гидрографа показывает их уменьшение. При определении общего объема запасов воды, регулирующих сток, исключена крутая часть кривой спада и суммирование ординат начинается с точки, где кривая переходит в пологую, почти прямую линию и вплоть до пересечения продолжения прямой с осью абсцисс. Полученные объемы запасов коррелированы со средним минимальным стоком, а также с параметрами кривой обеспеченности суточного стока. На основе такой корреляции получена следующая формула [40]:

$$\omega=[1{,}0-0{,}49\,(1{,}00-k_{95\%})^{1{,}62}]^{4{,}55} \qquad (2)$$

или

$$k_{95\%}=1{,}00-[2{,}04\,(1-\omega^{0{,}22})]^{0{,}62}, \qquad (2а)$$

где ω — объем запасов воды, регулирующей сток в водосборе, в долях от суммарного годового стока.

Формула (2а), как и (2) не соответствует условию $\omega=0$, $k_{95\%}=0$, поэтому необходимо внести в нее небольшую поправку. Тогда

$$k_{95\%}=1-\{2{,}04[1{,}01-(\omega+0{,}05)^{0{,}22}]\}^{0{,}62} \qquad (2б)$$

Величину $k_{95\%}$ можно определить по данным экспедиционных измерений в маловодный период, когда в аналогичных водосборах по многолетним гидрометрическим наблюдениям обеспеченность суточного стока равна примерно 95%. Для Эстонии на основе предварительных данных составлена картограмма изолиний модуля среднего минимального стока $q_{95\%}$ в *л/сек км²* [40]. $k_{95\%}=q_{95\%}:\bar{q}$, где $\bar{q}$ — модуль среднего многолетнего стока, определяемый по картограмме среднего годового стока с введением поправки по формуле (1а).

Поскольку величина среднего минимального стока играет важную роль в гидрологических и водохозяйственных расчетах, в будущем непременно необходимо уточнить картограмму этого стока.

В осушенных низинных торфяных почвах наблюдается расходование стока грунтовых вод на испарение. Вследствие усиленной транспирации культурными растениями испарение здесь происходит интенсивнее, и средний минимальный сток убывает почти до нуля. Выше было сказано, что после осушения низинных болот замечается увеличение среднего годового стока. Так как повышение среднего минимального стока незначительное, то увеличение стока после осушения происходит при средних и высоких значениях стока. Такое явление может иметь место при осушении площадей грунтового питания.

При осушении тяжелых суглинистых и глинистых почв притока грунтовых вод не наблюдается. Здесь в летние месяцы (в июне, июле и августе) сток отсутствует в среднем приблизительно 50% всего времени (см. табл. 38).

§ 3. ВЕСЕННИЙ МАКСИМАЛЬНЫЙ СТОК

Для разработки основ гидрологических расчетов в области мелиорации необходимо исследовать режим стока с водосборов в различные фазы вегетационного периода и уборки урожая.

Обычно осушительные системы не рассчитываются на пропуск весеннего максимального стока, однако весенние паводки могут сильно повредить сеть осушительных систем, в связи с чем необходимо иметь расчетные данные для определения возможных максимальных скоростей потока в каналах. Для таких расчетов необходимо знать величину максимального стока. Кроме того,

гидротехнические сооружения на водотоках, такие, как плотины, мосты, трубы и т. п., должны быть рассчитаны на пропуск максимальных расходов. Таким образом, характер режима весеннего максимального стока имеет большое практическое значение.

Известно, что режим максимального стока зависит, кроме климатических условий, от влияния целого ряда физико-географических факторов. При установлении величины максимального стока в водосборах, по которым не существует гидрометрических наблюдений, следует учитывать влияние всех этих факторов.

К настоящему времени в Эстонской ССР накоплено достаточно гидрометрического материала, на основе которого можно приступить к уточнению формулы весеннего максимального стока. Анализ влияния различных факторов ведется на основе следующей формулы максимального стока, опубликованной автором впервые в 1938 г. [39, 47]:

$$q_{\max P\%} = \frac{100\,\bar{q}}{F^{0,14}\,10^{1,4\,(k_{95\%}+r)}\,P^{0.29}}, \qquad (3)$$

где $q_{\max P\%}$ — модуль весеннего максимального стока с обеспеченностью $P\%$, *л/сек км²*;

$\bar{q}$ — модуль среднего многолетнего стока, *л/сек км²*,

F — площадь водосбора, *км²*;

$k_{95\%}$ — модульный коэффициент среднесуточного стока с обеспеченностью в 95% (при отсутствии данных наблюдений определяется по картограмме среднего минимального стока);

r — параметр, учитывающий влияние характера растительного покрова, почвы и рельефа.

Максимальный сток с единицы площади водосбора ($F=1$) или с элементарной площади водосбора [если эту площадь в формуле максимального стока увеличить на единицу $(F+1)$] обозначается обычно через A. В формуле (3) $A=100\bar{q}\,10^{-1,4(k_{95\%}+r)}$

Влияние водопроницаемости и озерности водосбора учитывается в формуле (3) величиной модульного коэффициента среднесуточного стока с обеспеченностью в 95%, т. е. ординатой обобщенной кривой обеспеченности суточного стока или минимальным стоком ($k_{95\%}$).

На основе формулы (2а) установлено, что минимальный сток является хорошим показателем как поверхностных запасов (аккумулируемых в озерах), так и подземных (грунтовых) вод, принимающих участие в регулировании стока.

С целью устранения из расчета влияния климатических факторов и неточностей, возникающих при определении площади водосбора малых рек, максимальный сток был выражен в долях от среднего стока за период наблюдений. Сравнение ординат кри-

Таблица 2

Характеристики водосборов, относительно которых имеются данные наблюдений весеннего максимального стока

Наименование водосбора и створа	Площадь водосбора, $км^2$	Модуль, $л/сек\ км^2$		$k_{95\%}$	Заболоченность, %		Лесистость, %		Ориентировочный уклон открытых суходолов, ‰
		среднего многолетнего стока	суточного стока с обеспеченностью в 95%		Низинные болота и заболоченные земли $А_{нз}\ А_{н}$	Верховые болота $А_{в}$	Незаболоченный	Заболоченный	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Бассейн Финского залива									
Нарва—Васькнарва	47824	7,8	3,3	0,42					
Нарва—Кульгу	55887	7,4	3,2	0,43					
Пюхайыги—Пюхайыэ	166	10,9	1,5	0,14	25		23	13	{9}
Пуртсе—Люганузе	792	8,1	0,5	0,06	20*	10	29	17*	|4|
Кунда—Сями	390	11,3	3,4	0,30	16	2	30	16	{10}
Вальге—Ванакюла	402	9,1	2,5	0,28	17	8	26	14	{14}
Ягала—Кехра	904	8,0	1,5	0,19	14	8	25	25	{12}
Аавоя—Маапаю	31,5	8,7	0,7	0,08	8	9	23	(45)*	6
Пирита—Нехату	709	9,2	0,9	0,10	31	5	8	20	{8}
Пирита—Паункюла	119	8,2	1,2	0,15	18	13	17	30	{10}
Лейвайыги—Паюба	84	8,9	0,8	0,09	|38| (10)	6	7	11	{9}
Лейвайыги—Суурсоо	20,6	8,8	0,35	0,04	|30| (33)		6	13	7
Лейвайыги—Арувалла	10,4	8,7	0,2	0,02	|18|30*		26	6*	|6|
Салу—Салу	5,1	7,3	0,1	0,01	|18|25*		8	12*	|9|
Силлаотса—Сооне	3,7	9,2	0,0	0,00	|25| (56)		6		4
Вяо-оя—Вяо	4,7	6,9	0,0	0,00	21				|10|
Кейла—Кейла	665	9,2	1,0	0,11	32	8	19	6	{8}
Вазалемма—Урба	383	10,4	0,8	0,08	29	4	29	6	{7}
Вихтерпалу—Энглема	468	9,4	0,3	0,03	11 [25]	6	31	4	{5}

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Бассейн Рижского залива									
Қазари—Қазари	2660	10,0	0,7	0,07	25	7	22	12	
Қазари—Тээнузе	649	10,0	0,6	0,06	22	3	28	7	7
Вигала—Қоноверe	558	10,6	1,5	0,14	23	3	25	6	7
Вигала—Рапла	53,2	11,7	1,3	0,11	32	4	23		10
Энге—Ядивере	132	8,8	0,1	0,01	28	4	16	17	5
Осушительная система Рехемяэ	0,5	10,6	0,5	0,05	(100)				
Рийзаоя—Валусте	34,1	8,4	0,1	0,01	28	40	2	19	
Паадремаа—Мытсусилла	216	9,5	0,5	0,05	32	15	19	10	5
Сауга—Эльби	93	10,1	0,3	0,03	18	12	36	10	5
Пярну—Орекюла	5180	9,3	0,9	0,10	24	3	25	10	
Пярну—Тахкузе	2120	9,0	1,1	0,12	26		26	6	
Навести—Аэсоо	957	9,0	1,1	0,12	22	7	28	9	9
Вяндра—Қийза	243	9,2	0,03	0,00	18	8	11	29	6
Халлисте—Рийза	1920	9,0	1,1	0,12	12	7	35	7	13
Пээгле—Қуустле	44,8	8,6	1,8	0,21	8		18		27
Қыпу—Римму	265	8,8	1,2	0,11	20	2	30	2	19
Қапсиоя—Рейну	4,4	6,8	0,2	0,03	22				26
Йыхве-оя—Йыхве	25,4	8,5	0,3	0,04		70	22		4
Рейю—Сурью	349	8,8	0,3	0,03	15	10	43	8	8
Бассейн Чудского озера									
С. Эмайыги—Тарту	7846	7,0	2,8	0,40	28	1	18	9	
Пыльтсамаа—Пыльтсамаа	1000	10,5	3,0	0,29	6 [20]	7	16	10	
Педья—Тырве	792	7,7	0,5	0,07	15 [15]	2	19	20	10
Мустоя—Тулиярве	21,7	7,5	1,0	0,12	[22]	27	22		8
Мустоя—Қолуверe	3,8	7,0	0,0	0,0	[42]		37		27
Тоома—Тоома	1,1	9,7	0,1	0,01	[24]	51	25		3
Ахья—Қоорверe	286	8,3	3,4	0,41	10		24	5	26
Пийгасте-оя—Пийгасте	14,3	7,9	1,5	0,19	6		32		50
Эльва—Эльва	246	8,5	2,3	0,27	15	1	17	4	27

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
В. Эмайыги—Тыллисте	1068	7,9	1,5	0,19	13	1	28	3	20
Ыхне—Тырва	270	8,3	2,4	0,29	10	6	30	11	18
Выханду-Химмисте	853	8,1	2,6	0,32	9	2	20	15	35
Бассейн острова Сааремаа									
Пунапеа—Метскюла	101	7,8	0,2	0,03	15	1	15	57	6

Примечания. 1. (10) — процент хорошо осушенных болот ($A_{но}$).

2. |38| — процент слабо осушенных (канализованных) болот ($A_з$).

3. (45)* — процент осушенных минеральных земель ($A_{зо}$).

4. [25] — процент низинных болот ($A_н$).

5. 35* — процент заболоченных минеральных земель с уклоном $< 0{,}002$ ($0{,}5\ A_з$).

6. |2| — ориентировочный средний уклон слабо водопроницаемых (с коэффициентом фильтрации $k < 0{,}1$ *м*/сутки) открытых суходольных (не требующих осушения) земель.

7. {10} — ориентировочный средний уклон хорошо водопроницаемых ($k > 1{,}0$ *м*/сутки) безлесных суходольных земель.

8. За ориентировочный уклон открытых суходольных земель, по данным Гидрометслужбы Эстонской ССР, принимается средний уклон склонов водосбора.

вых обеспеченности весеннего максимального стока, опубликованных в 1938 г. (табл. 3б), с данными настоящей работы (табл. 3), показывает, что принятый метод расчета вполне удовлетворителен.

В табл. 2 представлены характерные данные о водосборах водотоков, относительно которых имеются гидрометрические наблюдения.

В табл. 3 представлены ординаты эмпирических кривых обеспеченности весеннего среднесуточного максимального стока за период с 1926 по 1958 г.

В табл. 3а приводятся значения ординат кривых обеспеченности стока с 1926 по 1958 г., приведенные к этому периоду по данным наблюдений за период с 1948 по 1957 г.

Таблица 3

Ординаты кривых обеспеченности весеннего среднесуточного максимального стока за период с 1926 по 1958 г. (в долях от среднего многолетнего стока)

Наименование водосбора и створа	Обеспеченность, %						
	2	5	10	20	30	50	90
Бассейн Финского залива							
Нарва—Кульгу	4,1	3,5	3,1	2,7	2,4	2,1	1,4
Нарва—Васькнарва	2,6	2,4	1,9	1,8	1,7	1,4	0,9
Пуртсе—Люганузе	22,6	19,7	16,0	13,5	11,6	8,9	4,2
Кунда—Сями	10,0	8,6	7,6	6,7	6,0	4,6	1,8
Ягала—Кехра	24,5	20,0	13,3	9,6	7,8	5,9	2,7
Пирита—Нехату	23,0	19,3	15,3	11,3	9,2	7,1	3,4
Лейвайыги—Паюба	34,0	26,0	18,0	11,5	9,2	6,6	3,3
Кейла—Кейла	20,0	16,2	12,0	10,0	9,0	6,9	3,6
Вазалемма—Урба	14,6	13,6	12,2	10,2	8,7	6,4	3,6
Вихтерпалу—Энглема	18,0	16,3	12,6	11,4	9,6	7,2	3,3
Бассейн Рижского залива							
Казари—Казари	26,2	23,5	19,2	13,9	11,4	8,9	3,7
Энге—Ядивере	42,0	32,5	27,1	21,4	17,2	11,9	4,8
Сауга—Эльби	20,0	18,3	16,5	13,7	11,7	8,7	3,8
Пярну—Орекюла	17,0	15,2	13,3	10,4	8,7	7,0	4,0
Вяндра—Кийза	38,0	31,0	24,7	18,8	15,1	11,9	6,0
Кыпу—Римму	25,0	21,5	18,6	14,7	11,8	7,7	2,3
Бассейн Чудского озера							
С. Эмайыги—Тарту	7,2	6,4	5,4	4,3	3,6	2,7	1,5
Педья—Тырве	25,0	20,8	17,6	14,8	12,7	9,7	5,2
Пыльтсамаа—Пыльтсамаа	13,0	10,3	8,8	7,1	6,0	4,3	2,0
В. Эмайыги—Тыллисте	23,5	19,8	16,0	12,9	11,1	8,8	4,2
Эльва—Эльва	24,6	20,3	16,1	11,9	9,8	7,9	4,1
Выханду—Химмисте	11,2	9,7	7,6	5,9	5,2	3,9	2,2

Таблица 3а

Ординаты кривых обеспеченности весеннего среднесуточного максимального стока за период с 1948 по 1957 г., приведенные к периоду с 1926 по 1958 г. (в долях от среднего многолетнего стока)

Наименование водосбора и створа	Обеспеченность, %						
	2	5	10	20	30	50	90
Бассейн Финского залива							
Лообу—Арбавере	11,5	9,3	8,1	7,2	6,6	5,6	3,0
Вальге—Ванакюла	11,5	9,8	8,6	7,8	7,0	5,6	2,6
Пудисоо—Ояпера			8,5				
Аавоя—Маапаю	21,6	17,8	14,6	12,0	10,2	8,1	4,2
Пирита—Паункюла	18,0	16,0	14,1	12,2	10,7	6,5	2,3
Лейвайыги—Арувалла	45,0	37,8	27,5	19,8	16,3	11,2	5,3
Силлаотса—Сооне	46,0	37,5	29,6	21,5	17,3	12,9	4,8
Салу—Салу	46,0	37,5	29,6	21,9	18,0	13,4	4,6
Вяо-оя—Вяо	54,2	45,1	32,2	21,1	16,6	11,5	4,8
Бассейн Рижского залива							
Казари—Тээнузе	23,5	19,6	16,8	13,5	11,5	9,1	4,3
Луйстве-оя—Тээнузе			28,8				
Вигала—Коноверe	23,0	20,7	17,2	13,2	11,5	8,7	3,1
Вигала—Рапла	28,0	25,9	22,2	16,6	14,4	10,9	3,9
Сымера-оя—Мяннику			18,5				
Осушительная система Рехемяэ	46,0	38,3	32,2	23,0	17,6	11,8	3,8
Паадремаа—Мытсусилла	28,0	25,0	19,6	15,5	13,5	10,6	4,6
Пярну—Тахкузе	18,5	15,4	13,2	10,8	9,3	7,7	4,3
Невести—Аэсоо	19,2	16,9	14,5	11,5	9,6	6,8	3,8
Халлисте—Рийза	16,0	14,0	12,0	10,0	8,7	6,8	3,6
Пээгле—Куустле	36,0	29,8	25,0	21,1	17,4	11,4	4,1
Йыхве-оя—Йыхве	41,0	36,0	28,2	20,6	16,5	11,1	5,2
Рейю—Сурью	30,0	26,3	23,2	17,8	13,3	7,7	4,0
Сурьюпера-оя—Сурью			9,6				
Бассейн Чудского озера							
Ахья—Коорверe	29,4	25,5	19,4	13,5	10,8	8,2	3,8
Пийгасте-оя—Пийгасте	31,0	27,5	24,1	19,2	15,3	9,8	4,0
Мустоя—Тулиярве	25,3	22,8	19,5	14,7	11,4	7,6	3,3
Мустоя—Колуверe	34,2	31,6	27,8	22,0	17,6	12,7	5,5
Тоома—Тоома	39,3	35,8	30,0	22,8	16,9	10,3	3,7
Ыхне—Тырва	22,0	18,8	14,8	12,0	10,1	6,4	3,1
Бассейн острова Сааремаа							
Пунапеа—Метскюла	31,0	25,7	20,3	15,7	12,5	9,4	4,4

Таблица 3б

Ординаты кривых обеспеченности весеннего максимального стока, опубликованные в 1938 г. [47] (в долях от среднего многолетнего стока)

Наименование водосбора и створа	Площадь водосбора, $км^2$	Модуль среднего годового стока, $л/сек\ км^2$	Средний минимальный сток $k_{95}\%$	Обеспеченность, %			Период наблюдений
				5	10	90	
Нарва—Кульгу	55887	7,9	0,42	3,9	3,2	1,5	1903—1930
Нарва—Васькнарва	47824	8,0	0,44	2,8	2,7	1,1	1922—1936
Пуртсе—Люганузе	807	9,7	0,06	19,3	18,1	3,2	1924—1933
Ягала—Линнамяэ	1581	8,8	0,14	21,7	20,3	2,4	1925—1934
Пирита—Лагеди	671	13,0	0,08	16,1	14,3	3,4	1924—1933
Лейвайыги—Паюба	80	12,0	0,08	27,2	24,3	4,0	1928—1935
Кейла—Кейла	668	11,9	0,08	16,3	14,7	2,7	1924—1933
Пярну—Орекюла	5160	11,8	0,08	18,6	17,7	3,1	1924—1933
С. Эмайыги—Тарту	7846	10,0	0,40	4,9	4,8	1,4	1924—1933
В. Эмайыги—Тыллисте	1068	9,7	0,19	20,6	17,0	5,2	1924—1933
Выханду—Химмисте	853	9,6	0,32	9,6	8,9	2,1	1925—1934

Таблица 4

Отношение ординат кривых обеспеченности весеннего максимального стока за период с 1926 по 1958 г. к периоду с 1948 по 1957 г.

Наименование водосбора и створа	Обеспеченность, %					
	2	5	10	30	50	90
Пуртсе—Люганузе		1,04	0,95	0,91	0,90	1,00
Кунда—Сями	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,64
Ягала—Кехра		1,43	1,10	0,89	0,92	0,96
Пирита—Нехату	1,00	1,00	1,00	1,08	1,02	0,92
Лейвайыги—Паюба		1,18	0,99	0,88	0,88	1,00
Кейла—Кейла	1,29	1,27	1,08	1,05	0,99	0,90
Вазалемма—Урба	1,00	1,00	1,00	1,00	0,86	0,97
Вихтерпалу—Энглема	0,98	0,96	0,96	0,95	0,92	0,82
Казари—Казари	1,08	1,10	1,08	0,98	0,91	0,66
Энге—Ядиверe		1,12	1,05	0,99	0,95	0,81
Сауга—Эльби		0,92	0,98	0,94	0,88	0,84
Пярну—Орекюла	1,00	1,00	1,00	0,98	0,95	0,93
Вяндра—Кийза		1,00	1,03	0,95	0,88	0,90
Кыпу—Римму	0,86	0,91	0,93	1,02	0,92	1,00
С. Эмайыги—Тарту	1,18	1,14	1,08	0,95	0,85	0,94
Педья—Тырве	1,14	1,14	1,08	0,88	0,92	1,00
Пыльтсамаа—Пыльтсамаа	1,25	1,13	1,07	0,96	1,17	0,91
В. Эмайыги—Тыллисте	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Эльва—Эльва	1,02	1,01	1,00	1,00	1,00	1,21
Выханду—Химмисте	1,11	1,14	1,10	1,09	1,14	1,05

При приведении коротких рядов наблюдений к многолетнему ряду были использованы отношения ординат кривых обеспеченности тридцатилетнего периода к десятилетнему (табл. 4). В табл. 3а представлены также данные маршрутных измерений 1951 г., когда наблюдался весенний максимальный сток с обеспеченностью в 10%.

Обладая фактическими данными по весеннему максимальному стоку при различных процентах обеспеченности, а также данными о площади водосбора и среднем минимальном стоке, можно вычислить значения параметра r в формуле (3).

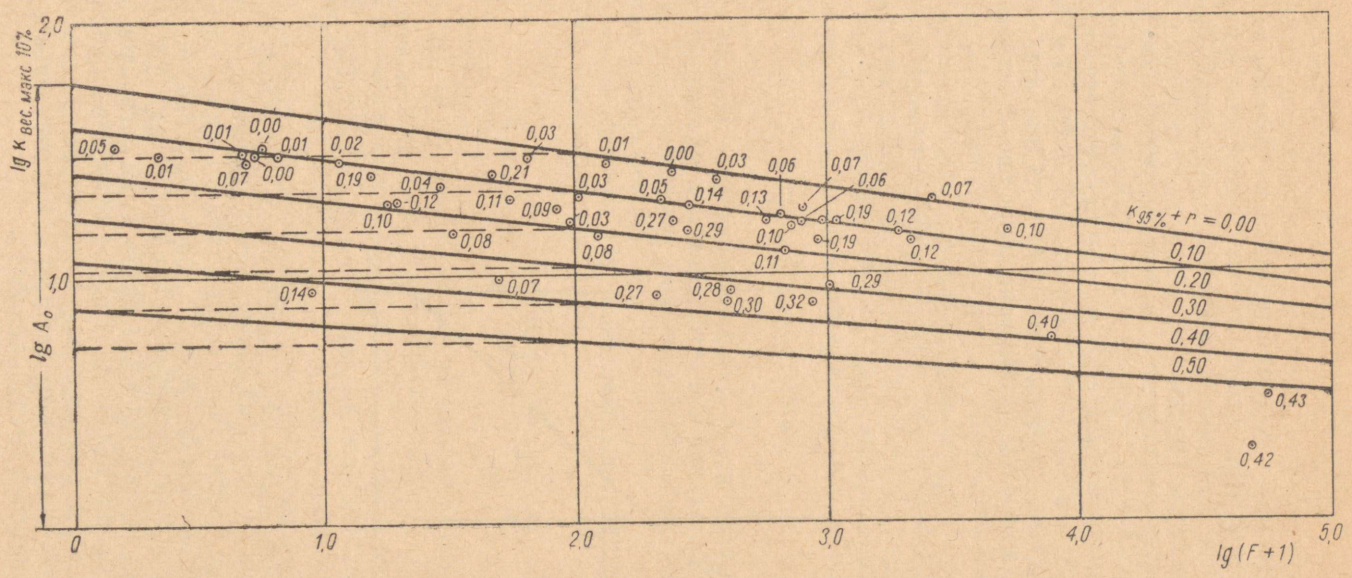
Расчеты показали, что в отдельных водосборах увеличение процента обеспеченности стока ведет к увеличению значения параметра r. Отсюда следует, что параметры в величине A определяются неточно, так как с изменением процента обеспеченности стока в формуле (3) изменяется только P, а остальные параметры (для одного и того же водосбора и створа) остаются постоянными.

Возможность уточнения параметров в формуле (3) исследована сначала по методу применения их для отдельных интервалов обеспеченности. В этом случае в формуле (3) для каждого интервала заданы наиболее подходящие параметры.

Если изменить величину A и принять для обеспеченности от 1 до 10% $A=100\bar{q}\,10^{-1{,}4(k_{95\%}+r)}\,P^{-0{,}22}$, а для обеспеченности от 10 до 50% — $A=200\bar{q}\,10^{-1{,}4(k_{95\%}+r)}\,P^{-0{,}52}$, то пределы изменения параметра r уменьшаются. В этом случае среднее квадратичное отклонение r (σ_r) в пределах одного водосбора при обеспеченности максимального стока от 2 до 50% колеблется около 0,03. В неисправленной формуле σ_r составляет в среднем 0,05 [39].

Так как параметр r был вычислен по разности между наблюдавшимся и вычисленным стоком, значение σ_r является показателем всех конструктивных недостатков формулы (3). Если $\sigma_r=0{,}03$, то величина A определяется со средней квадратичной ошибкой $\sigma_A=10^{1{,}4\sigma_r}=10^{1{,}4\cdot 0{,}03}=1{,}10$. Отсюда следует, что в исправленной формуле (3) вследствие влияния неучтенных факторов и конструктивных недостатков самой формулы ошибки в определении q_{max} могут составлять в среднем 10%.

Численный коэффициент, помноженный на $\bar{q}$, отражает в выражении A максимальную величину стока с элементарной площади водосбора или интенсивность водоотдачи при $k_{95\%}=0$ и $r=0$. В случае приведенного произвольного изменения параметров величины A, зависящего от обеспеченности стока, численный коэффициент в выражении A теряет свое физическое значение. Вследствие этого формулу (3) можно использовать лишь в известных пределах обеспеченности стока. Поэтому для определения A желательно получить формулу, действительную в пределах всей кривой обеспеченности. С этой целью были состав-



Р и с. 1. Зависимость весеннего максимального стока $k_{\text{вес. макс } 10\%}$ от площади водосбора F. Числа около точек показывают значения $k_{95\%}$.

лены графики на логарифмической сетке, ординатами которых служат величины максимального стока определенной обеспеченности, а абсциссами — площади водосборов. Отрезок на оси ординат, образуемый пересечением прямой, проведенной по точкам водосборов, где $k_{95\%}+r=0$, является величиной $\lg A$ при $k_{95\%}+r=0$, или $\lg A_0$ (см. рис. 1).

Используя гидрометрические данные Гидрометслужбы ЭССР за период с 1926 по 1958 г. по 22 (табл. 3) и за период с 1948 по 1957 г. по 30 водосборам (табл. 3а), были построены аналогичные рис. 1 графики для обеспеченности 1, 2, 5, 30, 50 и 90%. Из этих графиков были взяты отрезки $\lg A_0$ и на полулогарифмической сетке составлен рис. 2. На основании рис. 2 получено следующее выражение для A_0:

$$A_0=-52\lg(P+1)+112.$$

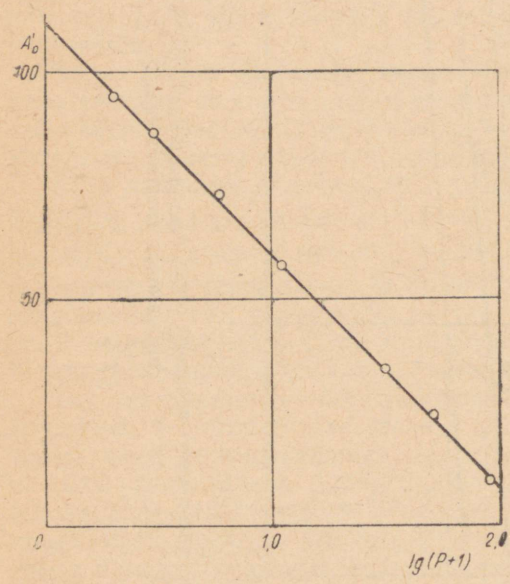


Рис. 2. Зависимость параметра A_0 в формуле весеннего максимального стока от процента обеспеченности P.

С увеличением суммы параметров $k_{95\%}+r$, характеризующей зарегулированность максимального стока, величина A уменьшается. По мере увеличения среднесуточного стока обеспеченностью в 95% (в долях от среднего многолетнего стока) $k_{95\%}$ до единицы, т. е. при полной зарегулированности стока, $\lg A$ должен приближаться к единице. На рис. 1 видно, что в логарифмическом масштабе уменьшение величины A происходит пропорционально увеличению суммы параметров $k_{95\%}+r$. При увеличении $k_{95\%}+r$ от 0 до 1 $\lg A$ уменьшается от $\lg A_0$ до 0. Следовательно, выражение для A принимает следующий вид:

$$\lg A = [1 - (k_{95\%} + r)] \lg A_0$$

или

$$A = A_0^{1-(k_{95\%}+r)} = [112 - 52 \lg (P+1)]^{1-(k_{95\%}+r)}. \quad (4)$$

Угловой коэффициент прямых на рис. 1, т. е. показатель степени n в коэффициенте влияния площади водосбора (обозначим его через φ), не является постоянным, как в формуле (3). Если при $k_{95\%} + r = 0$ этот показатель равен $-0{,}14$, то при приближении $k_{95\%} + r$ к единице показатель степени площади водосбора стремится к нулю. Такой результат вполне логичен, так как при полной зарегулированности стока площадь водосбора уже больше не влияет на режим максимального стока и коэффициент φ должен быть равным единице.

На основании рис. 1 можно установить, что уменьшение угловых коэффициентов прямых происходит пропорционально увеличению суммы величин $k_{95\%} + r$. Таким образом, можно писать $n = -0{,}14[1 - (k_{95\%} + r)]$. Отсюда для определения коэффициента φ вытекает следующая формула:

$$\varphi = (F+1)^{-0{,}14(1-k_{95\%}-r)}. \quad (5)$$

При полной отрегулированности стока коэффициент φ должен быть равным единице. Это требование остается действительным и при площади водосбора, меньшей единицы, как это показано в формуле (5).

На основе формул (4) и (5) получим следующую формулу весеннего максимального стока:

$$k_{\text{вес. макс } P\%} = \left[\frac{112 - 52 \lg (P+1)}{(F+1)^{0{,}14}}\right]^{1-k_{95\%}-r}, \quad (6)$$

где $k_{\text{вес. макс } P\%}$ — весенний максимальный сток в долях от среднего многолетнего стока.

Для вычисления среднесуточного максимального стока при площади водосбора менее 100 $км^2$, как показывают данные наблюдений, величина водосбора существенной роли не играет. В водосборах с площадью, превышающей 100 $км^2$, внутрисуточное колебание максимального стока уже незначительно [5, 10, 33]. Таким образом, для вычисления среднесуточного весеннего максимального стока при площади водосбора в 100 $км^2$ и больше можно пользоваться формулой (6). На малых водосборах с площадью менее 100 $км^2$ среднесуточный весенний максимальный сток $K_{\text{вес. макс } P\%}$ вычисляется по формуле

$$k_{\text{вес. макс } P\%} = \left[\frac{112 - 52 \lg (P+1)}{100^{0{,}14}}\right]^{1-k_{95\%}-r}. \quad (6а)$$

Умножая числитель в формуле (6) на модуль среднегодового стока $\bar{q}$ в *л/сек км²* и на коэффициент размерности $\frac{3600}{10^6}=0{,}0036$, получаем выражение для максимального стока с элементарной площади водосбора (A_0) в *мм/час* при $k_{95\%}=0$ и $r=0$.

$$A_0=0{,}0036\bar{q}[112-52\lg(P+1)]. \qquad (*)$$

Сопоставление полученных по выражению (*) величин с картами изолиний максимального элементарного стока талых вод в *мм/час*, представленных Д. Л. Соколовским [33], показывает, что в условиях Эстонской ССР они по картам получаются примерно в 1,7 раза больше, чем по формуле (*). Это расхождение постепенно увеличивается по направлению к юго-востоку европейской территории СССР. Следовательно, в названном направлении увеличивается интенсивность снеготаяния.

По картам, составленным под руководством К. Е. Иванова [10], элементарный весенний максимальный сток получается в два с лишним раза больше, чем по формуле (*).

Числитель формулы (6) можно сопоставить еще со слоем весеннего максимального стока обеспеченностью $P\%$. В таком случае формула (6) принимает вид

$$k_{\text{вес. макс } P\%}\left[\frac{k\,h_{P\%}}{(F+1)^{0{,}14}}\right]^{1-k_{95\%}-r},$$

где $h_{P\%}$ — слой весеннего максимального стока обеспеченностью $P\%$, *мм*;

$$k=\frac{112-52\lg(P+1)}{h_{P\%}};$$

На основе формул (6) и (6а) и данных наблюдений были вычислены величины параметра r при обеспеченности 2, 5, 10, 30 и 50% для водосборов, о которых имеются тридцатитрехлетние данные. В табл. 5 представлены результаты вычислений. Девятая графа таблицы показывает, что среднее квадратичное отклонение параметра r (σ_r) при обеспеченности стока от 2 до 50% в среднем для всех 21 водосбора равно 0,03. Такой же результат был получен раньше при изменении выражения A в формуле (3) по интервалам обеспеченности от 2 до 10 и от 10 до 50% [39]. Следовательно, расчет по формуле (6) дает вполне удовлетворительные результаты. Кроме того, формула (6) действительна и в граничных условиях, т. е. при $F=0$ и $k_{95\%}+r=1$. Это позволяет использовать формулу (6) для вычисления весеннего

Таблица 5

Значение параметра r в формулах (6) и (6а) весеннего максимального стока

Наименование водосбора и створа	Обеспеченность, %					Средний r	Амплитуда колебания	Среднее квадратичное отклонение σ_r	Вычисленный по формуле (7b) $r_{выч}$	$\lvert r - r_{выч} \rvert$
	2	5	10	30	50					
Бассейн Финского залива										
Нарва—Кульгу	+0,09	+0,10	+0,12	+0,12	+0,09	+0,10	0,03	0,02		
Пуртсе—Люганузе	+0,05	+0,03	+0,04	−0,01	−0,04	+0,01	0,09	0,04	+0,05	0,04
Кунда—Сями	+0,06	+0,06	+0,02	+0,03	+0,03	+0,04	0,04	0,02	+0,07	0,03
Ягала—Кехра	−0,11	−0,10	−0,03	0,00	−0,01	−0,05	0,11	0,05	+0,04	0,09
Пирита—Нехату	+0,01	0,00	+0,02	+0,04	0,00	+0,01	0,04	0,02	+0,01	0,00
Лейвайыги—Паюба	−0,02	0,00	+0,06	+0,14	+0,14	+0,06	0,16	0,08	+0,05	0,01
Кейла—Кейла	+0,04	+0,05	+0,09	+0,05	+0,01	+0,05	0,08	0,03	+0,05	0,00
Вазалемма—Урба	+0,15	+0,15	+0,14	+0,11	+0,10	+0,13	0,05	0,03	+0,06	0,07
Вихтерпалу—Энглема	+0,16	+0,14	+0,14	+0,12	+0,10	+0,13	0,06	0,02	+0,09	0,04
Бассейн Рижского залива										
Казари—Казари	−0,05	−0,08	−0,08	−0,09	−0,16	−0,09	0,11	0,04	+0,01	0,10
Энге—Ядивере	−0,01	+0,01	+0,01	−0,02	−0,02	−0,01	0,03	0,02	+0,01	0,02
Сауга—Эльби	+0,18	+0,16	+0,14	+0,12	+0,07	+0,13	0,11	0,04	+0,08	0,05
Пярну—Орекюла	+0,02	−0,01	−0,02	−0,03	−0,11	−0,03	0,13	0,06	0,00	0,03
Вяндра—Кийза	0,00	+0,01	+0,02	0,00	−0,06	−0,01	0,08	0,03	+0,01	0,02
Кыпу—Римму	−0,02	−0,03	−0,04	−0,04	−0,02	−0,03	0,02	0,01	−0,03	0,00
Бассейн Чудского озера										
С. Эмайыги—Тарту	−0,02	−0,03	−0,01	+0,03	+0,07	+0,01	0,10	0,04	−0,01	0,02
Педья—Тырве	+0,01	+0,01	+0,01	−0,06	−0,12	−0,03	0,13	0,06	+0,06	0,09
Пыльтсамаа—Пыльтсамаа	−0,03	−0,02	0,00	+0,01	+0,03	0,00	0,06	0,02	−0,02	0,02
В. Эмайыги—Тыллисте	−0,11	−0,11	−0,10	−0,15	−0,22	−0,14	0,12	0,05	−0,07	0,07
Эльва—Эльва	−0,13	−0,13	−0,12	−0,10	−0,15	−0,13	0,05	0,02	−0,11	0,02
Выханду—Химмисте	−0,02	−0,01	+0,02	+0,04	+0,05	+0,02	0,07	0,02	−0,06	0,08
Среднее						+0,02	0,08	0,03	+0,01	0,04

максимального стока при малых и больших процентах обеспеченности.

Из данных, помещенных в табл. 5, видно, что среднее квадратичное отклонение параметра r (σ_r) и амплитуда изменения r наибольше в водосборе Лейвайыги-Паюба. Вычисленные значения параметра r увеличиваются с ростом процента обеспеченности стока. Следовательно, при вычислении максимального стока по формуле (6), принимая для r его среднее значение, при малых (<10) процентах обеспеченности получаются заниженные, а при больших процентах — завышенные значения стока.

Болотные массивы водосбора реки Лейвайыги прорезаны магистральными каналами. Осушенные торфяники составляют около 10% площади водосбора. Густота магистральных каналов равна 0,96 *км/км²*. Густая сеть водотоков ускоряет отвод поверхностных вод, что, по-видимому, вызывает увеличение максимального стока во время высоких весенних паводков.

В болотистом и лесистом слабо канализованном водосборе реки Сауга в створе Эльби наблюдается обратная картина. Здесь с увеличением процента обеспеченности стока величина параметра r уменьшается, т. е. эмпирическая кривая обеспеченности имеет более пологий вид, чем вычисленная по формуле (6). Однáко этих примеров недостаточно для того, чтобы внести поправку в формулу (6).

Для более подробного исследования характера кривых обеспеченности весеннего максимального стока вычислены величины параметра r по данным десятилетних наблюдений, приведенным к тридцатитрехлетнему ряду. Результаты вычисления представлены в табл. 5а. Осушенные водосборы здесь представлены: 1) осушенным редкими канавами лесистым водосбором Аавоя—Маапаю на песчаных почвах, 2) осушенным закрытым дренажем (через 30—40 *м*) участком Рехемяэ на торфяных почвах низинного типа и 3) водосбором магистрального канала Силлаотса—Сооне, где около 56% площади составляют осушенные открытыми (через 50 *м*) канавами торфяники, 13% площади занято водопроницаемыми моренными отложениями и остальная часть болот (25%) канализована магистральными каналами.

Представителями неканализованных (густота каналов $<0{,}2$ *км/км²*) болотистых водосборов (болот более 50%) в табл. 2 и 5а можно считать Йыхве-оя—Йыхве, Мустоя—Тулиярве и Тоома—Тоома. В водосборах Йыхве-оя—Йыхве и Тоома—Тоома болота верховые. Болота водосбора Мустоя—Тулиярве принадлежат к низинному и верховому типу.

Из данных табл. 5а видно, что с увеличением процента обеспеченности стока растет величина параметра r в водосборе Вяо-оя—Вяо, подстилаемом водонепроницаемым силурийским известняком.

Таблица 5а

Значение параметра r в формулах (6) и (6а) по приведенным рядам наблюдений

Наименование водосбора и створа	Обеспеченность, %					Средний r	Амплитуда колебания	Среднее квадратичное отклонение σ_r	Вычисленный по формуле (7b) $r_{выч}$	$\lvert r - r_{выч} \rvert$
	2	5	10	30	50					
Бассейн Финского залива										
Вальге—Ванакюла	+0,04	+0,04	+0,04	+0,01	+0,04	+0,03	0,03	0,01	+0,06	0,03
Аавоя—Маапаю	+0,17	+0,18	+0,19	+0,17	+0,14	+0,17	0,05	0,02	+0,08	0,09
Пирита—Паункюла	+0,08	+0,07	+0,07	+0,02	−0,01	+0,05	0,09	0,03	+0,08	0,03
Лейвайыги—Арувалла	−0,03	−0,03	0,00	0,00	0,00	−0,01	0,03	0,02	+0,02	0,03
Силлаотса—Сооне	−0,01	−0,01	0,00	0,00	−0,04	−0,01	0,04	0,02	0,00	0,01
Салу—Салу	−0,02	−0,02	−0,01	−0,02	−0,06	−0,03	0,05	0,02	−0,04	0,01
Вяо-оя—Вяо	−0,06	−0,06	−0,02	−0,02	+0,01	−0,03	0,07	0,03	−0,08	0,05
Бассейн Рижского залива										
Казари—Тээнузе	+0,04	+0,04	+0,03	0,00	−0,06	+0,01	0,10	0,03	0,00	0,01
Вигала—Коновере	−0,03	−0,05	−0,04	−0,07	−0,11	−0,06	0,08	0,03	−0,02	0,04
Вигала—Рапла	+0,01	−0,02	−0,03	−0,03	−0,08	−0,03	0,09	0,04	−0,01	0,02
Осушительная система Рехемяэ	−0,06	−0,07	−0,07	−0,02	−0,05	−0,05	0,05	0,02	−0,04	0,01
Паадремаа—Мытсусилла	+0,04	+0,02	+0,04	+0,01	−0,04	+0,01	0,08	0,03	+0,03	0,02
Пярну—Тахкузе	+0,01	+0,01	+0,01	−0,04	−0,12	−0,03	0,13	0,06	0,00	0,03
Навести—Аэсоо	+0,02	+0,02	+0,01	−0,01	−0,01	+0,01	0,03	0,01	+0,01	0,00
Халлисте—Рийза	+0,05	+0,05	+0,05	−0,01	−0,05	+0,02	0,10	0,04	+0,04	0,02
Пээгле—Куустле	−0,16	−0,15	−0,16	−0,21	−0,19	−0,17	0,06	0,02	−0,15	0,02
Йыхве-оя—Йыхве	−0,01	−0,03	−0,02	−0,01	−0,01	−0,02	0,02	0,01	−0,01	0,01
Рейю—Сурью	+0,03	+0,01	−0,01	+0,01	+0,07	+0,02	0,08	0,03	+0,02	0,00
Бассейн Чудского озера										
Ахья—Коорвере	−0,34	−0,35	−0,33	−0,28	−0,32	−0,32	0,07	0,03	−0,10	0,22
Пийгасте-оя—Пийгасте	−0,10	−0,11	−0,13	−0,14	−0,11	−0,12	0,04	0,02	−0,09	0,03
Мустоя—Тулиярве	+0,05	+0,01	0,00	+0,04	+0,05	+0,03	0,05	0,02	+0,02	0,01
Мустоя—Колувере	+0,07	+0,04	+0,02	0,00	−0,03	+0,02	0,10	0,04	+0,08	0,06
Тоома—Тоома	+0,03	+0,01	0,00	+0,02	+0,01	+0,02	0,04	0,02	+0,07	0,05
Ыхне—Тырва	−0,14	−0,14	−0,11	−0,13	−0,09	−0,12	0,05	0,02	−0,02	0,10
Бассейн острова Сааремаа										
Пунапеа—Метскюла	+0,06	+0,06	+0,08	+0,09	+0,06	+0,07	0,03	0,01	+0,12	0,05
Среднее						−0,02	0,06	0,03	0,00	0,04

В осушенных водосборах Рехемяэ, Силлаотса—Сооне и Аавоя—Маапаю, а также в водосборах верховых болот Йыхвеоя—Йыхве и Тоома—Тоома не замечается одностороннего изменения параметра r в связи с увеличением процента обеспеченности стока.

Уменьшение величины параметра r с увеличением процента обеспеченности стока отмечается в неканализованном болотном водосборе Мустоя—Колувере и в слабо канализованном болотном водосборе Вигала—Рапла.

Итак, увеличение или уменьшение параметра r в связи с увеличением процента обеспеченности стока происходит различным образом в зависимости от канализованности, заболоченности и других характерных свойств водосбора.

Все сказанное свидетельствует о том, что при внесении некоторой поправки в формулу (6) она дает удовлетворительные результаты.

Необходимость внесения поправки в формулу (6) становится еще более очевидной после установления зависимости величины r от различных условий в водосборах.

На основе данных по 30 заболоченным и облесенным водосборам (табл. 2) и средним величинам параметров r (табл. 5 и 5а) была получена следующая корреляционная связь:

$$r = 0{,}0044\,(A_{НЗ} + 0{,}5A_{В}) + 0{,}0043B - 0{,}26, \qquad (7)$$

где $A_{НЗ}$ — процент площади низинных болот и заболоченных минеральных земель в водосборе;
$A_{В}$ — процент площади верховых болот;
B — процент лесистости водосбора.

Общий коэффициент корреляции формулы (7) $R_r = 0{,}91$.

Довольно сложно оценить влияние на режим максимального стока незаболоченных открытых или покрытых кустарником площадей, имеющих различные уклоны поверхности. Склоны суходольных земель обычно имеют самые разнообразные уклоны, и определение какого-то среднего уклона весьма трудоемко.

По данным, полученным из незаболоченных открытых водосборов Вяо-оя—Вяо, Пийгасте—Пийгасте, Эльва—Эльва и Пээгле-оя—Куустле, где средний уклон поверхности составляет соответственно около 0,011, 0,050, 0,027 и 0,027, можно установить, что влияние уклона сравнительно слабо. Корреляция между разностью средней величины r в табл. 5 и 5а и $r_{выч}$, определенной по формуле (7) ($\Delta r = r - r_{выч}$), и средним уклоном суходольных земель показывает, что при средних уклонах склонов в 0,020 и более суходольные земли почти не оказывают влияния на величину r. При уклонах менее 0,02 процент хорошо проницаемых ($k > 1{,}0$ *м*/сутки) суходольных земель следует принять

с коэффициентом +0,0012. При таком слабом влиянии искать более точной связи между уклоном и поправочным коэффициентом, по-видимому, пока не имеет практического значения.

Таким образом, выражение для параметра r с приведенными дополнениями имеет вид

$$r=0{,}0044(A_{\text{нз}}+0{,}5A_{\text{в}}+B)+0{,}0012C-0{,}26, \qquad (7\text{а})$$

где C — процент площади открытых или покрытых кустарником хорошо проницаемых суходольных земель с уклоном $<0{,}02$.

Зная влияние различных условий водосборов на величину параметра r, можно исследовать и влияние осушения на режим максимального стока. Для низинного болотного водосбора $r=0{,}0044\cdot 100-0{,}26=0{,}18$ (по формуле (7)). Для осушенного водосбора Рехемяэ, по данным наблюдений, среднее значение $r=-0{,}05$ (см. табл. 5а).

Таким образом, коэффициент процента площади низинных болот после осушения в формуле (7) определяется из уравнения

$$-0{,}05=0{,}0044\alpha\,100-0{,}26, \text{ откуда } \alpha=0{,}48.$$

Для водосбора Силлаотса—Сооне, где осушенные торфяные почвы составляют 56% всей площади водосбора, $\alpha=0{,}46$.

Приведенных данных недостаточно для установления влияния осушения на режим максимального стока. Однако в предварительном порядке можно указать, что при хорошем осушении (расстояние между осушителями 30—50 *м*) низинных торфяных почв процент площади осушенных болот следует включить в формулу (7а) с коэффициентом 0,50.

Можно полагать, что влияние осушенных заболоченных минеральных земель аналогично влиянию среднепроницаемых ($k>0{,}1$ *м*/сутки) суходольных земель с уклоном менее 0,02. Кратковременные наблюдения также подтверждают, что в формуле (7а) процент таких осушенных земель $A_{\text{з}}$ следует умножить на коэффициент 0,0012.

Таким образом, в формуле (7) добавляются еще два члена и она принимает следующий вид:

$$r=0{,}0044[A_{\text{нз}}+0{,}5(A_{\text{но}}+A_{\text{в}})+B]+0{,}0012(A_{\text{зо}}+C)-0{,}26 \qquad (7\text{б})$$

или

$$r=0{,}0044[A_{\text{нз}}+0{,}5(A_{\text{но}}+A_{\text{в}})+B+0{,}27(A_{\text{зо}}+C)]-0{,}26, \qquad (7\text{в})$$

где $A_{\text{но}}$ и $A_{\text{зо}}$ — соответственно процент площади осушенных низинных болот и минеральных земель водосбора.

На основе формул (6а) и (7в) вычислены величины весеннего среднесуточного максимального стока водосборов Лейва-

йыги—Паюба, Вяо-оя—Вяо, осушительной системы Рехемяэ и осушенного водосбора Силлаотса—Сооне. В табл. 5б представлены отношения фактических максимумов к вычисленным.

Таблица 5б

Отношения ординат эмпирических кривых обеспеченности максимального стока к вычисленным ординатам в канализованных и осушенных водосборах

Наименование водосбора и створа	Обеспеченность, %				
	2	5	10	30	50
Лейвайыги—Паюба	1,29	1,16	0,97	0,77	0,79
Вяо-оя—Вяо	1,15	1,15	1,04	0,90	0,93
Осушительная система Рехемяэ	1,07	1,09	1,11	1,02	1,01
Силлаотса—Сооне	1,05	1,03	0,99	0,98	1,08

Несмотря на высокую степень канализованности ($>1{,}0$ *км/км*^{2}) водосбора Вяо-оя—Вяо, здесь встречаются участки, затопляемые во время паводков. Регулирующее влияние временных затоплений на максимальный сток можно учитывать на основе роста величины среднего минимального стока $k_{95\%}$. Зная средний объем затоплений, можно вычислить добавочный член в формуле среднего минимального стока по формуле (2б). В условиях водосбора Вяо-оя, где площадь затопляемых участков равна 0,30 *км*^{2}, средняя глубина воды — 0,10 *м* и средний годовой слой стока составляет 218 *мм*, средний объем

$$\omega = \frac{0{,}30 \cdot 10^6 \cdot 0.10}{4{,}7 \cdot 10^6 \cdot 0{,}218} = 0{,}029 \quad \text{и}$$

$$k_{95\%} = 1 - \{2{,}04[1{,}01 - (0{,}029 + 0{,}05)^{0{,}22}]\}^{0{,}62} = 0{,}07.$$

Принимая во внимание данную поправку, получаем отношения вычисленных и наблюдавшихся ординат, приведенные в табл. 5б для канализованного водосбора Вяо-оя—Вяо с маломощным почвенным покровом (средняя мощность 0,50 *м*), расположенным на водонепроницаемом известняке.

Данные табл. 5б показывают, что при больших (30—50) процентах обеспеченности в канализованных водосборах вычисленный сток на 10—20% больше фактического. При малых процентах обеспеченности, наоборот, вычисленный сток на 15—30% меньше. В осушенном торфяном водосборе Рехемяэ отмечаются значительно меньшие расхождения. Здесь только в пределах обеспеченности от 2 до 10% вычисленный сток на 7—11% меньше, чем полученный при наблюдениях. На осушенном на 56%

водосборе Силлаотса—Сооне также значительных отклонений не замечается. Вычисленный сток здесь при обеспеченности 2,5 и 50% меньше фактического от 3 до 8%, а при обеспеченности от 10 до 30% расхождения менее 2%.

Учитывая все вышеприведенные поправки и регулирующее влияние затопляемых площадей, по формуле (6а) можно вычислить величину весеннего максимального стока с удовлетворительной точностью. Точность вычисления зависит, главным образом, от точности определения величины всех влияющих факторов. Особенные затруднения может составить определение площади низинных болот и заболоченных минеральных земель по топографическим картам. Не имея других данных исследований, можно в категорию низинных болот и заболоченных минеральных земель включить площади, отмеченные на топографических картах как избыточно увлажненные.

При уклоне заболоченных минеральных земель от 0,002 до 0,004, в особенности на тяжелых почвах, их площадь, по данным водосборов Лейвайыги—Арувалла и Салу—Салу, следует уменьшить до 50%.

В водосборах, в которых озера занимают менее 1% и где нет временных затоплений, при определении факторов, влияющих на максимальный сток, по топографическим картам среднесуточный весенний максимальный сток вычисляется по формулам (6) и (6а) для водосборов, представленных в табл. 5 и 5а, с точностью в среднем 10% (среднее абсолютное значение $r - r_{выч} = 0{,}04$). Максимальное отклонение — 52% — наблюдается в створе Ахья—Коорвере. Этот водосбор отличается крутыми склонами, и здесь возможен неправильный учет склонового стока. Большое отклонение — 37% при обеспеченности 2% — отмечается также в водосборе Ыхне—Тырва, который также характеризуется крутыми склонами.

В других створах отклонение вычисленного стока от наблюдавшихся не превышает 25%.

§ 4. ЛЕТНЕ-ОСЕННИЙ МАКСИМАЛЬНЫЙ СТОК

Расчет максимального стока летне-осеннего периода обычно базируется на наблюдениях за ливневыми осадками. Серьезные затруднения вызывает при этом определение потерь дождевой воды, вызванных инфильтрацией в грунт. Как известно, количество инфильтрующейся воды зависит, главным образом, от водопроницаемости и влажности почвы, которые изменяются как по площади водосбора, так и во времени. В ряде случаев потери на инфильтрацию могут превышать объем стока и поэтому неточности определения потерь сильно влияют на величину максимального стока.

К настоящему времени накоплено достаточно гидрометрического материала для исследования режима максимумов дождевых паводков на основе данных непосредственных измерений стока.

За летне-осенний максимальный сток приняты максимумы, наблюдавшиеся в период с 1 июня по 31 октября. Майские максимумы формируются в климатических условиях Эстонии под влиянием весенних паводков. Поэтому майский сток рассматривается отдельно как сток посевного периода.

По гидрометрическим створам, относительно которых имеется ряд наблюдений (с 1924 по 1963 г.), были построены эмпирические кривые обеспеченности летне-осеннего максимального стока. В табл. 6 приведены ординаты этих кривых.

В табл. 6а представлены ординаты кривых обеспеченности летне-осеннего максимального стока водотоков, по которым кратковременные наблюдения с 1948 по 1963 г. были приведены к периоду 1924—1963 гг.

Таблица 6

Ординаты кривых обеспеченности летне-осеннего максимального стока по данным наблюдений с 1924 по 1963 г. (в долях от среднего многолетнего стока)

Наименование водосбора и створа	Обеспеченность, %						
	2	5	10	20	30	50	90
Пуртсе—Люганузе	13,0	11,5	9,8	7,2	5,2	2,6	0,5
Пирита—Нехату	7,0	6,6	6,0	5,1	4,3	2,6	0,5
Лейвайыги—Паюба	10,4	8,5	6,4	5,1	4,4	3,0	0,9
Кейла—Кейла	7,0	6,2	5,6	4,8	4,1	2,7	0,5
Вазалемма—Урба	8,6	7,5	6,2	4,7	3,8	2,6	0,6
Вихтерпалу—Энглама	8,5	6,7	6,1	5,1	4,1	2,5	0,4
Пярну—Орекюла	7,0	5,5	5,0	4,3	3,7	2,5	0,6
С. Эмайыги—Тарту	4,0	2,9	2,2	1,9	1,7	1,4	0,9
В. Эмайыги—Тыллисте	10,1	9,0	7,4	5,2	4,0	2,6	1,0
Выханду—Химмисте	4,7	3,7	3,2	2,5	2,1	1,6	0,7
Нарва—Кульгу	2,8	2,4	2,0	1,8	1,6	1,4	0,9
Нарва—Васькнарва	2,9	2,3	1,9	1,6	1,5	1,3	0,9

Отношения, использованные в ходе приведения кратковременных рядов к многолетнему ряду, представлены в табл. 6б.

Как видно из данных табл. 6 и 6а, летне-осенний максимальный сток одной и той же обеспеченности в различных водосборах колеблется в больших пределах. Данные об основных факторах, влияющих на режим максимального стока (величина площади водосбора, средний минимальный сток, заболоченность и лесистость водосбора), приведены в табл. 2.

Ординаты кривых обеспеченности летне-осеннего максимального стока, приведенных к многолетнему ряду с 1924 по 1963 г. (в долях от среднегодового стока)

Наименование водосбора и створа	Обеспеченность, %						
	2	5	10	20	30	50	90
Бассейн Финского залива							
Пюхайыги—Пюхайыэ	9,0	8,1	7,0	5,3	3,9	2,1	0,8
Кунда—Сями	8,2	6,0	4,6	3,6	3,0	2,0	0,9
Вальге—Ванакюла	5,9	5,6	5,2	4,4	3,7	2,3	0,9
Аавоя—Маапаю	15,4	14,0	12,0	9,8	8,0	5,2	0,9
Пирита—Паункюла	7,5	6,8	6,0	5,2	4,3	3,0	0,7
Лейвайыги—Суурсоо	13,2	12,1	10,4	7,9	6,2	3,8	1,0
Лейвайыги—Арувалла	22,0	18,0	15,1	12,0	9,2	5,0	1,1
Силлаотса—Сооне	18,0	15,0	13,1	10,0	7,8	4,9	1,1
Салу—Салу	24,5	20,4	16,2	11,6	8,6	5,3	1,7
Вяо-оя—Вяо	37,6	34,5	29,4	18,8	11,5	5,1	1,8
Бассейн Рижского залива							
Казари—Казари	8,7	7,8	6,9	5,5	4,4	2,9	0,7
Казари—Тээнузе	9,4	8,5	7,5	6,0	4,7	2,7	0,4
Вигала—Коноверe	8,3	7,5	6,2	4,8	4,2	2,8	0,6
Энге—Ядивере	13,0	11,0	8,8	6,5	5,6	3,9	0,8
Осушительная система Рехемяэ	24,9	22,7	19,0	12,2	8,1	4,4	1,7
Рийзаоя—Валусте	7,0	6,7	6,1	5,2	4,3	2,8	0,7
Паадремаа—Мытсусилла	13,2	10,8	7,2	5,2	4,2	2,6	0,6
Вяндра—Кийза	10,2	8,8	7,5	5,8	5,0	3,3	0,3
Кыпу—Римму	6,8	6,0	5,0	3,8	3,0	1,9	0,6
Йыхве-оя—Йыхве	7,0	5,7	4,8	4,0	3,5	2,7	1,0
Капсиоя—Рейну	34,0	28,5	22,5	13,4	8,8	4,7	2,0
Пээгле—Куустле	19,0	15,5	12,0	8,0	6,0	3,5	0,9
Рейю—Сурью	17,0	13,0	9,8	7,0	5,5	3,7	1,2
Бассейн Чудского озера							
Педья—Тырве	7,5	6,4	5,5	4,3	3,5	2,3	0,7
Пыльтсамаа—Пыльтсамаа	3,6	3,3	2,9	2,4	2,1	1,6	1,0
Мустоя—Тулиярве	6,6	6,0	5,4	4,5	3,6	2,3	1,0
Мустоя—Колувере	6,5	6,3	6,0	5,4	4,7	3,5	0,9
Тоома—Тоома	8,1	7,5	6,9	5,7	4,7	3,0	0,8
Ыхне—Тырва	7,0	5,3	4,3	3,2	2,8	2,1	0,9
Эльва—Эльва	9,5	7,8	6,7	5,1	4,0	2,4	1,1
Пийгасте—Пийгасте	19,7	16,8	14,5	11,4	9,2	6,0	1,8
Ахья—Коорвере	8,1	7,0	6,1	4,7	3,7	2,4	1,2
Бассейн острова Сааремаа							
Пунапеа—Метскюла	8,5	7,7	7,1	6,0	5,0	2,8	0,3

Таблица 6б

Отношения ординат кривых обеспеченности летне-осеннего максимального стока за период с 1924 по 1963 г. к периоду с 1948 по 1963 г.

Наименование водосбора и створа	Обеспеченность, %							
	2	5	10	20	30	40	50	90
Пуртсе—Люганузе	1,00	1,00	1,09	1,19	1,27	1,35	1,44	1,00
Пирита—Нехату	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Лейвайыги—Паюба	0,96	0,90	0,87	1,00	1,07	1,12	1,15	1,00
Кейла—Кейла	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,96	0,90	1,00
Вазалемма—Урба	0,91	0,90	0,87	0,93	0,97	1,00	1,00	0,88
Вихтерпалу—Энглема	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Пярну—Орекюла	1,28	1,10	1,10	1,16	1,12	1,07	1,04	0,86
С. Эмайыги—Тарту	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90
В. Эмайыги—Тыллисте	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,87
Выханду—Химмисте	1,18	1,09	1,14	1,04	0,96	0,97	0,94	0,91

Факторы, оказывающие влияние на режим весеннего максимального стока, имеют, по-видимому, аналогичное влияние и на величину дождевого максимального стока. Поэтому при разработке формул для расчета дождевых максимумов была применена та же методика, что и при исследовании режима весеннего максимального стока.

На основе рис. 3, составленного по данным табл. 6 и 6а, для летне-осеннего максимального стока с обеспеченностью в 2% можно составить следующую формулу логарифмической аноморфозы:

$$\lg k_{\text{летн.-ос. макс } 2\%} = -0{,}11\,(1-k_{95\%}-r_{л})\lg(F+1) - \\ -1{,}32\,(k_{95\%}-r_{л})+1{,}32. \qquad (8)$$

Аналогичным способом были получены формулы для обеспеченности в 5, 10, 30 и 50%. Общий вид их следующий:

$$\lg k_{\text{летн.-ос. макс } P\%} = -0{,}11\,(1-k_{95\%}-r_{л})\lg(F+1) - (k_{95\%}+r_{л}) \\ \lg c+\lg c$$

или

$$k_{\text{летн.-ос. макс } P\%} = \left[\frac{c}{(F+1)^{0{,}11}}\right]^{1-k_{95\%}-r_{л}}. \qquad (9)$$

Величины числителя c формулы (9) приведены в табл. 7.

Таблица 7

Величины числителя c формулы (9)

Обеспеченность, %	2	5	10	30	50
Значение c	20,9	17,4	14,4	9,6	6,3

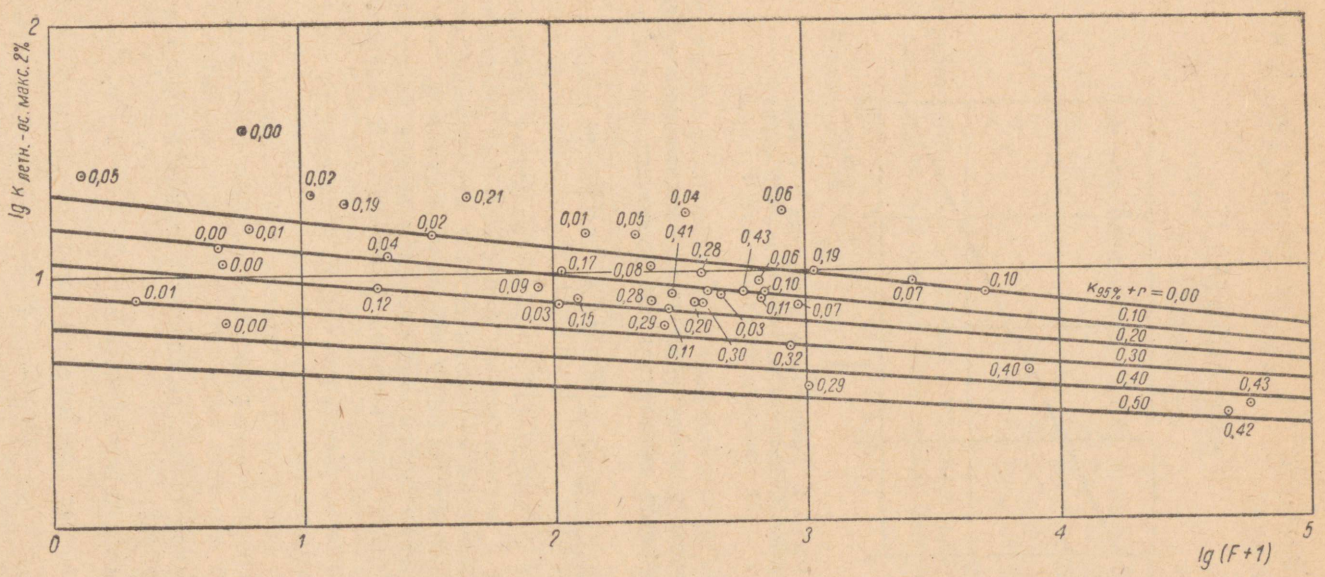


Рис. 3. Зависимость летне-осеннего максимального стока $k_{\text{летн.-ос. макс}\,2\%}$ от площади водосбора F. Числа около точек показывают значение $k_{95\%}$.

Числитель формулы (9), как показывает рис. 4, можно вычислить по формуле

$$c=26-11{,}5\lg(P+1). \qquad (10)$$

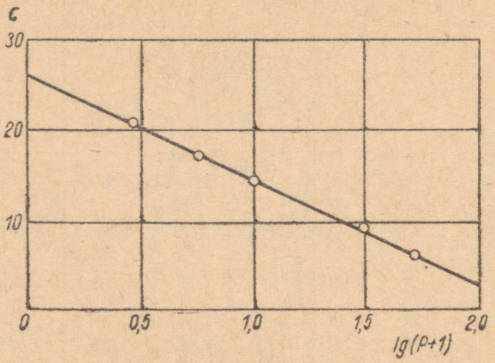


Рис. 4. Зависимость параметра c в формуле летне-осеннего максимального стока от процента обеспеченности P.

Таким образом, для летне-осеннего максимального стока получается следующая окончательная формула:

$$k_{\text{летн.-ос. макс } P\%}=\left[\frac{26-11{,}5\lg(P+1)}{(F+1)^{0{,}11}}\right]^{1-k_{95\%}-r_{\text{л}}}. \qquad (11)$$

Числитель c формулы (11), представляющий максимальный дождевой сток с элементарного водосбора при обеспеченности $P\%$, можно сопоставить с количеством максимальных дождевых осадков соответствующей обеспеченности $P\%$.

При вычислении максимального слоя дождя за сутки H (в миллиметрах) была использована формула Г. А. Алексеева [4]

$$H=a(\lg\overline{m}+\lg N)^{1{,}82}, \qquad (12)$$

где

$$a=2{,}68\frac{\overline{W}_0}{\overline{m}};$$

$\overline{W}_0$ — средняя сумма дождевых осадков в году (за май—октябрь);

$\overline{m}$ — среднее число дождей в году;

N — число лет превышения дождя со слоем H $\left(N=\frac{100}{P}\right)$.

Если принять для территории Эстонской ССР $a=7{,}76$ и $\lg\overline{m}=2{,}12$, то для равенства c и H, по формулам (10) и (12),

количество осадков H необходимо умножить на коэффициент стока $\beta_{P\%}$, вычисляемый по формуле

$$\beta_{P\%} \frac{26-11{,}5\lg(P+1)}{7{,}76\left(2{,}12+\lg\frac{100}{P}\right)^{1{,}82}}. \qquad (13)$$

При обеспеченности 0,3% $\beta_{0,3\%}=0{,}20$
„ „ 1 % $\beta_{1\%}=0{,}22$
„ „ 10 % $\beta_{10\%}=0{,}23$
„ „ 30 % $\beta_{30\%}=0{,}18$
„ „ 50 % $\beta_{50\%}=0{,}17$

Для вычисления летне-осеннего максимального стока по суточному слою осадков формула (11) принимает следующий вид:

$$k_{\text{летн.-ос. макс } P\%}=\left[\frac{\beta_{P\%}H}{(F+1)^{0{,}11}}\right]^{1-k_{05\%}-r_л}, \qquad (14)$$

где H — количество осадков, вычисленное по формуле (12), *мм*;

В условиях Эстонской ССР коэффициент стока $\beta_{P\%}$ в пределах обеспеченности от 0,3 до 10% почти постоянен (в среднем 0,22), и только при обеспеченности более 10% его значение начинает постепенно уменьшаться.

При более сухих почвах, где значительная доля дождевых осадков расходуется на инфильтрацию, коэффициент $\beta_{P\%}$ не столь устойчив и по мере увеличения процента обеспеченности стока постепенно уменьшается.

Для исследования влияния физико-географических факторов на режим дождевого максимального стока, на основе ординат эмпирических кривых обеспеченности были вычислены размеры параметра $r_л$ в формуле (11). Так же как при анализе режима весеннего максимального стока, расчеты для дождевых максимумов были проведены в долях от среднегодового стока. На первый взгляд можно предполагать, что применение таких относительных величин может привести к некоторому искажению значений дождевых максимумов, так как связь между среднегодовым и летне-осенним максимальным стоками или между годовыми осадками и ливневыми дождями может быть недостаточно тесной. Однако из формулы (12) видно, что при постоянном числе дождей в году m слой осадков H пропорционален коэффициенту α, зависящему от суммы годовых дождевых осадков H.

Сравнение суммы дождевых осадков с суммарным слоем стока, образующимся от этих осадков, показывает, что в осенний

период слой стока на некоторых водосборах может даже превышать слой осадков. В других водосборах слой стока при незначительной интенсивности испарения значительно меньше суммы осадков. Если разности между слоем осадков и стоком в различные холодные периоды в определенных водосборах остаются значительными и однозначными, то это показывает, что величина площади водосбора определена неточно. Использование относительных величин стока, выраженных в долях от среднегодового (нормы) стока, устраняет влияние этой неточности.

В табл. 8 представлены вычисленные по формуле (11) величины параметра $r_л$ при обеспеченности летне-осеннего максимального стока в 2, 5, 10 и 30%. Оказывается, что $r_л$ изменяется здесь в более значительных пределах, чем при весеннем максимальном стоке. При обеспеченности стока от 2 до 30% амплитуда колебания $r_л$ составляет (по табл. 8) в среднем 0,09 и среднее квадратичное отклонение при этом равно 0,04. На основе табл. 5 амплитуда колебания параметра $r_л$ в формулах (6) и (6а) весеннего максимального стока составляет при обеспеченности от 2 до 50% 0,08 и среднее квадратичное отклонение — 0,03.

Наибольшие изменения параметра $r_л$ отмечаются в водосборах рек Кунда—Сями, Паадремаа—Мытсусилла, С. Эмайыги—Тарту и Выханду—Химмисте. Амплитуда колебания $r_л$, при обеспеченности стока от 2 до 30%, составляет в этих водосборах 0,17 и 0,18, а среднее квадратичное отклонение $\sigma_{r_л}$ равно 0,08 и 0,09. По мере роста процента обеспеченности здесь увеличиваются значения параметра $r_л$, т. е. при малых процентах обеспеченности расчетные величины максимального стока получаются меньше фактических, а при больших (>10) процентах обеспеченности расчет дает завышенные значения.

По режиму стока указанные водосборы различны. В гидрометрических створах Кунда—Сями, С. Эмайыги—Тарту и Выханду—Химмисте сток зарегулирован. т. е. при сравнительно большом среднем минимальном стоке ($\kappa_{95\%}=0{,}30-0{,}40$) максимумы имеют заниженные значения. В створе Паадремаа—Мытсусилла наблюдается обратное явление — заниженные величины минимального стока и завышенные максимумы. В некоторых других гидрометрических створах (таких, как Аавоя—Маапаю, Казари—Казари, Пярну—Орекюла, Вяо-оя—Вяо) с увеличением процента обеспеченности стока значения параметра $r_л$ уменьшаются. Изменения параметра $r_л$ для водотоков, водосборы которых находятся в более или менее одинаковых физико-географических условиях, имеют различный характер. Поэтому какой-нибудь закономерности в этих отклонениях на основании имеющихся данных обнаружить не удалось.

Таблица 8

Значение параметра r в формуле (11) летне-осеннего максимального стока

Наименование водосбора и створа	Обеспеченность, %				Средний $r_л$	Амплитуда колебания	Среднее квадратичное отклонение $\sigma_{r_л}$	Вычисленный по формуле (15в) $r_{л\,выч}$	$\lvert r_л - r_{л\,выч} \rvert$
	2	5	10	30					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Бассейн Финского залива									
Нарва — Кульгу	+0,01	+0,03	+0,09	+0,08	+0,05	0,08	0,04	—	—
Пуртсе — Люганузе	−0,22	−0,18	−0,26	−0,19	−0,21	0,08	0,04	−0,12	0,09
Пюхайыги — Пюхайыэ	−0,04	−0,05	−0,08	−0,02	−0,04	0,06	0,04	−0,08	0,04
Кунда — Сями	−0,19	−0,11	−0,07	−0,01	−0,10	0,18	0,08	−0,08	0,02
Вальгейыги — Ванакюла	−0,03	−0,07	−0,09	−0,12	−0,08	0,09	0,04	−0,05	0,03
Аавоя — Маапаю	0,00	−0,09	−0,13	−0,18	−0,10	0,18	0,08	−0,12	0,02
Пирита — Нехату	+0,05	+0,04	−0,03	−0,07	0,00	0,12	0,05	0,00	0,00
Пирита — Паункюла	+0,04	+0,03	0,00	−0,03	+0,01	0,07	0,03	+0,05	0,04
Лейвайыги — Паюба	−0,02	0,00	+0,04	+0,03	+0,01	0,05	0,02	−0,01	0,02
Лейвайыги — Суурсоо	−0,01	−0,03	−0,06	−0,02	−0,03	0,05	0,02	−0,02	0,01
Лейвайыги — Арувалла	−0,15	−0,14	−0,17	−0,17	−0,16	0,03	0,01	−0,10	0,06
Силлаотса — Сооне	−0,01	−0,01	−0,04	−0,03	−0,02	0,03	0,01	−0,03	0,01
Салу — Салу	−0,15	−0,16	−0,15	−0,10	−0,14	0,06	0,04	−0,13	0,01
Вяо-оя — Вяо	−0,28	−0,33	−0,38	−0,23	−0,31	0,15	0,06	−0,25	0,06
Кейла — Кейла	−0,05	−0,04	0,00	−0,05	−0,04	0,05	0,02	−0,02	0,02
Вазалемма — Урба	+0,01	0,00	0,00	+0,05	+0,01	0,05	0,02	−0,06	0,07
Вихтерпалу — Энглема	+0,05	+0,09	+0,05	+0,05	+0,06	0,04	0,02	+0,03	0,03
Бассейн Рижского залива									
Казари — Казари	−0,07	−0,11	−0,16	−0,18	−0,13	0,11	0,05	−0,06	0,07
Казари — Тээнузе	−0,03	−0,06	−0,10	−0,11	−0,08	0,08	0,04	−0,09	0,01
Вигала — Коновере	−0,06	−0,08	−0,08	−0,09	−0,08	0,03	0,01	−0,09	0,01

Продолжение табл. 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Энге — Ядивере	−0,05	−0,04	−0,05	−0,05	−0,05	0,01	0,00	−0,02	0,03
Осушительная система Рехемяэ	−0,13	−0,17	−0,18	−0,04	−0.13	0,14	0,06	−0,14	0,01
Рийзаоя — Валусте	+0,22	+0,19	+0,16	+0,14	+0,18	0,08	0,04	+0,19	0,01
Паадремаа — Мытсусилла	−0,12	−0,10	−0,02	+0,05	−0,04	0,17	0,08	+0,04	0,08
Пярну — Орекюла	−0,03	−0,01	−0,05	−0,14	−0.06	0,13	0,06	−0,08	0,02
Вяндра — Кийза	+0,03	+0,03	0,00	+0,02	+0,02	0,03	0,02	+0,01	0,01
Кыпу — Римму	+0,10	+0,09	+0,09	+0,19	+0,12	0,10	0,05	−0,13	—
Капсиоя — Рейну	−0,28	−0,30	−0,31	−0,13	−0,26	0,15	0,08	−0,25	0,01
Пээгле — Куустле	−0,35	−0,34	−0,33	−0,23	−0,31	0,12	0,06	−0,29	0,02
Йыхвеоя — Йыхве	+0,23	+0,26	+0,26	+0,28	+0,26	0,05	0,02	+0,23	0,03
Рейю — Сурью	−0,23	−0,20	−0,18	−0,13	−0,18	0,10	0,05	−0,15	0,03
Бассейн Чудского озера									
С. Эмайыги — Тарту	+0,02	+0,03	+0,13	+0,20	+0,10	0,18	0,09	−0,08	—
Педья — Тырве	+0,04	+0,06	+0,04	+0,07	+0,05	0,03	0,01	+0,02	0,03
Пыльтсамаа — Пыльтсамаа	+0,15	+0,14	+0,15	+0,19	+0,16	0,05	0,02	+0,01	—
Мустоя — Тулиярве	+0,17	+0,16	+0,14	+0,18	+0,16	0,04	0,02	+0,14	0,02
Мустоя — Колувере	+0,34	+0,31	+0,27	+0,23	+0,29	0,11	0,05	+0,05	—
Тоома — Тоома	+0,27	+0,25	+0.23	+0,29	+0,26	0,06	0,03	+0,27	0,01
Ыхне — Тырва	−0,09	−0,04	−0,02	+0,06	−0,02	0,15	0,05	−0,11	0,09
В. Эмайыги — Тыллисте	−0,22	−0,24	−0,24	−0,18	−0,22	0,06	0,03	−0,22	0,00
Эльва — Эльва	−0,16	−0,18	−0,20	−0,15	−0,17	0,05	0,02	−0,17	0,00
Ахья — Коорвере	−0,28	−0,28	−0,31	−0,25	−0,28	0,06	0,02	−0,25	0,03
Пийгасте — Пийгасте	−0,29	−0,30	−0,34	−0,36	−0,32	0,07	0,03	−0,28	0,04
Выханду — Химмисте	0,00	+0,05	+0,07	+0,18	+0,08	0,18	0,07	−0,13	
Бассейн острова Сааремаа									
Пунапеа — Метскюла	+0,12	+0,09	+0,05	+0,01	+0,07	0,11	0,05	+0,07	0,00
Среднее					−0,04	0,09	0,04	−0,06	0,03

С целью определения параметра $r_л$ для водотоков, по которым отсутствуют данные наблюдений, установлена связь между этим параметром и физико-географическими факторами водосборов.

На основе средних величин $r_л$ (по табл. 8) и данных по двадцати четырем заболоченным и облесенным водосборам, представленным в табл. 2, была получена следующая корреляционная связь:

$$r_л = 0{,}0047(A_з + 1{,}5A_{нв}) + 0{,}001\,B_с - 0{,}28, \qquad (15)$$

где $A_з$ — процент площади заболоченного леса заболоченных минеральных земель и слабо осушенных (канализованных) торфяных почв,

$A_{нв}$ — процент площади низинных и верховых болот водосбора,

$B_с$ — процент площади лесов, не требующих осушения, и осушенных лесов на минеральных почвах.

Общий коэффициент корреляции формулы (15) $R_{r_л} = 0{,}87$.

Сравнение формул (15) и (7) показывает, что при определении величины параметра $r_л$ площадь низинных и верховых болот берется со значительно большим коэффициентом, чем при вычислении весеннего стока. Однако коэффициент для лесных площадей, не требующих осушения, при дождевых максимумах почти в пять раз меньше, чем при весенних максимумах. Такое положение вполне понятно, так как лесные площади, с одной стороны, сильно задерживают таяние снега, а, с другой стороны, оказывают на сток дождевых вод значительно меньшее регулирующее влияние, чем заболоченные земли.

Если формуле (15) придать вид, аналогичный формуле (7), то будем иметь

$$r_л = 0{,}0047(A_з + 1{,}5A_{нв} + 0{,}20\ B_с) - 0{,}28. \qquad (15а)$$

О влиянии суходольных земель можно судить на основе водосборов Пээгле—Куустле, Капсиоя—Рейну, В. Эмайыги—Тыллисте, Эльва—Эльва и Вяо-оя—Вяо. Здесь не удалось установить связи между изменением величины $\Delta r_л$ и средним уклоном суходольных земель. На основе данных наблюдений можно только констатировать, что при среднем уклоне поверхности суходольных земель около 0,02 и более и слабо проницаемых почв ($k < 0{,}1$ *м*/сутки) с уклоном около 0,002 и более поправка $\Delta r_л = -0{,}001\,C$. При водопроницаемых почвах ($k > 0{,}1$ *м*/сутки) и уклонах суходольных земель меньше 0,02 C равен нулю.

На основе данных водосборов Лейвайыги—Арувалла и Салу—Салу можно установить, что при определении влияния заболоченных минеральных земель с уклоном от 0,002 до 0,004 их площадь следует уменьшить до 50%.

Кратковременные наблюдения над осушенными заболоченными минеральными землями показывают, что их режим аналогичен режиму водосбора Вяо-оя—Вяо. Поэтому процент осушенных минеральных земель $A_{зо}$ в формуле (15б) следует также умножить на коэффициент $-0{,}001$.

Как показывают данные осушенного лесного водосбора Аавоя—Маапаю, осушенные лесные площади на минеральных почвах оказывают на величину $r_л$ такое же влияние, как и незаболоченные леса, и их процент в формуле (15) следует суммировать с членом $B_с$.

Судя по предварительным данным, слабое осушение лесных и прочих площадей на торфяных почвах оказывает на величину $r_л$ такое же влияние, как и заболоченные минеральные почвы $A_з$. Таким образом, формула (15а) принимает вид

$$r_л = 0{,}0047\,(A_з + 1{,}5\,A_{нв} + 0{,}20\,B_с) - 0{,}001\,(A_{зо} + C) - 0{,}28, \quad (15б)$$

где C — процент площади открытых или покрытых кустарником незаболоченных земель со средним уклоном около 0,02 или больше, сухих слабоводопроницаемых почв и осушенных минеральных земель. При средних незаболоченных безлесных почвах ($k > 0{,}1$ *м*/сутки) с уклоном около 0,02 и меньше $C = 0$.

Влияние осушения низинных болот можно определить по данным осушительной системы Рехемяэ. Среднее значение параметра в Рехемяэ равно $-0{,}13$ (табл. 8). Если в формуле (15) $r_л$ заменить величиной $-0{,}13$ и процент низинных болот $A_{нв}$ принять за 100, то коэффициент площади осушенных низинных болот (α) определяется из уравнения $-0{,}13 = 0{,}0047 \cdot 100\alpha - 0{,}28$, откуда $\alpha = 0{,}32$. Этот коэффициент соответствует участку осушенного дренажем при расстоянии между дренами 35—40 *м* и их глубине 0,90 *м*.

Для водосбора Силлаотса—Сооне, где 56% площади составляют слабо осушенные низинные болота, $\alpha = 0{,}52$. Здесь осушение произведено мелкими открытыми канавами через 50 *м* при глубине 0,50—0,60 *м*.

Предварительные данные показывают, что осушение уменьшает способность болот регулировать максимальный сток, причем по мере увеличения интенсивности осушения снижается и эта способность. В зависимости от интенсивности осушения коэффициент α может, по-видимому, изменяться в пределах от 0,30 до 1,0. Таким образом, для параметра $r_л$ можно получить следующую предварительную формулу:

$$r_л = 0{,}0047\,[A_з + 0{,}30\,A_{но} + 1{,}5\,A_{нв} + 0{,}20\,(B_с - A_{зо} - C)] - 0{,}28, \quad (15в)$$

где $A_{но}$ — процент площади хорошо осушенных низинных болот водосбора.

Используя данные табл. 2, по формуле (15в) были вычислены значения параметра $r_{л\,выч}$. Сравнение вычисленных величин со средними значениями величины $r_л$ в табл. 8 показывает большие расхождения по некоторым водосборам. Замечаются такие расхождения в основном в водосборах, где имеются озера, пойменные или другие затопляемые площади, регулирующие максимальный сток. Влияние запасов воды в водосборе, регулирующих сток, учитывается по формуле (11) летне-осеннего максимального стока параметром $k_{95\%}$. Однако временные затопления и русловое регулирование не влияют на величину $k_{95\%}$. Поэтому влияние таких затоплений учитывается поправкой $\Delta k_{95\%}$ по формуле (2б). Судя по данным водосборов С. Эмайыги—Тарту и Нарва—Кульгу, объем запасов воды, необходимый для вычисления поправки $\Delta k_{95\%}$, можно определить по размерам затопляемых участков, емкости русел и озер, срабатываемых в течение 30 суток в период среднего половодья.

На основе данных о заболоченности и лесистости водосборов, определенных по топографическим картам (табл. 2), величина летне-осеннего максимального стока для водосборов, представленных в табл. 7, вычисляется с точностью в среднем около 7% (среднее отклонение $r_л - r_{л\,выч} = 0{,}03$).

Исключение составляют такие водосборы с озерами и затопленными участками, как Кыпу—Римму, С. Эмайыги—Тарту, Пыльтсамаа—Пыльтсамаа, Мустоя—Колувере, Ыхне—Тырва, Выханду—Химмисте и Нарва—Кульгу, где необходимо учесть поправку $\Delta k_{95\%}$, определяемую по регулирующей емкости озер и затоплений на основе формулы (2б).

В створе Пуртсе—Люганузе вычисленный сток при обеспеченности в 10% на 23% меньше фактического.

В остальных створах расхождение между наблюдавшимся и вычисленным стоком составляет менее 20%.

Аналогично весенним максимумам, при определении среднесуточного летне-осеннего максимального стока с водосборов площадью менее 100 $км^2$ практически можно пользоваться формулой

$$k_{\text{летн.-ос. макс } P\%} = \left[\frac{26 - 11{,}5 \lg (P+1)}{100^{0{,}11}}\right]^{1 - k_{95\%} - r_л}. \qquad (11а)$$

§ 5. СТОК ПОСЕВНОГО ПЕРИОДА

При исследовании вопроса о необходимой интенсивности осушения сельскохозяйственных угодий в разных условиях почво-грунтов, а также при расчете осушительных систем требуют-

ся данные о стоке в различные фазы вегетационного периода и уборки урожая.

Осушительные системы на участках, предназначенных под полевые севообороты, должны обеспечить свободное передвижение сельскохозяйственных машин и создать благоприятные условия для развития растений. Для создания на осушаемых землях необходимого водного режима во время весенней обработки почвы необходимы сведения о весеннем стоке.

С целью исследования характера весеннего паводкового стока в период спада, т. е. в предпосевной и посевной периоды в условиях Эстонии в первую очередь были изучены отдельные элементы сравнительно сильного паводка 1951 г., по которому имелось достаточное количество данных.

Весной 1951 г. в водосборах рек Эстонской ССР наблюдались максимумы, обеспеченность которых составляла, по данным исследований весеннего максимального стока, около 10% [39].

С целью изучения характера стока весеннего паводка в период спада были обработаны гидрометрические данные наблюдений за 1951 г. по 47 пунктам сети Управления гидрометслужбы ЭССР, а также по трем специальным, самым малым по площади (от 1,7 до 36 *га*) водосборам.

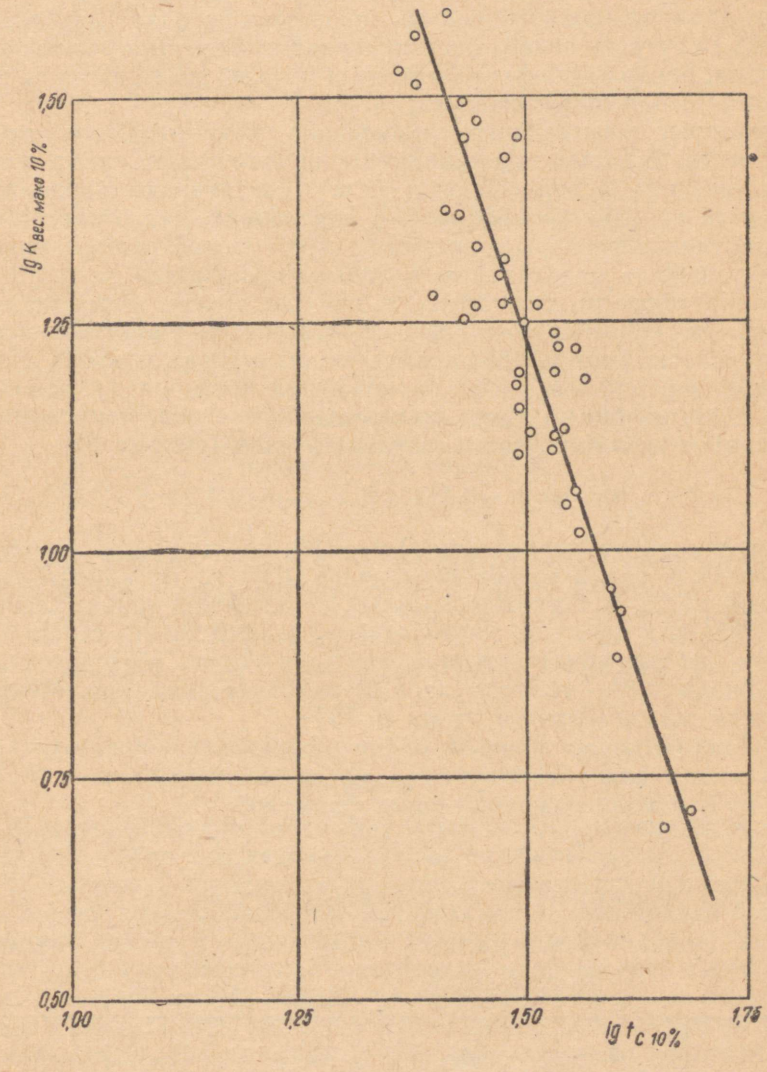
Для всех гидрометрических створов были составлены гидрографы весеннего паводкового стока 1951 г.

Продолжительность спада паводка определена по гидрографам весеннего половодья. Вслед за максимумом на гидрографах отмечается крутая линия спада. По мере убывания стока линия спада принимает форму вогнутой кривой с крутизной, зависящей от зарегулированности стока. Конечная часть кривой спада обычно представляет собой пологую линию с незначительным уклоном. Нормальный вид линии спада может нарушаться вторичными подъемами, обусловленными выпадением дождей в период спада. Чтобы устранить в первичных расчетах влияние дождей на форму кривой, при исследовании выбирались промежутки без осадков, из которых путем соединения их в одну плавную линию получали так называемые «нормальные кривые спада» для гидрометрического створа. На нормальной кривой спада определяется точка, где кривая переходит в почти прямую линию с очень малым размером спада (около 3 *л/сек км*^{2} и меньше в течение 30 суток). Начиная с этой точки, сток образуется главным образом за счет запасов грунтовых вод. Точку перегиба на нормальной кривой спада можно считать концом паводка.

На гидрографах 1951 г. конец весеннего паводка несколько растянут. Вызвано это тем, что в описываемом году во время спада весеннего паводка выпадали дожди, которые отодвинули окончание паводка в среднем на 9 суток. Чтобы исключить влия-

ние осадков на продолжительность спада паводка, срок конца его был подсчитан по нормальным кривым спада.

Средняя фактическая продолжительность спада весеннего паводка 1951 г. в водосборах, по которым имелись данные на-



Р и с. 5. Зависимость продолжительности спада паводка $t_{c\,10\%}$ от величины весеннего максимального стока при обеспеченности $P=10\%$

блюдений, составляла 41 сутки, а по нормальным кривым спада — 32 суток. Наименьшая продолжительность спада, 7 суток, наблюдалась на осушенных участках с тяжелыми глинистыми почвами. В водосборах с большими озерами или с обильным стоком подземных вод продолжительность спада паводка 1951 г. составляла, по нормальным кривым, 45—48 суток.

Средняя продолжительность подъема паводка оказалась равной 10 суткам, колеблясь в пределах от двух (на осушенных участках, расположенных на тяжелых почвах) до 17 суток (в водосборах с большими озерами).

Факторы, вызывающие уменьшение максимального стока (озерность, хорошая проницаемость почво-грунтов, заболоченность, лесистость водосборов и т. п.), увеличивают продолжительность паводка, и наоборот, в водосборах, где отсутствуют регулирующие факторы, максимумы стока увеличиваются, а продолжительность спада волны паводка уменьшается.

Таким образом, при одном и том же объеме паводка для различных водосборов должна существовать обратная связь между максимумом и продолжительностью спада паводка. Корреляция логарифмов чисел продолжительности спада паводка 1951 г. логарифмами чисел максимального стока, измеряемого в принятых единицах, дает следующую связь (см. рис. 5):

$$\lg t_{\text{с }1951} = -0{,}333 \lg k_{\text{вес. макс }1951} - 1{,}91 \qquad (16)$$

с коэффициентом корреляции $R = -0{,}90$. Здесь $t_{\text{с }1951}$ — продолжительность спада весеннего паводка 1951 г. по нормальным кривым спада, в сутках, $k_{\text{вес. макс }1951}$ — весенний максимальный сток 1951 г. в долях от многолетнего среднегодового стока.

Так как обеспеченность максимального стока 1951 г. составляла около 10%, то формула (16) действительна при обеспеченности максимального стока в 10%.

По нормальным кривым спада определена продолжительность спада для обеспеченности максимального стока в 2, 20, 30 и 50% и получена следующая формула:

$$\lg t_{\text{с }P\%} = -0{,}333 \lg k_{\text{вес. макс }P\%} + a \qquad (17)$$

Член a формулы (17) определяется по табл. 9.

Таблица 9

Величина члена a в формуле (17)

P%	2	10	20	30	50
a	1,97	1,91	1,86	1,81	1,71

На основании рис. 6 для свободного члена a формулы продолжительности спада (17) можно написать следующее выражение:

$$a = -0{,}21 \lg (P+1) + 2{,}12. \qquad (18)$$

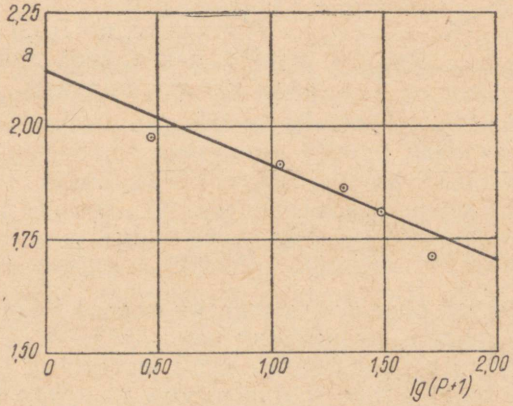


Рис. 6. Зависимость параметра a в формуле продолжительности спада паводка от процента обеспеченности P.

Таким образом, формула продолжительности спада весеннего паводка при максимальном стоке с обеспеченностью от 2 до 50% имеет общий вид

$$t_{c\,P\%} = -0{,}333 \lg k_{\text{вес. макс}\,P\%} - 0{,}21 \lg (P+1) + 2{,}12$$

или

$$t_c = \frac{132}{\sqrt[3]{k_{\text{вес. макс}\,P\%}}\,(P+1)^{0.21}}. \qquad (19)$$

При установлении вида формулы спада принимаем, что во время посевного периода они представляют собой параболы. Если построить кривую спада в логарифмических координатах, то тангенс угла, образуемый касательной к этой кривой с осью абсцисс, является показателем степени кривой спада. Ввиду того, что логарифмическая анаморфоза представляет собой кривую, тангенс и, следовательно, показатель степени кривой спада представляют собой величину переменную. Однако для отдельных участков кривой спада (например, посевного периода) эту степень можно принять за постоянную.

Если выразить ординаты кривой спада в долях максимального стока ($k_{\text{вес. макс}}$), а абсциссы в долях продолжительности

TRÜ Raamatukogu

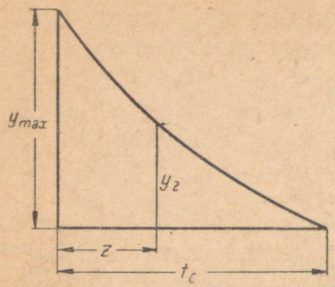


Рис. 7. Кривая спада.

периода спада (рис. 7), то

$$y_z = \frac{k_z}{k_{\text{вес. макс}}} \quad \text{и} \quad x_z = \frac{t_c - z}{t_c}$$

Принимая, по Д. Л. Соколовскому [33], для кривой спада параболу вида $y_z = x_z^n$, получим

$$\lg y_z = n \lg x_z$$

и

$$n = \frac{\lg y_z}{\lg x_z} = \lg \frac{k_z}{k_{\text{вес. макс}}} : \lg \frac{t_c - z}{t_c}. \qquad (20)$$

Нас интересует показатель степени кривой спада в посевной период. Поэтому при вычислении показателя n следует в формулу (20) вместо k_z подставить сток посевного периода $k_{\text{пос}}$, а вместо z — число суток от максимума до ординаты посевного периода.

При использовании для вычисления показателя данных наблюдений необходимо из общей величины посевного и максимального стока вычесть величину стока грунтовых вод в данном водосборе. В противном случае не будет выполнено условие, чтобы при $x=0$, $y=0$, как это следует из уравнения $y_z = x_z^n$. Таким образом, показатель степени кривой спада стока посевного периода можно вычислить по следующей формуле:

$$n = \lg \frac{k_{\text{пос}} - k_{\text{гр}}}{k_{\text{вес. макс}} - k_{\text{гр}}} : \lg \frac{t_c - z}{t_c}, \qquad (21)$$

где $k_{\text{гр}}$ — сток грунтовых вод в принятых единицах;

t_c — продолжительность спада весеннего паводка, определяемого по нормальным кривым спада в сутках.

При использовании данных гидрометрических измерений в период паводка 1951 г. для вычисления показателя степени кривой спада была определена дата начала посевного периода. На основании многолетних исследований Э. К. Халлера [46], посвященных выбору посевного периода для яровых зерновых культур, и с учетом исследований А. И. Ивицкого [15] установлено, что оптимальным сроком посева яровых зерновых в климатических условиях Эстонской ССР можно приближенно считать время, к которому сумма среднесуточных температур с начала снеготаяния достигает примерно +90° С.

Весной 1951 г. сумма среднесуточных положительных температур по водосборам центральной Эстонии достигла 90—100° приблизительно к 28 апреля, и среднесуточный сток, соответствующий этой дате, принят за посевной.

Весенние максимумы в водосборах рек Эстонии наблюдались в 1951 г. с 9 по 16 апреля. Промежуток от максимума до начала посевного периода (z) составлял, таким образом, 12—19 суток. Исключение из общей картины составляли водосборы с большими озерами, где появление максимального стока сильно запаздывало. Так, в реке Нарва, ниже Чудского озера, в створе Васькнарва, максимум стока 1951 г. наблюдался 28 апреля, т. е. совпадал с началом посевного периода. В водосборах южной Эстонии продолжительность периода между максимумом и сроком посева оказалась в среднем на 1—2 суток больше, чем в северной Эстонии. Видимо, в южных районах срок посева также наступает в среднем на 1—2 дня раньше. В наших расчетах был принят один срок посева (28/IV) для всей территории республики, что вносит некоторую неточность, однако отклонение на 1—2 дня, хотя и влияет в некоторой мере на величину посевного стока, не имеет значения при вычислении показателя степени кривой спада. При исследовании названного показателя, как было сказано выше, необходимо из нижней части кривой спада паводка исключить сток грунтовых вод, величину которого можно определить по нормальным кривым спада. Сток, соответствующий точке перегиба на кривой спада, где кончается паводок и начинается более медленный спад за счет убывания запаса грунтовых вод, и является интересующим нас стоком грунтовых вод.

Результаты вычисления степени спада весеннего паводка показывают, что эта степень n в большинстве водосборов колеблется незначительно и во время посевного периода везде можно применять постоянную ее величину, равную 3,7.

Зная продолжительность спада весеннего паводка и имея данные о характере кривых спада в виде показателя степени n, можно вывести формулы среднесуточного стока для оптимального срока весеннего сева.

Из уравнения кривой спада $y_z = x_z^n$ или

$$\frac{k_z - k_{гр}}{k_{вес.\,макс} - k_{гр}} = \left(\frac{t_c - z}{t_c}\right)^n$$

получим

$$k_z = (k_{вес.\,макс} - k_{гр})\left(\frac{t_c - z}{t_c}\right)^n + k_{гр}.$$

Подставляя

$$k_z = k_{пос},$$

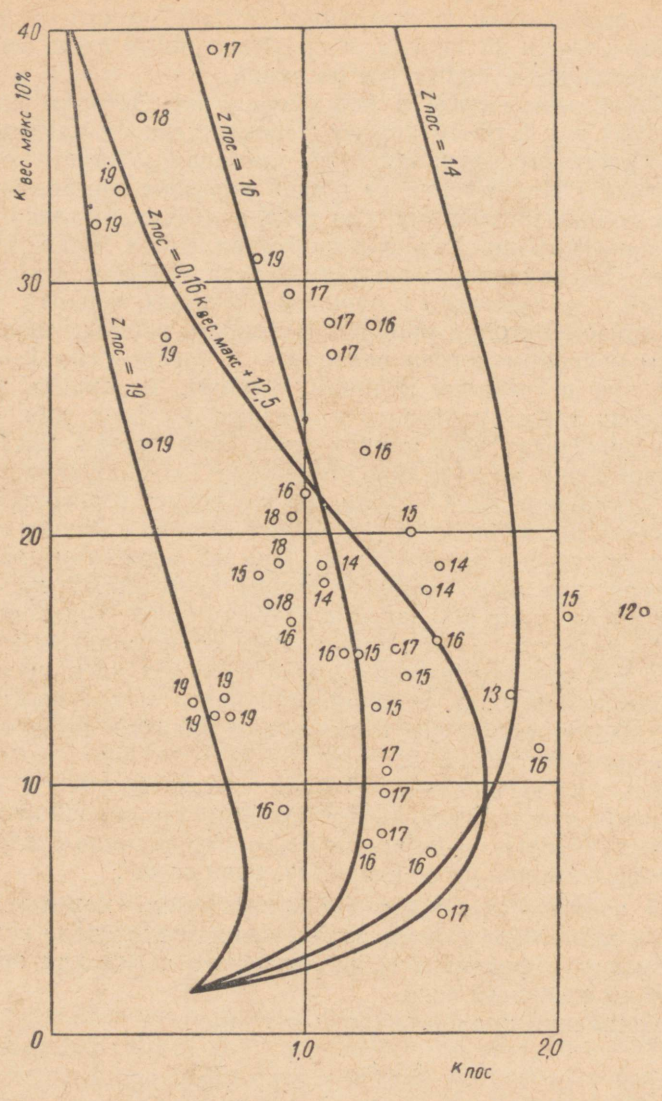


Рис. 8. Зависимость посевного стока $k_{пос}$ от весеннего максимального стока $k_{вес.\ макс\ 10\%}$. Числами около точек обозначены числа суток $z_{пос}$ от максимума до посевного периода.

получим формулу посевного стока

$$k_{\text{пос}} = (k_{\text{вес. макс}} - k_{\text{гр}}) \left(\frac{t_c - z}{t_c} \right)^n + k_{\text{гр}}, \qquad (22)$$

где $n = 3{,}7$.

На рис. 8 в системе координат нанесены величины фактического посевного стока 1951 г. (в долях от многолетнего стока). По оси ординат отложены величины весеннего максимального стока 1951 г. ($k_{\text{вес.макс}}$), по оси абсцисс — величины посевного стока этого же водосбора, уменьшенные на величину стока грунтовых вод ($k_{\text{пос}} - k_{\text{гр}}$).

Кроме того, на рис. 8 показаны кривые, построенные по формуле (22) для обеспеченности максимального стока $P = 10\%$ при $k_{95\%} = 0$. Кривые построены для периода от максимума до посевного стока при $z_{\text{пос}} = 19$, 16 и 14 суток.

Кривые на рис. 8 показывают, что точки посевного стока с водосборов, где от максимума до посевного периода прошло 18—19 суток, расположены главным образом около кривой, построенной для значений $z_{\text{пос}} = 19$. Точки с $z_{\text{пос}} = 13$ и 14 суток находятся около кривой, где $z_{\text{пос}} = 14$ суток, а точки со средней продолжительностью $z_{\text{пос}} = 15$, 16 и 17 суток группируются, главным образом, около средней кривой, вычисленной по $z_{\text{пос}} = 16$ суток.

Дополнительно к рис. 8 в табл. 10 приведены цифровые данные о зависимости посевного стока от максимального.

Таблица 10

Зависимость посевного стока от максимального стока

Максимальный сток обеспеченностью в 10% $k_{\text{вес. макс } 10\%}$, в долях от многолетнего среднегодового стока	Посевной сток, вычисленный по формуле (22), при $k_{\text{вес. макс } 10\%}$ и $k_{95\%} = 0$ соответственно			
	$z_{\text{пос}} = 14$	$z_{\text{пос}} = 16$	$z_{\text{пос}} = 19$	$z_{\text{пос}}$ по формуле (23)
5	1,38	1,12	0,76	1,49
10	1,74	1,23	0,70	1,70
15	1,84	1,22	0,56	1,57
20	1,82	1,10	0,43	1,18
30	1,64	0,80	0,20	0,47
40	1,37	0,57	0,08	0,09

Данные табл. 10 показывают, что уменьшение продолжительности $z_{\text{пос}}$ на 2 суток сильно влияет на величину посевного стока. Поэтому необходимо искать связь, по которой можно было бы определить величину $z_{\text{пос}}$.

Известно, что ранний или поздний срок появления макси-

мума зависит, кроме климатических факторов, от целого ряда особенностей водосбора. Можно предположить, что увеличенное влияние таких факторов, как площадь водосбора, залесенность, заболоченность, озерность, водопроницаемость почво-грунтов и т. п., приводит к запаздыванию наступления максимума и сокращению продолжительности $z_{пос}$, что, в свою очередь, уменьшает максимальный сток. Следовательно, при одинаковых климатических условиях с уменьшением максимального стока можно ожидать запаздывания срока прохождения его пика и уменьшения продолжительности периода между максимумом и посевным периодом. По-видимому, должна существовать связь между продолжительностью $z_{пос}$ и размером максимального стока. На рис. 9 показано, что такая связь действительно существует, но является довольно слабой.

Ординаты точек на рис. 9 суть значения максимального стока 1951 г. $k_{вес.макс}$, абсциссы — продолжительность спада паводка от момента наступления максимума до посевного периода $z_{пос}$.

На основании рис. 9 для $z_{пос}$ получено следующее выражение:

$$z_{пос} = 0{,}16 k_{вес.макс} + 12{,}5. \qquad (23)$$

Графическое изображение зависимости $k_{пос}$ при обеспеченности максимального стока $P=10\%$, $k_{95\%}=0$ и $z_{пос}=0{,}16k_{вес.макс}+12{,}5$ представлено на рис. 8. Эта кривая показывает, что при увеличении максимального стока от 1 до 10 увеличивается и посевной сток, при дальнейшем увеличении максимального стока посевной сток начинает постепенно уменьшаться.

Точки, соответствующие размерам фактического посевного стока 1951 г. (рис. 8) разбросаны, но группируются около кривой $z_{пос}=0{,}16\,k_{вес.макс}+12{,}5$. Картина разброса точек аналогична таковой на рис. 9. Разброс обусловлен, главным образом, тем, что продолжительность предпосевного периода $z_{пос}$ слабо связана с нарастающим максимальным стоком и что $k_{гр}$ и $k_{95\%}$ для всех водосборов не равны нулю, как это было принято при вычислении кривых на рис. 8.

После канализации и осушения водосбора можно ожидать увеличения максимального стока и уменьшения посевного.

В табл. 11 приведены результаты определения величины стока посевного периода по формуле (22) до и после осушения для водосборов, характеризуемых следующими данными: $F=0 \div 100$ км^2, $k_{95\%}=0{,}0$, 0,10 и 0,20, процент низинных болот в водосборе $A_н=100$, процент лесистости $B=0$, процент обеспеченности весеннего максимального стока $P=10$, после осушения процент болот $A_{он}=0{,}5\cdot 100=50\%$, грунтовый сток $k_{гр}$ принят равным 2,5 $k_{95\%}$.

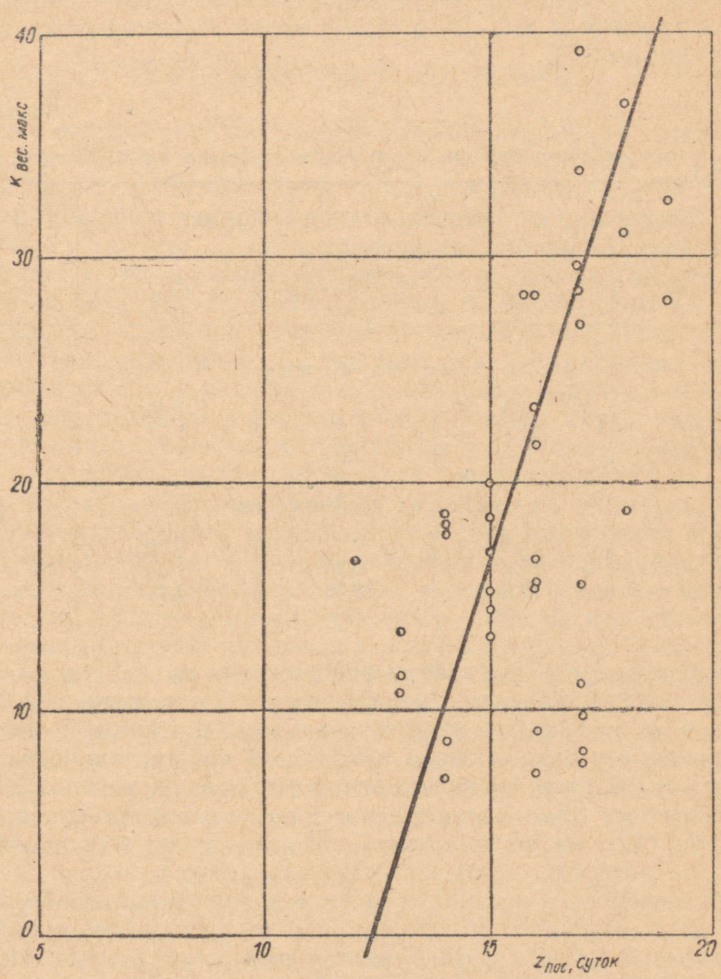


Рис. 9. Зависимость продолжительности $z_{пос}$ от величины весеннего максимального стока.

Как видно из табл. 11, при осушении малых ($F \leqslant 100$ км^2) болотистых водосборов без грунтового питания ($k_{95\%}=0$) можно ожидать уменьшения стока посевного периода примерно на 80%, т. е. посевной сток после осушения составит лишь 20% этой величины до осушения. Осушение низинных болот с обильным стоком грунтовых вод ($k_{95\%}>0{,}10$) ведет к уменьшению посевного стока до 50%.

Таблица 11

Сток посевного периода до и после осушения ($F \leqslant 100$ км^2)

Сток в долях от многолетнего среднегодового				Уменьшение $k_{пос}$ после осушения, %
$k_{95\%}$	$k_{вес.\ макс\ 10\%}$	$k_{гр}=2{,}5\ k_{95\%}$	$k_{пос}$	
		До осушения		
0	16,3	0	1,48	
0,10	11,7	0,25	1,91	
0,20	8,3	0,50	2,17	
		После осушения		
0	34,2	0	0,26	−82
0,10	25,2	0,25	1,06	−44
0,20	17,5	0,50	1,91	−12

Вышеприведенные расчеты основаны на предположении, что спад весеннего паводка происходит по нормальным кривым спада, т. е. по кривым, из которых исключено влияние осадков, выпадающих в период спада паводка. В действительности же в период спада почти ежегодно выпадают осадки, увеличивающие сток. Поэтому обеспеченность посевного стока, вычисленная по формуле (22), не соответствует обеспеченности максимального стока, по которому производится вычисление.

Обеспеченность посевного стока в зависимости от обеспеченности максимального можно определить способом сравнения вычисленных данных с фактическими. По створам, где имеются многолетние гидрометрические наблюдения, были составлены эмпирические кривые обеспеченности посевного стока. Сравнение эмпирических кривых с вычисленными показывает, что обеспеченность вычисленного стока в среднем на 20% ниже фактического. В связи с этим обеспеченность вычисленного посевного стока следует увеличить на 20% по сравнению с обеспеченностью весеннего максимального стока, по которому производятся вычисления.

Таким образом, формулу (22) среднесуточного посевного стока нужно использовать в следующем виде:

$$k_{\text{пос } P+20\%} = (k_{\text{вес. макс } P\%} - k_{\text{гр}}) \left(\frac{t_c - z}{t_c}\right)^{3,7} + k_{\text{гр}}. \qquad (24)$$

§ 6. СРЕДНИЙ СТОК В МАЕ

Исследования среднесуточного стока весеннего посевного периода показали, что сток в это время изменяется за 1—2 суток в больших пределах. Весенний посев по времени совпадает примерно с серединой периода спада весеннего паводка. В это время за двое суток сток с заболоченных водосборов может измениться на 30—40%, а с незаболоченных и осушенных еще больше (см. табл. 10 и рис. 8). Таким образом, средний сток за одни сутки весьма изменчив и не может служить характеристикой всего посевного периода. Кроме того, как установлено выше, случайный характер распределения осадков в значительной мере мешает определению размеров стока за одни сутки посевного периода по теоретически обоснованным формулам. Поэтому необходимо изучить средний сток всего посевного периода.

На основании исследований Э. К. Халлера [46] можно считать, что оптимальный срок весеннего сева приходится в среднем на конец апреля — начало мая. При нормальных условиях, когда вспашка произведена осенью, а весной перед севом остается только культивация или дискование полей, нет значительной разницы в сроках начала полевых работ и сева. Таким образом, можно считать, что в условиях Эстонии весенние полевые работы начинаются в среднем в конце апреля — начале мая.

В некоторые годы (например, с 1955 по 1959 г.) вследствие затяжной весны весенние посевные работы были растянуты до конца мая, поэтому при исследовании среднего стока посевного периода произведен анализ среднего стока мая.

Можно предположить, что средний сток в мае вычисляется по весеннему максимальному стоку, так как в мае продолжается спад паводка. Однако последующий расчет показывает, что к началу посевного периода основная часть талых вод уже успевает стечь и лишь незначительная доля объема паводка стекает в мае. Если $k_z = k_{\text{вес. макс}} \left(\frac{t_c - z}{t_c}\right)^n$, то объем спада весеннего паводка (рис. 10) равен

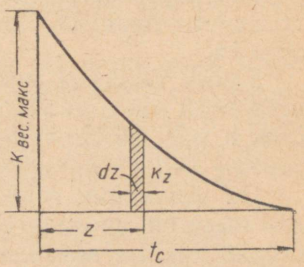


Рис. 10. Кривая спада.

$$\int k_z dz = \int k_{\text{вес. макс}} \left(\frac{t_c - z}{t_c}\right)^n dz$$

или

$$\int k_z dz = k_{\text{вес. макс}} \int z^n dz, \tag{25}$$

где

$$z = \frac{t_c - z}{t_c} = 1 - \frac{z}{t_c}.$$

После интегрирования в пределах от $z=0$ до $z=t_c$ получаем

$$\int_0^{t_c} k_z dz = k_{\text{вес. макс}} \frac{t_c}{n+1}. \tag{26}$$

При интегрировании уравнения (25) в пределах от $z=z_{\text{пос}}$ до $z=t_c$ формула объема весеннего паводка, стекающего после начала посевного периода, приобретает следующий вид:

$$\int_{z_{\text{пос}}}^{t_c} = k_z dz = k_{\text{вес.макс}} \frac{(t_c - z_{\text{пос}})^{n+1}}{t_c^n (n+1)}. \tag{27}$$

Если взять средний случай, когда начало посевного периода совпадает по времени с серединой спада паводка, то $z_{\text{пос}} = 0{,}5t_c$ и формула (27) принимает вид

$$\int_{z_{\text{пос}}}^{t_c} k_z dz = k_{\text{вес. макс}} \frac{0{,}5^{n+1} t_c}{n+1}. \tag{28}$$

Формулы (28) и (26) отличаются только коэффициентом $0{,}5^{n+1}$. Если $n=3{,}7$, то $0{,}5^{3{,}7+1} = 0{,}039$. Отсюда следует, что в данном случае объем весеннего паводка, стекающий после начала посевного периода, составляет всего лишь 3,9% общего его объема.

Таким образом можно прийти к выводу, что на основании весеннего максимального стока невозможно определить средний сток в мае. Поэтому при исследовании посевного стока использованы непосредственные данные измерений.

На основании гидрометрических данных по 11 водосборам, где имеется многолетний ряд наблюдений, составлены эмпирические кривые обеспеченности среднего стока в мае за период с 1922 до 1954 г. В табл. 12 представлены ординаты этих кривых

Ординаты кривых обеспеченности среднего стока в мае (по данным наблюдений с 1922 по 1954 г.) в долях от многолетнего среднегодового стока

Наименование водосбора и створа	Средний минимальный сток $k_{95\%}$	Средний сток в мае при обеспеченности, %							
		2	5	10	20	30	40	50	90
Нарва—Васькнарва	0,42	3,20	2,78	2,25	1,71	1,50	1,33	1,21	0,92
Пуртсе—Люганузе	0,06	6,0	3,06	2,51	1,92	1,64	1,46	1,29	0,61
Лейвайыги—Паюба	0,09	2,68	2,38	2,04	1,57	1,28	1,07	0,90	0,44
Кейла—Кейла	0,11	3,20	2,90	2,48	1,98	1,44	1,09	0,84	0,45
Вазалемма—Урба	0,08	2,37	2,15	1,92	1,56	1,27	1,09	0,97	0,51
Вихтерпалу—Энглема	0,03	2,90	2,61	2,22	1,79	1,44	1,15	0,90	0,29
Пярну—Орекюла	0,10	2,44	2,22	2,01	1,70	1,42	1,15	0,92	0,46
С. Эмайыги—Тарту	0,40	4,48	3,90	2,92	1,98	1,61	1,46	1,30	0,75
Педья—Тырве	0,07	3,40	2,60	2,32	1,95	1,60	1,30	1,03	0,49
В. Эмайыги—Тыллисте	0,19	2,60	2,12	1,83	1,68	1,18	0,94	0,78	0,35
Выханду—Химмисте	0,32	3,0	2,76	2,36	1,76	1,36	1,10	0,95	0,64

в долях от многолетнего среднегодового стока. Из таблицы видно, что в водосборах рек Нарва—С. Эмайыги и Выханду, где средний минимальный сток имеет более высокие значения ($k_{95\%} \approx 0{,}40$), средний сток в мае также относительно высок. Такое увеличение среднего стока в мае в водосборах с более зарегулированным стоком является вполне обоснованным, поскольку в таких условиях увеличивается как продолжительность спада весеннего паводка, так и доля паводка в среднем стоке мая. Если, например, допустить, что при $k_{95\%} = 0{,}40$ $z_{пос} = 0{,}3t_c$, то доля объема спада весеннего паводка в посевной период на основании формул (26) и (27) составляет уже $0{,}7^{3{,}7+1} = 0{,}18 = 18\%$. Исключением является река Пуртсе в створе Люганузе, где при малой величине среднего минимального стока средний сток в мае имеет завышенные значения. Этот водосбор находится в районе заводов сланцевого бассейна и вследствие откачки и сброса в реку шахтных вод естественный режим стока, по-видимому, сильно нарушен.

Кроме данных, представленных в табл. 12, приведены к многолетнему ряду гидрометрические наблюдения на водосборах, имеющих данные десятилетних наблюдений. Так как в период с 1955 по 1958 г. средний сток в мае был чрезвычайно высок, то при удлинении рядов были использованы наблюдения с 1946 по 1955 г.

Отношения ординат кривых обеспеченности за период с 1922 по 1954 г. к ординатам за период с 1946 по 1955 г. представлены в табл. 13.

Таблица 13

Отношение ординат кривых обеспеченности среднего стока в мае за период с 1922 по 1954 г. к периоду с 1946 по 1955 г.

Наименование водосбора и створа	Отношение ординат при обеспеченности, %								Водосборы, где применимы соответствующие отношения
	2	5	10	20	30	40	50	90	
Нарва—Васькнарва	1,37	1,32	1,22	1,08	1,07	1,03	1,92	1,00	
Пуртсе—Люганузе		0,53	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,22	Бассейн Финского залива с р. Пюхайыги по р. Лообу
Лейвайыги—Паюба		0,57	0,85	1,25	1,28	1,26	1,25	1,05	Бассейн Финского залива с р. Вальге по р. Кейла
Кейла—Кейла		0,78	1,11	1,80	1,92	1,76	1,47	1,00	
Вазалемма—Урба		0,60	0,86	1,21	1,24	1,16	1,12	1,02	Притоки рек Казари и Пярну
Вихтерпалу—Энглема		0,54	1,00	1,19	1,24	1,25	1,23	1,00	
Пярну—Орекюла		0,55	0,87	1,21	1,09	1,19	1,10	1,00	
Среднее		0,56	0,91	1,20	1,19	1,20	1,15	1,01	
С. Эмайыги—Тарту	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Педья—Тырве		0,45	0,74	0,98	1,00	1,00	0,95	0,98	Северные притоки р. С. Эмайыги
В. Эмайыги—Тыллисте		0,59	0,82	1,39	1,34	1,31	1,20	0,83	Южные притоки р. С. Эмайыги и другие юго-восточные водосборы
Выханду—Химмисте	0,70	0,84	0,98	1,17	1,25	1,22	1,13	1,00	
Среднее	0,70	0,72	0,90	1,28	1,30	1,26	1,16	0,92	

Имея в виду, что отношения, приведенные в табл. 13, по отдельным рекам колеблются в значительных пределах, территория республики была разбита на районы и для каждого района были использованы свои отношения в соответствии в различными процентами обеспеченности.

Таблица 14

Ординаты кривых обеспеченности среднего стока в мае, приведенных к многолетнему ряду с 1922 по 1954 г., в долях от многолетнего среднегодового стока

Наименование водосбора и створа	Средний минимальный сток	Средний сток в мае при обеспеченности, %						
		2	10	20	30	40	50	90
Бассейн Финского залива								
Пюхайыги—Пюхайыэ	0,14	1,42	2,11	1,58	1,34	1,21	1,01	0,57
Кунда—Сями	0,30	2,23	2,01	1,83	1,68	1,53	1,38	0,72
Сельге—Аркна	0,20	2,54	2,25	1,95	1,72	1,54	1,36	0,85
Лообу—Арбаверe	0,27	2,23	2,03	1,74	1,58	1,42	1,31	0,93
Вальге—Ванакюла	0,28	2,60	2,26	1,96	1,71	1,50	1,33	0,76
Аавоя—Маапаю	0,08	2,90	2,52	2,08	1,78	1,52	1,33	0,64
Пирита—Нехату	0,10	2,46	2,05	1,69	1,41	1,15	0,97	0,92
Пирита—Паункюла	0,15	2,95	2,44	1,91	1,50	1,18	1,01	0,62
Лейвайыги—Суурсоо	0,04	2,50	2,04	1,59	1,30	1,09	0,93	0,44
Лейвайыги—Арувалла	0,02	2,42	2,02	1,58	1,22	0,95	0,76	0,30
Вяо-оя—Вяо	0,00	1,30	1,94	0,75	0,58	0,46	0,39	0,12
Бассейн Рижского залива								
Казари—Казари	0,07	2,27	1,83	1,37	1,06	0,88	0,72	0,28
Казари—Тээнузе	0,06	2,16	1,82	1,35	1,10	0,93	0,80	0,34
Вигала—Коноверe	0,14	1,76	1,36	1,13	0,98	0,88	0,78	0,44
Энге—Ядиверe	0,01	2,04	1,66	1,30	1,08	0,91	0,76	0,27
Осушительная система Рехемяэ	0,05	2,26	1,70	1,31	1,06	0,82	0,63	0,21
Паадремаа—Мытсусилла	0,05	1,70	1,48	1,26	1,07	0,95	0,81	0,37
Пярну—Тахкузе	0,12	1,88	1,60	1,40	1,25	1,10	0,96	0,49
Вяндра—Кийза	0,00	2,01	1,74	1,42	1,17	0,94	0,75	0,15
Кыпу—Римму	0,14	2,61	1,82	1,45	1,21	1,06	0,92	0,49
Навести—Аэсоо	0,11	2,49	1,94	1,60	1,34	1,14	0,93	0,42
Халлисте—Рийза	0,12	2,68	1,66	1,37	1,17	1,02	0,89	0,49
Пээгле-оя—Куустле	0,21	2,24	1,54	1,11	0,95	0,85	0,76	0,36
Рейю—Сурью	0,03	2,32	1,73	1,20	0,98	0,86	0,74	0,26
Мустйыги—Коннуверe	0,26	2,65	1,80	1,33	1,21	1,10	1,00	0,60
Бассейн Чудского озера								
Ыхне—Тырва	0,29	3,06	2,10	1,70	1,41	1,18	0,98	0,44
Эльва—Эльва	0,27	2,79	1,80	1,49	1,27	1,10	0,96	0,35
Ахья—Коорверe	0,41	2,44	1,74	1,38	1,18	1,06	0,95	0,51
Бассейн острова Сааремаа								
Пунапеа—Метскюла	0,03	2,28	1,84	1,34	0,96	0,68	0,49	0,18

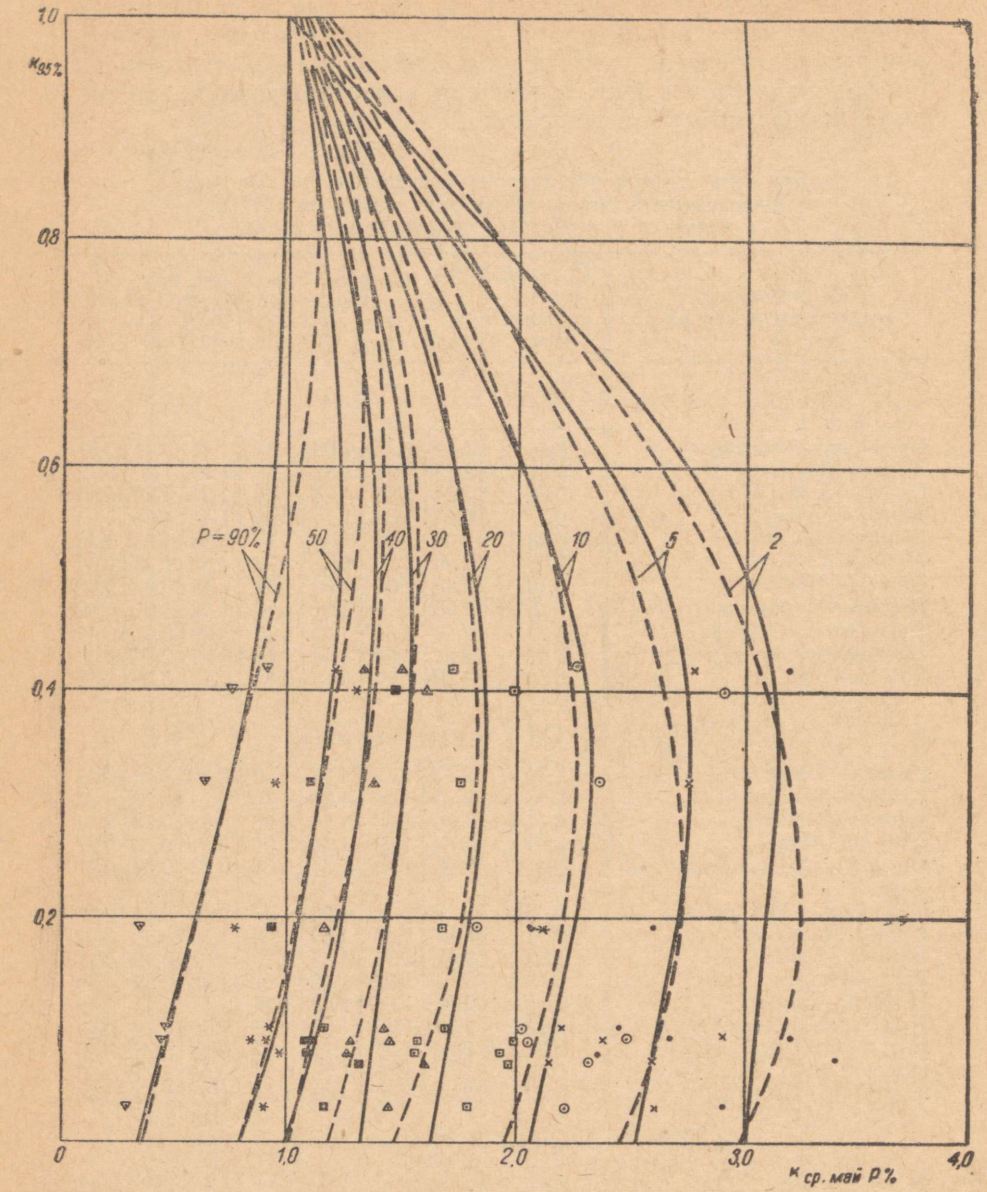


Рис. 11. Зависимость среднего стока в мае $k_{ср.май\ P\%}$ от среднего минимального стока $k_{95\%}$:

——— по данным наблюдений
– – – – – по формуле (34).

В табл. 14 представлены ординаты кривых обеспеченности стока, приведенные к многолетнему ряду наблюдений (с 1922 по 1954 г.).

Из таблицы видно, что с увеличением среднего минимального стока увеличивается и средний сток в мае.

На рис. 11 показана графическая связь между средним стоком в мае и средним минимальным стоком. На основании точек, нанесенных на график, проведены кривые для различных процентов обеспеченности (2, 5, 10, 20, 30, 40, 50 и 90%) среднего стока в мае.

При полностью урегулированном стоке, т. е. при приближении среднего минимального стока в долях от среднего многолетнего годового стока к единице ($k_{95\%}=1{,}0$), средний сток в мае, в тех же долях, также должен приближаться к единице ($k_{\text{ср. май}}=1{,}0$). Так как данные наблюдений имеются только до $k_{95\%}=0{,}42$, то кривые на рисунке экстраполированы до единицы.

Аналитическое выражение для семейства кривых, представленное на рис. 11, определено графическим способом. Из семейства кривых выбрана наиболее симметрическая кривая, соответствующая обеспеченности в 40%, координаты ее для случая, когда начало координат перенесено в вершину кривой, приведены в табл. 15.

Данные табл. 15 нанесены на рис. 12 в системе координат. На основании этого рисунка для кривой среднего стока в мае с обеспеченностью в 40% получена следующая формула:

$$\lg(1{,}38-k_{\text{ср. май }40\%})=2{,}0\lg(k_{95\%}-0{,}50)+0{,}19,$$

откуда

$$k_{\text{ср. май }40\%}=1{,}38-1{,}55(k_{95\%}-0{,}50)^{2{,}0}. \qquad (29)$$

Таблица 15

Координаты кривой среднего стока в мае с обеспеченностью в 40%

$k_{95\%}$	$k_{\text{ср. май }40\%}$	$\lvert k_{95\%}-0{,}5\rvert$	$1{,}38-k_{\text{ср. май }40\%}$	$\lg\lvert k_{95\%}-0{,}5\rvert$	$\lg(1{,}38-k_{\text{ср. май }40\%})$
0,00	1,00	0,50	0,38	−0,301	−0,420
0,10	1,14	0,40	0,24	−0,398	−0,620
0,20	1,24	0,30	0,14	−0,523	−0,854
0,30	1,32	0,20	0,06	−0,699	−1,022
0,40	1,37	0,10	0,01	−1,000	−2,000
0,50	1,38	0,00			
0,60	1,37	0,10	0,01	−1,000	−2,000
0,70	1,32	0,20	0,06	−0,699	−1,222
0,80	1,24	0,30	0,14	−0,523	−0,854
0,90	1,12	0,40	0,26	−0,398	−0,585
1,00	1,00	0,50	0,38	−0,301	−0,420

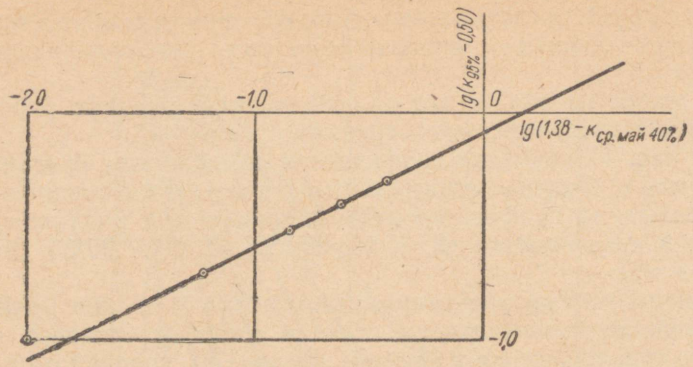


Рис. 12. Зависимость среднего стока в мае $k_{ср.\,май\,40\%}$ от среднего минимального стока $k_{95\%}$.

Таблица 16

Отношение среднего стока в мае с различной обеспеченностью к стоку с обеспеченностью в 40%

Обеспеченность		Средний сток в мае					$\eta_V = \frac{k_{ср.\,май\,P\%}}{k_{ср.\,май\,40\%}}$				
		при $k_{95\%}$									
$P\%$	$\lg(P+1)$	0,00	0,20	0,40	0,60	0,80	0,00	0,20	0,40	0.60	0,80
2	0,477	2,97	3,10	3,12	2.74	1.90	2,97	2,50	2,28	2,00	1,53
5	0,778	2,52	2,70	2,76	2,39	1.71	2,52	2,18	2,02	1,75	1,38
10	1,041	2,07	2,25	2,31	2.01	1,53	2,07	1,81	1,68	1,47	1,23
20	1,322	1,64	1,81	1,86	1,73	1,42	1,64	1,46	1,36	1,26	1,14
30	1,491	1,30	1,47	1,54	1.52	1,32	1,30	1,18	1,13	1,11	1,06
40	1,613	1,00	1,24	1.37	1.37	1,24	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
50	1,708	0,80	1,05	1.20	1.22	1.15	0,80	0,85	0,88	0,89	0,93
90	1,959	0,32	0,61	0,82	1,94	0,98	0,32	0,49	0,60	0,69	0,79

В табл. 16 показаны отношения (η_V) среднего стока в мае при различной обеспеченности к стоку с обеспеченностью в 40%.

На рис. 13 представлена графическая связь этих отношений с логарифмами процентов обеспеченности стока при различных значениях $k_{95\%}$. Для выпрямления линий связи на рис. 13 за абсциссы приняты логарифмы процентов обеспеченности стока, увеличение на единицу — $\lg(P+1)$.

На основании рис. 13 получаем следующую формулу отношений:

$$\eta_{Vk95\%} = m_V \lg(P+1) + n_V. \qquad (30)$$

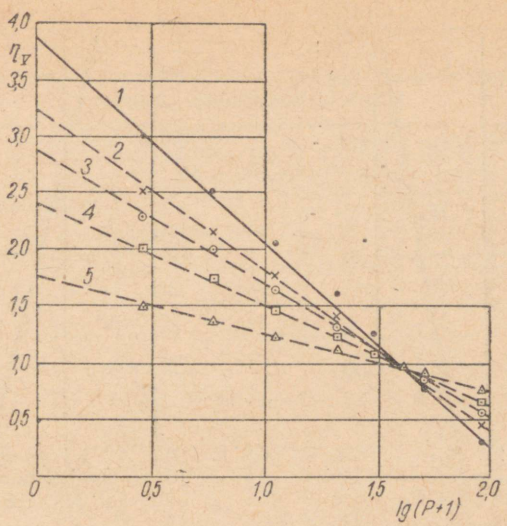


Рис. 13. Зависимость коэффициента η_V в формуле среднего стока в мае при $k_{95\%}$, равном: *1* — 0,0, *2* — 0,2, *3* —0,4, *4* — 0,6 и *5* — 0,8 от процента обеспеченности *P*.

Величины m_V и n_V представлены в табл. 17.

Таблица 17

Значения величин m_V и n_V в формуле (30)

$k_{95\%}$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
m_V	−1,88	−1,40	−1,16	−0,92	−0,50
n_V	3,90	3,24	2,88	2,40	1,76

На основании рис. 14 для углового коэффициента m_V в формуле (30) можно получить следующее выражение:

$$m_V = 1{,}70\, k_{95\%} - 1{,}80. \qquad (31)$$

Для свободного члена n_V в формуле (30) на основании рис. 15 получаем

$$n_V = -2{,}60\, k_{95\%} + 3{,}85. \qquad (32)$$

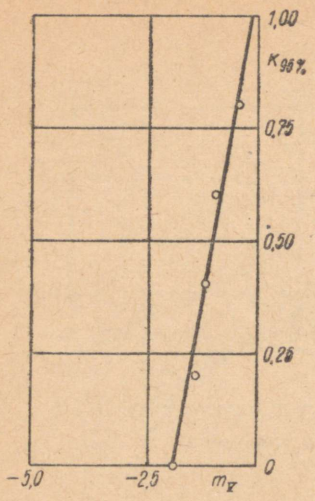


Рис. 14. Зависимость параметра m_V от среднего минимального стока $k_{95\%}$.

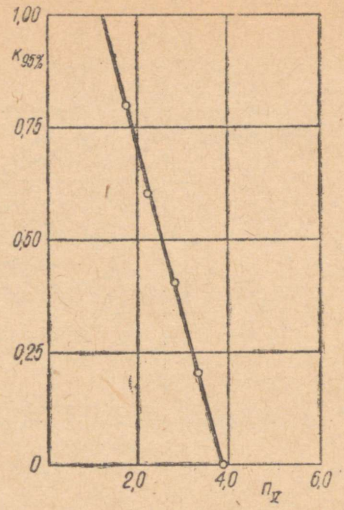


Рис. 15. Зависимость параметра n_V от среднего минимального стока $k_{95\%}$.

Подставляя в формуле (30) вместо углового коэффициента выражение (31) и вместо свободного члена выражение (32), получим для отношения η_V следующую формулу:

$$\eta_V = (1{,}70\, k_{95\%} - 1{,}80)\lg(P+1) - 2{,}60\, k_{95\%} + 3{,}85. \qquad (33)$$

Зная формулу среднего стока в мае при обеспеченности в 40% (29) и формулу отношения среднего стока в мае с обеспеченностью $P\%$ к стоку с обеспеченностью в 40% (33) $\eta_V = \frac{k_{\text{ср. май } P\%}}{k_{\text{ср. май } 40\%}}$, можно получить общую формулу для среднего стока в мае:

$$k_{\text{ср. май } P\%} = \eta_V [1{,}38 - 1{,}55\,(k_{95\%} - 0{,}50)^{2,0}]. \qquad (34)$$

Семейство кривых, вычисленных по формуле (34), показано на рис. 12 пунктиром. Можно заметить, что вычисленные для мая кривые среднего стока совпадают с эмпирическими кривыми с удовлетворительной точностью.

Сравнение вычисленных по формуле (34) величин среднего стока в мае при обеспеченности в 10 и 50%, приведенных в табл. 18, с фактическими показывает, что среднее квадратичное отклонение составляет около 17—18%. Наибольшие отклонения отмечаются в водосборе магистрального канала Вяо-оя, где вычисленный сток почти в два раза больше наблюдавшегося. Этот

Таблица 18

Фактические и вычисленные величины среднего стока в мае в долях от среднего многолетнего стока

Наименование водосбора и створа	Средний сток в мае при обеспеченности в 10 и 50%				Расхождение, %, при обеспеченности, %	
	фактический		вычисленный по формуле (34)			
	10	50	10	50	10	50
1	2	3	4	5	6	7
Бассейн Финского залива						
Нарва — Васькнарва	2,25	1,21	2,23	1,21	— 1	0
Пюхайыги — Пюхайыэ	2,11	1,01	2,19	0,97	— 4	+ 4
Пуртсе — Люганузе	2,54	1,29	2,08	0,86	+18	+33
Кунда — Сями	2,01	1,38	2,25	1,12	—12	+19
Сельге — Аркна	2,25	1,36	2,24	1,04	+ 1	+24
Лообу — Арбавере	2,03	1,31	2,26	1,10	—11	+16
Вальге—Ванакюла	2,26	1,33	2,26	1,11	0	+17
Аавоя — Маапаю	2,52	1,33	2,10	0,88	+17	+34
Пирита — Нехату	2,05	0,97	2,14	0,92	— 4	+ 5
Пирита — Паункюла	2,44	1,01	2,20	0,98	+10	+ 3
Лейвайыги — Паюба	2,04	0,90	2,12	0,90	— 4	0
Лейвайыги — Суурсоо	2,04	0,93	2,04	0,83	0	+11
Лейвайыги — Арувалла	2,02	0,76	1,99	0,80	+ 1	— 5
Вяо-оя — Вяо	1,04	0,39	1,95	0,76	—88	—95
Кейла — Кейла	2,48	0,84	2,15	0,93	+13	—11
Вазалемма — Урба	1,92	0,97	2,10	0,88	— 9	+ 9
Вихтерпалу — Энглема	2,22	0,90	2,01	0,82	+ 9	+ 9
Бассейн Рижского залива						
Казари — Казари	1,83	0,72	2,10	0,87	—15	—21
Казари — Тээнузе	1,82	0,80	2,08	0,86	—14	— 8
Вигала — Конувере	1,36	0,78	2,19	0,97	—61	—24
Энге — Ядивере	1,66	0,76	1,97	0,78	—19	— 3
Осушительная система Рехемяэ	1,70	0,63	2,06	0,85	—21	—35
Паадремаа — Мытсусилла	1,48	0,81	2,06	0,85	—39	— 5
Пярну — Орекюла	2,01	0,92	2,14	0,91	— 7	+ 1
Пярну — Тахкузе	1,60	0,96	2,16	0,94	—35	+ 2
Вяндра — Кийза	1,74	0,75	1,95	0,76	—12	— 1
Кыпу — Римму	1,82	0,92	2,15	0,93	—18	— 1
Навести — Аэсоо	1,94	0,93	2,15	0,93	—11	0
Халлисте — Рийза	1,66	0,89	2,17	0,94	—31	— 6
Пээгле — Куустле	1,54	0,76	2,24	1,04	—46	—37
Рейю — Сурью	1,73	0,74	2,01	0,81	—16	—10
Мустйыги — Коннувере	1,80	1,00	2,26	1,08	—26	— 8

Продолжение табл. 18

1	2	3	4	5	6	7
Бассейн Чудского озера						
С. Эмайыги — Тарту	2,92	1,30	2,24	1,20	+23	+17
Педья — Тырве	2,32	1,03	2,10	0,88	+ 9	+15
Ыхне — Тырва	2,10	0,98	2,26	1,12	− 8	−14
В. Эмайыги — Тыллисте	1,83	0,78	2,24	1,03	−23	−32
Эльва — Эльва	1,80	0,96	2,26	1,10	−26	−15
Выханду — Химмисте	2,36	0,95	2,26	1,14	+ 4	−20
Ахья — Коорвере	1,74	0,95	2,24	1,20	−29	−26
Бассейн острова Сааремаа						
Пунапеа — Метскюла	1,84	0,49	2,01	0,81	− 9	−65

водосбор, как уже указывалось, расположен на водонепроницаемом известняке, покрытом тонким слоем (0,5 *м*) четвертичных отложений. Ниже будет показано, что такие условия стока наблюдаются и в осушительных системах на тяжелых суглинистых и глинистых почвах. В осушительной системе Рехемяэ, расположенной на торфяных почвах, вычисленный сток на 15—35% больше фактического. Таким образом, при вычислении стока в осушенных водосборах по формуле (34) получаются результаты, на 15—100% превышающие фактический. Это повышение, по предварительным данным, составляет в случае торфяных почв 15—35, в слабоводопроницаемых почвах — 75—100 и в остальных случаях — 35—75%. Отсюда следует, что при осушении заболоченных минеральных земель нужно ожидать уменьшения среднего стока в мае до 50%.

Хорошие условия стока наблюдаются также в водосборе ручья Пээгле—Куустле, где открытые угодья со средним уклоном поверхности около 2,7% составляют 74% площади водосбора. Здесь вследствие ускоренной сработки весенней паводковой волны вычисленный сток в среднем на 45% больше фактического. Уменьшенные значения среднего стока в мае отмечаются также в водосборах Вигала—Коноверe и Паадремаа—Мытсусилла (при обеспеченности в 10%) и Пунапеа—Метскюла (при обеспеченности в 50%). В других водосборах расхождение между фактическим и вычисленным стоком не превышает 35%.

§ 7. СРЕДНИЙ ЛЕТНИЙ СТОК

Основная часть корневой массы большинства культур полевого севооборота развивается в июне и июле. Почва в это время должна быть хорошо аэрирована, и повышение уровня грунто-

вых вод выше нормы осушения в это время не допустимо. Норма осушения должна быть обеспечена и в остальное время вегетационного периода. Однако именно в начальный период вегетации глубина грунтовых вод имеет решающее значение для формирования урожая.

Для расчета уровня грунтовых вод на осушаемых участках в течение основной части вегетационного периода исследованы условия среднего стока за летние месяцы — июнь и июль.

При составлении кривых обеспеченности среднего летнего стока использованы гидрометрические данные с 1922 по 1954 г. и с 1946 по 1955 г.

В табл. 19 приведены ординаты кривых обеспеченности, определенные по данным наблюдений с 1922 по 1954 г.

На основе кривых обеспеченности среднего летнего стока, составленных по десятилетним данным, и отношений, представленных в табл. 20, были определены кривые обеспеченности тридцатитрехлетнего периода. Ординаты этих кривых представлены в табл. 21.

Как показывают данные табл. 19 и 21, увеличение среднего минимального стока не всегда ведет к увеличению среднего летнего стока. Если при малых значениях стока влияние запасов воды, регулирующих сток, довольно чувствительно, то при обеспеченности стока менее 10% эта связь оказывается слабой.

Другие физико-географические факторы, такие, как площадь водосбора, рельеф, заболоченность, лесистость и т. п., оказывают на режим среднего летнего стока столь слабое влияние, что по имеющимся данным четко выявить их роль невозможно.

Таблица 19

Ординаты кривых обеспеченности среднего летнего (июнь—июль) стока по данным наблюдений за период с 1922 по 1954 г. в долях от среднего многолетнего стока

Наименование водосбора и створа	Средний минимальный сток k_{95} %	Средний летний сток при обеспеченности, %						
		2	5	10	20	30	50	90
Пуртсе — Люганузе	0,06	1,82	1,32	0,95	0,68	0,53	0,33	0,08
Пирита — Нехату	0,10	2,16	1,88	1,56	0,89	0,63	0,32	0,11
Лейвайыги — Паюба	0,09	2,00	1,71	1,38	0,87	0,55	0,32	0,18
Кейла — Кейла	0,11	1,48	1,33	1,12	0,80	0,61	0,36	0,17
Вазалемма — Урба	0,08	1,64	1,40	1,11	0,76	0,55	0,33	0,15
Вихтерпалу — Энглемаа	0,03	1,28	1,17	0,99	0,70	0,49	0,25	0,07
Пярну — Орекюла	0,10	1,74	1,40	1,09	0,75	0,53	0,34	0,21
С. Эмайыги — Тарту	0,40	1,37	1,32	1,26	1,14	1,04	0.86	0,58
Педья — Тырве	0,07	1,40	1,20	0,96	0.70	0,52	0,32	0,15
В. Эмайыги — Тыллисте	0,19	2,30	1,88	1,34	0.94	0,77	0,56	0,28
Выханду — Химмисте	0,32	1,80	1,40	1,10	0,88	0,78	0,58	0,36

Отношения ординат кривых обеспеченности среднего летнего стока за период с 1922 по 1954 г. к периоду с 1946 по 1955 г.

Наименование водосбора и створа	Отношения ординат при обеспеченности, %							Водосборы, где применимы соответствующие отношения
	2	5	10	20	30	50	90	
Пуртсе — Люганузе	2,22	1,66	1,31	1,06	0,95	0,82	0,42	Бассейн Финского залива: Пюхайыги — Лообу
Пирита — Нехату	2,36	2,22	2,18	1,92	1,67	1,24	0,92	Лообу — Пирита
Лейва — Паюба	3,85	3,50	3,07	2,29	1,77	1,28	1,12	Лейвайыги
Кейла — Кейла	2,24	2,15	1,96	1,67	1,30	1,24	0,94	Водосборы рек Казари и Пярну
Вазалемма—Урба	2,68	2,50	2,24	1,87	1,55	1,24	1,00	
Вихтерпалу—Энглема	2,29	2,25	2,15	2,00	1,88	1,92	1,17	
Пярну — Орекюла	2,20	1,92	1,85	1,47	1,29	1,06	1,00	
Среднее	2,35	2,22	2,05	1,75	1,50	1,36	1,03	
С. Эмайыги — Тарту	0,84	0,86	0,92	1,05	1,14	1,10	1,16	
Педья — Тырве	1,27	1,25	1,26	1,40	1,30	0,94	0,65	
В. Эмайыги — Тыллисте	1,26	1,25	1,37	1,31	1,33	1,33	1,33	Южные притоки р. С. Эмайыги и другие юго-восточные водосборы
Выханду — Химмисте	1,34	1,22	1,16	1,22	1,30	1,23	1,06	
Среднее	1,30	1,24	1,26	1,26	1,32	1,28	1,20	

Таким образом, большие расхождения в величинах среднего летнего стока по различным водосборам, по-видимому, обусловлены такими случайными метеорологическими явлениями, как распределение осадков.

Значения среднего летнего стока с различной обеспеченностью, приведенные в табл. 19, сопоставлены на рис. 16 со средним минимальным стоком. Из рис. 16 видно, что существует зависимость между средним летним и средним минимальным стоками.

Как и в случае среднего стока в мае (см. рис. 11), так и здесь при увеличении относительного среднего минимального стока до единицы, т. е. до среднего годового стока, относительный сред-

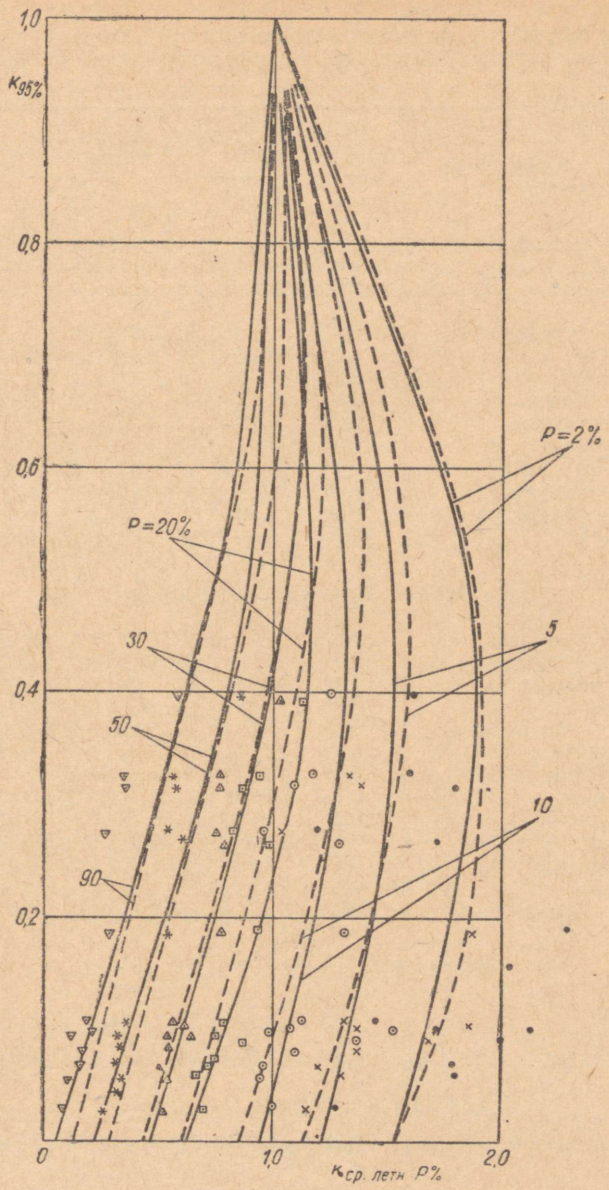


Рис. 16. Зависимость среднего летнего стока $k_{ср.\ летн\ P\%}$ от среднего минимального стока $k_{95\%}$:
———— по данным наблюдений
– – – – – по формуле (40).

Таблица 21

Ординаты кривых обеспеченности среднего летнего стока, приведенные к многолетнему ряду с 1922 по 1954 г., в долях от среднего многолетнего стока

Наименование водосбора и створа	Средний минимальный сток	Средний летний сток при обеспеченности, %						
		2	5	10	20	30	50	90
Бассейн Финского залива								
Пюхайыги—Пюхайыэ	0,14	1,66	1,30	0,97	0,78	0,65	0,47	0,24
Кунда — Сями	0,30	1,87	1,60	1,38	1,14	0,97	0,75	0,58
Сельге — Аркна	0,20	1,75	1,45	1,27	1,07	0,92	0,71	0,41
Лообу — Арбавере	0,27	1,92	1,66	1,39	1,12	0,96	0,72	0,42
Вальге — Ванакюла	0,28	1,79	1,50	1,20	0,90	0,77	0,63	0,44
Аавоя — Маапаю	0,08	1,71	1,58	1,31	0,98	0,76	0,49	0,24
Пирита — Паункюла	0,15	1,74	1,59	1,35	1,00	0,79	0,54	0,22
Лейвайыги — Суурсоо	0,04	2,00	1,44	0,94	0,60	0,44	0,32	0,19
Лейвайыги — Арувалла	0,02	1,89	1,50	1,10	0,70	0,50	0,30	0,12
Вяо-оя — Вяо	0,00	1,00	0,50	0,28	0,15	0,10	0,03	0,00
Бассейн Рижского залива								
Казари — Казари	0,07	1,36	1,16	0,92	0,62	0,41	0,29	0,14
Казари — Тээнузе	0,06	1,20	0,88	0,72	0,52	0,40	0,30	0,13
Вигала — Коновере	0,14	1,50	1,32	1,04	0,70	0,56	0,44	0,23
Энге—Ядивере	0,01	1,48	1,16	0,85	0,44	0,24	0,12	0,04
Паадремаа — Мытсусилла	0,05	1,66	1,35	0,96	0,53	0,36	0,26	0,09
Пярну—Тахкузе	0,12	2,10	1,78	1,40	0,91	0,62	0,47	0,21
Вяндра — Кийза	0,00	1,48	1,20	0,82	0,42	0,29	0,17	0,02
Кыпу — Римму	0,11	1,86	1,53	1,36	0,90	0,62	0,37	0,16
Навести — Аэсоо	0,11	1,89	1,57	1,18	0,72	0,51	0,35	0,17
Халлисте — Рийза	0,12	1,91	1,64	1,34	0,80	0,57	0,41	0,17
Пээгле — Куустле	0,21	2,30	2,02	1,56	1,08	0,84	0,52	0,25
Рейю — Сурью	0,03	1,91	1,59	1,16	0,62	0,34	0,17	0,06
Мустйыги — Коннувере	0,26	2,21	1,78	1,45	1,01	0,82	0,61	0,38
Бассейн Чудского озера								
Ыхне — Тырва	0,29	1,74	1,48	1,28	1,01	0,85	0,61	0,37
Эльва — Эльва	0,27	1,40	1,21	1,12	0,98	0,86	0,64	0,30
Ахья — Коорвере	0,41	1,96	1,70	1,47	1,13	0,91	0,71	0,52
Бассейн острова Сааремаа								
Пунапеа — Метскюла	0,03	1,44	1,13	0,68	0,28	0,18	0,14	0,06

ний летний сток должен приближаться к единице при любом проценте обеспеченности.

Формула для семейства кривых на рис. 16 была выведена способом, аналогичным выведению формулы для майского сред-

него стока. Из всех кривых была выбрана наиболее симметричная, соответствующая обеспеченности стока в 10%.

В табл. 22 на основании рис. 16 приведены координаты кривой среднего летнего стока в зависимости от среднего минимального стока при обеспеченности в 10%. При этом за начало координат принята вершина кривой.

Таблица 22

Координаты кривой среднего летнего стока при обеспеченности в 10% в зависимости от среднего минимального стока ($k_{95\%}$)

$k_{95\%}$	$k_{\text{ср. летн } 10\%}$	$\lvert k_{95\%} - 0{,}5 \rvert$	$1{,}32 - k_{\text{ср. летн } 10\%}$	$\lg \lvert k_{95\%} - 0{,}50 \rvert$	$\lg (1{,}32 - k_{\text{ср. летн } 10\%})$
0,00	0,92	0,50	0,40	−0,301	−0,398
0,10	1,03	0,40	0,29	−0,398	−0,538
0,20	1,17	0,30	0,15	−0,523	−0,824
0,30	1,27	0,20	0,05	−0,699	−1,301
0,40	1,31	0,10	0,01	−1,000	−2,000
0,50	1,32	0,00	0,00		
0,60	1,30	0,10	0,02	−1,000	−1,699
0,70	1,23	0,20	0,09	−0,699	−1,046
0,80	1,15	0,30	0,17	−0,523	−0,770
0,90	1,11	0,40	0,21	−0,398	−0,678
1,00	1,00	0,50	0,32	−0,301	−0,495

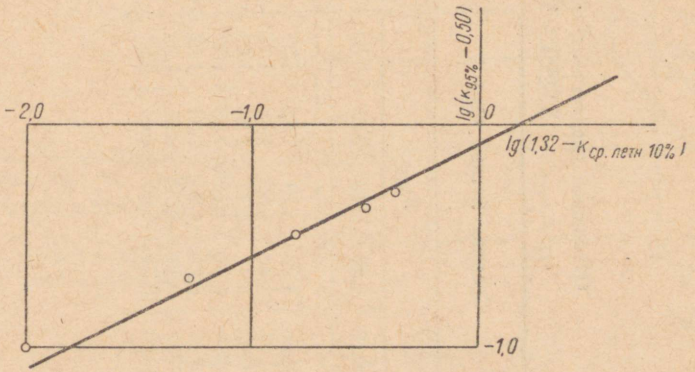


Рис. 17. Зависимость среднего летнего стока $k_{\text{ср. летн } 10\%}$ от среднего минимального стока $k_{95\%}$.

На рис. 17 показана графическая связь между логарифмами среднего летнего стока обеспеченностью в 10% и логарифмами среднего минимального стока. Аналитическое выражение этой связи следующее:

Таблица 23

Отношение среднего летнего стока с различной обеспеченностью к стоку с обеспеченностью в 10 %

Обеспеченность		Средний летний сток					$\eta_л = \frac{k_{ср.\ летн\ P\%}}{k_{ср.\ летн\ 10\%}}$					$\lg(\eta_л + 1)$				
		$k_{95\%}$					$k_{95\%}$					$k_{95\%}$				
$P\%$	$(P+1)$	0,00	0,20	0,40	0,60	0,80	0,00	0,20	0,40	0,60	0,80	0,00	0,20	0,40	0,60	0,80
2	0,477	1,56	1,78	1,88	1,75	1,37	1,70	1,52	1,44	1,36	1,19	0,431	0,401	0,387	0,373	0,340
3	0,778	1,21	1,44	1,52	1,48	1,23	1,32	1,23	1,16	1,13	1,07	0,366	0,348	0,354	0,328	0,316
10	1,041	0,92	1,17	1,31	1,29	1,15	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,301	0,301	0,301	0,301	0,301
20	1,322	0,60	0,94	1,14	1,13	1,06	0,65	0,80	0,87	0,88	0,92	0,218	0,255	0,272	0,276	0,283
30	1,492	0,42	0,74	0,95	1,03	1,02	0,46	0,63	0,72	0,80	0,89	0,164	0,212	0,236	0,255	0,276
50	1,708	0,19	0,53	0,77	0,96	0,98	0,21	0,45	0,58	0,74	0,85	0,083	0,161	0,199	0,241	0,267
90	1,959	0,03	0,33	0,66	0,84	0,94	0,03	0,28	0,44	0,65	0,82	0,013	0,107	0,158	0,218	0,260

$$\lg(1{,}32-k_{\text{ср. летн }10\%})=2{,}00\lg(k_{95\%}-0{,}50)+0{,}20$$

или

$$k_{\text{ср. летн }10\%}=1{,}32-1{,}58(k_{95\%}-0{,}50)^{2{,}0}. \qquad (35)$$

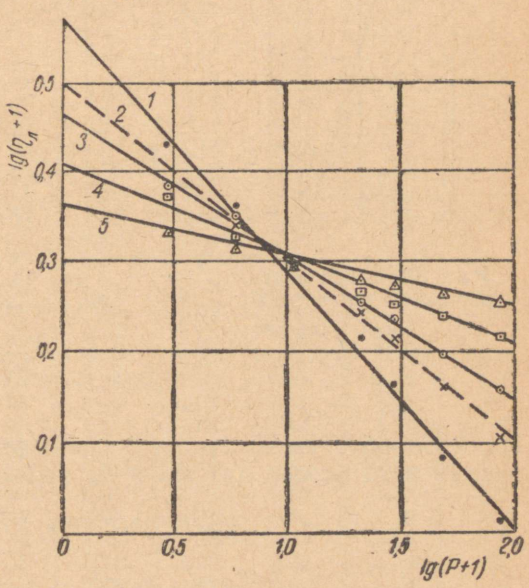
Отношения абсцисс других кривых рис. 16 к абсциссе кривой с обеспеченностью в 10% приведены в табл. 23.

Связь логарифмов этих отношений ($\eta_л$), увеличенных на единицу ($\eta_л+1$), с логарифмами соответствующих процентов обеспеченности стока ($P+1$) показана на рис. 18. На основе последнего получено следующее логарифмическое выражение:

$$\lg(\eta_л+1)=-n_л\lg(P+1)+m_л$$

или

$$\eta_л=\frac{m_л}{(P+1)^{n_л}}-1. \qquad (36)$$



Р и с. 18. Зависимость коэффициента $\eta_л$ в формуле среднего стока при $k_{95\%}$, равном: *1* — 0,0, *2* — 0,2, *3* — 0,4, *4* — 0,6 и *5* — 0,8 от процента обеспеченности *P*.

Таблица 24

Значения $m_л$ и $n_л$ в формуле (36)

$k_{95\%}$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
$m_л$	3,63	3,16	2,82	2,57	2,29
$n_л$	0,28	0,20	0,16	0,10	0,06

В табл. 24 приведены значения $m_л$ и $n_л$ при разных $k_{95\%}$.

Если в последнем уравнении числитель первого члена правой части обозначить через $m_л$ и в знаменателе показатель степени

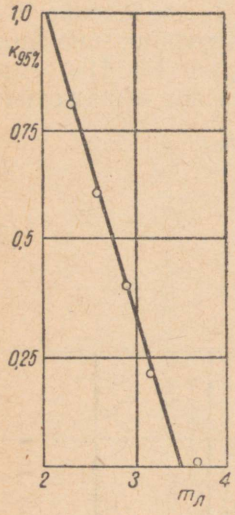


Рис. 19. Зависимость параметра $m_л$ от среднего минимального стока $k_{95\%}$.

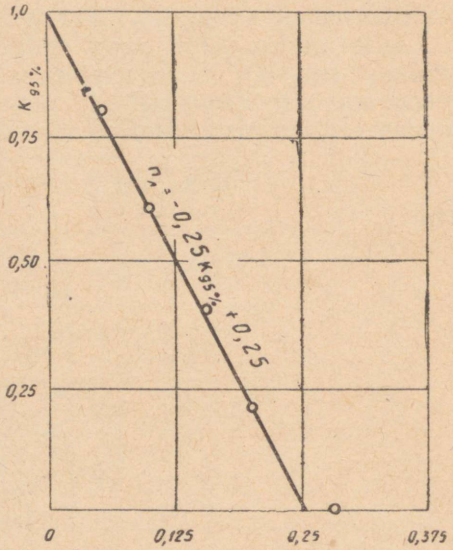


Рис. 20. Зависимость параметра $n_л$ от среднего минимального стока $k_{95\%}$.

процента обеспеченности $(P+1)$ — через $n_л$, то на основании рис. 19 и 20 можно для $m_л$ и $n_л$ вывести следующие формулы:

$$m_л = -1{,}50k_{95\%} + 3{,}50 \qquad (37)$$

и

$$n_л = -0{,}25k_{95\%} + 0{,}25. \qquad (38)$$

Зная $m_л$ и $n_л$, пишем для отношения $\eta_л$ общую формулу

$$\eta_л = \frac{3{,}50 - 1{,}50k_{95\%}}{(P+1)^{0{,}25-0{,}25k_{95\%}}} - 1. \qquad (39)$$

Поскольку

$$\eta_л = \frac{k_{\text{ср. летн } P\%}}{k_{\text{ср. летн } 10\%}},$$

то

$$k_{\text{ср. летн } P\%} = \eta_л k_{\text{ср. летн } 10\%}.$$

Таблица 25

Сравнение фактических и вычисленных величин среднего летнего стока

Наименование водосбора и створа	Средний летний сток при обеспеченности 10 и 50%				Расхождение, %, при обеспеченности, %	
	фактический		вычисленный по формуле (40)			
	10	50	10	50	10	50
Бассейн Финского залива						
Пюхайыги—Пюхайыэ	1,09	0,53	1,03	0,42	+ 5	+21
Пуртсе—Люганузе	0,95	0,33	0,95	0,36	0	— 9
Кунда—Сями	1,38	0,75	1,28	0,64	+ 7	+15
Сельге—Аркна	1,27	0,71	1,16	0,56	+ 9	+21
Лообу—Арбаверe	1,39	0,72	1,24	0,64	+11	+11
Вальге—Ванакюла	1,20	0,63	1,25	0,64	— 4	— 2
Аавоя—Маапаю	1,31	0,49	0,99	0,38	+24	+22
Пирита—Нехату	1,56	0,32	1,02	0,41	+24	—28
Пирита—Паункюла	1,35	0,54	1,09	0,48	+19	+11
Лейвайыги—Паюба	1,38	0,32	1,00	0,40	+28	—25
Лейвайыги—Суурсоо	0,94	0,32	0,92	0,34	+ 2	— 6
Лейвайыги—Арувалла	1,10	0,30	0,88	0,31	+20	— 3
Вяо-оя—Вяо	0,28	0,03	0,84	0,28		
Кейла—Кейла	1,12	0,36	1,03	0,42	+ 8	—17
Вазалемма—Урба	1,11	0,33	0,99	0,38	+10	—15
Вихтерпалу—Энглема	0,99	0,25	0,90	0,32	+ 9	—28
Бассейн Рижского залива						
Казари—Казари	0,92	0,29	0,97	0,38	— 5	—31
Казари—Тээнузе	0,72	0,30	0,95	0,36	—32	—20
Вигала—Коноверe	1,04	0,44	1,08	0,46	— 4	— 5
Энге—Ядивере	0,85	0,12	0,86	0,30	— 1	—250
Паадремаа—Мытсусилла	0,96	0,26	0,94	0,34	+ 2	—31
Пярну—Орекюла	1,09	0,34	1,01	0,41	+ 7	—21
Пярну—Тахкузе	1,40	0,47	1,05	0,44	+25	+ 6
Вяндра—Кийза	0,82	0,17	0,84	0,28	— 2	—65
Кыпу—Римму	1,36	0,37	1,03	0,42	+24	—14
Навести—Аэсоо	1,18	0,35	1,03	0,42	+13	—20
Халлисте—Рийза	1,34	0,41	1,05	0,44	+22	— 7
Пээгле—Куустле	1,56	0,52	1,18	0,56	+24	— 8
Рейю—Сурью	1,16	0,17	0,90	0,32	+22	—88
Мустйыги—Коннувере	1,45	0,61	1,22	0,61	+16	0
Бассейн Чудского озера						
С. Эмайыги—Тарту	1,26	0,86	1,36	0,80	— 8	+ 7
Педья—Тырве	0,96	0,32	0,97	0,38	— 1	—19
Ыхне—Тырва	1,28	0,61	1,26	0,66	+ 2	— 8
В. Эмайыги—Тыллисте	1,34	0,56	1,15	0,53	+14	+ 5
Эльва—Эльва	1,12	0,64	1,24	0,63	—11	+ 1
Выханду—Химмисте	1,10	0,58	1,30	0,70	—18	—21
Ахья—Коорверe	1,47	0,71	1,36	0,82	+ 7	—16
Бассейн острова Сааремаа						
Пунапеа—Метскюла	0,68	0,14	0,90	0,32	—32	—228

Заменяя $k_{ср.летн\ 10\%}$ формулой (35), получаем для относительного среднего летнего стока

$$k_{ср.летн\ P\%} = \eta_л [1{,}32 - 1{,}58 (k_{95\%} - 0{,}50)^{2{,}0}], \qquad (40)$$

где $\eta_л$ определяется по формуле (39).

Кривые среднего летнего стока, вычисленные по формуле (40), обозначены на рис. 16 пунктиром. Эти кривые показывают, что вычисленные величины стока с удовлетворительной точностью совпадают с фактическими.

В табл. 25 представлены расхождения между эмпирическими и вычисленными по формуле (40) величинами среднего летнего стока при обеспеченности в 10 и 50%. Вычисления проведены по всем водотокам, приведенным в табл. 19 и 21. Исключение из общей картины составляет магистральный канал Вяо-оя, где вычисленный средний летний сток в несколько раз больше фактического. В этом водосборе происходит быстрое стекание весенних талых вод и летних дождевых паводков. Вследствие слабой защищенности местности от ветра величина испарения с почвы высокая. Такие условия, по-видимому, вызывают сильное занижение среднего летнего стока в водосборе Вяо-оя. Необходимые поправки к вычислению стока с подобных водосборов анализируются ниже при исследовании режима стока с осушительных систем.

В остальных водосборах расхождение между фактическим и вычисленным стоками при обеспеченности в 10% не превышает 32%. При обеспеченности в 50% большие отклонения от вычисленного стока отмечаются в водосборах Энге—Ядивере, Вяндра—Кийза, Рейю—Сурью и Пунапеа—Метскюла. Здесь, по-видимому, вследствие слабой водопроницаемости почв наблюдаются малые величины стока и вычисленный сток превышает данные наблюдений до 2,5 раза. При этом расхождение в модулях стока не превышает 1,6 *л/сек км*^{2}. В других водосборах расхождения не превышают 31%. Среднее квадратичное отклонение по всем остальным водосборам при обеспеченности в 10% равно 16 и при обеспеченности 50% — 17%.

§ 8. СРЕДНИЙ ОСЕННИЙ СТОК

Осушительные системы должны не только обеспечить водный режим осушенных почв, необходимый для выращивания растений, но и создать условия для беспрепятственной работы сельскохозяйственных машин. Для своевременного выполнения механизированной уборки урожая уровень грунтовых вод на осушенных минеральных почвах в период уборки должен располагаться на 40—50, а в торфяных почвах на 50—60 *см* ниже поверхности. В противном случае урожай может остаться неубранным.

Если при осушении не созданы необходимые условия аэрации и увлажнения почвы в вегетационный период, теряется какая-то доля урожая. При невозможности произвести механизированную уборку урожай может погибнуть полностью.

В целях дальнейшей разработки основ для проектирования осушительных систем был исследован режим среднего стока за осенние месяцы (сентябрь—октябрь).

В табл. 26 представлены ординаты эмпирических кривых обеспеченности среднего осеннего стока (в долях от модуля многолетнего среднегодового стока). Данные этой таблицы показывают, что в водосборах с большими озерами или с хорошо водопроницаемыми почво-грунтами, как, например, у рек Нарва, Суур-Эмайыги, Вяйке-Эмайыги и Выханду, величина среднего осеннего стока изменяется в меньших пределах, чем в водосборах с малыми запасами воды, регулирующими сток (реки Пуртсе, Вихтерпалу и др.).

Таблица 26

Ординаты кривых обеспеченности среднего осеннего (сентябрь—октябрь) стока по данным наблюдений с 1922 по 1954 гг. в долях от среднегодового стока

Наименование водосбора и створа	Средний минимальный сток $K_{95\%}$	Средний сток осеннего периода в долях от многолетнего среднегодового стока при обеспеченности, %							
		2	5	10	20	30	40	50	90
Нарва—Васькнарва	0,42	2,10	1,23	1,15	1,08	1,00	0,90	0,83	0,54
Пуртсе—Люганузе	0,06	3,65	3,09	2,43	1,83	1,42	1,02	0,74	0,11
Пирита—Нехату	0,10	2,82	2,14	1,70	1,30	1,08	0,86	0,61	0,17
Лейвайыги—Паюба	0,09	3,10	2,50	1,84	1,52	1,27	1,00	0,77	0,12
Кейла—Кейла	0,11	3,10	2,40	1,65	1,37	1,15	0,85	0,63	0,14
Вазалемма—Урба	0,08	3,23	2,39	1,81	1,46	1,22	1,08	0,88	0,14
Вихтерпалу—Энглема	0,03	3,50	2,50	1,84	1,50	1,20	1,00	0,82	0,14
Пярну—Орекюла	0,10	3,30	2,60	1,94	1,46	1,22	1,02	0,88	0,18
С. Эмайыги—Тарту	0,40	2,40	1,55	1,35	0,13	0,91	0,84	0,79	0,40
Педья—Тырве	0,07	3,20	2,68	2,04	1,35	1,04	0,84	0,62	0,16
В. Эмайыги—Тыллисте	0,19	2,30	2,10	1,84	1,42	1,13	0,87	0,71	0,24
Выханду—Химмисте	0,32	2,30	2,00	1,68	1,23	1,10	1,00	0,80	0,41

Запасы воды, регулирующие сток в водосборе, хорошо характеризуются средним минимальным стоком (или среднесуточным стоком с обеспеченностью в 95%). Поэтому средний минимальный сток может быть принят, как и при среднем стоке мая и летнего периода, за определяющий показатель режима среднего осеннего стока.

Кроме данных, приведенных в табл. 26, использованы так-

же гидрометрические материалы по 27 постам, где наблюдения проводились с 1946 по 1955 г.

На основании отношений ординат кривых обеспеченности 33-летнего периода к 10-летнему периоду, представленных в табл. 27, кривые обеспеченности 10-летнего периода приведены к периоду 1922—1954 гг. Ординаты последних показаны в табл. 28.

Таблица 27

Отношение ординат кривых обеспеченности среднего осеннего стока за период с 1922 по 1954 гг. к периоду с 1946 по 1955 гг.

Наименование водосбора и створа	Отношение ординат при обеспеченности, %							Водосборы, где применены соответствующие отношения
	2	5	10	20	30	50	90	
Пуртсе—Люганузе	1,20	1,19	1,12	1,09	1,11	1,20	1,00	От водосбора р. Пюхайыги до водосбора р. Вальге
Пирита—Лагеди	1,32	1,09	0,96	0,91	0,94	1,00	1,00	Бассейн Финского и Рижского заливов, начиная с р. Аавоя
Лейвайыги—Паюба	1,32	1,20	1,00	1,04	1,09	1,24	1,50	
Кейла—Кейла	1,49	1,25	0,87	0,90	0,97	0,95	1,17	
Вазалемма—Урба	1,44	1,16	1,13	1,12	1,26	—	—	
Вихтерпалу—Энглема	1,49	1,15	0,94	0,99	1,02	1,24	—	
Пярну—Орекюла	1,40	1,17	0,98	0,91	0,95	1,13	1,39	
Среднее	1,42	1,17	0,99	0,98	1,04	1,09	1,19	
С. Эмайыги—Тарту	1,34	1,05	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Педья—Тырве	1,10	1,00	0,88	0,79	0,82	1,11	1,14	
В. Эмайыги—Тыллисте	1,07	1,06	1,07	1,04	1,07	1,21	1,00	Водосборы Чудского озера, исключая С. Эмайыги
Выханду—Химмисте	1,30	1,14	1,11	1,07	1,08	1,08	1,00	
Среднее	1,18	1,10	1,09	1,06	1,08	1,14	1,00	

На основании данных табл. 26 на рис. 21 представлена связь между средним осенним стоком различной обеспеченности ($k_{\text{ср.летн}\,P\%}$) и средним минимальным стоком ($k_{95\%}$). Как показывает расположение точек на рисунке, для каждого процента обеспеченности среднего осеннего стока можно построить отдельную прямую. При приближении среднего минимального

Ординаты кривых обеспеченности среднего осеннего стока, приведенных к многолетнему ряду с 1922 по 1954 гг., в долях от среднего многолетнего стока

Наименование водосбора и створа	Средний минимальный сток $k_{95\%}$	Средний осенний сток при обеспеченности, %						
		2	5	10	20	30	50	90
Бассейн Финского залива								
Пюхайыги—Пюхайыэ	0,14	3,18	2,77	2,11	1,42	1,03	0,65	0,12
Кунда—Сями	0,30	2,85	2,44	1,89	1,38	1,06	0,70	0,32
Сельге—Аркна	0,20	2,26	2,01	1,65	1,20	0,92	0,57	0,20
Лообу—Арбаверe	0,27	2,48	2,27	1,84	1,48	1,18	0,74	0,28
Вальге—Ванакюла	0,28	2,34	2,12	1,84	1,46	1,22	0,78	0,25
Аавоя—Маапаю	0,08	3,40	2,84	2,04	1,56	1,30	0,92	0,18
Пирита—Паункюла	0,15	3,22	2,55	1,68	1,28	1,08	0,75	0,18
Лейвайыги—Суурсоо	0,04	3,40	2,86	2,20	1,78	1,46	0,86	0,07
Лейвайыги—Арувалла	0,02	3,24	2,78	2,14	1,76	1,56	0,89	0,02
Вяо-оя—Вяо	0,00	3,64	3,10	2,40	1,97	1,60	0,95	0,00
Бассейн Рижского залива								
Казари—Казари	0,07	2,80	2,42	1,88	1,60	1,36	0,94	0,15
Казари—Тээнузе	0,06	3,00	2,54	1,94	1,62	1,38	0,85	0,12
Вигала—Коноверe	0,14	3,30	2,60	2,00	1,62	1,30	0,77	0,17
Энге—Ядивере	0,01	2,90	2,32	1,70	1,24	0,96	0,53	0,05
Осушительная система Рехемяэ	0,05	3,64	2,80	2,16	1,64	1,29	0,67	0,04
Паадремаа—Мытсусилла	0,05	3,08	2,56	1,88	1,37	1,04	0,51	0,07
Пярну—Тахкузе	0,12	3,05	2,39	1,82	1,45	1,17	0,74	0,13
Пярну—Кийза	0,00	3,29	2,68	2,06	1,65	1,31	0,67	0,03
Кыпу—Римму	0,11	2,87	2,25	1,76	1,47	1,24	0,84	0,14
Навести—Аэсоо	0,11	2,94	2,39	2,01	1,64	1,30	0,71	0,07
Халлисте—Рийза	0,12	3,15	2,59	2,01	1,64	1,34	0,86	0,15
Пээгле—Куустле	0,21	3,02	2,40	1,86	1,54	1,32	0,91	0,28
Рейю—Сурью	0,03	2,83	2,27	1,77	1,46	1,21	0,73	0,05
Мустйыги—Коннувере	0,26	1,92	1,74	1,56	1,31	1,11	0,79	0,30
Бассейн Чудского озера								
Болотный участок Тоома	0,01	2,52	2,20	1,80	1,34	1,03	0,60	0,08
Ыхне—Тырва	0,29	2,47	2,15	1,91	1,48	1,20	0,86	0,42
Эльва—Эльва	0,27	2,80	2,45	2,17	1,70	1,31	0,82	0,33
Ахья—Коорверe	0,41	2,85	2,41	2,05	1,65	1,34	0,97	0,49
Бассейн острова Сааремаа								
Пунапеа—Метскюла	0,03	3,00	2,50	1,88	1,51	1,20	0,65	0,04

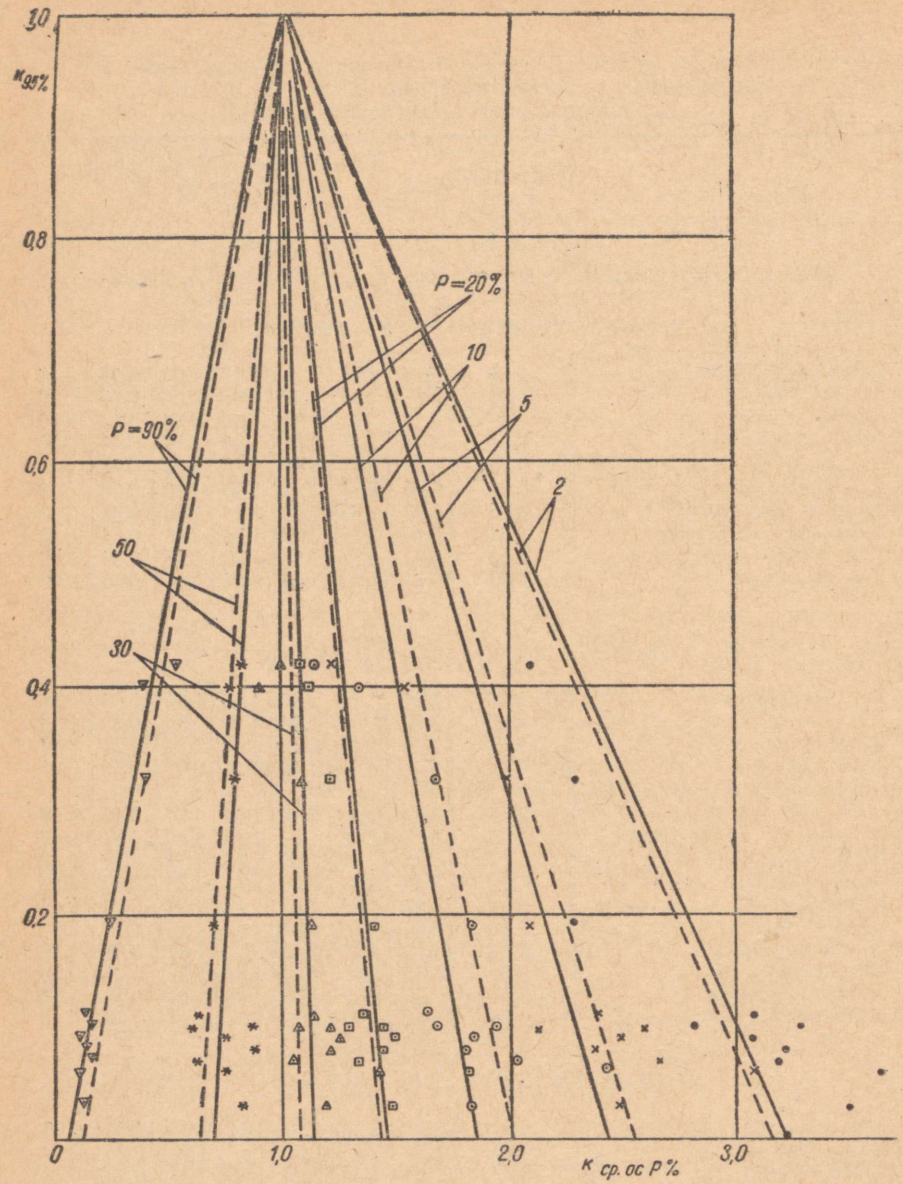


Рис. 21. Зависимость среднего осеннего стока $k_{\text{ср. ос } P\%}$ от среднего минимального стока $k_{95\%}$:

———— по данным наблюдений
– – – – – по формуле (44).

стока к среднему годовому стоку, т. е. к принятой нами единице, средний осенний сток должен также приближаться к единице. Поэтому все прямые доведены до единицы.

Точки на рис. 21 для стока одной и той же обеспеченности, соответствующие различным водосборам, не располагаются точно на прямой, так как, кроме среднего минимального стока, имеются и другие факторы, влияющие на величину среднего осеннего стока. К числу таких факторов можно отнести неравномерное распределение осадков. Влияние их распределения не полностью сглаживается при использовании относительных величин стока.

Известно, что отношение между среднегодовым и средним осенним стоком для различных водосборов не постоянно. Оно зависит, с одной стороны, от объема изменяющихся запасов гравитационной воды и, с другой, от характера распределения осадков. Влияние изменения запасов воды учитывается величиной среднего минимального стока. Однако воздействие распределения осадков оказывается столь случайным, что на основании имеющихся данных учесть его невозможно.

Для прямых рис. 21 можно написать следующее уравнение:

$$k_{\text{ср. ос } P\%} = m_0 k_{95\%} + n_0. \qquad (41)$$

В табл. 29 представлены величины m_0 и n_0 при разных процентах обеспеченности среднего осеннего стока.

Таблица 29

Величины m_0 и n_0 в формуле (41)

Обеспеченность, %	2	5	10	20	30	50	90
m_0	−2,24	−1,46	−0,88	−0,44	−0,12	0,32	0,92
n_0	3,24	2,46	1,88	1,44	1,22	0,68	0,08

На основании рис. 22 можно для m_0 и n_0 написать следующие выражения:

$$m_0 = 2{,}06 \lg(P+1) - 3{,}16 \qquad (42)$$

и

$$n_0 = -2{,}06(P+1) + 4{,}16. \qquad (43)$$

Используя выражения (42) и (43), получаем для среднего осеннего стока

$$k_{\text{ср. ос } P\%} = k_{95\%}[2{,}06 \lg(P+1) - 3{,}16] - 2{,}06 \lg(P+1) + 4{,}16, \qquad (44)$$

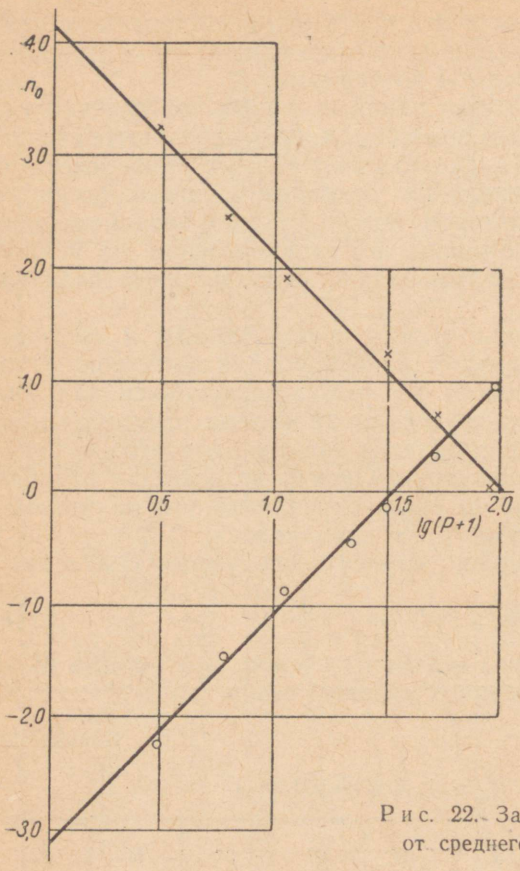


Рис. 22. Зависимость параметров m_0 и n_0 от среднего минимального стока $k_{95\%}$.

где $k_{\text{ср. ос } P\%}$ — средний осенний сток, в долях от модуля многолетнего среднегодового стока, с обеспеченностью в $P\%$.

Семейство прямых, вычисленных по формуле (44), показано на рис. 21 пунктиром. Сравнение вычисленных прямых с данными наблюдений показывает, что они совпадают с удовлетворительной точностью.

Фактические и вычисленные величины среднего осеннего стока с обеспеченностью в 10 и 50% представлены в табл. 30. Среднее квадратичное отклонение для всех 40 водосборов (исключая р. Нарва), по которым имеются данные наблюдений, при обеспеченности в 10 и 50% составляет соответственно 9,4 и 16,6%. Максимальное отклонение при обеспеченности стока в 10 и 50% равно 20 и 32% соответственно.

Таблица 30

Сравнение фактических и вычисленных величин среднего осеннего стока

Наименование водосбора и створа	Средний осенний сток при обеспеченности в 10 и 50%				Расхождение, %, при обеспеченности, %	
	фактический		вычисленный по формуле (44)			
	10	50	10	50	10	50
Бассейн Финского залива						
Пюхайыги—Пюхайыэ	2,11	0,65	1,87	0,69	+11	− 6
Пуртсе—Люганузе	2,43	0,74	1,95	0,66	+ 4	+11
Кунда—Сями	1,89	0,70	1,71	0,75	+ 9	− 1
Сельге—Аркна	1,65	0,57	1,81	0,71	−11	−25
Лообу—Арбавере	1,84	0,74	1,74	0,74	+ 5	0
Вальге—Ванакюла	1,84	0,78	1,73	0,74	+ 6	+ 5
Аавоя—Маапаю	2,04	0,92	1,93	0,67	+ 5	+27
Пирита—Нехату	1,70	0,61	1,91	0,68	−12	−12
Пирита—Паункюла	1,68	0,75	1,86	0,69	−11	+ 8
Лейвайыги—Паюба	1,84	0,77	1,92	0,67	− 5	+10
Лейвайыги—Суурсоо	2,20	0,86	1,97	0,65	+10	+24
Лейвайыги—Арувалла	2,14	0,89	1,99	0,65	+ 7	+27
Вяо-оя—Вяо	2,40	0,95	2,01	0,64	+16	+32
Кейла—Кейла	1,65	0,63	1,90	0,68	−15	− 8
Вазалемма—Урба	1,81	0,88	1,93	0,67	− 7	+24
Вихтерпалу—Энглема	1,84	0,82	1,98	0,65	− 8	+21
Бассейн Рижского залива						
Казари—Казари	1,88	0,94	1,94	0,67	− 3	+29
Казари—Тээнузе	1,94	0,85	1,95	0,66	− 1	+22
Вигала—Коновере	2,00	0,77	1,87	0,69	+ 6	+10
Энге—Ядивере	1,70	0,53	2,00	0,64	−18	−21
Осушительная система Рехемяэ	2,16	0,67	1,96	0,66	+ 9	+ 1
Паадремаа—Мытсусилла	1,88	0,51	1,96	0,66	+ 4	−31
Пярну—Орекюла	1,94	0,88	1,91	0,68	+ 1	+23
Пярну—Тахкузе	1,82	0,74	1,91	0,68	− 5	+ 8
Вяндра—Кийза	2,06	0,67	2,01	0,64	+ 2	+ 5
Кыпу—Римму	1,76	0,84	1,90	0,68	− 8	+19
Навести—Аэсоо	2,01	0,71	1,90	0,68	+ 5	+ 4
Халлисте—Рийза	2,01	0,86	1,89	0,68	+ 6	+21
Пээгле-оя—Куустле	1,86	0,91	1,80	0,72	− 3	+21
Рейю—Сурью	1,77	0,73	1,98	0,65	−12	+11
Мустйыги—Коннувере	1,56	0,79	1,75	0,73	−12	+ 8
Бассейн Чудского озера						
С. Эмайыги—Тарту	1,35	0,79	1,61	0,78	−19	+ 1
Педья—Тырве	1,76	0,79	1,94	0,67	−10	+15
Болотный участок Тоома	1,80	0,60	2,00	0,64	−11	− 7
Ыхне—Тырва	1,91	0,86	1,72	0,74	+10	−14
В. Эмайыги—Тыллисте	1,84	0,71	1,82	0,71	− 1	0
Эльва—Эльва	2,17	0,82	1,74	0,74	+20	+10
Выханду—Химмисте	1,68	0,80	1,69	0,76	− 1	+ 5
Ахья—Коорвере	2,05	0,97	1,60	0,79	− 4	+18
Бассейн острова Сааремаа						
Пунапеа—Метскюла	1,88	0,65	1,98	0,65	− 5	0

Для исследования вопроса о влиянии осушения на режим среднего осеннего стока имеются только десятилетние данные по осушительной системе Рехемяэ, расположенной на низинных торфяных почвах. При помощи определения процента обеспеченности стока отдельных лет, по которым имеются данные наблюдений, и по ближайшим водосборам с многолетними наблюдениями оказалось возможным построить кривые обеспеченности стока для осушенного водосбора Рехемяэ и болотного участка в Тоома. Сравнение этих данных в табл. 28 показывает, что при обеспеченности в 59% средний осенний сток с осушенной системы на 12% больше, чем с болотного участка. При обеспеченности от 5 до 30% увеличение стока составляет около 25% и при обеспеченности в 2%—44%. Кроме того, при осушении болот с притоком грунтовых вод увеличивается средний годовой сток. В рассматриваемом случае это увеличение составляет 18%. Таким образом, общее увеличение среднего осеннего стока после осушения в данном примере можно считать равным приблизительно 40—60%.

При расчете среднего осеннего стока по формуле (44) для осушенного водосбора Рехемяэ получаются заниженные результаты — при обеспеченности стока от 2 до 30% в среднем на 12%, а для болотного участка Тоома — завышенные значения стока на 25% при обеспеченности в 2% и при обеспеченности от 5 до 30% — в среднем на 10%.

При переводе относительных чисел в модули стока следует учитывать соответствующие величины многолетнего среднегодового стока.

Почти такое же увеличение стока, как в осушительных системах Рехемяэ, наблюдается в канализованных и частично осушенных водосборах Лейвайыги—Суурсоо, Аавоя—Маапаю и Вяо-оя—Вяо. Заниженные значения среднего осеннего стока, кроме болотного участка Тоома, отмечаются еще в заболоченном водосборе Энге—Ядивере.

ГЛАВА II

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ГРУНТОВЫХ ВОД И РАСЧЕТНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСУШЕНИЯ

§ 9. РЕЖИМ СТОКА И ГЛУБИНА ГРУНТОВЫХ ВОД В ОСУШИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

1. КРИВЫЕ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ СРЕДНЕМЕСЯЧНОГО И СРЕДНЕГО ЛЕТНЕГО СТОКА И ГЛУБИНА ГРУНТОВЫХ ВОД НА ТОРФЯНЫХ ПОЧВАХ В ОСУШИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ РЕХЕМЯЭ

Для исследования водного режима осушительных систем на торфяных почвах использованы данные, полученные по системе Рехемяэ.

Ежесуточные данные по стоку с этого участка имеются за 1952 и 1954—1962 гг. Эти кратковременные наблюдения не могут дать полного представления о режиме стока в данной осушительной системе и их следует привести к многолетнему ряду. Для этого используются многолетние данные по стоку с ближайшего гидрометрического поста Энглема на реке Вихтерпалу.

На основании корреляции среднемесячных величин стока поста Энглема и Рехемяэ, представленных в табл. 31, определена связь между данными водосборами для среднего стока каждого месяца с мая по октябрь. В отдельные месяцы эта связь довольно тесная. Можно установить, что во всех случаях сток в осушительной системе Рехемяэ больше, чем в водосборе Энглема. Такое увеличение стока закономерно и объясняется притоком напорных грунтовых вод в осушительную систему с прилегающих моренных отложений.

Так как линии связи стока представляют собой прямые, проходящие через начало координат, то угловой коэффициент этих прямых может служить коэффициентом, с помощью которого по среднемесячным величинам стока одного водосбора можно получить значения стока другого водосбора. Для отдельных месяцев такой переход производится с большой ошибкой. Однако для таких величин, как ординаты кривых обеспеченности среднемесячного стока, приведение производится достаточно точно.

Таким образом, для приведения кривых обеспеченности среднемесячного стока в Рехемяэ могут быть использованы угловые коэффициенты кривых, представленные в табл. 32.

Таблица 31

Среднемесячные модули стока осушительной системы Рехемяэ и водпоста реки Вихтерпалу—Энглема
(*л/сек км²*)

Год	Месяцы					
	V	VI	VII	VIII	IX	X
Осушительная система Рехемяэ						
1952	10,6	4,6	2,6	2,8	7,1	20,1
1954	—	—	—	30,9	22,3	19,3
1955	34,1	2,6	0,3	0	0,9	1,3
1956	32,5	1,0	1,0	13,5	14,0	14,7
1957	21,4	1,0	3,6	4,8	19,3	28,0
1958	25,0	4,4	0,9	1,1	0,5	1,5
1959	3,5	0,9	5,4	0	0,1	0,4
1960	20,3	3,9	1,2	3,8	12,4	6,9
1961	6,9	2,2	5,0	21,5	13,0	3,4
1962	15,5	2,7	2,7	8,2	37,2	15,9
Вихтерпалу—Энглема						
1952	10,9	1,5	0,7	0,6	2,7	14,6
1954	5,1	1,7	7,5	24,5	13,6	18,9
1955	45,7	2,7	0,5	0,2	0,8	2,6
1956	31,0	1,2	2,5	9,0	16,0	13,1
1957	25,4	1,8	1,2	2,0	13,0	21,4
1958	22,2	4,0	1,0	1,8	0,9	2,4
1959	2,4	1,0	4,7	0,2	0,3	0,4
1960	5,0	0,8	2,4	5,4	5,8	4,3
1961	4,0	3,5	5,3	17,4	15,9	3,6
1962	13,6	1,8	1,5	2,5	24,4	11,6

Таблица 32

Отношение среднемесячных величин стока в осушительной системе Рехемяэ к среднемесячному стоку в водосборе реки Вихтерпалу (створ Энглема)

Месяц	V	VI	VII	VIII	IX	X	VI—VIII	V—X
Рехемяэ / Энглема	0,89	1,14	1,26	1,38	1,44	1,20	1,26	1,20

На рис. 23 показаны кривые обеспеченности среднемесячного стока гидрометрического створа Энглема за период с 1922 по 1954 г. В табл. 33 приведены численные значения ординат этих кривых. На основании коэффициентов, представленных в табл.

32, вычислены ординаты кривых обеспеченности стока в осушительной системе Рехемяэ. На рис. 23 показаны также приведенные кривые обеспеченности стока осушительной системы Рехемяэ (жирной линией). В табл. 34 представлены ординаты кривых обеспеченности среднемесячного и среднего стока за июнь—июль в осушительной системе Рехемяэ.

Таблица 33

Ординаты кривых обеспеченности модуля среднемесячного и среднего летнего стока гидрометрического створа Вихтерпалу—Энглема за период с 1922 по 1954 г.
(*л/сек км²*)

Месяц	Обеспеченность, %							
	2	5	10	20	30	40	50	90
Май	25,0	22,3	19,6	15,6	12,6	9,8	7,5	2,5
Июнь	18,6	15,6	11,5	6,8	4,4	2,9	2,2	0,9
Июль	19,0	13,0	9,0	5,5	3,2	1,8	1,0	0,4
Август	23,0	20,2	15,3	7,6	4,0	2,4	1,5	0,4
Сентябрь	29,0	15,0	11,7	8,2	5,7	3,9	2,8	0,35
Октябрь	43,0	29,0	23,0	18,5	14,8	11,6	9,0	1,0
Июнь—июль	12,1	11,0	9,4	6,6	4,6	3,3	2,3	0,6

Таблица 34

Ординаты приведенных кривых обеспеченности модуля среднемесячного и среднего летнего стока осушительной системы Рехемяэ на период с 1922 по 1954 г.
(*л/сек км²*)

Месяц	Обеспеченность, %							
	2	5	10	20	30	40	50	90
Май	31,1	24,0	18,0	13,9	11,2	8,7	6,7	2,2
Июнь	21,2	17,8	13,1	7,7	5,0	3,3	2,5	1,0
Июль	24,0	16,4	11,3	6,9	4,0	2,3	1,3	0,5
Август	31,8	27,9	21,2	10,5	5,5	3,3	2,1	0,6
Сентябрь	41,8	21,6	16,8	11,8	8,2	5,6	4,0	0,5
Октябрь	51,6	34,8	27,6	22,2	17,8	13,9	10,8	1,2
Июнь—июль	15,2	13,9	11,8	8,3	5,8	4,2	2,9	0,8

На основании кривых обеспеченности стока, приведенных на рис. 23, можно легко определить обеспеченность среднемесячного стока, наблюдавшегося в осушительной системе Рехемяэ. Зная обеспеченность стока короткого периода наблюдений, можно составить кривые обеспеченности среднемесячных глубин

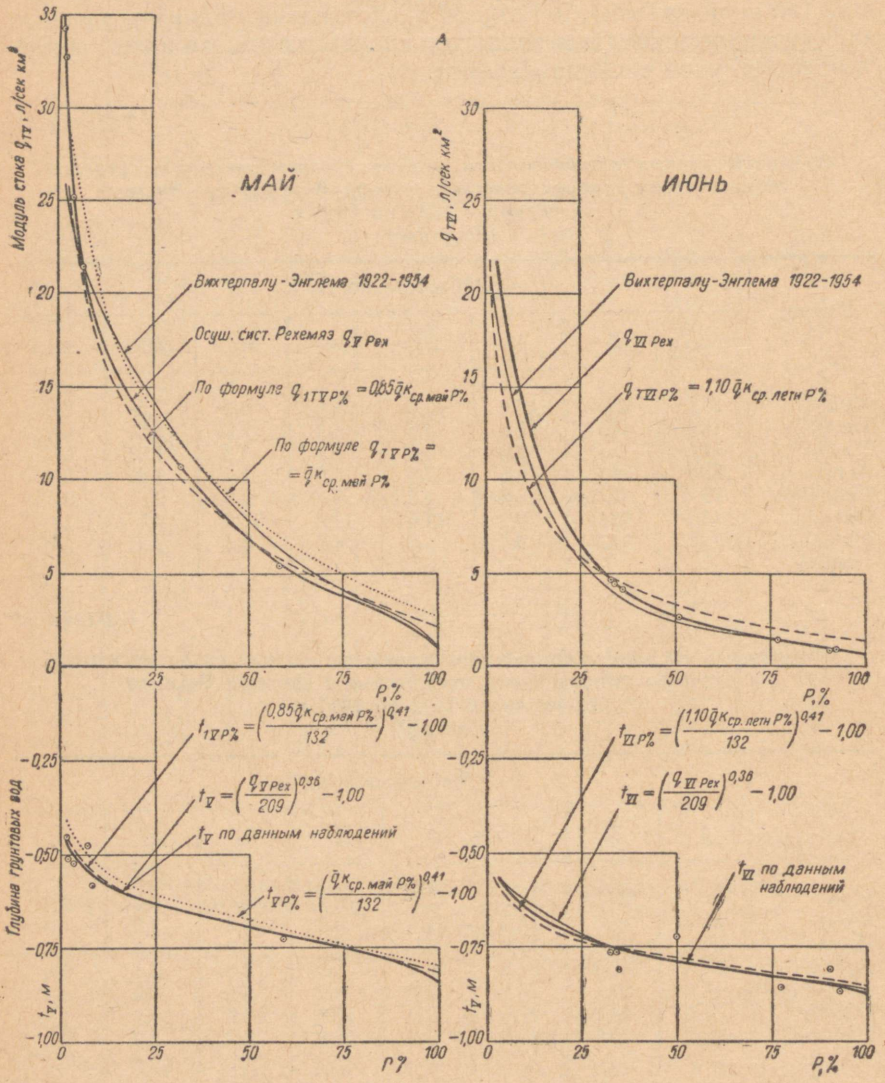
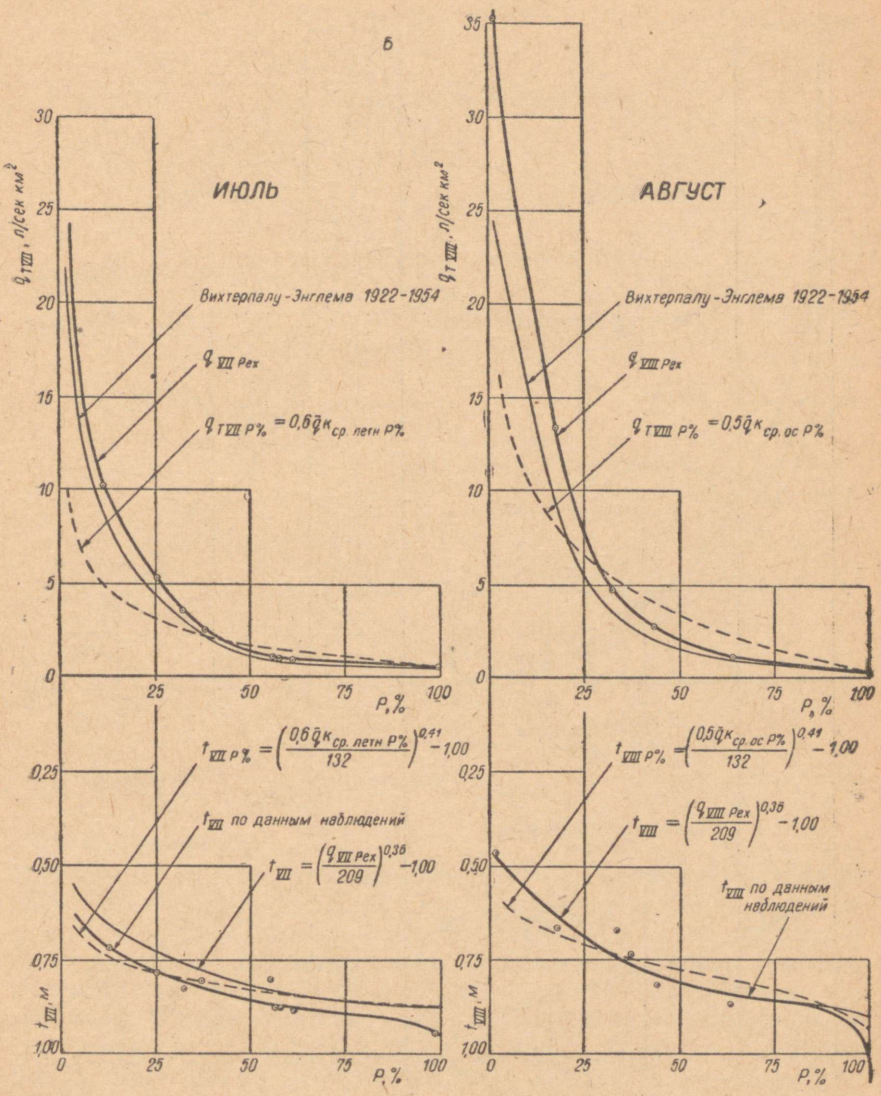
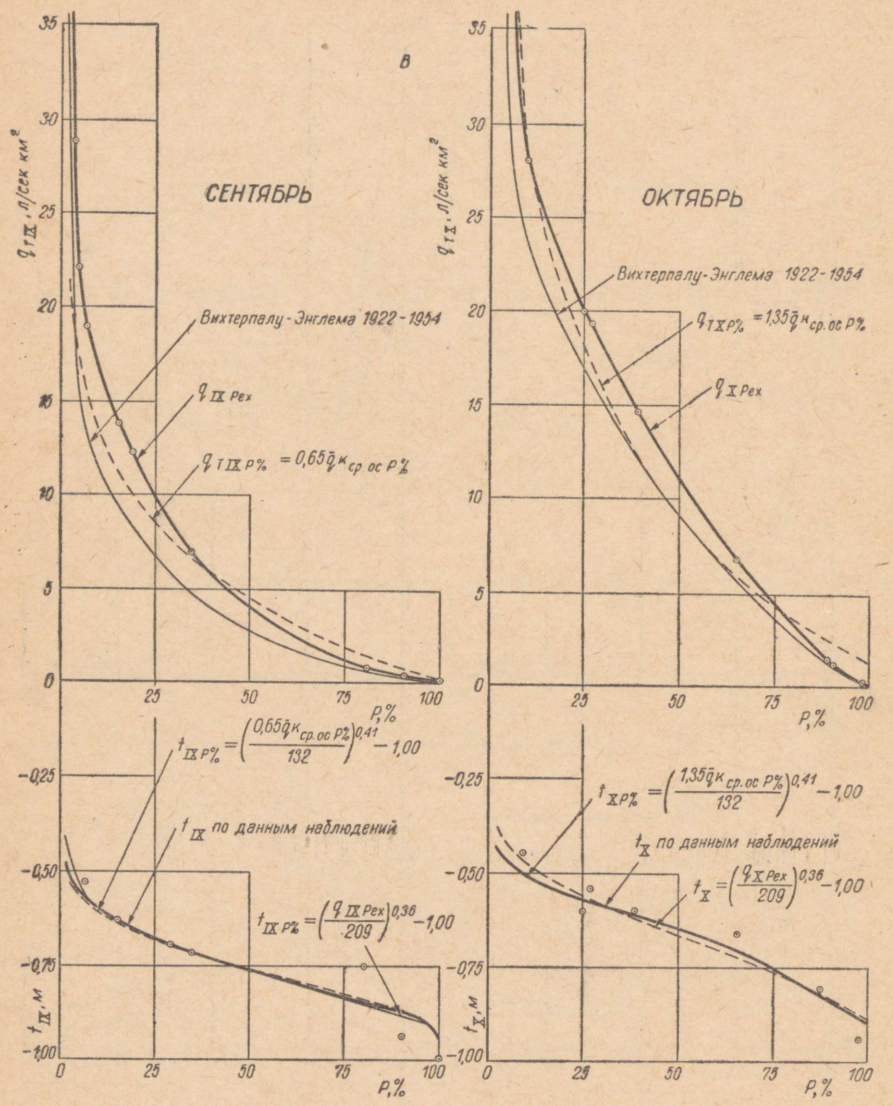
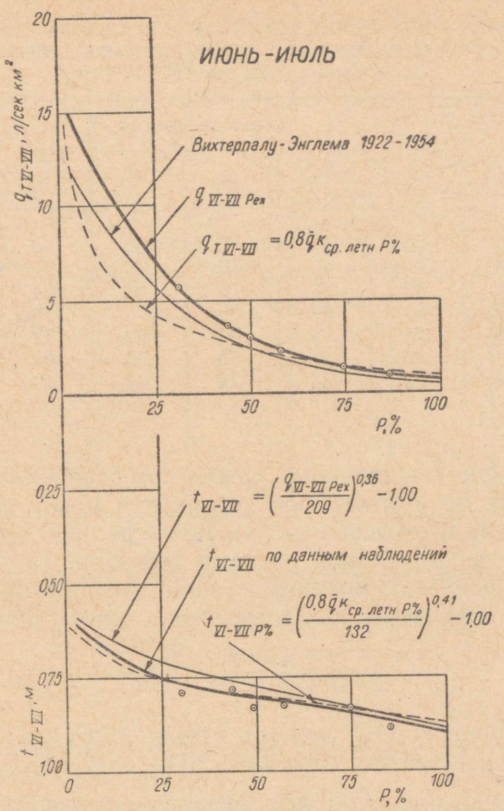


Рис. 23. Кривые обеспеченности среднемесячного стока и глубины грунтовых вод в осушительной системе Рехемяэ на торфяных почвах.


б
ИЮЛЬ
АВГУСТ
Вихтерпалу-Энглема 1922-1954
$q_{VII\,Рех}$
$q_{VIII\,Рех}$
$q_{т\,VII\,P\%} = 0{,}6\bar{q}_{к\,ср.\,летн\,P\%}$
$q_{т\,VIII\,P\%} = 0{,}5\bar{q}_{к\,ср.\,ос\,P\%}$
$q_{т\,VII}$, л/сек км²
$q_{т\,VIII}$, л/сек км²
P, %
$t_{VII\,P\%} = \left(\frac{0{,}6\bar{q}_{к\,ср.\,летн\,P\%}}{132}\right)^{0{,}41} - 1{,}00$
$t_{VIII\,P\%} = \left(\frac{0{,}5\bar{q}_{к\,ср.\,ос\,P\%}}{132}\right)^{0{,}41} - 1{,}00$
t_{VII} по данным наблюдений
$t_{VII} = \left(\frac{q_{VII\,Рех}}{209}\right)^{0{,}36} - 1{,}00$
$t_{VIII} = \left(\frac{q_{VIII\,Рех}}{209}\right)^{0{,}36} - 1{,}00$
t_{VIII} по данным наблюдений
t_{VII}, м
t_{VIII}, м


в
СЕНТЯБРЬ
ОКТЯБРЬ
Вихтерпалу-Энглема 1922-1954
q_{IX} Рех
q_{X} Рех
$q_{IX\,P\%} = 0{,}65\bar{q}_{к\,ср.ос\,P\%}$
$q_{X\,P\%} = 1{,}35\bar{q}_{к\,ср.ос\,P\%}$
q_{IX}, л/сек км²
P,%
$t_{IX\,P\%} = \left(\frac{0{,}65\bar{q}_{к\,ср.ос\,P\%}}{132}\right)^{0{,}41} - 1{,}00$
$t_{X\,P\%} = \left(\frac{1{,}35\bar{q}_{к\,ср.ос\,P\%}}{132}\right)^{0{,}41} - 1{,}00$
t_{IX} по данным наблюдений
t_{X} по данным наблюдений
$t_{IX\,P\%} = \left(\frac{q_{IX\,Pex}}{209}\right)^{0{,}36} - 1{,}00$
$t_{X} = \left(\frac{q_{X\,Pex}}{209}\right)^{0{,}36} - 1{,}00$
t_{IX}, м
t_{X}, м

г



грунтовых вод для осушительной системы Рехемяэ. При составлении этих кривых допущено, что обеспеченность стока соответствует обеспеченности глубины грунтовых вод. Такое допущение было бы справедливо, если зависимость между стоком и глубиной грунтовых вод в данной осушительной системе была бы постоянной. Однако известно, что эта зависимость переменна и определяется различным состоянием почвы. Поэтому при внесении установленных пунктов кривых обеспеченности глубины грунтовых вод в системе координат (см. кружки при кривых обеспеченности глубины грунтовых вод на рис. 23) получается разброс точек. Как видно из рис. 23, этот разброс не особенно значителен и по этому графику можно довольно достоверно определить кривые обеспеченности. Ординаты этих кривых приведены в табл. 35.

Таблица 35

Ординаты приведенных кривых обеспеченности среднемесячных и средних летних глубин грунтовых вод в осушительной системе Рехемяэ за период с 1922 по 1954 г. (*см*)

Месяц	Обеспеченность, %							
	2	5	10	20	30	40	50	90
Май	49	53	57	62	65	68	70	80
Июнь	56	60	65	70	74	77	78	85
Июль	62	66	71	76	80	84	86	92
Август	47	51	57	66	74	79	83	92
Сентябрь	49	54	59	65	69	72	75	86
Октябрь	41	45	50	55	58	61	64	76
Июнь—июль	60	62	66	72	77	79	81	88

Для проверки вычислены кривые обеспеченности глубины грунтовых вод по кривым обеспеченности стока. С этой целью определено аналитическое выражение средней кривой дренажного стока в осушительной системе Рехемяэ. На рис. 24 показано графическое изображение кривой дренажного стока в этой системе. Его аналитическое выражение имеет следующий вид:

$$t = \left(\frac{q}{132}\right)^{0,41} - 1,00, \qquad (45)$$

где q — среднесуточный модуль стока, *л/сек км²*;
t — среднесуточная глубина грунтовых вод, *м*.

Эта формула пригодна для вычисления среднесуточных величин стока или глубины грунтовых вод. Для расчета среднемесячных величин прокоррелированы среднемесячные значения стока со среднемесячными глубинами грунтовых вод. На основании рис. 24, где эта корреляция показана пунктиром, получено следующее выражение:

$$t_1 = \left(\frac{q_1}{209}\right)^{0,36} - 1,00, \qquad (46)$$

где q_1 — среднемесячный модуль стока в Рехемяэ, *л/сек км²*;
t_1 — среднемесячная глубина грунтовых вод в Рехемяэ, *м*.

Кривые обеспеченности среднемесячных глубин грунтовых вод, вычисленные на основании формулы (46) и кривых обеспеченности среднемесячного стока по осушительной системе Рехемяэ, показаны на рис. 23. Сравнение эмпирических и вычисленных кривых обеспеченности среднемесячных глубин грунтовых вод показывает, что они сходятся с удовлетворительной точностью,

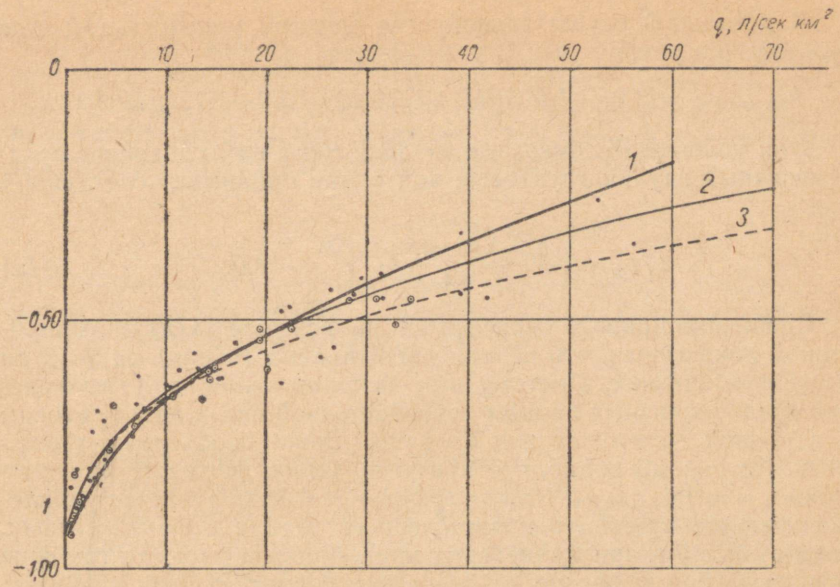


Рис. 24. Кривая стока в осушительной системе Рехемяэ:

1 — $t=0{,}105q^{0,5}-1{,}0$, 2 — $t=\left(\frac{q}{132}\right)^{0,41}-1{,}0$, 3 — $t=\left(\frac{q_1}{209}\right)^{0,36}-1{,}0$

——●—— среднесуточные данные

— — — — ⊙ среднемесячные данные.

исключение составляет только июль, где вычисленные глубины на 3—5 *см* выше фактических.

На рис. 23 пунктиром показаны также среднемесячные кривые глубин грунтовых вод, вычисленные по формуле (47), где сток определен по выведенным ранее формулам стока. Так, кривая мая определена сперва по формуле

$$t_{V\,P\%}=\left(\frac{\bar{q}k_{\text{ср. май}\,P\%}}{132}\right)^{0,41}-1{,}00, \qquad (47)$$

где $t_{V\,P\%}$ — среднемесячная глубина грунтовых вод в мае с обеспеченностью в $P\%$, *м*;

$\bar{q}$ — модуль многолетнего среднегодового стока, *л/сек км²* (в условиях Рехемяэ $\bar{q}=10{,}6$ *л/сек км²*);

$k_{\text{ср. май}\,P\%}$ — средний сток в мае с обеспеченностью в $P\%$;

$$k_{\text{ср. май}\,P\%}=\eta_V[1{,}38-1{,}55\,(k_{95\%}-0{,}5)^2]$$

$$\eta_V=(1{,}70\,k_{95\%}-1{,}80)\lg(P+1)-2{,}60\,k_{95\%}+3{,}85.$$

В детальной осушительной сети средний минимальный сток $k_{95\%}$ обычно равен нулю. В этом случае

$$k_{\text{ср. май } P\%} = [3{,}85 - 1{,}80 \lg(P+1)]\,0{,}99 = 3{,}82 - 1{,}79 \lg(P+1).$$

Для условий Рехемяэ, где $\bar{q} = 10{,}6$ *л/сек км*^{2}, уравнение среднемесячных глубин грунтовых вод в мае принимает следующий вид:

$$t_{\text{V } P\%} = \left[\frac{40{,}5 - 1{,}90 \lg(P+1)}{132}\right]^{0{,}41} - 1{,}00. \qquad (47а)$$

Сравнение кривой, вычисленной по формуле (47а), с эмпирической показывает, что первая расположена (в мае) на 2—3 *см* выше фактической. Поэтому при использовании для вычисления среднемесячных кривых среднесуточной связи между стоком и глубиной грунтовых вод величину стока необходимо уменьшить. Из рис. 23 видно, что при умножении формулы среднего стока в мае ($k_{\text{ср. май } P\%}$) на коэффициент 0,85 получается удовлетворительное совпадение вычисленных глубин с фактическими. Таким образом, при вычислении кривой обеспеченности глубины грунтовых вод в мае по среднесуточной связи между глубиной грунтовых вод и стоком формула кривой обеспеченности среднемесячного стока в условиях торфяных почв в Рехемяэ принимает следующий вид:

$$q_{\text{TV } P\%} = 0{,}85\,\bar{q} k_{\text{ср. май } P\%}. \qquad (48)$$

На основании сказанного формулу (47) следует переписать в следующем окончательном виде:

$$t_{\text{V } P\%} = \left(\frac{0{,}85\,\bar{q} k_{\text{ср. май } P\%}}{132}\right)^{0{,}41} - 1{,}00,$$

а формулу (47а) соответственно в виде

$$t_{\text{V } P\%} = \left[\frac{34{,}4 - 1{,}61 \lg(P+1)}{132}\right]^{0{,}41} - 1{,}00.$$

В июне кривая обеспеченности глубин грунтовых вод, вычисленная по формуле (45), где сток определен по формуле среднего летнего стока, проходит при обеспеченности от 0 до 30% на 1—2 *см* ниже естественной. Поэтому при вычислении июньской среднемесячной кривой обеспеченности глубины грунтовых вод величина стока, определенная по формуле среднего летнего стока ($k_{\text{ср. летн. } P\%}$), увеличена на 1,10. Тогда формула кривой обеспеченности стока в июне получает следующий вид:

$$q_{\text{T VI } P\%} = 1{,}10\,\bar{q} k_{\text{ср. летн } P\%}. \qquad (49)$$

В июле уровень грунтовых вод в осушительных системах ниже, чем в июне. Для вычисления их глубины следует использовать формулу среднего летнего стока ($k_{ср.\ летн.\ P\%}$) с поправочным коэффициентом 0,6, и формула для кривой обеспеченности среднемесячного стока в июле приобретает вид

$$q_{т\ VII\ P\%} = 0{,}6\,\bar{q}k_{ср\ летн\ P\%}. \qquad (50)$$

Средняя за июнь—июль кривая обеспеченности глубин грунтовых вод вычисляется по формуле (45) и среднему летнему стоку с применением коэффициента 0,8, т. е.

$$q_{т\ VI–VII\ P\%} = 0{,}8\,\bar{q}k_{ср.\ летн\ P\%}. \qquad (51)$$

При вычислении глубины грунтовых вод в августе для определения стока можно пользоваться формулой среднего летнего или среднего осеннего стока. Пользуясь рис. 23, можно заметить, что, применяя формулу среднего осеннего стока, необходимо вводить коэффициент 0,5. При этом вычисленная кривая пересекается с фактической при обеспеченности в 30%. При обеспеченности меньше 30% вычисленная кривая проходит до 9 *см* ниже и при обеспеченности больше 30% — в среднем на 3 *см* выше фактической кривой.

Расчеты с применением формулы среднего летнего стока не дают лучшего результата, поэтому при вычислении августовской кривой обеспеченности среднемесячных глубин грунтовых вод осушенных торфяных почв можно ординаты кривой обеспеченности среднемесячного стока вычислить по формуле

$$q_{т\ VIII\ P\%} = 0{,}5\,\bar{q}k_{ср.\ ос\ P\%}. \qquad (52)$$

В сентябре и октябре глубину грунтовых вод в осушительных системах на торфяных почвах можно вычислить на основе формулы для среднего осеннего стока. В настоящем случае в формуле (45) величина стока для сентября определяется по формуле среднего осеннего стока ($k_{ср\ ос\ P\%}$) с применением поправочного коэффициента 0,6 и для октября — коэффициента 1,35, т. е.

$$q_{т\ IX\ P\%} = 0{,}65\,\bar{q}k_{ср.\ ос\ P\%} \qquad (53)$$

и

$$q_{т\ X\ P\%} = 1{,}35\,\bar{q}k_{ср\ ос\ P\%}. \qquad (54)$$

2. КРИВЫЕ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ СРЕДНЕСУТОЧНОГО СТОКА ЗА ОТДЕЛЬНЫЕ МЕСЯЦЫ ВЕГЕТАЦИОННОГО ПЕРИОДА В ОСУШИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ РЕХЕМЯЭ

С целью исследования характера внутримесячного распределения стока на основании непосредственных данных наблюдений за 6—7 лет по осушительной системе Рехемяэ составлены средние кривые обеспеченности среднесуточного стока для каждого месяца с мая по октябрь. При составлении этих кривых сток выражен в долях от среднего стока каждого месяца. На основании этих относительных значений определены ординаты кривых обеспеченности суточного стока для каждого месяца вегетационного периода. В табл. 36 представлены ординаты этих кривых в мае. Из таблицы видно, что годовые колебания ординат с определенной обеспеченностью в общем невелики. Поэтому средняя из шести кривых данного месяца вполне удовлетворительно характеризует среднее распределение стока этого месяца.

Таблица 36

Ординаты кривых обеспеченности среднесуточного стока в мае в осушительной системе Рехемяэ в долях от среднего стока данного месяца

Дата	Обеспеченность, %	Годы						
		1952	1955	1956	1957	1958	1959	Средний
1/V	3,1	1,98	3,90	3,85	2,43	2,03	2,16	2,73
2/V	6,2	1,79	2,34	3,38	2,38	1,96	1,82	2,28
3/V	9,4	1,79	1,61	2,92	2,01	1,52	1,77	1,94
7/V	21,8	1,32	1,35	1,69	1,82	1,32	1,34	1,47
10/V	31,2	1,04	1,09	1,35	1,68	1,16	1,26	1,26
13/V	40,6	0,96	0,91	1,05	1,35	1,08	1,17	1,09
16/V	50,0	0,92	0,88	0,52	0,75	1,00	0,91	0,83
21/V	65,0	0,83	0,75	0,29	0,33	0,88	0,68	0,63
28/V	87,5	0,57	0,42	0,14	0,16	0,50	0,29	0,35
Модуль среднемесячного стока, *л/сек км²*		10,6	34,1	32,5	21,4	25,0	3,5	

В табл. 37 приведены ординаты средних кривых обеспеченности суточного стока в отдельные месяцы вегетационного периода. На основе корреляции логарифмов этих ординат по месяцам с мая по октябрь получены следующие аналитические выражения для кривых среднесуточного стока в осушительной системе Рехемяэ.

Ординаты средней кривой обеспеченности среднесуточного стока за отдельные месяцы вегетационного периода в осушительной системе Рехемяэ в долях от среднего стока данного месяца (в модульных коэффициентах)

Месяц	Обеспеченность, %							
	2	5	10	20	30	40	50	90
Май	3,25	2,55	2,08	1,54	1,21	0,97	0,81	0,36
Июнь	2,52	2,16	1,86	1,46	1,17	0,96	0,82	0,48
Июль	3,50	2,42	2,00	1,54	1,25	1,06	0,88	0,40
Август	4,40	3,05	2,20	1,52	1,10	0,83	0,65	0,36
Сентябрь	2,60	1,10	1,75	1,39	1,17	1,01	0,90	0,51
Октябрь	2,50	1,90	1,55	1,32	1,16	1,03	0,92	0,56

в мае

$$k_{T,V\,P_1\%} = \frac{7{,}25}{(P_1+1)^{0,24}} - 2, \qquad (55)$$

в июне

$$k_{T\,VI\,P_1\%} = \frac{5.25}{(P_1+1)^{0,28}} - 1, \qquad (56)$$

в июле

$$k_{T\,VII\,P_1\%} = \frac{6{,}30}{(P_1+1)^{0,32}} - 1, \qquad (57)$$

в августе

$$k_{T\,VIII\,P_1\%} = \frac{8{,}50}{(P_1+1)^{0,42}} - 1, \qquad (58)$$

в сентябре

$$k_{T\,IX\,P_1\%} = \frac{4{,}90}{(P_1+1)^{0,25}} - 1, \qquad (59)$$

в октябре

$$k_{T\,X\,P_1\%} = \frac{4{,}47}{(P_1+1)^{0,22}} - 1, \qquad (60)$$

где $k_{T\,V\ldots X}$ — ордината средней кривой обеспеченности среднесуточного стока осушенных торфяных почв данного месяца в долях от среднемесячного стока;

P_1 — обеспеченность среднесуточного стока данного месяца.

3. КРИВЫЕ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ СРЕДНЕМЕСЯЧНОГО СТОКА И ГЛУБИНА ГРУНТОВЫХ ВОД В ОТДЕЛЬНЫЕ МЕСЯЦЫ ВЕГЕТАЦИОННОГО ПЕРИОДА В ТЯЖЕЛЫХ СУГЛИНИСТЫХ ПОЧВАХ

Кратковременные наблюдения за стоком и глубиной грунтовых вод в тяжелых суглинистых почвах имеются по осушительной системе совхоза «Рахноя». Здешние тяжелые суглинистые почвы были осушены открытыми канавами с профилированной поверхностью между ними. После устройства дренажа профилированные поверхности довольно заметны и ускоряют освобождение верхних слоев почвы от избытка влаги. Расстояние между дренами в системе 3 равно 19,5, а глубина — около 0,9 *м*.

Вследствие короткого периода наблюдений рахноякские данные можно использовать только для выбора аналогичных водосборов, по которым имеются данные более длительных наблюдений.

На рис. 25 показаны гидрографы на гидрометрическом посту Вяо-оя (Управления гидрометрической службы ЭССР) и дренажной системы 3 совхоза «Рахноя» за 1956 г.

Климатические условия в обоих пунктах могут быть различны, так как водосбор Вяо-оя находится на северном побережье вблизи Таллина, а совхоз «Рахноя» расположен на 100 *км* южнее. Однако в зимнее время (январе и феврале), когда климатические условия более равномерны, гидрографы на рис. 25 почти совпадают. Хорошее совпадение отмечается также в сентябре и октябре. Небольшие расхождения в гидрографах других месяцев обусловлены, главным образом, различием в количестве и распределении осадков, выпадающих на эти водосборы.

На основании рис. 25 можно утверждать, что характер стока в водосборе Вяо-оя и в дренажной системе «Рахноя» аналогичен.

Водосбор Вяо-оя расположен на силурийском известняке, покрытом тонким слоем почвы, мощностью около 50 *см*. Площадь водосбора равна 4,7 $км^2$, около 20% его площади подвергается временному переувлажнению. Водосбор осушен магистральным каналом и выборочной сетью открытых канав.

Водопроницаемость почв водосбора в Вяо-оя, по-видимому, мало отличается от рахноякских тяжелых суглинков. Поэтому режим стока в водосборе Вяо-оя может быть характерным и для тяжелых суглинистых почв.

Гидрометрические данные по водосбору Вяо-оя имеются с 1938 по 1957 г. с перерывом в 1947 и 1948 гг. Для составления кривых обеспеченности среднемесячного стока по отдельным месяцам необходимо продлить ряд наблюдений до 32—33 лет, включая по меньшей мере один полный цикл (сухой и влажный периоды).

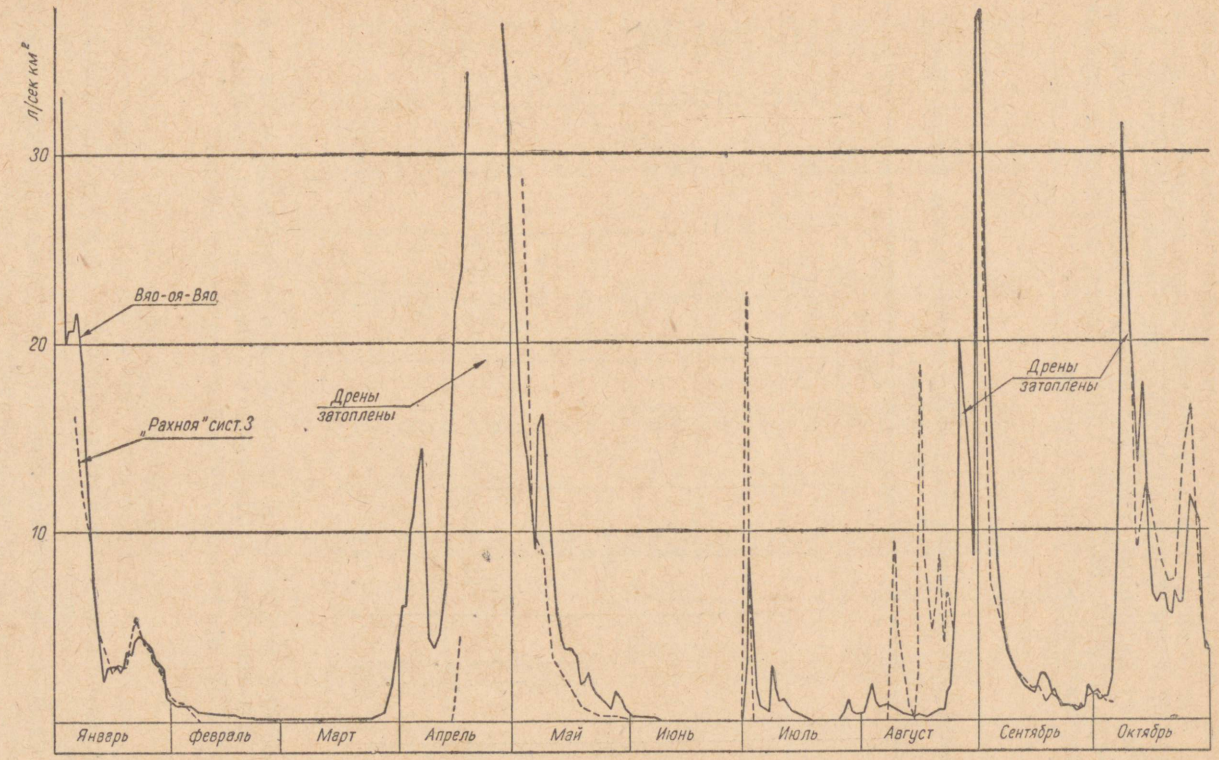


Рис. 25. Гидрографы водпоста Вяо-оя и дренажной системы совхоза «Рахноя».

Для продления ряда наблюдений в водосборе Вяо-оя использованы гидрометрические данные с водосбора магистрального канала Лейвайыги, расположенного несколько южнее Вяо-оя. Расстояние между центрами обоих водосборов составляет около 16 *км*. Водосбор Лейвайыги сильно заболочен. Площадь болот низинного типа составляет 53,7% общей площади водосбора, равной 84,3 *км*^{2}. 18,8% болот осушено и засеяно сельскохозяйственными культурами.

Таблица 38

Среднемесячные модули стока магистрального канала Вяо-оя—Вяо
(*л/сек км*)

Год	Месяц					
	V	VI	VII	VIII	IX	X
1938		0	0	0	0	1,4
1939		0	0	0	0	0
1940		0	0	0	0,8	1,8
1941		0	0	0	0,2	0,7
1942		0,1	0,7	1,4	0,4	2,7
1943		5,1	19,2	16,8		
1944		20,4				
1945	3,4	0	0	0	0	4,5
1946	4,5	1,9	0	0	0,1	1,6
1949	0,4	1,3	0	0		
1950	1,1	0	0	0	0,4	24,9
1951	1,5	0	0	0	0	0
1952	5,1	1,0	0	0	1,0	22,1
1953	0,6	0	0	1,2	11,7	9,6
1954	2,1	0,1	0,1	20,8	14,0	16,2
1955	17,2	0,2	0	0	0	0,1
1956	6,2	0	0,9	4,0	4,9	9,2
1957	24,6	3,0	0	0,1	27,9	23,4

На основе корреляции среднемесячных модулей стока водосборов Вяо-оя—Вяо и Лейвайыги—Паюба, представленных в табл. 38 и 39, получено следующее уравнение связи:

$$q_{\text{Вяо}} = mq_{\text{Лейва}} - n, \qquad (61)$$

где $q_{\text{Вяо}}$ — среднемесячные модули стока в водосборе Вяо-оя,

$q_{\text{Лейва}}$ — среднемесячные модули стока водосбора Лейвайыги в створе Паюба.

Величины m и n для отдельных месяцев показаны в табл. 40.

Таблица 39

Среднемесячные модули стока магистрального канала Лейвайыги—Паюба (*л/сек км*)

Год	Месяц					
	V	VI	VII	VIII	IX	X
1938	3,6	1,8	1,3	0,8	1,3	6,1
1939	5,8	2,8	1,3	1,0	1,4	2,4
1940	5,6	1,8	1,1	0,8	2,4	5,3
1941	9,7	1,9	1,3	1,4	3,4	14,5
1942	6,2	1,7	3,5	11,9	4,2	14,0
1943	6,7	7,6	22,4	18,1	4,4	13,6
1944	19,9	22,0	7,3	1,0	1,0	2,2
1945	8,4	3,7	1,8	3,1	3,4	0,9
1946	10,7	3,4	1,1	1,2	1,9	3,8
1949	3,6	6,1	1,3	2,8	1,1	1,4
1950	4,4	1,4	0,6	0,3	1,8	21,5
1951	6,8	2,2	1,6	0,4	0,4	0,5
1952	11,0	4,8	1,4	1,9	6,2	21,2
1953	3,8	1,3	0,7	1,6	5,0	7,7
1954	5,5	2,3	6,5	19,2	12,1	15,8
1955	37,8	4,3	1,1	0,4	0,9	5,2
1956	27,8	3,2	5,5	12,0	10,8	14,4
1957	34,7	5,3	1,4	1,4	16,8	23,4

Таблица 40

Величины *m* и *n* уравнения (61)

Месяц	V	VI	VII	VIII	IX	X
m	0,58	1,03	1,01	1,05	1,52	1,20
n	1,6	2,8	2,7	2,8	4,1	3,2

В табл. 41 представлены ординаты кривых обеспеченности среднемесячных модулей стока магистрального канала Вяо-оя.

Для выяснения возможности вычисления кривых обеспеченности стока и глубины грунтовых вод в тяжелых суглинистых почвах, среднемесячные кривые обеспеченности стока магистрального канала Вяо-оя приведены к условиям осушительной системы Рехемяэ. Для этого ординаты кривых обеспеченности Вяо-оя (табл. 41) умножены на отношение между многолетним средне-

Таблица 41

Ординаты кривых обеспеченности модулей среднемесячного стока отдельных месяцев вегетационного периода в магистральном канале Вяо-оя за период с 1922 по 1954 г.
(*л/сек км*)

Месяц	Обеспеченность, %										
	2	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Май	18,0	9,0	7,2	5,2	4,0	3,2	2,7	2,2	1,8	1,3	0,8
Июнь	19,0	11,2	7,0	3,0	1,4	0,6	0,2	0,0			
Июль	17,0	7,9	3,2	0,7	0,1	0,0					
Август	20,4	18,0	13,6	6,0	2,1	0,7	0,0				
Сентябрь	31,9	24,5	14,7	9,6	5,6	2,9	1,0	0,3	0,0		
Октябрь	39,9	32,5	25,5	20,2	15,9	11,6	7,2	3,4	1,5	0,5	0,0

годовым стоком в Рехемяэ и Вяо-оя. Если величину модуля среднего годового стока за период с 1922 по 1954 г. в Рехемяэ считать равной 10,6 и в Вяо-оя — 6,9 *л/сек км²*, то коэффициент перевода равен $\frac{10,6}{6,9} = 1,54$. В табл. 42 показаны ординаты приведенных кривых.

Таблица 42

Ординаты кривых обеспеченности модуля среднемесячного стока со слабопроницаемых почв, приведенных к условиям осушительной системы Рехемяэ ($q_{c\,v\ldots x}$) за период с 1922 по 1954 г.
(*л/сек км²*)

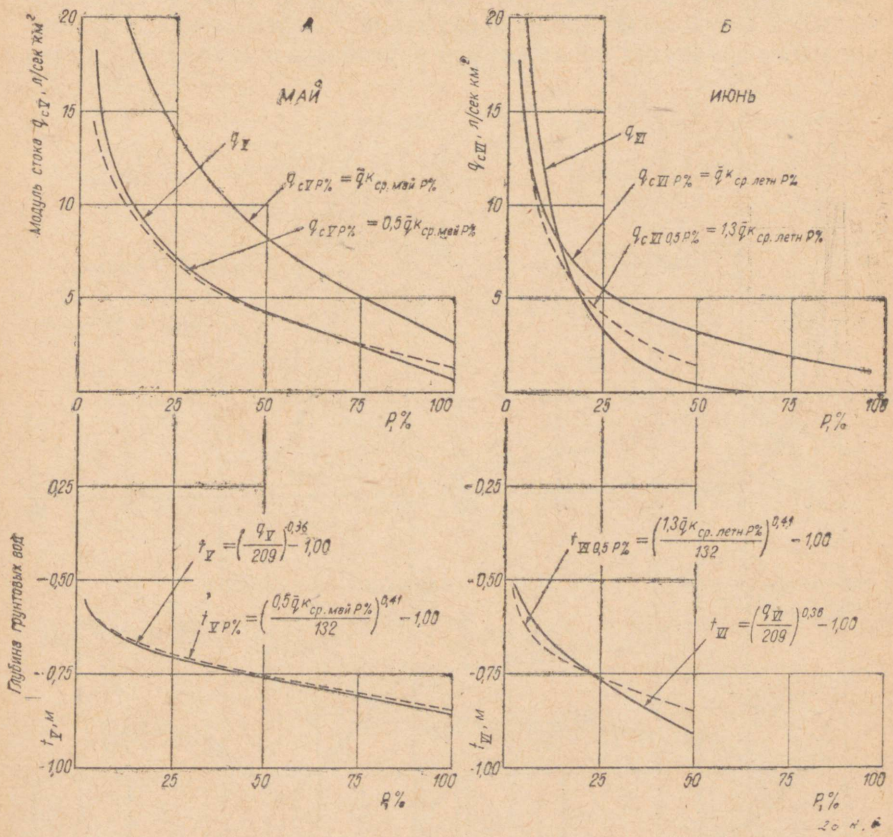
Месяц	Обеспеченность, %										
	2	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Май	27,7	13.8	11,0	8,0	6,1	4,9	4,1	3,4	2,7	2,0	1,2
Июнь	29,2	17.2	10,8	4,6	2,2	0,9	0,3	0,0			
Июль	26,1	12.1	4,9	1,1	0,15	0,0					
Август	31,3	27,7	20,9	9,2	3,2	1,1	0,0				
Сентябрь	49,0	37,7	22,6	14,8	8,6	4,5	1,5	0,5	0,0		
Октябрь	61,2	50,0	39,6	31,0	24,9	17,8	11,1	5,2	2,3	0,8	0,0

Пользуясь формулой (46) и данными о модуле стока ($q_{c\,v\ldots x}$), приведенными в табл. 42, можно вычислить среднемесячные кривые обеспеченности глубины грунтовых вод осушительной системы Рехемяэ для случая, если бы вместо торфяных почв здесь были слабоводопроницаемые почвы.

На рис. 26 показаны среднемесячные кривые стока, составленные по данным табл. 42, и соответствующие кривые обеспеченности глубины грунтовых вод, вычисленные по формуле (46) и модулю стока табл. 42.

На основании полученных кривых обеспеченности глубин грунтовых вод можно разработать основы расчета этих кривых на тяжелых суглинистых почвах при различной интенсивности осушения.

Интенсивность осушения, как известно, определяется характером режима грунтовых вод или характером связи между стоком и глубиной грунтовых вод. Такая связь определяется обычно по соотношению между среднесуточными значениями стока



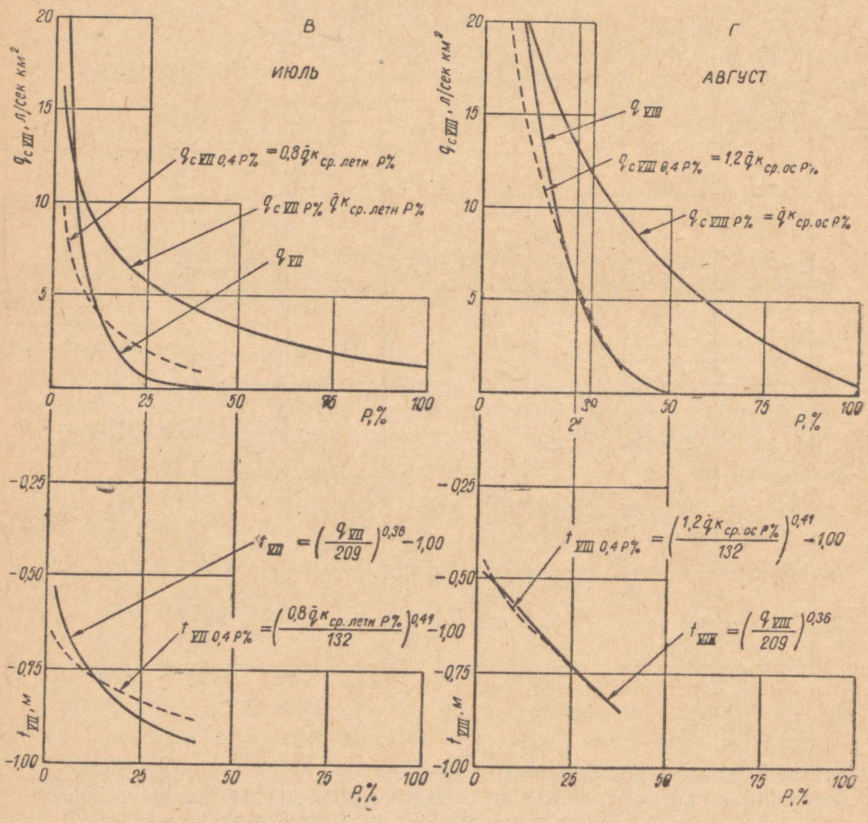
Р и с. 26. Кривые обеспеченности среднемесячного стока и глубины грунтовых вод в осушительных системах на тяжелых глинистых почвах, приведенные к условиям осушительной системы Рехемяэ.

и глубиной грунтовых вод (кривая дренажного стока), поэтому расчеты следует производить на основании формулы (45).

На рис. 26 показаны кривые обеспеченности глубины грунтовых вод, полученные в результате расчета по формуле (45) и по указанным выше формулам стока.

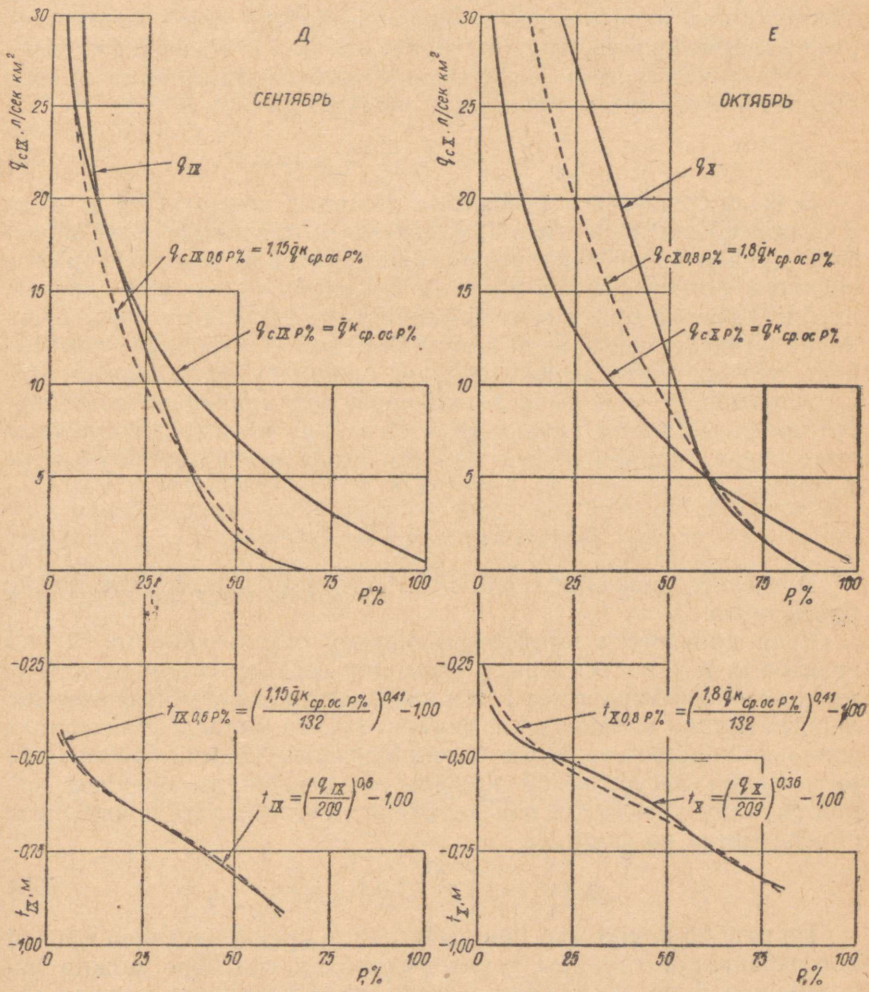
В используемые формулы стока с помощью подбора были внесены коэффициенты с таким условием, чтобы вычисленная кривая обеспеченности стока по характеру соответствовала фактической и чтобы кривые обеспеченности глубины грунтовых вод, вычисленные по формулам стока и по фактическим кривым обеспеченности стока, имели наименьшие отклонения друг от друга.

Как в случае торфяных почв, так и в данном случае была использована формула (45), дающая связь между среднесуточными значениями стока и глубиной грунтовых вод. При вычислении среднемесячных глубин грунтовых вод величину стока



необходимо уменьшить (приблизительно на 15—20%). Таким образом, площадь среднемесячных кривых обеспеченности стока, вычисленных по приведенным ниже формулам стока, оказывается меньше фактической (приблизительно на 15—20%).

На основании произведенных расчетов, результаты которых показаны на рис. 26, устанавливается, что при вычислении майской кривой обеспеченности среднемесячных глубин грунтовых вод на тяжелых суглинистых почвах формулу среднего стока мая ($k_{\text{ср. май } P\%}$) следует брать с поправочным коэффициентом



0,5. Тогда формула кривой обеспеченности среднемесячного стока в мае принимает следующий вид:

$$q_{\text{с V } P\%} = 0{,}5\,\bar{q}\,k_{\text{ср. май } P\%}. \qquad (62)$$

При вычислении июньской кривой обеспеченности среднемесячных глубин грунтовых вод на основании формулы среднего летнего стока ($k_{\text{ср. летн } P\%}$), оказалось необходимым процент обеспеченности вычисленных глубин уменьшить в два раза (по сравнению с процентом обеспеченности стока в формуле среднего летнего стока). Кроме того, значения, полученные по формуле среднего летнего стока пришлось увеличить в 1,3 раза. Таким образом, при вычислении июньской кривой обеспеченности среднемесячной глубины грунтовых вод с осушенных тяжелых суглинистых почв формула для вычисления ординат кривой обеспеченности стока принимает следующий вид:

$$q_{\text{с VI } 0{,}5\,P\%} = 1{,}3\,\bar{q}\,k_{\text{ср. летн } P\%}. \qquad (63)$$

В июле среднемесячный сток с тяжелых почв падает до нуля уже при обеспеченности в 40%. Поэтому при вычислении июльской кривой обеспеченности глубин грунтовых вод по формуле среднего летнего стока процент обеспеченности вычисленных глубин следует брать с коэффициентом 0,4. Кроме того, сравнение вычисленной кривой с эмпирической (см. рис. 26) показывает, что ординаты первой следует брать с коэффициентом 0,8. Следовательно, при вычислении июльской кривой обеспеченности среднемесячных глубин грунтовых вод в тяжелых суглинистых почвах кривая обеспеченности стока вычисляется по формуле

$$q_{\text{с VII } 0{,}4\,P\%} = 0{,}8\,\bar{q}\,k_{\text{ср. летн } P\%}. \qquad (64)$$

В августе, при обеспеченности между 40 и 50% сток также равен нулю.

Если произвести вычисления кривой обеспеченности глубин грунтовых вод на основании формулы среднего осеннего стока, взятого с коэффициентом 1,2, и в процент обеспеченности вычисленных глубин вводить коэффициент 0,4, то вычисленная кривая довольно хорошо совпадает с эмпирической. Таким образом, при вычислении августовской кривой обеспеченности среднемесячной глубины грунтовых вод в тяжелых суглинистых почвах сток определяется по формуле

$$q_{\text{с VIII } 0{,}4\,P\%} = 1{,}2\,\bar{q}\,k_{\text{ср. ос } P\%}. \qquad (65)$$

Из рис. 26 видно, что при вычислении среднемесячной кривой обеспеченности глубины грунтовых вод в сентябре можно использовать формулу среднего осеннего стока с поправочным ко-

эффициентом 1,15. При этом процент обеспеченности вычисленной ординаты следует брать с коэффициентом 0,6 по сравнению с процентом обеспеченности в формуле среднего осеннего стока. Таким образом, формула для построения сентябрьской кривой обеспеченности среднемесячного стока получает следующий вид:

$$q_{\text{с IX } 0{,}6\,P\%} = 1{,}15\,\bar{q}\,k_{\text{ср. ос}\,P\%}. \qquad (66)$$

Результаты расчетов, представленные на рис. 26, показывают, что в октябре при вычислении кривой обеспеченности глубины грунтовых вод модуль стока определяется по формуле среднего осеннего стока с поправочным коэффициентом 1,8. В процент обеспеченности вычисленных ординат следует вводить поправочный коэффициент, равный 0,8. Следовательно, формулу кривой обеспеченности среднемесячного стока в октябре следует применять здесь в виде

$$q_{\text{с X } 0{,}8\,P\%} = 1{,}8\,\bar{q}\,k_{\text{ср. ос}\,P\%}. \qquad (67)$$

Из приведенного анализа можно установить, что режим стока и глубин грунтовых вод в торфяных и в слабоводопроницаемых почвах весьма различен. Кривые обеспеченности показывают, что сток с осушенных торфяных почв колеблется в значительно меньших пределах, чем с тяжелых суглинистых почв. На осушительной системе Рехемяэ среднемесячные значения стока с торфяных почв только в августе 1955 и 1959 г. доходили до нуля. С июня по август же среднемесячный сток с тяжелых глинистых почв при обеспеченности около 50% равен нулю.

Известным показателем характера режима стока в отдельные месяцы является отношение площади кривых обеспеченности стока для торфяных и тяжелых суглинистых почв. Если уравнение майской кривой обеспеченности среднемесячного стока с торфяных почв имеет вид

$$q_{\text{т V}\,P\%} = 0{,}85\,\bar{q}\,k_{\text{ср. май}\,P\%},$$

а с тяжелых суглинистых почв

$$q_{\text{с V}\,P\%} = 0{,}5\,\bar{q}\,k_{\text{ср. май}\,P\%},$$

то отношение площадей кривых обеспеченности стока в мае равно

$$\frac{\int_0^{100} q_{\text{т V}\,P\%}\,dP}{\int_0^{100} q_{\text{с V}\,P\%}\,dP} = \frac{0{,}85\bar{q}\int_0^{100} k_{\text{ср. май}\,P\%}\,dP}{0{,}5\bar{q}\int_0^{100} k_{\text{ср. май}\,P\%}\,dP} = 1{,}70.$$

Уравнение июньской кривой обеспеченности стока с торфяных почв можно выразить в следующем виде:

$$q_{\text{т VI } P\%} = 1{,}10\,\bar{q}\,k_{\text{ср. летн } P\%},$$

а площадь кривой обеспеченности равна

$$\int_0^{100} q_{\text{т VI } P\%}\,dP = 1{,}10\bar{q}\int_0^{100} k_{\text{ср. летн } P\%}\,dP.$$

В случае тяжелых суглинистых почв уравнение кривой обеспеченности стока в июне имеет вид

$$q_{\text{с VI } 0{,}5\,P\%} = 1{,}3\,\bar{q}\,k_{\text{ср. летн } P\%}.$$

Так как P — процент обеспеченности среднемесячного стока в июне в 2 раза меньше процента обеспеченности среднего летнего стока, то уравнение для определения площади кривой обеспеченности принимает следующий вид:

$$\int_0^{50} q_{\text{с VI } 0{,}5\,P\%}\,dP = 0{,}5 \cdot 1{,}3\,\bar{q}\int_0^{100} k_{\text{ср. летн } P\%}\,dP.$$

Итак, отношение площадей кривых обеспеченности стока с осушенных торфяных и тяжелых суглинистых почв в июне равно:

$$\frac{\int_0^{100} q_{\text{т VI } P\%}\,dP}{\int_0^{50} q_{\text{с VI } 0{,}5\,P\%}\,dP} = \frac{1{,}10\bar{q}\int_0^{100} k_{\text{ср. летн } P\%}\,dP}{0{,}5 \cdot 1{,}3\,\bar{q}\int_0^{100} k_{\text{ср. летн } P\%}\,dP} = 1{,}69.$$

Это же отношение в июле, августе, сентябре и октябре составляет 1,88, 1,04, 0,94 и 0,94.

Из приведенного следует, что при одной и той же величине среднего годового стока объем стока с осушенных низинных торфяных почв в мае, июне и июле на 69—88% больше, а в сентябре и октябре на 6% меньше, чем с тяжелых суглинистых почв.

4. КРИВЫЕ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ СРЕДНЕСУТОЧНОГО СТОКА ЗА ОТДЕЛЬНЫЕ МЕСЯЦЫ ВЕГЕТАЦИОННОГО ПЕРИОДА СО СЛАБОВОДОПРОНИЦАЕМЫХ ПОЧВ

С целью более полного исследования режима стока со слабоводопроницаемых почв построены кривые обеспеченности среднесуточного стока отдельных месяцев вегетационного перио-

да магистрального канала Вяо-оя. При составлении этих кривых была использована та же методика, что и при составлении кривых обеспеченности среднесуточного стока осушительной системы Рехемяэ. Учитывались только те месяцы, в которые сток в течение всего месяца был выше нуля. Для летних месяцев (июня, июля и августа) из всего цикла наблюдений можно было использовать только три года, когда сток в течение месяца был выше нуля. Однако, как показывают данные, приведенные в табл. 43, колебания ординат одной и той же обеспеченности незначительны. Поэтому средние ординаты можно считать характерными и для многолетнего периода.

Таблица 43

Ординаты кривой обеспеченности среднесуточного стока магистрального канала Вяо-оя и осушительной системы Рахноя в долях от среднемесячного стока

Дата	Обеспеченность, %	Годы			Средняя	Осушительная система Рахноя, 1956 г.
		1943	1954	1956		
1/VIII	3,1	7,30	10,60	9,17	9,02	Дрены затоплены
2/VIII	6,3	5,44	6,09	4,95	5,49	
3/VIII	9,4	5,31	3,53	4,06	4,30	
7/VIII	21,8	1,14	1,26	1,12	1,17	1,03
10/VIII	31,2	0,90	0,45	0,40	0,58	0,51
13/VIII	40,6	0,39	0,21	0,20	0,23	0,38
16/VIII	50,0	0,20	0,18	0,15	0,18	0,27
20/VIII	62,5	0,12	0,09	0,10	0,10	0,12
28/VIII	87,5	0,03	0,01	0,05	0,03	0,0
Модуль среднемесячного стока, *л/сек км²*		16,8	20,6	4,04	—	—

Из данных, представленных в табл. 43, видно, что ординаты кривой обеспеченности среднесуточного стока в осушительной системе Рахноя довольно близки к средним ординатам водосбора Вяо-оя. Следовательно, кривые обеспеченности среднесуточного стока магистрального канала Вяо-оя в известной мере характеризуют и среднесуточный режим стока дренажных систем на тяжелых суглинистых почвах.

В табл. 44 приведены ординаты средних кривых обеспеченности суточного стока водосбора Вяо-оя—Вяо. На основании корреляции логарифмов этих координат получены следующие уравнения для средних кривых обеспеченности суточного стока магистрального канала Вяо-оя, характеризующих также дренажный сток с тяжелых суглинистых почв:

Таблица 44

Ординаты средней кривой обеспеченности среднесуточного стока отдельных месяцев вегетационного периода в магистральном канале Вяо-оя в долях от среднего стока данного месяца (в модулях коэффициентах)

Месяц	Обеспеченность, %							
	2	5	10	20	30	40	50	90
Май	3,60	3,20	2,63	1,83	1,31	0,94	0,60	0,10
Июнь	6,40	4,75	2,90	1,50	0,75	0,40	0,29	0,02
Июль	9,00	3,90	2,45	1,47	1,06	0,76	0,50	0,01
Август	11,30	7,20	4,25	1,40	0,62	0,27	0,18	0,03
Сентябрь	5,50	4,00	3,15	2,00	1,14	1,10	0,39	0,07
Октябрь	3,20	2,40	1,91	1,40	1,16	1,00	0,81	0,37

в мае

$$k_{c\,V\,P_1\%} = \frac{9{,}44}{(P_1+1)^{0{,}32}} - 2, \qquad (68)$$

в июне

$$k_{c\,VI\,P_1\%} = \frac{16{,}21}{(P_1+1)^{0{,}60}} - 1, \qquad (69)$$

в июле

$$k_{c\,VII\,P_1\%} = \frac{14{,}42}{(P_1+1)^{0{,}58}} - 1, \qquad (70)$$

в августе

$$k_{c\,VIII\,P_1\%} = \frac{23{,}42}{(P_1+1)^{0{,}69}} - 1, \qquad (71)$$

в сентябре

$$k_{c\,IX\,P_1\%} = \frac{13{,}50}{(P_1+1)^{0{,}56}} - 1 \qquad (72)$$

и в октябре

$$k_{c\,X\,P_1\%} = \frac{5{,}95}{(P_1+1)^{0{,}31}} - 1, \qquad (73)$$

где $k_{c\,V\ldots X}$ — ордината средней кривой обеспеченности среднесуточного стока данного месяца с тяжелых суглинистых почв в долях от среднемесячного стока;

P_1 — обеспеченность среднесуточного стока данного месяца, %.

Приведенные выше формулы дают основу для построения кривых обеспеченности среднемесячных и среднесуточных глубин грунтовых вод, необходимых при исследовании вопроса о требуемой интенсивности осушения.

Для перехода от стока к глубине грунтовых вод требуется знание характера кривой дренажного стока или связи среднесуточного стока и глубины грунтовых вод. Как уже указывалось выше, эта связь не является постоянной, так как коэффициент фильтрации почвы одной и той же осушительной системы зависит от ее водно-воздушного режима и изменяется в больших пределах. Поэтому необходимо знать так наз. среднюю кривую дренажного стока, полученную из большого числа измерений стока и глубины грунтовых вод в различных условиях состояния почвы в течение нескольких лет.

§ 10. РАСЧЕТНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ОСУШЕНИЯ

В предыдущем параграфе был освещен режим стока в осушительных системах по отдельным месяцам вегетационного и уборочного периодов. В дальнейшем рассмотрим вопрос об интенсивности осушения, которую целесообразно принять за основу при расчете осушительных систем.

При определении сечения осушительных каналов исходят обычно из положения, что осушительная система должна обеспечить оптимальный уровень грунтовых вод в период вегетации, причем летние затопления не должны приводить к потерям урожая. Для выполнения этих условий осушительные системы необходимо рассчитывать, исходя из бытового или среднего за вегетационный период стока и летнего максимального стока. При этом надо решить, какой процент обеспеченности должна иметь расчетная величина стока. С экономической точки зрения нет основания рассчитывать осушительные системы на пропуск самого максимального сезонного стока. Выбирая в качестве расчетного наиболее часто повторяющееся значение, можно ожидать довольно больших потерь урожая от недостаточного осушения. По-видимому, при проектировании осушительных систем следует выбирать расчетные нормы стока так, чтобы сумма годовых эксплуатационных и амортизационных расходов по осушительной системе и годовых потерь урожая от избытка влажности была минимальной. Это равносильно положению, что разность между стоимостью годового урожая и годовой суммы эксплуатационных и амортизационных расходов должна быть максимальной.

В условиях Эстонской ССР амортизационные расходы и затраты на содержание осушительной системы можно подсчитать по строительной стоимости и сроку ее службы.

Сложнее оценить зависимость урожая на осушенных и освоенных землях от интенсивности осушения, так как, кроме степени осушения, на величину урожая влияют различные геоморфологические, агрохимические, агротехнические и, в особенности, клима-

тические условия. Выяснение влияния всех этих факторов на размер урожая требует длительных и тщательно поставленных исследований. Имея в виду срочность производства огромных осушительных работ, которые предусмотрены планом развития народного хозяйства нашей страны, целесообразно проанализировать проблему расчета осушительных систем, не дожидаясь накопления данных многолетних наблюдений. Вполне понятно, что результаты такой разработки будут лишь предварительными и их следует уточнить по мере накопления дополнительных материалов наблюдений.

Представленные ниже расчеты произведены для случая, когда дрены расположены в однородной почве на водоупоре. В этом случае расстояние между дренами может быть выражено известной формулой:

$$E=2H\sqrt{\frac{k}{q}} \quad \text{и} \quad H=\frac{E}{2}\sqrt{\frac{q}{k}}, \tag{74}$$

где E — расстояние между дренами, *м*;
k — коэффициент фильтрации, *м/сек*;
H — напор грунтовых вод или разность между высотами уровней в середине междудренья и в дрене, *м*;
q — модуль стока, $м^3/сек\ м^2$.

Фактически почвы не являются однородными и дрены не расположены на водоупоре. Однако вследствие сложности расчетов приходится вводить названные упрощения.

Применение формул неустановившегося режима также пока не позволяет решать вопрос об интенсивности осушения, так как нет данных об урожайности различных культур в зависимости от скорости понижения грунтовых вод в разных почвенных условиях.

При производстве расчетов нами используются данные по стоку, полученные с осушительных систем, расположенных на торфяных и слабоводопроницаемых почвах. Эти данные используются для вычисления глубины грунтовых вод при различной интенсивности осушения. По глубинам грунтовых вод определяются потери урожая.

Известно, что характер связи между дренажным стоком и глубиной грунтовых вод в середине междудренья, кроме расстояния между дренами и коэффициента фильтрации, зависит и от глубины расположения водоупора. При учете глубины водоупора расчеты сильно усложняются. Кроме того, при каждой глубине водоупора требуется произвести отдельные циклы расчетов. Установление глубины залегания водоупора или определение величины активного слоя располагающегося ниже дрен в естественных условиях, когда дрена укладывается в неоднородный грунт, затруднительно. Поэтому расчетная схема преду-

сматривает укладку дрен на водоупоре. После получения решений для расчетной схемы необходимо найти зависимости, позволяющие переходить от расчетной схемы к реальным условиям.

Если в формуле (74) принять $\frac{E}{\sqrt{k}} = A$,

то

$$H = \frac{A}{2}\sqrt{q} \tag{75}$$

и

$$E = A\sqrt{k}. \tag{75а}$$

Придавая коэффициенту A различные значения, можно по данным о стоке (q) определить напоры или глубины грунтовых вод в середине междудренья при различной интенсивности осушения. В предыдущем параграфе были представлены формулы стока, приспособленные для вычисления кривых обеспеченности глубины грунтовых вод с осушительных систем на торфяных и слабоводопроницаемых почвах. Потери урожая при различной интенсивности осушения, определяемые по глубинам грунтовых вод, разделены на следующие элементы: 1) потери урожая вследствие запаздывания срока весеннего сева, 2) потери от затопления, 3) потери от высокого стояния грунтовых вод в вегетационный период и 4) потери в период уборки.

Потери урожая и расчетная интенсивность осушения определены для культурных сенокосов, пастбищ и культур полевого севооборота.

1. ИНТЕНСИВНОСТЬ ОСУШЕНИЯ КУЛЬТУРНЫХ СЕНОКОСОВ И ПАСТБИЩ

При определении потерь урожая культурных сенокосов и пастбищ от избытка влажности не принимают в расчет потери от запаздывания весеннего сева и кратковременного повышения уровня грунтовых вод до поверхности почвы. Посев луговых трав производится с промежутком в несколько лет и не связан с жесткими сроками.

Потери от затопления в вегетационный период следовало бы рассматривать как потери в период сеноуборки, обычно наблюдаемые в июле в тех районах, где сено затопляется при паводковых разливах рек. На внепойменных территориях, где главным образом и расположены культурные луга, кратковременные повышения уровня грунтовых вод не приносят значительного вреда травам.

А. Интенсивность осушения культурных сенокосов и пастбищ на торфяных почвах

Для установления связи между урожаем культурных сенокосов и пастбищ и уровнем грунтовых вод на торфяных почвах использованы данные, полученные на опытных участках и представлены в табл. 45—48. Эти данные показывают, что между урожаем и интенсивностью осушения существует четко выраженная связь. Однако последняя сильно затушевана влиянием целого ряда факторов, в том числе больших потерь влаги за счет испарения. В засушливое время влияние глубины грунтовых вод сглаживается по разным вариантам осушения. Из табл. 48 видно, что при слабом осушении уровни грунтовых вод в мае и июне стояли близко к поверхности почвы. В августе они были

Таблица 45

Урожай культурных пастбищ и глубина грунтовых вод на торфяных почвах на опытной базе «Тоома» (средние за 1953—1958 гг., по данным А. И. Райдла [30])

Расстояние между дренами, *м*	Глубина закладки дрен, *м*	Глубина грунтовых вод в середине между дренами, *м*		Урожай		Потери урожая, %
		в мае	в июне	*корм. ед./га*	%	
15	0,8	0,66	0,79	3020	100	0
30	0,8	0,44	0,63	2723	90	10
45	0,8	0,36	0,60	2193	73	27
60	0,8	0,24	0,64	1910*	63	37

* Данные с 1953 по 1956 г.

Таблица 46

Урожай культурных сенокосов и полевых культур и глубина грунтовых вод на торфяных почвах в совхозе «Ойдремаа» (средние за 1951—1958 гг. по данным У. Х. Томберга [48])

Расстояние между дренами, *м*	Глубина закладки дрен, *м*	Глубина грунтовых вод в середине между дренами, *м*		Урожай		Потери урожая, %
		в мае	в июне	*корм. ед./га*	%	
30	0,95	0,75	0,90	2520	100	0
45	0,95	0,67	0,85	2345	93	7
60	0,95	0,63	0,86	2160	86	14
80	0,95	0,60	0,82	2025	80	20
120	1,20	0,49	0,75	1855	74	26

Таблица 47

Урожай культурных сенокосов, пастбищ и ржи в зависимости от глубины грунтовых вод на торфяных почвах опытной базы «Тоома» (средние за 1951—1953 гг., по данным И. А. Эйзена [43])

Глубина грунтовых вод, *м*	Урожай сена культурных лугов		Урожай трав культурных пастбищ		Урожай ржи	
май—сентябрь	*ц/га*	%	*корм. ед./га*	%	*ц/га*	%
1,25	50	100	3170	100		
1,00	50	100			23	100
0,90	47	94			22	96
0,80	48	96			22	96
0,70	39	78	2717	86	20	87
0,60	36	72	2289	72	17	74
0,50	34	68			16	70
0,40	30	60			13	57
0,30	23	46	1279	40	7	30

Таблица 48

Влияние глубины грунтовых вод в вегетационный период на урожай культурных сенокосов на торфяных почвах в колхозе «Большевик» Йыгеваского района (1955 г. по данным И. А. Эйзена [43])

Средняя глубина грунтовых вод, *м*					Урожай сена культурных лугов, *ц/га*
май	июнь	июль	август	май—сентябрь	
4,47	0,60	0,91	1,11	0,86	46,5
0,09	0,24	0,79	1,06	0,67	19,5
0,06	0,18	0,76	1,02	0,62	10,7

уже ниже одного метра, т. е. на таком же уровне, как и при хорошем осушении. Данные табл. 48 показывают также, что величина урожая в большой степени зависит от глубины грунтовых вод в начале вегетационного периода. По-видимому, для получения высокого урожая каждая стадия развития растений требует свою минимально допустимую глубину грунтовых вод. На основе данных табл. 45 и 46, полученных на опытных осушительных системах и в результате исследования норм осушения, представленных в табл. 47, составлены рисунки 27 и 28.

На рис. 27, составленном на основе табл. 45 и 46, показана связь между величиной урожая и средней глубиной грунтовых вод в мае. Анализ рис. 27 показывает, что разброс точек довольно велик, а их количество слишком мало для определения сколько-нибудь точной средней зависимости. На основе этого рисунка

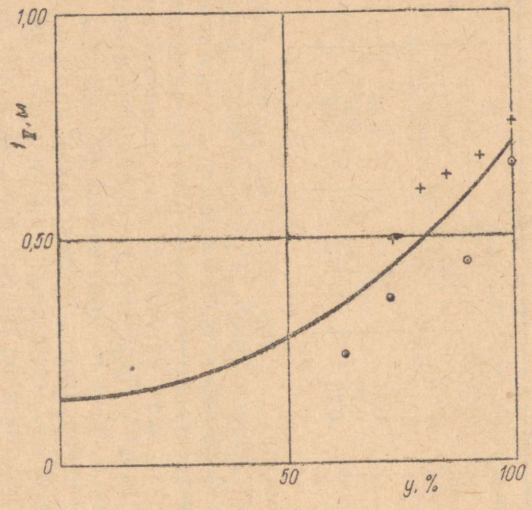


Рис. 27. Зависимость урожая от глубины грунтовых вод в мае:
⊙ — по данным табл. 45
\+ — по данным табл. 46.

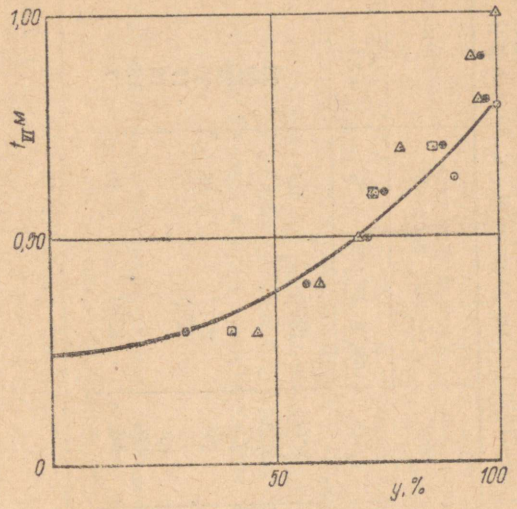


Рис. 28. Зависимость урожая от глубины грунтовых вод в июне:
⊙ — по данным табл. 45
△ — сено, по данным табл. 47.
□ — пастбище, по данным табл. 47
● — рожь, по данным табл. 47.

можно установить только приближенную, применяемую для контрольных расчетов, зависимость следующего вида:

$$y = 132(t_V - 0{,}15)^{0{,}46}, \qquad (76)$$

где y — урожай в процентах от полного урожая, т. е. от урожая, при котором потери от избытка влаги равны нулю,

t_V — средняя глубина грунтовых вод в мае, *м*.

На рис. 28, где урожай сопоставлен с глубиной грунтовых вод в июне, точек больше. Здесь, кроме данных, помещенных в табл. 45, использованы также данные табл. 47. В табл. 47 представлены результаты исследований, полученные на опытном участке, где с целью установления влияния нормы осушения на урожай глубины вод в вегетационный период поддерживалась в разных вариантах на различной, но каждый раз на строго определенной высоте. Исходя из предположения, что осушительные системы должны обеспечить норму осушения в период интенсивного развития растений (в июне), для определения связи между урожаем и глубиной грунтовых вод в июне использованы и данные табл. 47.

Уравнение для определения зависимости урожая от глубины грунтовых вод в июне, полученное на основе рис. 28, имеет следующий вид:

$$y = 132(t_{VI} - 0{,}25)^{0{,}48}, \qquad (77)$$

где t_{VI} — средняя глубина грунтовых вод в июне, *м*.

Уравнение (77) можно использовать и для определения потерь урожая (y_0) от недостаточного осушения. В этом случае из полного, т. е. 100-процентного урожая вычитается урожай при данной интенсивности осушения. Таким образом:

$$y_0 = 100 - 132(t_{VI} - 0{,}25)^{0{,}48}. \qquad (78)$$

Для вычисления напора грунтовых вод в июне можно использовать формулу (75) $H = \frac{A}{2}\sqrt{q}$. Модуль стока q можно определить по формуле

$$q_{TVIP\%} = 1{,}10\bar{q}k_{\text{ср. летн } P\%},$$

где средний летний сток $k_{\text{ср. летн } P\%}$ определяется по формуле (40). Норма годового стока $\bar{q}$ получается по картограмме климатического стока [49] с использованием поправки, вычисляемой по формуле (1). Для перевода модулей стока из *л/сек км*^{2} в *м*^{3}*/сек м*^{2}, как это требуется в формуле (75), следует их умножить на коэффициент 10^{-9}. Таким образом, для вычисления

кривой обеспеченности напоров грунтовых вод в июне $H_{VI\,P\%}$ получаем выражение

$$H_{VI\,P\%}=\frac{A}{2}\sqrt{q_{T\,VI\,P\%}10^{-9}}. \qquad (79)$$

Для определения потерь урожая при разной интенсивности осушения необходимо знать напоры или, вернее, ординаты кривой депрессии, находящейся выше нормы осушения.

Норма осушения в июне определяется по формуле (77). Приведя формулу (77) к виду

$$t_{VI}=\left(\frac{y}{132}\right)^{2,08}+0,25$$

и подставляя $y=100\%$, получаем норму осушения в июне $t_{VI}=0,81$ *м*.

При повышении кривой депрессии выше нормы осушения наступает уменьшение урожая. Для определения этого уменьшения следует знать среднюю величину повышения грунтовых вод над нормой осушения при различной обеспеченности стока и интенсивности осушения. С этой целью определяется площадь сегмента кривой депрессии, находящаяся выше нормы осушения. Принимая во внимание, что кривая депрессии имеет форму, близкую к эллипсу, и используя обозначения, представленные на рис. 29, можно вычислить площадь сегмента эллипса, расположенную выше нормы осушения, по формуле

$$F=\frac{E}{2}H\arccos\frac{a}{H}-a\,x.$$

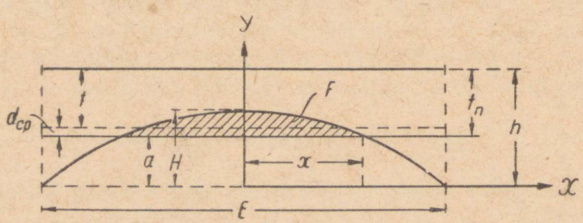


Рис. 29. Кривая депрессии.

Из уравнения эллипса

$$\frac{x^2}{\left(\frac{E}{2}\right)^2}+\frac{a^2}{H^2}=1$$

получается

$$x=\frac{E}{2}\sqrt{1-\frac{a^2}{H^2}}$$

$$F=\frac{E}{2}\left(H\arccos\frac{a}{H}-a\sqrt{1-\frac{a^2}{H^2}}\right). \quad (80)$$

Средний по всей полосе между дренами слой грунтовых вод, превышающий норму осушения, равен

$$d_{ср}=\frac{F}{E}. \quad (81)$$

Если заменить в формуле (81) F на выражение (80), расстояние между дренами сокращается и

$$d_{ср}=\frac{1}{2}\left(H\arccos\frac{a}{H}-a\sqrt{1-\frac{a^2}{H^2}}\right). \quad (81а)$$

Средняя глубина грунтовых вод t в полосе между дренами, необходимая для определения потерь урожая, определяется по уравнению

$$t=h-(a+d_{ср}). \quad (82)$$

где h — глубина заложения дрен, *м*;

a — расстояние от уровня закладки дрен до нормы осушения ($a=h-t_n$);

$d_{ср}$ — определяется по формуле (81а).

На основе изложенного выше можно определить потери урожая от высокого стояния грунтовых вод в июне при различной интенсивности осушения. С этой целью в уравнении (78) величину t_{VI} следует заменить величиной t, определяемой по формуле (82). Следовательно,

$$y_0=100-132(h-a_{VI}-d_{VI\,ср}-0{,}25)^{0{,}48}.$$

Принимая глубину укладки дрен h равной 1,0 *м* и $a_{VI}=1{,}00-0{,}81=0{,}19$ *м*, получаем

$$y_0=100-132(0{,}56-d_{VI\,ср})^{0{,}48}. \quad (83)$$

Величина $d_{ср}$ является функцией H, а H, на основе формулы (79), зависит от величины стока q и интенсивности осушения A. Величина стока, в свою очередь, зависит от процента обеспеченности P. При определенной интенсивности осушения ($A=\text{const}$) выбранного участка в выражении для $d_{ср}$ остается только одна переменная величина P, т. е. $d_{ср}=f(P)$. Если использовать для вычисления $q_{T\,VI\,P\%}$ формулу (49), то уравнение кривой обеспеченности потерь урожая от высокого стояния грунтовых вод можно записать в следующем виде:

$$y_0=100-132[0{,}56-f(P)]^{0{,}48}.$$

Величина y_0 равна нулю при обеспеченности стока $P=P_{H_a}$, когда $H=a_{VI}=0{,}19$ *м*. При $H<a$ величина y_0 принимается также равной нулю, так как отрицательные значения потерь урожая нереальны.

Площадь эпюры ординат кривой обеспеченности потерь урожая в пределах обеспеченности от $P=0$ до $P=H_a$ равна сумме потерь урожая за столетний период. Эта площадь выражается следующим интегралом:

$$\int_0^{P_{H_a}} y_0 dP = \{100-132[0{,}56-\int_0^{P_{H_a}} f(P)]^{0{,}48}\}dP \qquad (84)$$

и приближенно может быть определена по формуле трапеции

$$\int_0^{P_{H_a}} y_0 dP \approx \sum_{i=1}^{n} \bar{y}_0 \Delta P_i = \frac{y_{00}+y_{01}}{2}\Delta P_1 + \frac{y_{01}+y_{02}}{2}\Delta P_2 + \ldots +$$

$$+\frac{y_{0n-1}+y_{0n}}{2}\Delta P_n \qquad (84а)$$

При определении среднегодовых потерь урожая от высокого стояния грунтовых вод в июне следует взять сотую долю от суммы (84а), т. е.

$$y_{0ср}=\frac{1}{100}\sum_{i=1}^{n} y_{0i}\Delta P_i \qquad (85)$$

В табл. 49 приведены результаты определения $y_{0ср}$ на основе формулы (84а) при показателе интенсивности осушения $A=9000$. При вычислении кривой обеспеченности модуля стока в июне $q_{T\,VI\,P\%}$ за норму стока $\bar{q}$ принято 9 *л/сек км²*. Величина модульного коэффициента среднего минимального стока $k_{95\%}$, входящего в формулу для вычисления среднего летнего стока (39) и (40), принята равной нулю. В осушительных системах на торфяных почвах $k_{95\%}$ может быть больше нуля, однако обычно его величина не превышает 0,05.

Результаты вычислений, приведенные в табл. 49, показывают, что потери урожая $y_{0ср}$ от высокого стояния грунтовых вод в июне при показателе интенсивности $A=9000$ и норме стока в 9 *л/сек км²* на торфяных почвах составляют в среднем 4,7% полного урожая, если потери от избытка влаги равны нулю.

Потери урожая можно также определить по стоку в мае — $q_{T\,V\,P\%}$ (48). В этом случае для расчета урожая следует воспользоваться уравнением (76), а потери урожая определяются по уравнению

$$y_0=100-132\,(h-a_V-d_{V\,ср}-0{,}15)^{0{,}46}, \qquad (86)$$

Таблица 49

Определение потерь урожая на торфяных почвах от высокого стояния грунтовых вод в июне при интенсивности осушения $A=9000$ и модуле многолетнего среднегодового стока $\overline{q}=9$ *л/сек км²*

Показатели	P, %									
	73	50	40	30	20	10	5	2	1	0
$q_{T\,VI\,P\%}$	1,78	2,84	3,50	4,41	5,83	8,40	11,3	15,2	17,8	22,9
H	0,19	2,24	0,27	0,30	0,34	0,41	0,48	0,55	0,60	0,68
d_{VIcp}	0	0,02	0,04	0,06	0,09	0,14	0,19	0,25	0,28	0,35
y_0	0	1,8	3,6	5,4	8,0	12,8	18,2	24,8	28,4	37,6
$\overline{y_0}$	0,9	2,7	4,5	6,7	10,4	15,5	21,5	26,6	33,0	
ΔP	23	10	10	10	10	5	3	1	1	
$\overline{y_0}\Delta P$	21	27	45	67	104	78	64	27	33	
$y_{0cp}=\frac{1}{100}\sum\overline{y_0}\Delta P$	4,66									

где $a_V=h-t_{n\,V}$, t_{nV} — нормальная глубина грунтовых вод в мае, при которой потери урожая равны нулю.

Глубина грунтовых вод в мае, на основе уравнения (76), выражается следующим образом:

$$t_V=\left(\frac{y}{132}\right)^{2,18}+0,15,$$

при $y=100\%$ так наз. нормальная глубина грунтовых вод в мае $t_{n\,V}$ равна 0,70 *м*.

Таким образом, при глубине заложения дрен $h=1,0$ *м* $a_V=1,0-0,70=0,30$ *м* и $y_0=100-132(0,55-d_{Vcp})^{0,46}$.

При вычислении d_{Vcp} в формуле (81а) следует взять $a=0,30$ *м* и H найти по формуле (75), где q определяется по формуле (48).

Из табл. 50 видно, что при $A=9000$ и $\overline{q}=9$ *л/сек км²* средние потери, определенные по стоку в мае, составляют 4,3% полного урожая. Последний результат отличается на 17% от значения, приведенного в табл. 49. Выше было указано, что уравнение (76)

Таблица 50

Потери урожая от высокого стояния грунтовых вод в мае при интенсивности осушения $A=9000$ и модуле многолетнего среднегодового стока $\bar{q}=9$ л/сек км²

Показатель	P, %									
	63	50	40	30	20	10	5	2	1	0
$q_{TV\,P\%}$	4,55	5,9	7,2	8,8	11,2	14,9	18,6	22,7	25,2	19,2
H	0,32	0,35	0,38	0,42	0,48	0,55	0,61	0,68	0,71	0,77
d_{Vcp}	0	0,02	0,03	0,06	0,10	0,15	0,19	0,24	0,27	0,31
y_0	0	1,4	2,4	4,8	8,6	13,4	17,4	23,0	16,4	31,4
$\bar{y}_0$	0,7		1,9	3,6	6,7	11,0	15,4	20,1	24,7	28,9
ΔP	7		10	10	10	10	5	3	1	1
$y_0 \Delta P$	5		19	36	67	110	77	61	25	29
$y_{0cp}=\frac{1}{100}\sum \bar{y}_0 \Delta P$	4,29									

для определения величины урожая по глубине грунтовых вод в мае является весьма приближенным. Поэтому результаты вычислений, представленные в табл. 50, менее обоснованны, чем в табл. 49. Однако они показывают, что при достаточном объеме опытных данных об урожае и глубине грунтовых вод в мае можно определить средние потери урожая на основе формулы (48). Вместе с тем определение потерь урожая по отдельным годам может привести к большим неточностям. В отдельные годы на разных осушительных системах глубина грунтовых вод в мае и июне может быть больше минимально требуемой или нормальной величины. В таких случаях принималось, что потери урожая должны быть равны нулю. Фактически небольшие потери урожая все же наблюдаются. Из этого должно следовать, что потери зависят не только от глубины грунтовых вод в мае и июне, но и от их глубины в другие месяцы влажного периода. Точность средних расчетных величин от этого, однако, не страдает, ибо расчетные глубины грунтовых вод какого-либо месяца находятся в определенной зависимости от интенсивности осушения, а потери урожая также связаны с интенсивностью осушения (что ясно видно из данных табл. 45 и 46).

В табл. 51 представлены результаты определения потерь урожая в весенний период при различной интенсивности осушения. Расчеты были проведены на основе зависимости потерь урожая от высокого стояния грунтовых вод в июне (83) и размера среднемесячного стока в июне (49).

Таблица 51

Потери урожая культурных сенокосов и пастбищ в весенний период на торфяных почвах при $\overline{q}=9$ *л/сек км²*

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % от полного урожая (без учета потерь)
4000	0,0
5600	0,8
7800	3,1
9000	4,7
13000	13,0
15600	20,2

Кроме потерь урожая, обусловленных избытком влаги, и наблюдаемых при выращивании трав на культурных сенокосах и пастбищах, имеют место потери при уборке урожая. На основе наблюдений на опытной базе «Тоома» [30] выяснилось, что при глубине грунтовых вод в середине междудренья менее 0,45 *м* нецелесообразно производить пастьбу, так как происходит повреждение дернины копытами животных.

При уборке отавы культурных сенокосов на сено или силос нагрузка на дернину меньше, чем при пастьбе большого числа животных. Поэтому машинами можно работать на сенокосах уже при глубине грунтовых вод, равной 0,4 *м*.

В летние месяцы (июле и августе), когда удаление избытка влаги из почвы происходит главным образом за счет испарения и транспирации, можно считать, что уборка сена и использование осушенной территории под пастбища не особенно сильно зависят от интенсивности осушения. Однако в сентябре и октябре уборка отавы и стравливание урожая трав без ущерба для дернины возможно только при достаточно интенсивном осушении.

В условиях Эстонской ССР распределение урожая культурных пастбищ в среднем по республике дано в табл. 52.

Из таблицы видно, что при недостаточной интенсивности осушения потери урожая на пастбищах в сентябре—октябре могут составлять 15—25% урожая.

Таблица 52

Продуктивность культурных пастбищ по месяцам (в % от полного урожая, по данным Х. Вяльяотса [51]

Месяц	Продуктивность, %
Май	5—15
Июнь	25—35
Июль	20—30
Август	10—20
Сентябрь	10—15
Октябрь	5—10

Для определения потерь урожая на культурных пастбищах в осенний период, обусловленных невозможностью их стравливания, необходимо иметь кривые обеспеченности среднесуточной глубины грунтовых вод или напора, соответствующие различной интенсивности осушения (в сентябре и октябре). Напор грунтовых вод данного периода можно вычислить по стоку. Поэтому для вычисления среднесуточных напоров грунтовых вод в сентябре и октябре требуются данные о среднесуточном стоке, наблюдаемом на осушительных системах.

Вследствие короткого ряда наблюдений по стоку на отдельных осушительных системах: удалось построить только среднемесячные кривые обеспеченности стока. При этом процент обеспеченности стока отдельных месяцев был определен по обеспеченности стока этих месяцев на основании данных о соседних малых водосборах, по которым имелись многолетние ряды.

Среднесуточное распределение стока внутри месяца, выраженное в долях от среднего стока данного месяца, довольно устойчиво (см. табл. 36 и 43). Поэтому кривые обеспеченности среднесуточного стока, построенные по данным за три-четыре года, могут довольно удовлетворительно характеризовать внутримесячное распределение стока этого месяца в многолетнем разрезе.

Если ординаты кривой обеспеченности среднесуточного стока выражены в долях от среднемесячного стока, то при умножении их на ординаты кривой обеспеченности среднемесячного стока получается поверхность обеспеченности среднесуточного стока данного месяца. Таким образом на основе кратковременных наблюдений можно получить представление о распределении среднесуточного стока в осушительных системах за многолетний период.

Пользуясь поверхностью обеспеченности среднесуточного стока, мы определили поверхность обеспеченности среднесуточного напора грунтовых вод. Кривую обеспеченности среднемесячных величин напора грунтовых вод в сентябре и октябре при различных показателях интенсивности осушения А можно вычислить по формуле (75) с использованием формулы (53) для определения среднего стока в сентябре $q_{\text{тIX}P\%}$ и формулы (54) для определения $q_{\text{тX}P\%}$ в октябре.

Следовательно,

$$H_{\text{IX}P\%} = \frac{A}{2}\sqrt{q_{\text{тIX}P\%}\,10^{-9}} \qquad (87)$$

и

$$H_{\text{X}P\%} = \frac{A}{2}\sqrt{q_{\text{тX}P\%}10^{-9}}, \qquad (88)$$

где $H_{\text{IX}\,P\%}$ и $H_{\text{X}\,P\%}$ — среднемесячные напоры грунтовых вод в сентябре и октябре.

Для определения времени, в течение которого невозможно проводить стравливание, требуются данные о среднесуточных напорах или глубинах грунтовых вод. Для получения среднесуточных величин напора необходимо результаты, полученные по формуле (87), умножить на результаты, полученные по формуле (59) $k_{\text{тIX}P_1\%}$. Аналогично результаты, полученные по формуле (88), необходимо умножить на результаты, полученные по формуле (60) $k_{\text{тX}P_1\%}$. В результате умножения получается следующее уравнение поверхности обеспеченности напора грунтовых вод в сентябре:

$$H_{\text{IX}PP_1\%} = \frac{Ak_{\text{тIX}P_1\%}}{2}\sqrt{q_{\text{тIX}P\%}10^{-9}} \qquad (89)$$

и в октябре

$$H_{\text{X}PP_1\%} = \frac{Ak_{\text{тX}P_1\%}}{2}\sqrt{q_{\text{тX}P\%}\,10^{-9}}, \qquad (90)$$

где $H_{\text{IX}\,PP_1\%}$ и $H_{\text{X}\,PP_1\%}$ — среднесуточные напоры грунтовых вод в сентябре и октябре.

На рис. 30 поверхность обеспеченности среднесуточных напоров грунтовых вод обозначены буквами *ABCD*.

Горизонтальными осями координат на рис. 30 являются обеспеченность среднемесячного напора *P* и

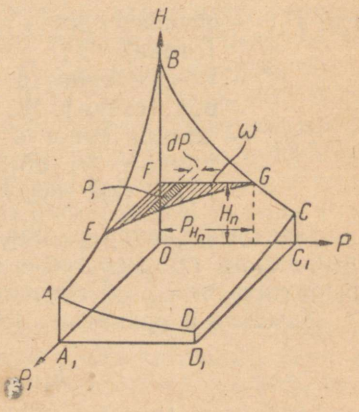


Рис. 30. Поверхность обеспеченности напора грунтовых вод.

обеспеченность среднесуточного напора данного месяца P_1, а по вертикальной оси отложены напоры грунтовых вод H.

Площадь проекции поверхности напоров грунтовых вод показывает обеспеченность или вероятность времени превышения данной величины.

При напоре $H > H_n$, где $H_n = h - 0{,}45$, а h — глубина заложения дрен, пастьба становится невозможной. На рис. 30 показана поверхность обеспеченности напоров одного месяца, выражаемая площадью EBG, соответствующая периоду, когда не допускается пастьба скота. Площадь проекции поверхности EBG (сечение EFG) показывает обеспеченность периода в течение месяца, когда нельзя пользоваться пастбищем.

Если продуктивность пастбища в течение одного месяца соответствует объему кормов, потребляемых скотом, то пастбище должно использоваться каждый день. В таком случае обеспеченность периода, когда использование пастбища невозможно, показывает также процент площади неиспользуемых пастбищ. Поэтому площадь EFG служит показателем невозможности использования пастбищ данного месяца. Доля площади EFG в процентах от площади $A_1OC_1D_1$, численно равна доле неиспользуемых пастбищ в процентах от общей их площади. Если данный месяц приходится на конец вегетационного периода, то продукция рассматриваемой площади пастбища за этот месяц является потерей урожая.

Площадь $EFG = \omega$ (см. рис. 30) выражается интегралом

$$\omega = \int_0^{P_{H_a}} P_1 dP, \qquad (90а)$$

где P_1 — обеспеченность среднесуточного напора грунтовых вод (стока), %;

P — обеспеченность среднемесячного напора грунтовых вод (стока), %;

P_{H_a} — обеспеченность среднемесячного напора, когда при данном H_n обеспеченность среднесуточного напора $P_1 = 0$ (см. рис. 30).

Для вычисления площади ω в уравнениях (89) и (90) обеспеченность среднесуточного стока данного месяца P_1 следует выражать через обеспеченность среднемесячного стока P.

Заменяя в уравнении (89) $k_{\text{т IX}\,P_1\%}$ формулой (59),

$$k_{\text{т IX}\,P_1\%} = \frac{4{,}90}{(P_1+1)^{0{,}25}} - 1$$

и $q_{\text{т IX}\,P\%}$ — формулой (53)

$$q_{\text{т IX}\,P\%} = 0{,}65\bar{q}k_{\text{ср.ос}\,P\%},$$

где $k_{\text{ср.ос}\,P\%}$ — вычисляется по формуле (44),

$$k_{\text{ср.ос}\,P\%}=k_{95\%}[2{,}06\lg(P+1)-3{,}16]-2{,}06\lg(P+1)+4{,}16,$$

принимая далее $k_{95\%}=0$, получим, что обеспеченность среднесуточного стока P_1 выражается через обеспеченность среднемесячного стока P в сентябре следующим уравнением:

$$P_{1\,\text{т IX}}=\left[\frac{20{,}39-10{,}10\lg(P+1)}{6{,}15\cdot 10^{9}\dfrac{H^2}{A^2q}+4{,}16-2{,}06\lg(P+1)}\right]^{4{,}0}-1 \qquad (91)$$

и

$$\omega_{\text{IX}}=\int_0^{P_{H_a}}P_{1\,\text{т IX}}dP. \qquad (92)$$

В приведенных формулах обеспеченность P и P_1 выражены в процентах. При среднемесячном напоре (стоке) за 100% можно принять период, равный 100 годам. При среднесуточном напоре (стоке) период в 30 или 31 сутки равен 100%. Таким образом, площадь ω_{IX} — соответствует обеспеченности суточного напора в сентябре за столетний период, когда на осушенных пастбищах в сентябре не допускается пастьба скота. Среднегодовая обеспеченность, при которой невозможно использование пастбищ, будет в 100 раз меньшей, чем ω_{IX}.

Имея, однако, в виду, что в сентябре продуктивность пастбищ составляет около 50% их продуктивности в июне и июле (см. табл. 52), для их стравливания в этот период требуется также на 50% меньше времени, чем в июне и июле. Поэтому при определении потерь урожая в сентябре нельзя за основу принять полную площадь ω_{IX}. Следует считать, что потери урожая имеют место только в том случае, если процент обеспеченности среднесуточного напора в сентябре $P_{1\,\text{т IX}}$ (при данной величине A), вычисленной по формуле (91), где $H=H_n=h-0{,}45$, получается больше 50%. При $P_{1\,\text{т IX}}<50\%$ можно более половины сентября проводить стравливание и использовать всю месячную продуктивность пастбищ. Если при данных величинах A и H при каком-то проценте обеспеченности среднемесячного напора P в формуле (91) $P_{1\,\text{т IX}}=100\%$, то это показывает, что в таком случае пастьба вообще невозможна, а потери урожая равны 100%. Таким образом, потери урожая на пастбищах в октябре имеют место при таких процентах обеспеченности среднемесячного напора P, когда процент обеспеченности среднесуточного напора $P_{1\,\text{т IX}}$ колеблется от 50 до 100%. При этом, если $P_{1\,\text{т IX}}=50\%$, потери равны нулю, т. е. процент площади неиспользуемых пастбищ также равен 0, а при $P_{1\,\text{т IX}}=100\%$ процент площади неиспользуемых пастбищ равен 100%. Для определения процента

площади неиспользуемых пастбищ в пределах от $P_{1\,т\,IX}=50\%$ до $P_{1\,т\,IX}=100\%$ произведена прямолинейная интерполяция (рис. 31). На основе рис. 31 получим

$$P'_{1\,т\,IX}=2P_{1\,т\,IX}-100, \qquad (93)$$

где $P_{1\,т\,IX}$ — процент площади неиспользуемых пастбищ в сентябре при данной обеспеченности среднемесячного напора грунтовых вод P.

Заменяя в формуле (92) $P_{1\,т\,IX}$ уравнением (93) $P_{1\,т\,IX}$, процент площади пастбищ, где не допускается пастьба в сентябре, можно вычислить за многолетний период по формуле

$$\omega_{IX}=\int_0^{P_0}(2P_{1\,т\,IX}-100)\,dP, \qquad (94)$$

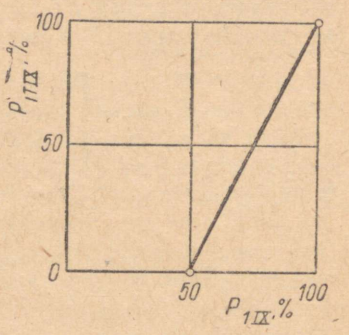


Рис. 31. Зависимость процента площади неиспользуемых пастбищ в сентябре $P_{1\,т\,IX}'$ от процента обеспеченности среднесуточного напора $P_{1\,т\,IX}$.

где ω'_{IX} — суммарный процент площади за столетний период, на которой в сентябре не допускается пастьба,

$P_{1\,т\,IX}$ — определяется по формуле (91),

P_0 — процент обеспеченности среднемесячного напора (стока), при котором $P_{1\,т\,IX}=50\%$.

Данные приближенного вычисления интеграла (94) методом трапеции при показателе интенсивности осушения $A=9000$, $H=1{,}00-0{,}45=0{,}55$ и $\bar{q}=9$ *л/сек км*^{2} представлены в табл. 53.

Результаты расчета, представленные в табл. 53, показывают, что при показателе интенсивности осушения $A=9000$ площадь неиспользуемых пастбищ в сентябре составляет в среднем лишь 0,7% общей их площади. Если урожай пастбищ в сентябре составляет в среднем 12,5% годового урожая (см. табл. 52), то потери в данных условиях равны $\frac{12{,}5\cdot 0{,}7}{100}=0{,}1\%$.

Потери урожая на пастбищах в октябре определены на основе уравнения (90). Здесь ординаты октябрьской кривой обеспеченности среднесуточного стока вычислены по формуле (60), имеющей вид

$$k_{т\,x\,P_1\%}=\frac{4{,}47}{(P_1+1)^{0{,}22}}-1,$$

$q_{т\,x\,P\%}$ вычисляется по формуле (54), имеющей вид

Определение процента площади пастбищ на торфяных почвах, где высокое стояние грунтовых вод в сентябре не допускает выпаса (при $A=9000$ и $\bar{q}=9$ *л/сек км²*)

Показатели	P, %			
	2,5	2	1	0
$P_{1\,\text{т}\,\text{IX}}=\left[\frac{20{,}39-10{,}10\lg(P+1)}{6{,}72-2{,}06\lg(P+1)}\right]^{4{,}0}-1$	49,4	53,2	64,5	83,5
$P'_{1\,\text{т}\,\text{IX}}=2P_{1\,\text{т}\,\text{IX}}-100$	0	6,4	29,0	67,0
$\overline{P'_{1\,\text{т}\,\text{IX}}}$	3,2		17,7	48,0
ΔP	0,5		1	1
$\overline{P'_{1\,\text{т}\,\text{IX}}}\Delta P$	1,6		17,7	48,0
$\frac{1}{100}\omega'_{\text{IX}}=\frac{1}{100}\sum\overline{P'_{1\,\text{т}\,\text{IX}}}\,\Delta P$	0,67			

$$q_{\text{т}\,\text{X}\,P\%}=1{,}35\,\bar{q}\,k_{\text{ср. ос}\,P\%}.$$

При $k_{95\%}=0$ для $P_{1\,\text{т}\,\text{X}}$ в октябре получается следующее выражение:

$$P_{1\,\text{т}\,\text{X}}=\left[\frac{18{,}60-9{,}20\lg(P+1)}{2{,}96\cdot 10^{9}\,\frac{H^2}{A^2q}+4{,}16-2{,}06\lg(P+1)}\right]^{4{,}55}-1. \qquad (95)$$

Урожай пастбищ в октябре составляет в среднем около 25% урожая июня и июля. Поэтому можно ожидать, что весь октябрьский урожай используется скотом, если в течение трех четвертей этого месяца глубина грунтовых вод меньше 0,45 *м*. Следовательно, при $P_{1\,\text{т}\,\text{X}}=75\%$ потери урожая равны нулю и $P'_{1\,\text{т}\,\text{X}}=0$, при $P_{1\,\text{т}\,\text{X}}=100\%$ пастбище остается неиспользованным, т. е. $P'_{1\,\text{т}\,\text{X}}=100$. Пользуясь для определения $P'_{1\,\text{т}\,\text{X}}$ прямолинейной интерполяцией, получаем

$$P'_{1\,\text{т}\,\text{X}}=4P_{1\,\text{т}\,\text{X}}-300, \qquad (96)$$

где $P'_{1\,тх}$ — процент общей площади пастбищ, остающийся в октябре неиспользованным при данной обеспеченности среднемесячного напора грунтовых вод P.

Определяя $P'_{1\,тх}$ при помощи уравнения (96) и подставляя в формулу (90а) потери урожая в октябре, можно вычислить ω'_x по формуле

$$\omega'_x = \int_0^{P_0} (4P_{1\,тх} - 300)\,dP, \qquad (97)$$

где ω'_x — суммарный процент площади пастбищ за столетний период, когда в октябре невозможна пастьба скота,
$P_{1\,тх}$ — определяется по формуле (95),
P_0 — процент обеспеченности среднемесячного напора грунтовых вод (стока) в октябре, при котором процент обеспеченности среднесуточного напора грунтовых вод (стока) $P_{1\,тх} = 75\%$.

Таблица 54

Определение процента площади пастбищ на торфяных почвах, где высокое стояние грунтовых вод в октябре не допускает выпаса
(при $A = 9000$ и $\bar{q} = 9$ *л/сек км²*)

Показатели	P, %				
	14,5	13	12	11	10,5
$P_{1\,тх} = \left[\frac{18{,}60 - 9{,}20\lg(P+1)}{5{,}40 - 2{,}06\lg(P+1)}\right]^{4{,}55} - 1$	75,0	83,1	90,0	96,1	100
$P'_{1\,тх} = 4P_{1\,тх} - 300$	0	33,2	60,0	84,4	100
$\overline{P'_{1\,тх}}$	16,6	46,6	72,2	92,2	100
ΔP	1,5	1	1	0,5	10,5
$\overline{P'_{1\,тх}}\,\Delta P$	25	47	72	46	1050
$\frac{1}{100}\omega'_x = \frac{1}{100}\sum \overline{P'_{1\,тх}}\,\Delta P$	12,40				

Расчет величины $P_{1\,тх}$ по формуле (95) и площади ω'_x по формуле (97) при $A=9000$, $\bar{q}=9$ *л/сек км²* и $H=0{,}55$ *м* представлен в табл. 54.

Результаты расчета показывают, что в приведенных условиях в среднем 12,4% пастбищ в октябре остаются неиспользованными.

Если урожай пастбищ в октябре (по данным табл. 52) составляет в среднем 7,5% годового урожая, то потери урожая в данном случае равны $\frac{7{,}5 \cdot 12{,}4}{100} = 0{,}9\%$.

Для проверки и иллюстрации приведенных расчетов использованы данные наблюдений по осушительной системе Рехемяэ с 1952 по 1962 г.

Показателем интенсивности осушения A для этой осушительной системы определяется из уравнения (75) кривой дренажного стока, где $H=\frac{A}{2}\sqrt{q}$. На основе рис. 24 для нижней части кривой стока при уровне грунтовых вод $t \leqslant -0{,}45$ *м* можно составить уравнение

$$t=0{,}105\sqrt{q}-1{,}00,$$

если при совпадении оси абсцисс с поверхностью почвы

$$t=-h+H \text{ и } h=1{,}0 \text{ м, то } H=0{,}105\sqrt{q},$$

где q — модуль дренажного стока, *л/сек км²*,
h — глубина заложения дрен, *м*.

После перевода модуля стока в *м³/сек м²* получим

$$H=0{,}105\sqrt{10^9 q}=\frac{A}{2}\sqrt{q},$$

откуда

$$A=6640.$$

Зная величину $A=6640$, $\bar{q}=10{,}6$ *л/сек км²* (по табл. 2) и $H=0{,}55$ *м*, можно по формуле (95) определить кривую обеспеченности напора грунтовых вод в октябре, при которой $H \geqslant 0{,}55$ *м*, т. е. обеспеченность периода, в течение которого невозможно вести пастьбу на осушительной системе Рехемяэ.

В табл. 54а представлены результаты определения площади пастбищ, где в условиях осушительной системы Рехемяэ невозможна пастьба в октябре.

В осушительной системе Рехемяэ в октябре месяце 1952—1962 гг. (за исключением 1953 г.) проводились наблюдения глубины грунтовых вод. При этом в 1952 г. глубина в 0,45 *м* и менее наблюдалась в течение 1 суток, в 1954 г. — 3, в 1956 — 2, в 1957 — 17 и в 1962 г. в течение 12 суток. В остальные годы глубина грунтовых вод превышала 0,45 *м*.

Таблица 54а

Определение процента площади пастбищ на торфяных почвах, где невозможна пастьба скота в октябре при $A=6640$ и $\overline{q}=10{,}6$ *л/сек км²*

Показатели	P, %							
	55	45	35	20	10	4,5	3	2,2
$P_{1\,т\,х} = \left[\frac{18{,}60-9{,}20\lg(P+1)}{6{,}08-2{,}06\lg(P+1)}\right]^{4{,}55}-1$	0	1,67	5,16	18,0	42,7	74,8	92,8	100
$P'_{1\,т\,х}=4P_{1\,т\,х}-300$						0	78,1	100
$\overline{P'_{1\,т\,х}}$						39,0	89,0	100
ΔP						1,5	0,8	2,2
$\overline{P'_{1\,т\,х}}\,\Delta P$						59	71	220
$\frac{1}{100}\omega'_х=\frac{1}{100}\sum\overline{P'_{1\,т\,х}}\,\Delta P$	3,50							

Из рис. 32 видно, что кривая обеспеченности месячного стока октября за период с 1952 по 1962 г. мало отличается от многолетнего периода, в связи с чем эти данные являются показательными и для многолетнего периода. На рис. 33 показаны кривые обеспеченности глубины (напора) грунтовых вод в октябре в осушительной системе Рехемяэ при глубине, равной и меньше 0,45 *м* ($H \geqslant 0{,}55$ *м*). Данные наблюдений на рисунке отмечены кружками. Обеспеченность (продолжительность) времени, при которой глубина грунтовых вод 0,45 *м* и меньше, обозначена в процентах от всего периода. При обозначении числа суток в процентах от общего числа суток октября их число умножено на коэффициент $\frac{100}{31}=3{,}22$. Обеспеченность октября с глубиной грунтовых вод в 0,45 *м* и меньше определена по формуле

$$P=\frac{m-0{,}3}{n+0{,}4}-100,$$

где m — порядковый номер октября в убывающем ряду, составленном по продолжительности стояния уровня грунтовых вод на глубине 0,45 *м* и выше;

n — общее число лет наблюдений.

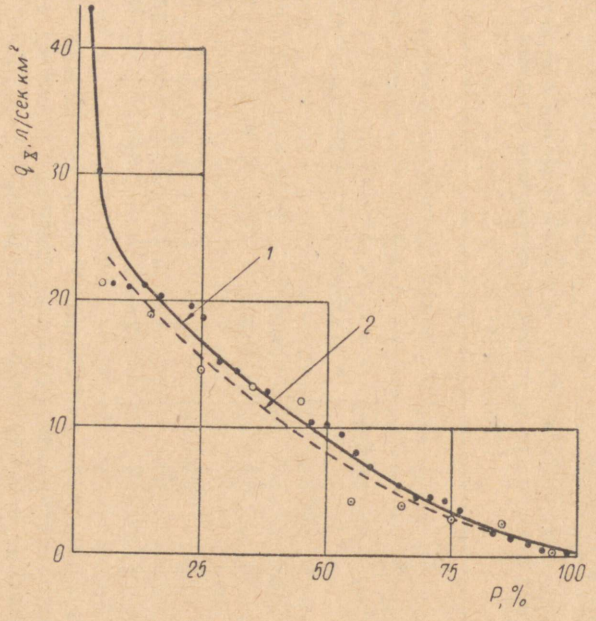


Рис. 32. Кривая обеспеченности среднемесячного стока в октябре водпоста р. Вихтерпалу—Энглема:
1 — 1922—1955 гг. *2* — 1952—1962 гг.

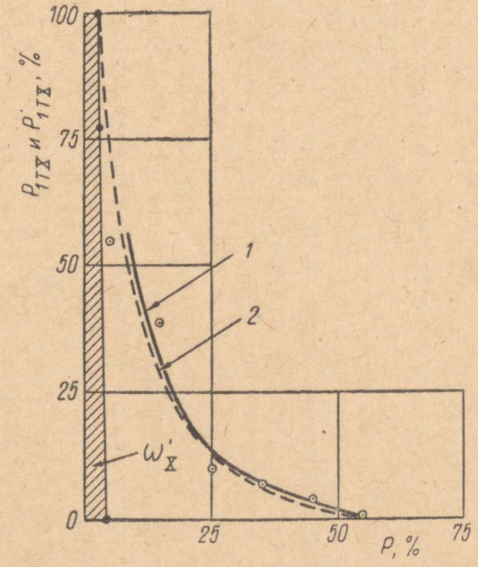


Рис. 33. Кривая обеспеченности глубины грунтовых вод октября, осушительной системы Рехемяэ, равной 0,45 *м* и меньше:
1 — по данным наблюдений 1952—1962 гг.
2 — по формуле (95).

Пунктиром на рис. 33 представлена кривая, определенная по первым двум строкам табл. 54а. Данные рис. 33 показывают, что определенная по приведенной выше методике кривая обеспеченности глубины грунтовых вод в 0,45 *м* и меньше почти совпадает с данными наблюдений.

Выше было отмечено, что потери урожая пастбищ в октябре принимаются в расчет в случае, когда глубина грунтовых вод равна или меньше 0,45 *м* в течение трех четвертей суток этого месяца, т. е. при $P_{1\,тх} \geqslant 75\%$. Из табл. 54а и рис. 33 видно, что обеспеченность таких месяцев равна 4,5%. Таким образом, при обеспеченности месяцев $P=4{,}5\%$ процент площади неиспользуемых пастбищ $P_{1\,тх}$ равен нулю. При $P=3\%$ $P_{1\,тх}=92{,}8\%$, а $P_{тх}=78{,}1\%$ и при $P=2{,}2\%$ $P_{1\,тх}$, а $P'_{1\,тх}=100\%$.

На рис. 33, где ось ординат использована также для обозначения $P'_{1\,тх}$, процент площади используемых пастбищ за столетний период заштрихован. Среднегодовой процент неиспользуемых пастбищ в данном случае составляет $\frac{350}{100}=3{,}5$. Если урожай пастбищ в октябре составляет 7,5% годового урожая, то потери урожая здесь равны всего лишь $0{,}075 \cdot 3{,}5=0{,}026\% \approx 0$.

Потери урожая культурных пастбищ в весенний и осенний периоды, определенные при различной интенсивности осушения, представлены в табл. 55.

Таблица 55

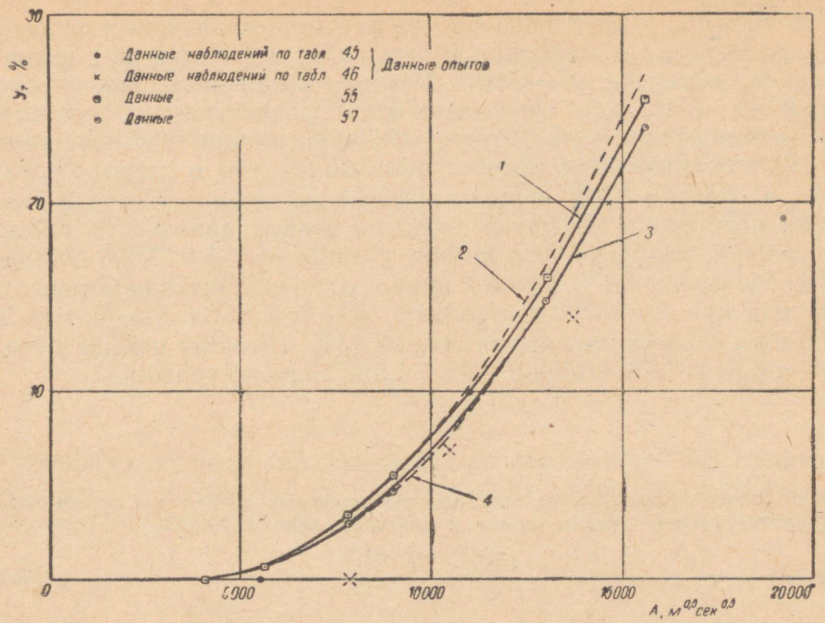
Потери урожая культурных пастбищ на торфяных почвах в весенний и осенний периоды при различной интенсивности осушения

(при $\bar{q}=9$ *л/сек км²*)

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % от полного урожая			
	в весенний период (по табл. 51)	в сентябре	в октябре	Всего $Y_{тп}$
5600	0,8	0	0	0,8
6400	1,6	0	0	1,6
7800	3,1	0,0	0,4	3,5
9000	4,7	0,1	0,9	5,7
13000	13,0	1,4	2,4	16,8
15600	20,2	2,2	3,0	25,4

На основе данных, приведенных в табл. 55; можно установить, что между потерями урожая культурных пастбищ на торфяных почвах $Y_{тп}$, и показателем интенсивности осушения A существует определенная связь (рис. 34).

$$Y_{тп}=\frac{(A-3500)^2}{5{,}36 \cdot 10^6}. \qquad (98)$$



Р и с. 34. Зависимость потерь урожая пастбищ и сенокосов на торфяных почвах от показателя интенсивности осушения:

1 — пастбище, *2* — $Y_{\text{тп}} = \frac{(A-3500)^2}{5{,}36 \cdot 10^4}$, *3* — сенокос, *4* — $Y_{\text{тс}} = \frac{(A-3500)^2}{6{,}03 \cdot 10^4}$

На культурных сенокосах осенние потери урожая могут возникать при уборке отавы. При стравливании отавы скоту потери урожая практически остаются такими же, что и у пастбищ в сентябре и октябре.

Уборка отавы на сено или силос производится в сентябре. Исходя из положения, что уборочные машины могут работать на сенокосе при глубине грунтовых вод более 0,40 *м*, для определения потерь урожая можно воспользоваться формулой (94), по которой вычислялся процент площади ω'_1, когда невозможно использование механизмов в сентябре. Аналогично пастбищам можно при уборке отавы сенокосов предполагать, что в том случае, если в течение половины дней сентября глубина грунтовых вод позволяет работать машинами, уборка проводится полностью, т. е. потери урожая равны нулю. Поэтому здесь также $P'_{1\,\text{т}\,\text{IX}} = 2P_{1\,\text{т}\,\text{IX}} - 100$ и

$$\omega'_{\text{IX}} = \int_0^{P_0} (2P_{1\,\text{т}\,\text{IX}} - 100)\, dP.$$

В табл. 56 представлен расчет площади культурных сенокосов, на которых невозможно убрать отаву в сентябре при интенсивности осушения $A=13000$. Расчет был проведен на основе формулы (94), где обеспеченность среднесуточного напора $P_{1\,т\,IX}$ определялась по формуле (91) при напоре грунтовых вод $H=0{,}60$ *м*. Результат расчета показывает, что в данных условиях в среднем 8,3% общей площади сенокоса остается в сентябре неубранной. Принимая урожай отавы равным 25% общего урожая, получаем, что потери урожая при $A=13\,000$ составляют $25\cdot 0{,}083=2{,}1\%$. Имея в виду, что потери урожая весеннего периода при $A=13000$ составляют 13% (см. табл. 51), потери в сентябре следует уменьшить еще на 13%. Поэтому потери в сентябре равны 0,01 (100−13) 2,1 = 1,8% полного урожая.

Таблица 56

Расчет площади культурных сенокосов на торфяных почвах, где невозможна механизированная уборка отавы в сентябре (при $A=13000$, $H=0{,}60$ *м* и $\overline{q}=9$ *л/сек км²*)

Показатели	P, %				
	13,5	10	7	5	4
$P_{1\,т\,IX}=\left[\frac{20{,}39-10{,}10\lg(P+1)}{5{,}62-2{,}06\lg(P+1)}\right]^{4{,}0}-1$	50,8	64,7	80,0	93,5	101,8
$P'_{1\,т\,IX}=2P_{1\,т\,IX}-100$	1,6	29,4	60,0	87,0	100
$\overline{P'_{1\,т\,IX}}$	15,5	44,7	73,5	93,5	100
ΔP	3,5	3	2	1	4
$\overline{P'_{1\,т\,IX}}\,\Delta P$	54	134	147	94	400
$\frac{1}{100}\omega'_{IX}=\frac{1}{100}\sum\overline{P'_{1\,т\,IX}}\,\Delta P$	8,29				

В табл. 57 представлены суммарные потери урожая культурных сенокосов на весенний и осенний периоды при различной интенсивности осушения.

Потери урожая культурных сенокосов за весенний и осенний периоды на торфяных почвах при различной интенсивности осушения и $q=9$ *л/сек км²*

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % от полного урожая		
	в весенний период (по табл. 51)	в сентябре	всего $Y_{тс}$
5600	0,8	0	0,8
7800	3,1	0	3,1
9000	4,7	0	4,7
13000	13,0	1,8	14,8
15600	20,2	3,7	23,9

Потери урожая на сенокосах, расположенных на торфяных почвах, в зависимости от интенсивности осушения можно определить по формуле (см. рис. 34).

$$Y_{тс}=\frac{(A-3500)^2}{6{,}03\cdot 10^6}. \qquad (99)$$

С целью сравнения полученных данных потери урожая, установленные на опытных осушительных системах, сопоставлены с результатами приведенных выше расчетов. На рис. 34 представлены кривые потерь урожая пастбищ и сенокосов, полученные на основе расчетов при различной интенсивности осушения, результаты которых приведены в табл. 55 и 57. Черными кружками на рисунке показаны средние данные за шестилетний период по пастбищам опытной базы «Тоома» (по данным, приведенным в табл. 45). При нанесении точек на график было принято, что при расстоянии между дренами в 15 *м* показатель интенсивности осушения $A=5500$. Если на основе формулы (75а) $E_1=A_1\sqrt{k}$ и $E_2=A_2\sqrt{k}$, то при равных величинах k

$$A_2=\frac{E_2}{E_1}A_1.$$

Таким образом, при расстоянии между дренами $E=30$ *м*

$$A_{30}=\frac{30}{15}5500=11000.$$

При $E=45$ *м* — $A_{45}=\frac{45}{15}5500=16500$

и при $E=60$ *м* — $A_{60}=\frac{60}{15}5500=22000.$

Из рисунка видно, что потери урожая при этих интенсивностях осушения довольно хорошо совпадают с расчетными данными.

Средние потери урожая за восьмилетний период на осушенном участке совхоза «Ойдрема» (по данным табл. 46) показаны на рис. 34 крестиками. Здесь показатель A при расстоянии между дренами в 30 *м* принят равным 5500.

При $E=45$ *м* — $A_{40}=\frac{45}{30}5500=8250$,

при $E=60$ *м* — $A_{60}=\frac{60}{30}5500=11000$

и при $E=80$ *м* — $A_{80}=\frac{80}{30}5500=14680$.

Эти точки располагаются довольно близко к расчетной кривой, и только при $A=8250$ и 11000 фактические потери урожая немного больше расчетных. Учитывая, что величина коэффициентов фильтрации при $E=30, 45, 60$ и 80 *м* составляет 0,0013, 0,0016, 0,0017 и 0,0026 *см/сек*, после приведения всех вариантов к коэффициенту фильтрации $k=0{,}0026$ *см/сек* получается: $A'_{30}=\sqrt{\frac{0{,}0026}{0{,}0013}}\times$ $\times 5500=7800$, $A'_{40}=\sqrt{\frac{0{,}0026}{0{,}0016}}\cdot 8250=10500$ и $A'_{60}=\sqrt{\frac{0{,}0026}{0{,}0017}}\cdot 11000=13600$. При A'_{40} и A'_{60} фактические потери урожая уже меньше расчетных.

Таким образом, есть основание утверждать, что на основе приведенных выше расчетов можно определить потери урожая культурных сенокосов и пастбищ, расположенных на торфяных почвах, от избытка влаги при различной интенсивности осушения.

Определение расходов на осушение. Для решения вопроса о расчетной интенсивности осушения сенокосов и пастбищ на торфяных почвах необходимо принять во внимание стоимость осушения при различной его интенсивности. Стоимость осушения определяется главным образом стоимостью осушительной и проводящей сетей и мостов. Расходы на строительство дорог, проектно-изыскательские работы и т. п. не учитываются, поскольку интенсивность осушения от них не зависит.

Стоимость осушительной сети на 1 *га* зависит от числа погонных метров осушителей p на *га*:

$$p=\frac{10^4}{E}\ м. \qquad (100)$$

Определяя расстояние между дренами E по формуле (75а) и подставляя в (100), получим

$$p = \frac{10^4}{A\sqrt{k}}.$$

Если стоимость одного погонного метра дренажа составляет 0,5 руб., то 1 *га* дренажной сети стоит

$$\frac{0{,}5 \cdot 10^4}{A\sqrt{k}} \text{ руб.}$$

Средние годовые потери урожая были выражены в процентах от общего урожая. В таких же процентах необходимо выражать расходы на устройство осушительной сети. Вследствие интенсивной и неравномерной осадки торфа в результате первичного осушения продолжительность работы дренажа в торфяных почвах можно считать равной примерно 25 годам. Годовые амортизационные расходы при этом составляют 4% его строительной стоимости. Для определения годовых расходов к амортизационным отчислениям необходимо прибавить эксплуатационные расходы, состоящие главным образом из расходов на ремонт устьев дренажа, в размере 1% его стоимости. Годовые расходы по осушительной дренажной сети R_0 определяются, таким образом, по формуле

$$R_0 = \frac{0{,}05 \cdot 0{,}5 \cdot 10^4}{A\sqrt{k}} = \frac{250}{A\sqrt{k}} \text{ руб.}$$

К амортизационным и эксплуатационным расходам необходимо прибавить амортизационные расходы на устройство открытых коллекторов, магистральных каналов и водоприемников. Если принять среднее расстояние между коллекторами равным 250 *м* со стоимостью 1,3 *руб/пог. м*, то затраты на устройство коллекторов на 1 га составят

$$\frac{10^4}{250} 1{,}3 = 52 \text{ руб.}$$

Расходы на магистральные каналы вычислены из предположения, что расстояние между ними равно 1000 *м*. При стоимости 1 *м* магистрального канала в 2,3 руб. затраты на 1 *га* равны $\frac{10^4}{10^3} 2{,}3 = 23$ руб. Затраты на устройство водоприемников на 1 *га* приняты в размере 25 руб.

При величине амортизационных отчислений на устройство открытых каналов, равной 2,5%, и эксплуатационных расходов, равных 2%, годовые расходы на содержание коллекторов, магистральных каналов и водоприемников составляет 0,045 $(52+23+25) = 4{,}5$ *руб/га*.

По схеме, принимающей, что открытые коллекторы расположены на расстоянии в 250 *м*, а магистральные каналы — на расстоянии в 1000 *м* друг от друга, на каждые 25 *га* приходится

строить один мост. Принимая стоимость деревянного моста равной 350 руб., амортизационные отчисления равными 10% и эксплуатационные расходы — 2%, получаем годовые расходы на содержание моста (из расчета на 1 *га*) $\frac{350(10+2)}{25 \cdot 10} = 1{,}7$ руб.

На основе приведенных рассуждений можно вычислить годовые расходы на осушение 1 *га* по следующей формуле:

$$R = \frac{250}{A\sqrt{k}} + 6{,}2 \text{ руб.} \qquad (101)$$

В процентах от стоимости урожая выражение (101) принимает вид

$$R_p = \frac{100}{D}\left(\frac{250}{A\sqrt{k}} + 6{,}2\right), \qquad (102)$$

где R_p — годовые расходы осушения 1 *га*, % от стоимости урожая,

D — реализационная стоимость урожая с 1 *га*, руб.

Определение расчетной интенсивности осушения пастбищ и сенокосов на торфяных почвах. На основе уравнений для определения потерь урожая (98) и (99) и расходов на осушение (102) можно определить расчетную интенсивность осушения. С этой целью необходимо найти минимальное значение годовой суммы расходов на осушение и потерь урожая.

Для культурных пастбищ после сложения величин, определяемых по уравнениям (98) и (102), получается следующая сумма потерь урожая и расходов на осушение ($S_{тп}$):

$$S_{тп} = \frac{(A-3500)^2}{5{,}36 \cdot 10^6} + \frac{100}{D}\left(\frac{250}{A\sqrt{k}} + 6{,}2\right). \qquad (103)$$

Дифференцируя по A, получим

$$\frac{dS_{тп}}{dA} = \frac{2A-7000}{5{,}36 \cdot 10^6} - \frac{100 \cdot 250}{D\,A^2\sqrt{k}}.$$

Так как

$$\frac{d^2S_{тп}}{dA} > 0,$$

то минимальное значение $S_{тп}$ имеем при

$$\frac{2A_{тп}-7000}{5{,}36 \cdot 10^6} - \frac{100 \cdot 250}{DA_{тп}^2\sqrt{k}} = 0$$

или

$$\frac{2A_{тп}^2}{5{,}36 \cdot 10^6}(A_{тп} - 3500) = \frac{2{,}5 \cdot 10^4}{D\sqrt{k}}. \qquad (104)$$

Из уравнения (104) видно, что с увеличением стоимости урожая D и коэффициента фильтрации k уменьшается $A_{тп}$, при котором функция $S_{тп}$ получает минимальное значение. Если принимать, что при предполагаемом уровне агротехники $D=200$ *руб/га*, то $A_{тп}$ для культурных пастбищ на торфяных почвах со степенью разложения около 55% или со средним коэффициентом фильтрации $k=0{,}0000025$ *м/сек* составляет, на основе уравнения (104), 7385.

При степени разложения торфа в 25%, $k=0{,}00002$ *м/сек* и $D=200$ *руб/га*, $A_{тп}=5765$.

На рис. 35 графически изображено уравнение (103) при

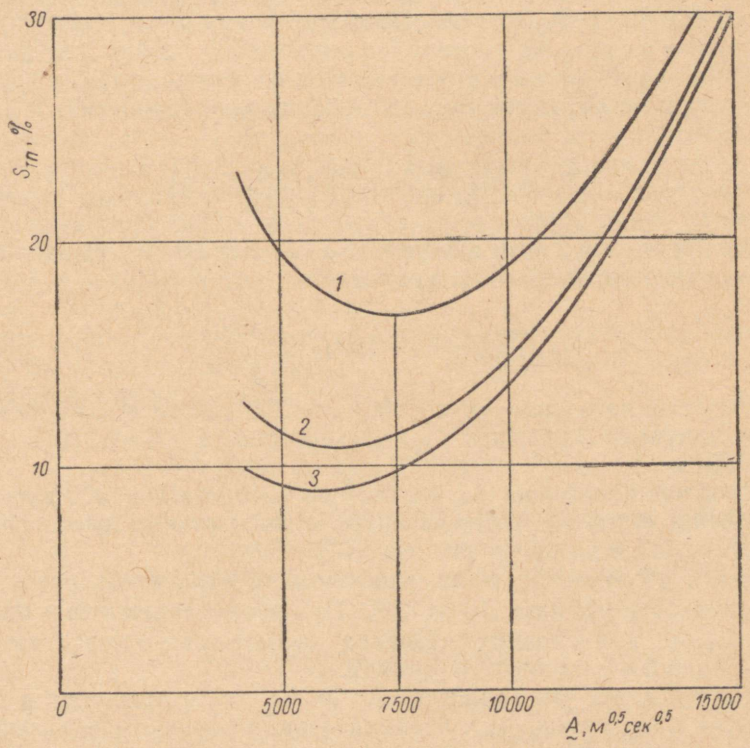


Рис. 35. Зависимость суммы потерь урожая культурных пастбищ и расходов на осушение торфяных почв от показателя интенсивности осушения:

1 — $k=0{,}0000025$, *2* — $k=0{,}00001$, *3* — $k=0{,}00002$ *м/сек*.

$D=200$ для $k=0{,}0000025$, $0{,}00001$ и $0{,}00002$ *м/сек*. Из рисунка следует, что $A_{тп}$ на торфяных почвах может изменяться в значительных пределах. Однако изменение функции $S_{тп}$ вблизи ее минимального значения невелико. Если при $A_{тп}=5765$, $k=0{,}00002$ *м/сек* и $D=200$ *руб/га* $S_{тп\,min}=8{,}9\%$, то при $A_{тп}=7385$ и таких же значениях k и D $S_{тп}=9{,}7\%$. Отсюда можно заключить, что при колебании $A_{тп}$ от 5765 до 7385 минимальное значение $S_{тп}$ увеличивается лишь на 0,8% от стоимости урожая. Поэтому можно величину $A_{тп}$ считать в данном случае постоянной. При этом с целью уменьшения стоимости строительства осушительных систем за расчетный показатель интенсивности осушения целесообразно принимать не среднее из значений $A_{тп}$, а по возможности ее максимальную величину. На основе сказанного можно заключить, что при осушении торфяных почв под культурные пастбища величину показателя интенсивности осушения целесообразно принять равной $A_{тп}=7500$. В таком случае расхождение между $S_{тп}$ и $S_{тп\,min}$ при средних степенях разложения торфа, как видно из рис. 35, составляет около 0,5% стоимости урожая.

Для культурных сенокосов сумма потерь урожая и расходов на осушение после сложения уравнений (99) и (102) равна

$$S_{тс}=\frac{(A-3500)^2}{6{,}03\cdot 10^6}+\frac{100}{D}\left(\frac{250}{A\sqrt{k}}+6{,}2\right). \qquad (105)$$

Величина $A_{тс}$, при которой $S_{тс}$ минимальна, вычисляется аналогично пастбищам по уравнению

$$\frac{2A_{тс}^2}{6{,}03\cdot 10^6}(A_{тс}-3500)=\frac{2{,}5\cdot 10^4}{D\sqrt{k}}. \qquad (106)$$

Подставляя в уравнение (106) $D=200$ *руб/га* и $k=0{,}0000025$ *м/сек*, получаем $A_{тс}=7615$. При $D=200$ *руб/га* и $k=0{,}00002$ *м/сек* $A_{тс}=5915$.

В случае колебания $A_{тс}$ от 5915 до 7615 при $D=200$ *руб/га* и $k=0{,}00002$ *м/сек* $S_{тс}$ изменяется от своего минимального значения $S_{тс\,min}=8{,}8$ до 9,6%, т. е. на 0,8%.

Как и в случае пастбищ, здесь можно показатель расчетной интенсивности принять $A_{тс}=7700$. При этом расхождение между $S_{тс}-S_{тс\,min}$, при средних степенях разложения торфа, составляет около 0,5% стоимости урожая.

Имея в виду, что величины $A_{тп}$ и $A_{тс}$ мало отличаются друг от друга и что сенокосы в осенний период обычно используются как пастбища, целесообразно при осушении культурных пастбищ и сенокосов на торфяных почвах принять за основу общий показатель интенсивности осушения, равный $A_{тп}=A_{тс}$ 7500.

Б. Интенсивность осушения культурных пастбищ и сенокосов на тяжелых суглинистых почвах

Режим стока тяжелых почв значительно отличается от такового на торфяных почвах. Вследствие слабой водопроницаемости почвы большая часть избыточной влаги стекает по поверхности или по верхним слоям почвы. При этом наблюдается увеличение максимумов и уменьшение минимумов. В холодный зимний и теплый периоды сток часто отсутствует в течение длительного времени. Расхождение в режиме стока тяжелых суглинистых и торфяных почв отражается также на режиме влажности и глубине грунтовых вод. Поэтому необходимая интенсивность осушения тяжелых почв может отличаться от таковой на более легких почвах.

С целью исследования интенсивности осушения культурных сенокосов и пастбищ, расположенных на тяжелых почвах, были определены потери урожая в весенний и осенний периоды теми же методами, которые использовались при расчетах на торфяных почвах.

Для определения потерь урожая весеннего периода в зависимости от глубины грунтовых вод была использована связь (78), установленная на основе данных, полученных по торфяным почвам. В Эстонской ССР нет специальных исследований по норме осушения тяжелых суглинистых почв. Однако данные урожаев с опытных осушенных участков в производственных условиях показывают, что при глубине грунтовых вод в весенний период менее 0,8 *м* отмечаются потери урожая как на тяжелых суглинистых, так и на торфяных почвах.

При вычислении кривой обеспеченности месячного напора грунтовых вод в июне ($H_{c\,VI\,0,5\,P\%}$) использовано выражение, аналогичное формуле (79), а именно

$$H_{c\,VI\,0,5\,P\%} = \frac{A}{2}\sqrt{q_{c\,VI\,0,5\,P\%}\,10^{-9}}, \qquad (107)$$

где $q_{c\,VI\,0,5\,P\%}$ — ординаты кривой обеспеченности модулей среднемесячного стока в июне на тяжелых суглинистых почвах, определяемые по формуле (63)

$$q_{c\,VI\,0,5\,P\%} = 1{,}3\overline{q}\,k_{ср.\,летн\,P\%}.$$

При этом следует иметь в виду, что за многолетний период в течение 50% всего времени сток с осушенных тяжелых почв в июне полностью отсутствует. Поэтому процент обеспеченности стока $q_{c\,VI}$, вычисленный по формуле (63) на основе среднего летнего стока $q_{ср.\,летн}$, необходимо уменьшить в два раза по сравнению с процентом обеспеченности среднего летнего стока.

На основе кривой обеспеченности напоров грунтовых вод в июне по формуле (107) при различном показателе интенсивности осушения и средней высоты уровня грунтовых вод выше нормы осушения (по формуле (81) нами определены потери урожая (по формуле (83). Расчеты проводились аналогично вычислениям, представленным в табл. 49, и их результаты приведены в табл. 58.

Таблица 58

Потери урожая на культурных пастбищах и сенокосах в весенний период на тяжелых почвах при различной интенсивности осушения (при $\bar{q}=9$ *л/сек км²*)

Интенсивность осушения A	Потери урожая весеннего периода, % от полного урожая
4000	0,1
5600	0,6
7800	2,0
9000	3,0
13000	8,3
15600	12,0

Потери урожая пастбищ в сентябре и октябре на тяжелых почвах были определены на основе формул для поверхности напора грунтовых вод, аналогичных формулам (89) и (90), а именно:

$$H_{\text{с IX } 0{,}6\,P\,P_1\%} = \frac{A\,k_{\text{с IX } P_1\%}}{2}\sqrt{q_{\text{с IX } 0{,}6\,P\,\%}\,10^{-9}}$$

и

$$H_{\text{с X } 0{,}8\,P\,P_1\%} = \frac{A\,k_{\text{с X } P_1\%}}{2}\sqrt{q_{\text{с X } 0{,}8\,P\,\%}\,10^{-9}}, \qquad (109)$$

где $q_{\text{с IX } 0{,}6\,P\,\%}$ — ординаты кривой обеспеченности модулей среднемесячного стока в сентябре на тяжелых почвах, определяемые по формуле (66), *л/сек км²*

$$q_{\text{с IX } 0{,}6\,P\,\%} = 1{,}15\,q\,k_{\text{ср. оо}\,P\,\%};$$

$k_{\text{с IX } P_1\%}$ — ординаты кривой обеспеченности среднесуточного стока в сентябре на тяжелых почвах, определяемые по формуле (72) в долях от среднемесячного стока

$$k_{\text{с IX } P_1\%} = \frac{13{,}50}{(P_1+1)^{0{,}56}} - 1;$$

$q_{\text{с X } 0{,}8\,P\%}$ — ординаты кривой обеспеченности модулей среднемесячного стока в октябре на тяжелых почвах, определяемые по формуле (67), *л/сек км²*

$$q_{\text{с X } 0{,}8\,P\%} = 1{,}8\,\bar{q}\,k_{\text{ср. сс}\,P\%};$$

$k_{\text{с X } P_1\%}$ — ординаты кривой обеспеченности среднесуточного стока в октябре на тяжелых почвах, определяемые по формуле (73) в долях от среднемесячного стока

$$k_{\text{с X } P_1\%} = \frac{5{,}95}{(P_1+1)^{0{,}31}} - 1.$$

Заменяя в формулах (108) и (109) величины стока вышеприведенными величинами и принимая $\bar{q}=9$ *л/сек км²* и $k_{95\%}=0$, получим для процента обеспеченности среднесуточного напора P_1, когда невозможна пастьба, следующие выражения:

в сентябре

$$P_{1\,\text{с IX } 0.6\,P\%} = \left[\frac{56{,}16-27{,}81\lg(P+1)}{3{,}86\cdot 10^8\frac{H^2}{A^2}+4{,}16+2{,}06\lg(P+1)}\right]^{1{,}79} - 1 \qquad (110)$$

и в октябре

$$P_{1\,\text{с X } 0{,}8\,P\%} = \left[\frac{24{,}75-12{,}26\lg(P+1)}{2{,}47\cdot 10^8\frac{H^2}{A^2}+4{,}16+2{,}06\lg(P+1)}\right]^{3{,}22} - 1. \qquad (111)$$

Здесь, как и для торфяных почв, можно принять, что при $P_{1\,\text{с IX}}=50\%$ потери урожая в сентябре равны нулю и при $P_{1\,\text{с IX}}=100\%$ урожай остается неубранным. Тогда в сентябре

$$P'_{1\,\text{с IX}}=2P_{1\,\text{с IX}}-100.$$

В октябре, когда для уборки требуется только 25% всего времени,

$$P'_{1\,\text{с X}}=4P_{1\,\text{с X}}-300.$$

Процент площади пастбищ, где урожай осеннего периода остается неубранным, вычисляется по формулам

$$\omega'_{\text{с IX}}=\int_0^{P_0}(2P_{1\,\text{с IX}}-100)\,dP.$$

$$\omega'_{c\,x} = \int_0^{P_0} (4P_{1\,c\,x} - 300)\,dP.$$

После умножения полученных площадей на процент урожая пастбищ соответствующего месяца, представленного в табл. 52 и деленного на 100, получены среднегодовые потери урожая осеннего периода, которые приведены в табл. 59.

На рис. 36 графически показана связь между показателем интенсивности осушения A и общими потерями урожая культурных пастбищ $Y_{сп}$ на тяжелых почвах. Аналитическое выражение этой связи имеет следующий вид:

$$Y_{сп} = \frac{(A-3500)^2}{7{,}95 \cdot 10^6}. \qquad (112)$$

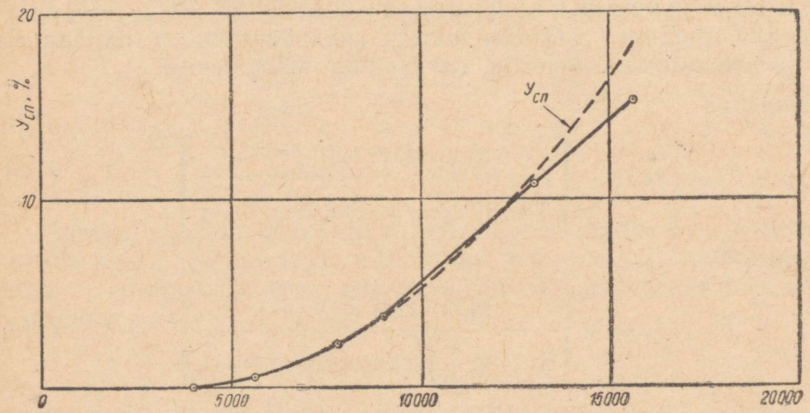


Рис. 36. Зависимость потерь урожая пастбищ на тяжелых суглинистых почвах от показателя интенсивности осушения.

——— — по данным табл. 59; — — — — $Y_{сп} = \frac{(A-3500)^2}{7{,}95 \cdot 10^6}$.

Определение расчетной интенсивности осушения пастбищ и сенокосов на минеральных почвах. Для суммы потерь урожая и расходов осушения на тяжелых суглинистых почвах после сложения уравнений (112) и (102) получается следующее выражение:

$$S_{сп} = \frac{(A-3500)^2}{7{,}95 \cdot 10^6} + \frac{100}{D}\left(\frac{250}{A\sqrt{k}} + 6{,}2\right). \qquad (113)$$

После дифференцирования $S_{сп}$ по A и приравнивания к нулю вычисляется минимальное значение $S_{сп}$ из уравнения

Таблица 59

Потери урожая культурных пастбищ в весенний и осенний периоды на тяжелых почвах при различной интенсивности осушения и $H=1{,}0-0{,}45=0{,}55$ *м*, $\overline{q}=9$ *л/сек км²*

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % от полного урожая			
	в весенний период (по табл. 58)	в сентябре	в октябре	Всего $Y_{сп}$
4000	0,1	0	0	0,1
5600	0,6	0	0,0	0,6
7800	2,0	0	0,3	2,3
9000	3,0	0,0	0,7	3,7
13000	8,3	0,4	2,1	10,8
15600	12,0	0,7	2,5	15,2

$$\frac{2A_{сп}^2}{7{,}95\cdot 10^6}(A_{сп}-3500)=\frac{2{,}5\cdot 10^4}{D\sqrt{k}}. \qquad (114)$$

При $D=200$ *руб/га* и $k=0{,}0000025$ *м/сек* величина $A_{сп}$ по уравнению (114) равна 8190. При таких же условиях на культурных пастбищах, расположенных на торфяных почвах $A_{тп}=7385$ (по уравнению (104). Отсюда следует, что показатель интенсивности осушения при минимальном значении $S_{сп\,min}$ для тяжелых суглинистых почв на 11% больше, чем для торфяных почв, т. е. $A_{сп}=1{,}11\cdot 7500=8325$.

На осушенных песчаных почвах режим стока не особенно сильно отличается от такового торфяных почв. На рис. 37 сопоставлены совмещенные гидрографы стока с осушительной системы «Рехемяэ» на торфяных почвах и «Саку» на песчаных почвах. Несмотря на то, что расстояние по прямой линии между этими системами составляет 45 *км*, гидрографы стока этих систем, особенно во время осенних обложных дождей, аналогичны.

Если в режиме стока с осушенных торфяных и песчаных почв особого различия не наблюдается, то и в потребной интенсивности осушения таких почв не может быть большой разницы.

Отсюда следует, что расчетный показатель интенсивности осушения на минеральных почвах, осушаемых под культурные пастбища, необходимо увеличить по сравнению с торфяными почвами от 0 до 11 или в среднем на 5,5%. Имея в виду, что функция $S_{сп}$, как в случае торфяных, так и тяжелых суглинис-

тых почв при минимальном ее значении выражается пологой кривой, для всех минеральных земель за исключением песчаных почв величину $A_{сп}$ можно принять так же постоянной, как и в случае торфяных почв. Если для торфяных почв было установлено, что $A_{тп} = 7500$, то при осушении тяжелых и средних минеральных почв, предназначенных для

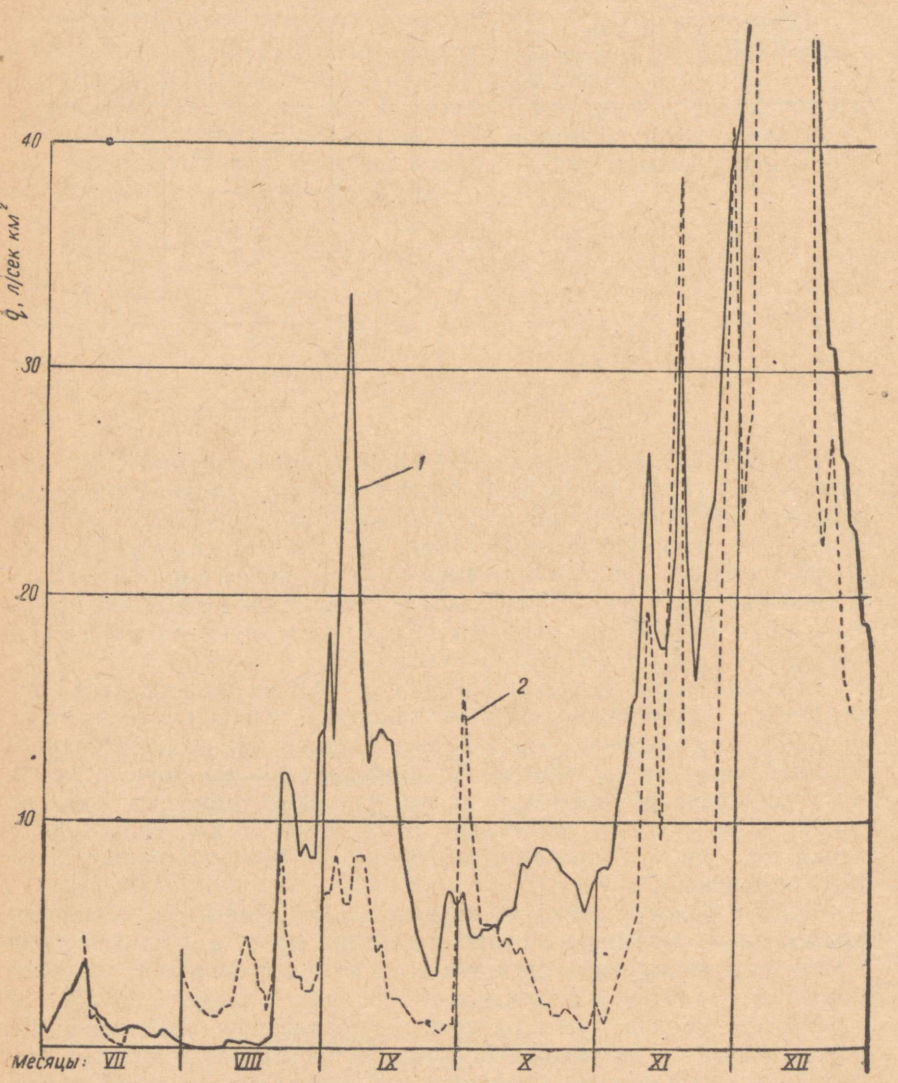


Рис. 37. Гидрографы модулей дренажного стока с осушительных систем: *1* — Рехемяэ на торфяных почвах и *2* — Саку (сист. 39) на песчаных почвах.

закладки культурных пастбищ, расчетный показатель интенсивности осушения целесообразно принять равным $A_{сп} = 7500 + 0{,}055 \cdot 7500 = 7900$. На песчаных почвах расчетный показатель интенсивности желательно принять равным показателю для торфяных почв, т. е. $A_{тп} = 7500$.

Для культурных сенокосов, расположенных на минеральных почвах, интенсивность осушения мало отличается от таковой для пастбищ, аналогично тому, как это было установлено для торфяных почв. Поэтому расчетную интенсивность осушения таких культурных сенокосов длительного пользования можно принять такой же, как и для культурных пастбищ.

Для сенокосов кратковременного использования, где травы чередуются с промежуточными культурами, интенсивность осушения определяется как средневзвешенная между интенсивностью осушения, необходимой для сенокоса и промежуточных культур.

2. ИНТЕНСИВНОСТЬ ОСУШЕНИЯ ЗЕМЕЛЬ ПОД ЯРОВЫЕ ЗЕРНОВЫЕ КУЛЬТУРЫ

Для изучения вопроса об интенсивности осушения земель, предназначенных под зерновые, необходимо знать потери урожая, обусловленные запаздыванием посева, высоким стоянием грунтовых вод в вегетационный период и невозможностью своевременной уборки урожая. После суммирования средних годовых потерь с годовыми расходами на осушение (при различной интенсивности осушения) можно решить вопрос о расчетной интенсивности осушения земель, используемых под зерновые культуры.

Осушительные системы на землях, где выращиваются яровые зерновые, должны обеспечить возможность работы механизмов, в первую очередь, в период посева весной. С этой целью в период наступления оптимальных сроков посева грунтовые воды должны находиться на глубине не менее 0,45 *м* от поверхности почвы.

Средние оптимальные сроки посева яровых зерновых могут быть установлены по соответствующим данным наблюдений. В табл. 60 представлены данные об урожайности овса и ячменя в зависимости от сроков посева, полученные Н. Роотси на опытной базе «Раади».

В табл. 61 приведены данные для яровой пшеницы, полученные М. Пиллем на Йыгеваской селекционной станции.

В табл. 62 и 63 представлены данные Э. Халлера, полученные на опытной базе «Куузику», где исследовалось влияние на

урожай яровых зерновых и бобовых культур более ранних сроков посева, чем приведенные в табл. 60 и 61.

Таблица 60

Влияние сроков посева на урожай овса и ячменя в Раади (% от полного урожая [46])

Год	Май					Июнь				100% = кг/га
1923	Срок посева		15			1				
	Урожай овса		100			88				2260
1927	Срок посева	7	15	18	25	1	8	15	23	
	Урожай овса	100	88	84	73	42*	37*	13*	6*	2922
	„ ячменя 4-гранного	98	97	90	100	78	62	55	32	2800
1928	Срок посева	7	14	21	30	4	11	18	25	
	Урожай овса	100	99	91	78	68	58	36*	16*	1995
	„ ячменя 4-гранного	100	97	78	96	81	80*	74*	59*	2145
1929	Срок посева	10	17	24	31	7	14	21	28	
	Урожай овса	91	90	100	93	64	51*	42	27*	2650
	„ ячменя 4-гранного	83	94	93	100	84	89	86	84	2334
1930	Срок посева	3	10	17	24	31	7	14	21	—	
	Урожай овса	99	100	100	98	88	70	35	22*	—	2290
	„ ячменя 4-гранного	95	86	89	100	74	61*	36*	34*	—	2254
1931	Срок посева		11	16	23	30	6	13	—	—	
	Урожай овса		100	90	84	56	47	36	—	—	2872
	„ ячменя 4-гранного		100	93	100	64	45*	39	—	—	2254
	Урожай ячменя 2-гранного		91	100	90	73	63*	52	—	—	3292
1932	Срок посева		6	13	20	27	3	10	17	24	
	Урожай овса		100	80	75	68	55*	35*	24*	18*	2422
	„ ячменя 4-гранного		100	81	87	87	58*	40*	21*	10*	2393
	Урожай ячменя 2-гранного		100	89	76	71	51*	42*	26*	28*	2530
Средний	Срок посева		9	15	22	29	4	12	18	25	
	Урожай овса		99	91	89	76	62	42	27	17	2487
	„ ячменя 4-гранного		94	92	91	87	68	58	54	46	2363

* Ошибка опыта >3%.

Таблица 61

Влияние срока посева на урожай яровой пшеницы в Йыгева (*кг/га* [46])

Год	Май					Июнь
1932	Срок посева	7	14	21	28	4
	Урожай	2413	2502	2099	1598	957
1933	Срок посева	10	17	24	31	7
	Урожай	3012	2944	2243	1064	594
1934	Срок посева	4	11	18	25	1
	Урожай	2532	2162	1440	778	190
1935	Срок посева	11	18	25	1/VI	8
	Урожай	1567	1287	1118	1048	681
Средний	Срок посева	6	15	22	29	5
	Урожай	2381	2224	1725	1128	605
	Урожай, %	100	93	72	47	25

Таблица 62

Влияние срока посева на урожай зерна двугранного ячменя, овса и яровой пшеницы в Куузику (*кг/га* [46])

Год		Посевы		
		I	II	III
1	2	3	4	5
1937	Срок посева	21/IV	4/V	18/V
	Урожай ячменя	945	424	358
	„ овса	2076	1670	1884
	„ пшеницы	1226	324	696
1938	Срок посева	21/IV	9/V	27/V
	Урожай ячменя	2001	1974	1392
	„ овса	2433	2511	1460
	„ пшеницы	1446	1357	789
1939	Срок посева	20/IV	5/V	23/V
	Урожай ячменя	1320	1399	1208
	„ пшеницы	997	975	627
1940	Срок посева	30/IV	10/V	21/V
	Урожай ячменя	3248	3764	3458

Продолжение табл. 62

1	2	3	4	5
1942	Срок посева	20/IV	30/IV	21/V
	Урожай ячменя	2425	2614	2292
	„ овса	2674	2816	2309
	„ пшеницы	1913	1938	1378
1943	Срок посева	3/IV	22/IV	21/V
	Урожай ячменя	1054	1332	1476
	„ овса	1054	1149	1332
	„ пшеницы	924	914	631
1944	Срок посева	27/IV	9/V	30/V
	Урожай ячменя	1276	1308	1090
	„ овса	1468	1346	1282
	„ пшеницы	1422	1338	1078
1945	Срок посева	12/IV	27/IV	18/V
	Урожай ячменя	1471	1394	1498
	„ овса	1312	1256	1166
	„ пшеницы	1056	1045	1251
1946	Срок посева	24/IV	3/V	21/V
	Урожай ячменя	1964	2138	2029
	„ овса	1883	1682	1709
	„ пшеницы	1332	1105	1006
Средний	Срок посева	20/IV	3/V	22/V
	Урожай ячменя	1744	1816	1645
	„ „ в %	96	100	91
	„ овса	1843	1776	1592
	„ „ в %	100	96	86
	„ пшеницы	1290	1124	932
	„ „ в %	100	87	72

На основе табл. 60—63 составлены графики связи потерь урожая в зависимости от времени посева (рис. 38 и 39). Аналитическое выражение этих связей имеет следующий вид:

для ячменя

$$y_{V\text{я}} = \frac{c_V^2}{52{,}5}, \qquad (115)$$

для овса

$$y_{V\text{о}} = \frac{c_V^{1{,}86}}{22{,}9}, \qquad (116)$$

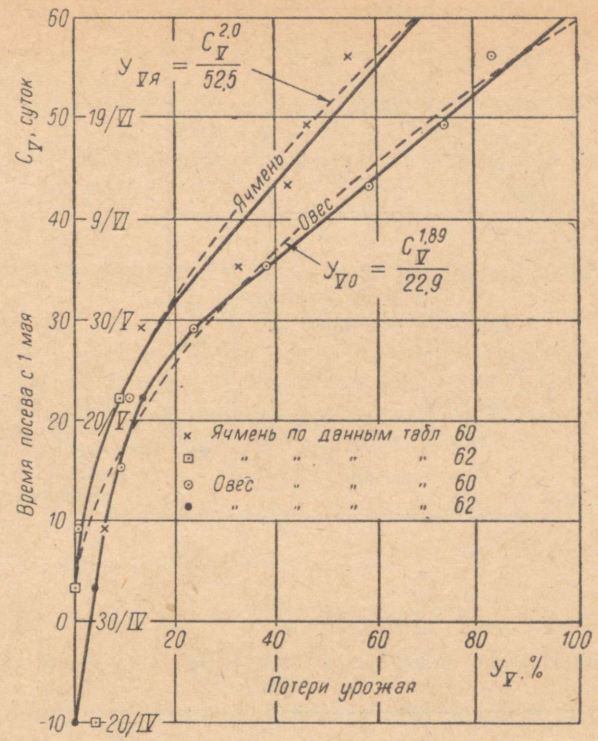


Рис. 38. Зависимость потерь урожая ячменя и овса от запаздывания срока посева.

для яровой пшеницы и гороха

$$y_{V\,пг} = \frac{(c_V + 10)^{2,3}}{91}, \qquad (117)$$

где $y_{V\text{я}}$, $y_{V\text{о}}$ и $y_{V\,пг}$ — потери урожая ячменя, овса, пшеницы и гороха, % от полного урожая,

c_V — число суток с начала мая.

Следует отметить, что связи (115)—(117) пригодны лишь для определения средних многолетних потерь в зависимости от запаздывания сроков посева. Для отдельных лет эти связи не действительны, так как оптимальные сроки посева не являются постоянными, а зависят от климатических условий данного года.

Для определения среднего запаздывания посева в зависимости от различной интенсивности осушения использована формула поверхности обеспеченности суточного напора грунтовых вод в мае, а именно:

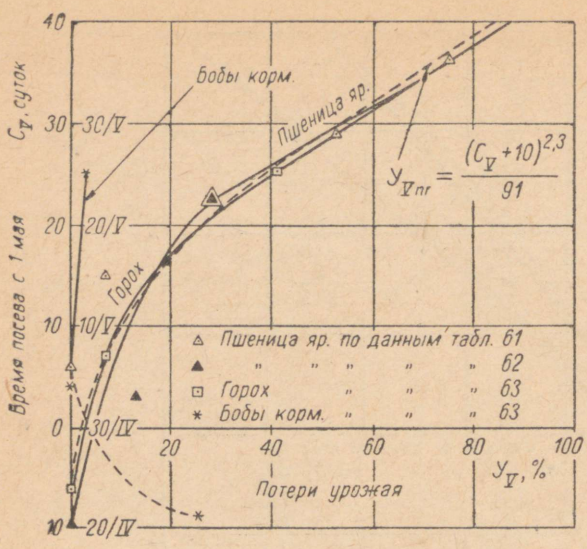


Рис. 39. Зависимость потерь урожая гороха, яровой пшеницы и кормовых бобов от запаздывания срока посева.

Таблица 63

Влияние срока посева на урожай гороха и кормовых бобов в Куузику (*кг/га* [46])

Год		Посевы					
		Горох			Боб кормовой		
		I	II	III	I	II	III
1938	Срок посева	27/IV	9/V	2/VI	—	—	—
	Урожай	2541	2340	955			
1939	Срок посева	20/IV	5/V	23/V	—	—	—
	Урожай	128	258	286			
1943	Срок посева	23/IV	—	—	15/IV	4/V	29/V
	Урожай				1553	2735	2729
1945	Срок посева	23/IV	8/V	26/V	2I/IV	8/V	25/V
	Урожай	1583	1532	1499	1518	1533	1374
1946	Срок посева	23/IV	7/V	18/V	27/IV	6/V	20/V
	Урожай	620	424	129	699	739	764
Средний	Срок посева	24/IV	7/V	25/V	21/IV	6/V	25/V
	Урожай	1218	1136	717	1257	1669	1622
	Урожай, %	100	93	59	75	100	97

$$H_{\text{V}PP_1} = \frac{Ak_{\text{V}PP_1\%}}{2}\sqrt{q_{\text{V}P\%}\,10^{-9}}, \qquad (118)$$

где $k_{\text{V}P_1\%}$ — ординаты кривой обеспеченности суточного стока в мае,

$q_{\text{V}P\%}$ — ординаты кривой обеспеченности месячного стока в мае.

А. Интенсивность осушения торфяных почв под яровые зерновые

Потери урожая от запаздывания срока посева яровых зерновых на торфяных почвах определены на основе следующего уравнения поверхности обеспеченности суточных напоров грунтовых вод в мае:

$$H_{\text{T V}PP_1\%} = \frac{Ak_{\text{T V}PP_1\%}}{2}\sqrt{q_{\text{T V}P\%}10^{-9}}, \qquad (118\text{а})$$

где на основе формулы (48) и (55)

$$q_{\text{T V}P\%} = 0{,}85\bar{q}k_{\text{ср. май}\,P\%}$$

$$k_{\text{T V}P_1\%}\frac{7{,}25}{(P_1+1)^{0{,}24}} - 2.$$

Вычисляя $k_{\text{ср. май}\,\%}$ по формулам (33) и (34), получим для $q_{\text{T V}P\%}$ при $k_{95\%} = 0$ и $\bar{q} = 9$ *л/сек км*^{2} следующее выражение:

$$q_{\text{T V}P\%} = 0{,}85 \cdot 9 \cdot 0{,}99[3{,}85 - 1{,}80\lg(P+1)]. \qquad (119)$$

Подставляя в формуле (118а) вместо $k_{\text{T V}P_1\%}$ его значение по формуле (55) и вместо $q_{\text{T V}P\%}$ выражение (119), можно для вычисления процента обеспеченности суточного напора грунтовых вод (стока) в мае $P_{1\,\text{T V}}$ после некоторых преобразований написать следующее уравнение:

$$P_{1\,\text{T V}} = \left[\frac{27{,}90 - 13{,}05\lg(P+1)}{5{,}27 \cdot 10^8\frac{H^2}{A^2} + 7{,}70 - 3{,}60\lg(P+1)}\right]^{4{,}16} - 1. \qquad (120)$$

Если при глубине грунтовых вод менее 0,45 *м* на поле невозможно работать машинами, то при глубине дрен в 1,0 *м* напор H в этом случае равен $1 - 0{,}45 = 0{,}55$ *м*. Подставляя в уравнение (120) $H = 0{,}55$ *м*, можно вычислить процент обеспеченности суточного напора в мае $P_{1\,\text{T V}}$ при данной обеспеченности месячного напора P и показателе интенсивности осушения A, при котором невозможно провести весенний посев, и определить, на сколько суток он опаздывает. Обеспеченности суточного напора $P_{1\,\text{T V}} = 100\%$ соответствуют в мае 31 сутки.

Для определения обеспеченности других напоров их значения необходимо умножить на величину 31 : 100 = 0,31. Таким образом, процент обеспеченности $P_{1\,TV}$, вычисленный по уравнению (120) и умноженный на 0,31, показывает число суток, на которое может опоздать посев при данном проценте обеспеченности месячного напора (стока) P, т. е.

$$c_V = 0{,}31 P_{1\,TV}. \qquad (121)$$

К числу суток, вычисленных по уравнению (121), следует прибавить еще время, необходимое для обработки почвы и производства посева. Исходя из того, что весенний посев должен быть проведен в течение 5—6 дней и прибавляя еще 5—6 дней для обработки почвы, получим, что от максимально раннего срока начала обработки почвы до окончания посева требуется до 12 суток. Имея, однако, в виду, что обычно не все посевные площади данного хозяйства избыточно увлажнены, можно принять, что средняя продолжительность обработки почвы и посева на осушенных землях равна примерно 5 суткам. Следовательно, при определении потерь урожая от запаздывания посева необходимо к времени, полученному по формуле (121), прибавить еще 5 суток.

Зная число суток запаздывания весеннего посева (c), можно по уравнениям (115), (116) и (117) вычислить потери урожая яровых зерновых для каждого процента обеспеченности месячного напора (P) в мае.

Вычисляя потери урожая при определенном проценте обеспеченности месячного напора в пределах от обеспеченности $P=0$ до $P=P_0$ (при которой $P_{1\,TV}=0$), получим кривую обеспеченности потерь урожая в зависимости от запаздывания срока весеннего посева за столетний период. Площадь, ограниченная этой кривой и осями координат, деленная на 100, является средней годовой потерей урожая при данной интенсивности осушения и выражается интегралом

$$N = \frac{1}{100} \int_0^{P_0} y_V \, dP. \qquad (122)$$

В табл. 64 представлен результат приближенного интегрирования выражения (122) методом трапеции (при $A=13000$). Из таблицы видно, что при данной интенсивности осушения потери урожая ячменя от запаздывания срока посева составляют в мае 4,43% полного урожая. Кроме того, можно убедиться, что при обеспеченности месячного напора в 10% средний срок посева падает на июнь месяц.

С целью определения потерь урожая для случая посева яровых зерновых в июне необходимо установить процент обеспечен-

Определение потерь урожая ячменя в зависимости от запаздывания срока весеннего посева в мае на торфяных почвах (при $A=13000$, $\bar{q}=9$ *л/сек км²* и $H=0{,}55$ *м*)

Показатели	P, %					
	100	80	60	40	20	10
$P_{1\,TV}$	1,23	8,20	20,4	34,5	65,8	86,2
$c_V=0{,}31P_{1\,TV}+5$	5,4	7,5	11,2	15,7	25,0	31,7
$y_{V\,я}=\frac{c_V^2}{52{,}5}$	0,56	1,07	2,39	4,69	11,9	19,1
$\bar{y}_{V\,я}$	0,82	1,73	3,54	8,3	15,5	
ΔP	20	20	20	20	10	
$\bar{y}_{V\,я}\Delta P$	16	35	71	166	155	
$\frac{1}{100}\sum\bar{y}_{V\,я}\Delta P$	4,43					

ности суточного напора грунтовых вод в июне $P_{1\,TVI}$ в зависимости от обеспеченности месячного стока.

Подставляя в уравнение поверхности суточных напоров в июне

$$H_{TVI\,PP_1\%}=\frac{Ak_{TVI\,P_1\%}}{2}\sqrt{q_{TVI\,P\%}\,10^{-9}}$$

$$k_{TVI\,P_1\%}=\frac{5{,}25}{(P_1+1)^{0{,}28}}-1 \qquad \text{(по формуле (56)}$$

и

$$q_{TVI\,P\%}=1{,}10\;k_{\text{ср. летн}\,P\%}, \qquad \text{(по формуле (49),}$$

где

$$k_{\text{ср. летн}\,P\%}=\eta[1{,}32-1{,}58\,(k_{95\%}-0{,}50)^2]$$

(по формуле (40) при $k_{95\%}=0$ и $\bar{q}=9$ *л/сек км²*) получим для процента обеспеченности суточного напора в июне следующее выражение:

$$P_{1\,T\,VI}=\left[\frac{18{,}35-5{,}25(P+1)^{0{,}25}}{3{,}50-\left(1-4{,}37\cdot 10^{8}\frac{H^2}{A^2}\right)(P+1)^{0{,}25}}\right]^{3{,}58}-1. \qquad (123)$$

Для определения числа суток, соответствующих обеспеченности суточного напора $P_{1\,T\,VI}$, необходимо число дней в июне умножить на коэффициент $P_{1\,T\,VI}:100$ или $P_{1\,T\,VI}$ умножить на $30:100=0{,}30$. Так как средним оптимальным сроком весеннего сева яровых зерновых (исключая пшеницу и кормовые бобы) считается 1 мая, то при производстве посева в июне число суток запаздывания срока посева составляет

$$c_V=31+0{,}30P_{1\,T\,VI}. \qquad (124)$$

Посевные работы в июне можно проводить в более короткий срок, чем в мае, так как к этому времени весенние полевые работы на более сухих почвах уже окончены. Поэтому при вычислении числа суток запаздывания срока посева в июне к результату, полученному по уравнению (124), можно прибавить лишь 3 суток.

Таблица 65

Определение потерь урожая ячменя в зависимости от запаздывания срока весеннего посева в июне на торфяных почвах (при $A=13\,000$, $\overrightarrow{q}=9$ *л/сек км²* и $H=0{,}55$ *м*)

Показатели	P, %						
	75	50	30	10	5	2,3	1,6
$P_{1\,T\,VI}$	0	2,9	10,8	40,6	64,0	89,6	100
$c_V=31+0{,}30\,P_{1\,T\,VI}+3$	34,0	34,9	37,2	46,2	53,2	60,9	64
$y_{V\text{я}}=\frac{c_V'^2}{52{,}5}$	22,0	23,2	26,3	40,6	53,9	70,6	77,9
$\bar{y}_{V\text{я}}$	22,6	24,8	33,4	47,2	62,2	74,2	
ΔP	25	20	20	5	2,7	0,7	
$\bar{y}_{V\text{я}}\,\Delta P$	565	496	668	236	168	52	
$\frac{1}{10\cdot 100}\sum\bar{y}_{V\text{я}}\,\Delta P$	2,18						

В табл. 65 показано определение потерь урожая ячменя от запаздывания срока посева при $A=13000$, когда в отдельные годы сев можно начать только в июне. Так как обеспеченность таких лет составляет (в данном случае) около 10% (см. табл. 64), то при определении потерь от запаздывания посева необходимо вводить в расчет коэффициент, равный 0,1. Таким образом, средние годовые потери урожая ячменя, вызванные запаздыванием срока посева и проведением его в июне, составляют в данных условиях 2,18% урожая ячменя, посеянного своевременно.

Данные табл. 65 показывают также, что при обеспеченности июньского месячного стока в 1,6% посев оказывается невозможным.

Если считать, что в июле уже нет смысла сеять ячмень и если количество семян составляет 8% урожая, то средние годовые потери от неполученного урожая составляют $\frac{1 \cdot 1{,}6(100-8)}{10 \cdot 100} = 0{,}15\%$.

Сумма потерь урожая ячменя от запаздывания весеннего посева при $A=13000$ равна, таким образом, $4{,}43+2{,}18+0{,}15=6{,}76\%$ урожая, посеянного своевременно.

На основе изложенной методики расчета вычислены потери урожая, вызванные запаздыванием срока весеннего посева, при различном показателе интенсивности осушения. Вычисления были проведены для ячменя, овса и яровой пшеницы. Потери урожая гороха равны потерям для пшеницы. Результаты вычисления представлены в табл. 66.

Таблица 66

Потери урожая, вызванные запаздыванием срока весеннего посева яровых зерновых на торфяных почвах (при различных значениях A и $\bar{q}=9$ л/сек км²)

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % своевременно посеянного		
	Ячмень	Овес	Яровая пшеница и горох
4000	0,0	0,1	0,6
5600	0,3	0,6	2,5
7800	1,1	1,9	6,5
9000	2,2	3,6	10,3
13000	6,8	10,8	23,2
15600	12,9	19,5	36,3

Потери урожая зерновых культур, обусловленные высоким стоянием грунтовых вод в вегетационный период, можно определить по той же методике, которая была использована для культурных пастбищ и сенокосов. При определении связи между урожаем и уровнем грун-

товых вод (по данным табл. 45—48) заметной разницы для трав и зерновых не наблюдалось. Поэтому потери урожая зерновых культур от высокого стояния грунтовых вод в вегетационный период при разных значениях A на торфяных почвах можно принять равными потерям урожая на культурных пастбищах и сенокосах, представленным в табл. 51, уменьшив их на процент потерь урожая от запаздывания срока весеннего посева.

Потери урожая при уборке яровых зерновых культур, связанные с интенсивностью осушения, определены на основе обеспеченности суточных напоров грунтовых вод в августе и сентябре.

В табл. 67 и 68 представлены сроки наступления восковой спелости яровых зерновых и зернобобовых культур в зависимости от разных сроков посева. Эти таблицы (составленные по данным за 8 лет) показывают, что зерновые культуры, посеянные с 20/IV по 22/V, созревали в среднем от 5 до 30/VIII. Горох, посеянный 24/IV, 7 и 25/V, созревал в среднем 10, 14 и 23/VIII. Кормовые бобы (по трехлетним данным), посеянные 21/IV, 6 и 25/V, созревали в среднем 16, 24/VI и 2/IX.

Таким образом, яровые зерновые и зернобобовые созревают в условиях Эстонской ССР в среднем в августе. При этом раньше всех созревает ячмень, овес созревает на 2—3 дня, а яровая пшеница — на 9—11 дней позже ячменя. Горох и овес созревают почти одновременно, а кормовые бобы поспевают на 6—10 дней позже гороха.

Данные табл. 67 и 68 показывают также продолжительность вегетационного периода в зависимости от срока посева.

Таблица 67

Сроки посева и созревания до состояния восковой спелости ячменя и яровой пшеницы
(по данным Э. К. Халлера [46], опытная база «Куузику»)

Год		Посевы		
		I	II	III
1	2	3	4	5
1937	Срок посева	21/IV	4/V	18/V
	„ созревания ячменя	29/VII	2/VIII	20/VIII
	„ „ овса	26/VII	2/VIII	9/VIII
	„ „ пшеницы	3/VIII	6/VIII	20/VIII
1938	Срок посева	27/IV	9/V	27/V
	„ созревания ячменя	4/VIII	6/VIII	18/VIII
	„ „ овса	6/VIII	8/VIII	23/VIII
	„ „ пшеницы	18/VIII	18/VIII	—

Продолжение табл. 67

1	2	3	4	5
1939	Срок посева	20/IV	5/V	23/V
	„ созревания ячменя	5/VIII	5/VIII	14/VIII
	„ „ овса	6/VIII	8/VIII	23/VIII
	„ „ пшеницы	7/VIII	10/VIII	19/VIII
1940	Срок посева	30/IV	10/V	21/V
	„ созревания ячменя	10/VIII	10/VIII	15/VIII
1942	Срок посева	20/IV	30/IV	21/V
	„ созревания ячменя	20/VIII	24/VIII	1/IX
	„ „ овса	20/VIII	24/VIII	1/IX
	„ „ пшеницы	31/VIII	3/IX	19/IX
1943	Срок посева	3/IV	22/IV	21/V
	„ созревания ячменя	30/VII	5/VIII	27/VIII
	„ „ овса	9/VIII	11/VIII	31/VIII
	„ „ пшеницы	11/VIII	23/VIII	7/IX
1944	Срок посева	27/IV	9/V	30/V
	„ созревания ячменя	10/VIII	13/VIII	28/VIII
	„ „ овса	17/VIII	19/VIII	31/VIII
	„ „ пшеницы	22/VIII	25/VIII	8/IX
1945	Срок посева	12/IV	27/IV	18/V
	„ созревания ячменя	3/VIII	6/VIII	10/VIII
	„ „ овса	6/VIII	7/VIII	13/VIII
	„ „ пшеницы	11/VIII	14/VIII	23/VIII
1946	Срок посева	24/IV	3/V	21/V
	„ созревания ячменя	27/VII	30/VII	8/VIII
	„ „ овса	1/VIII	3/VIII	12/VIII
	„ „ пшеницы	19/VIII	12/VIII	18/VIII
средний	Срок посева	20/IV	3/V	22/V
	„ созревания ячменя	5/VIII	8/VIII	19/VIII
	„ „ овса	8/VIII	10/VIII	22/VIII
	„ „ пшеницы	14/VIII	18/VIII	30/VIII

Таблица 68

Сроки посева и созревания до состояния восковой спелости гороха и кормовых бобов
(по данным Э. К. Халлера [46], опытная база «Куузику»)

Год		Посевы		
		I	II	III
1	2	3	4	5
1938	Срок посева гороха	17/IV	9/V	2/VI
	„ созревания гороха	18/VIII	18/VIII	29/VIII

Продолжение табл. 68

1	2	3	4	5
1939	Срок посева гороха	20/IV	5/V	23/VIII
	„ созревания гороха	10/VIII	12/VIII	23/VIII
1943	Срок посева бобов	15/IV	4/V	29/V
	„ созревания бобов	23/VIII	8/IX	21/IX
1945	Срок посева гороха	23/IV	8/V	26/V
	„ „ бобов	21/IV	8/V	25/V
	Срок созревания гороха	9/VIII	17/VIII	25/VIII
	„ „ бобов	17/VIII	22/VIII	29/VIII
1946	Срок посева гороха	25/IV	7/V	18/V
	„ „ бобов	27/IV	6/V	20/V
	Срок созревания гороха	1/VIII	7/VIII	16/VIII
	„ „ бобов	8/VIII	12/VIII	17/VIII
Средний	Срок посева гороха	24/IV	7/V	25/V
	„ „ бобов	21/IV	6/V	25/V
	Срок созревания гороха	10/VIII	14/VIII	23/VIII
	„ „ бобов	16/VIII	24/VIII	2/IX

При определении потерь урожая, обусловленных запаздыванием сроков уборки вследствие переувлажненности почвы, необходимо определить степень запаздывания уборки. Определение сроков созревания культур в зависимости от интенсивности осушения или возможного срока посева довольно сложно. Данных исследований для определения потерь урожая в зависимости от продолжительности запаздывания времени уборки очень мало. Поэтому нами принято, что при возможности проведения уборочных работ в августе потери урожая от их запаздывания невелики и они в расчет не принимаются. В случае проведения уборочных работ в сентябре уже следует считаться с потерями урожая, вызываемыми запаздыванием уборки.

Таблица 69

Средние потери урожая ячменя, овса и гороха в зависимости от срока уборки при созревании во второй половине августа

Срок уборки	Потери урожая, % полного урожая	
	ячменя	овса, яровой пшеницы и гороха
Конец I декады сентября	7	15
Конец II декады сентября	17	30
Конец сентября	25	50

На основе данных, собранных в некоторых хозяйствах, и наблюдений, проведенных в период уборки урожая на опытных участках, были получены средние ориентировочные размеры потерь урожая (табл. 69).

Данные табл. 69 позволяют составить следующие связи между потерями урожая и сроком уборки:

для ячменя

$$y_{\text{IX я}} = 0{,}8\, c_{\text{IX}} \tag{125}$$

для овса, яровой пшеницы и гороха

$$y_{\text{IX опг}} = c_{\text{IX}}^{1{,}15}, \tag{126}$$

где $y_{\text{IX я}}$, $y_{\text{IX опг}}$ — соответственно потери урожая ячменя, овса, яровой пшеницы и гороха;

c_{IX} — число суток с начала сентября до уборки.

Возможность проведения уборки в августе при различной интенсивности осушения определяется на основе формулы поверхности обеспеченности суточного напора грунтовых вод в августе:

$$H_{\text{T VIII}\,P P_1\%} \frac{A k_{\text{T VIII}\,P_1\%}}{2} \sqrt{q_{\text{T VIII}\,P\%}\, 10^{-9}}, \tag{127}$$

где $k_{\text{T VIII}\,P_1\%}$ — ординаты кривой обеспеченности суточного стока в августе, определяемые по формуле (58);

$q_{\text{T VIII}\,P\%}$ — ординаты кривой обеспеченности месячного стока в августе, определяемые по формуле (52).

Аналогично определению возможности производства посевных работ в мае, после замены символов в формуле (127) соответствующими расчетными выражениями по формулам (58), (52) и (44) и при условии, что в формуле (44) $k_{95\%} = 0$, а в формуле (52) $\overline{q} = 9$ *л/сек км²*, получаем для вычисления августовского процента обеспеченности суточного напора грунтовых вод в осушительных системах следующее выражение:

$$P_{\text{1 T VIII}} = \left[\frac{35{,}40 - 17{,}50 \lg (P+1)}{8{,}89 \cdot 10^{8} \dfrac{H^2}{A^2} + 4{,}16 - 2{,}06 \lg (P+1)} \right]^{2{,}38} - 1. \tag{128}$$

Формулы для вычисления процента обеспеченности суточного напора грунтовых вод в сентябре $P_{\text{1 T IX}}$ и в октябре $P_{\text{1 T X}}$ были получены при определении потерь урожая культурных пастбищ в осенний период (см. формулы (91) и (95)).

Подставляя в выражение (128) $H = 0{,}55$ *м* (при глубине заложения дрен 1,0 *м*), можно вычислить процент обеспеченности

суточного напора $P_{1\,т\,VIII}$ при данной обеспеченности месячного стока P в августе, когда невозможно проводить уборку.

Для определения числа дней, соответствующих обеспеченности $P_{1\,т\,VIII}$, необходимо общее число дней в августе умножить на коэффициент $P_{1\,т\,VIII} : 100$ или $P_{1\,т\,VIII}$ умножить на $31 : 100 = 0{,}31$.

К числу суток, когда невозможно проводить уборку, следует прибавить еще время, требуемое на производство самих уборочных работ. Если для производства посевных работ было предусмотрено в среднем 5 суток, то для уборки требуется больше времени (в частности из-за того, что ее невозможно проводить при росе и дожде). Поэтому срок производства уборочных работ определен в сентябре в 10 суток.

Если при какой-то обеспеченности месячного стока в августе P и данном значении A число суток $c_{VIII} = 0{,}31\ P_{1\,т\,VIII} + 10 \leqslant 31$, то уборку можно проводить в августе и потери урожая, обусловленные запаздыванием уборки, в расчет не принимаются. В случае, если $c_{VIII} = 31\ P_{1\,т\,VIII} + 10 > 31$ суток, уборочные работы переходят на сентябрь и потери урожая на каждый процент обеспеченности месячного стока определяются на основе связи (125) и (126). Площадь, заключенная между осью P, кривой потерь и двумя ординатами, соответствующими значениям $P = 0$ и $P = P_0$ (где потери равны нулю), представляет собой сумму потерь урожая за столетний период. Средние годовые потери урожая определяются по формуле

$$N_c = \frac{1}{100} \int_0^{P_0} y_{IX} dP. \qquad (129)$$

В табл. 70, 71 и 72 приведены результаты определения потерь урожая при уборке ячменя. Из табл. 70 видно, что при обеспеченности месячного стока около 1% урожай в августе может остаться неубранным ($c_{VIII} > 31$ суток) в среднем один раз в течение 100 лет. Таким образом, в величину потерь в сентябре следует ввести коэффициент 0,01.

Результаты вычислений, приведенные в табл. 71, показывают, что при уборке ячменя в сентябре потери урожая составляют в среднем 7,4% и при обеспеченности месячного стока в 15% уборка переносится на октябрь.

Из табл. 72 видно, что потери при уборке в октябре составляют 19,8%, а в 36% случаев уборка невозможна.

Из приведенных данных следует, что для вычисления средних годовых потерь урожая при уборке ячменя в результаты, приведенные в табл. 71, необходимо ввести коэффициент 0,01, а в данные табл. 72 — коэффициент $0{,}01 \cdot 0{,}15 = 0{,}0015$. Поэтому потери урожая в сентябре составляют $0{,}01 \cdot 7{,}4 = 0{,}07\%$ и в октяб-

Таблица 70

Определение возможности производства уборочных работ в августе на торфяных почвах (при $A=13\,000$, $\overline{q}=9$ *л/сек км²* и $H=0{,}55$ *м*)

Показатель	P, %								
	83	60	40	20	10	5	2	1	0
$P_{1\,\text{т VIII}}$	0	4,2	12,2	26,2	29,8	50,8	60,6	73,1	74,7
$c_{\text{VIII}}=0{,}31\,P_{1\,\text{т VIII}}+10$	10,0	11,3	13,8	18,1	19,2	25,7	28,8	32,7	33,2

Таблица 71

Определение потерь урожая при уборке ячменя в сентябре на торфяных почвах (при $A=13\,000$, $\overline{q}=9$ *л/сек км²* и $H=0{,}55$ *м*)

Показатели	P, %				
	75	50	35	19	15
$P_{1\,\text{т IX}}$	0	7,2	20,1	50,0	64,0
$c_{\text{IX}}=0{,}30\,P_{1\,\text{т IX}}+10$	10,0	12,2	16,0	25,0	29,2
$y_{\text{IX я}}=0{,}8\,c_{\text{IX}}$	80,0	9,8	12,8	20,0	23,4
$\overline{y}_{\text{IX я}}$	8,9	11,3	16,4	21,7	
ΔP	25	15	16	4	
$\overline{y}_{\text{IX я}}\,\Delta P$	222	170	262	87	
$\frac{1}{100}\sum\overline{y}_{\text{IX я}}\,\Delta P$	7,41				

ре — $0{,}0015\cdot 19{,}8=0{,}03\%$. Если считать, что в ноябре уборка вообще не производится, то потери с неубранной площади равны 100%. Поэтому к потерям в сентябре следует прибавить еще $0{,}0015\cdot 36{,}0=0{,}05\%$. Сумма потерь при уборке в данном случае составляет $0{,}07+0{,}03+0{,}05=0{,}15\%$. Такие потери ожидаются

только при условии, когда урожай поспевает до конца августа. По средним данным, приведенным в табл. 67, можно судить, что при запаздывании весеннего сева до 22 мая ячмень созревает до состояния восковой спелости около 19 августа. Если до полной спелости прибавить еще 5—6 суток, то уборка таких поздних посевов переходит на конец августа и начало сентября.

Таблица 72

Определение потерь урожая при уборке ячменя в октябре на торфяных почвах (при $A=13000$, $\overline{q}=9$ *л/сек км²* и $H=0{,}55$ *м*)

Показатели	P, %						
	85	70	60	50	45	40	36
$P_{1\,т\,х}$	0,1	14,9	24,4	45,8	62,0	80,3	100
$c_х=0{,}31\ P_{1\,т\,х}+40$	40,0	44,6	47,6	54,2	59,2	64,9	71,0
$y_{х\,я}=0{,}8\ c_х$	32,0	35,7	38,1	43,4	47,4	52,0	56,8
$\overline{y}_{х\,я}$	33,8		36,9	40,8	45,4	49,7	54,4
ΔP	15		10	10	5	5	4
$\overline{y}_{х\,я}\,\Delta P$	507		369	408	227	248	218
$\frac{1}{100}\sum \overline{y}_{х\,я}\,\Delta P$	19,77						

Из табл. 64 видно, что при $A=13000$ и обеспеченности месячного стока мая в 20% средним сроком посева является 25 мая. Отсюда следует, что при данной степени осушения уборка ячменя переносится на сентябрь с обеспеченностью в 20% общего числа случаев уборки. Таким образом, в августе можно убирать только в 80% всех случаев. Поэтому приведенные выше потери при уборке ячменя следует брать с коэффициентом 0,8 и прибавить к ним еще потери в сентябре, определенные по табл. 71 с коэффициентом 0,2, т. е. $0{,}2\cdot 7{,}41=1{,}48\%$, и в октябре — по табл. 72 с коэффициентом $0{,}2\cdot 0{,}15=0{,}03$, т. е. $0{,}03\cdot 19{,}8=0{,}59\%$, а также неубранный урожай в октябре — $0{,}03\cdot 36=1{,}08\%$.

Общая величина потерь ячменя (при $A=13000$) составляет, таким образом, $0{,}8 \cdot 0{,}15+1{,}48+0{,}59+1{,}08=3{,}27\%$. Так как потери урожая от запаздывания весеннего посева (по табл. 66) составляют 6,8%, а от высокого стояния уровня грунтовых вод (по табл. 51) — 0,01 (100−6,8) 13,0=12,1%, то общие потери при уборке, выраженные в процентах от полного урожая, равны 0,01 (100−6,8−12,1) 3,27=2,7%.

По приведенной методике рассчитаны потери при уборке ячменя, овса, пшеницы и гороха при различном показателе интенсивности осушения. Результаты расчета представлены в табл. 73.

Эти результаты показывают, что потери урожая появляются при показателе интенсивности осушения, превышающем 9000.

Таблица 73

Потери урожая при уборке ячменя, овса, гороха и яровой пшеницы на торфяных почвах (при различных значениях A, $q=9$ *л/сек км²* и $H=0{,}55$ *м*)

Интенсивность осушения A	Потери при уборке, % полного урожая		
	ячменя	овса и гороха	яровой пшеницы
7800	0	0	0
9000	0,0	0,1	0,5
13000	2,7	4,2	7,0
15600	6,6	9,2	13,6

Таблица 74

Общие потери урожая ячменя на торфяных почвах (при различных значениях A и $q=9$ *л/сек км²*

Интенсивность осушения A	Потери урожая ячменя, % полного урожая			
	в мае	в июне	в сентябре	всего ($Y_{тя}$)
4000	0	0	0	0
5600	0,3	0,8	0	1,1
7800	1,1	3,1	0	4,2
9000	2,2	4,6	0,0	6,8
13000	6,8	12,1	2,7	21,6
15600	12,9	17,6	6,6	37,1

Примечание. Потери урожая вследствие запаздывания весеннего сева (в мае) взяты из табл. 66, потери, обусловленные высоким стоянием грунтовых вод (в июне), приняты равными потерям урожая культурных пастбищ и сенокосов (см. табл. 51), а потери при уборке (в сентябре) — из табл. 73.

При $A<9000$ обеспечивается посев в мае и созревание в августе, когда имеются и благоприятные условия для уборки. При $A>9000$ появляется резкое увеличение потерь урожая, так как условия уборки в сентябре сильно ухудшаются. Наибольшие потери наблюдаются при уборке яровой пшеницы. Они обусловлены большей продолжительностью периода вегетации этой культуры и более поздним сроком уборки. В продолжительности вегетационного периода овса и гороха нет особой разницы (см. табл. 67), поэтому потери при уборке овса и гороха приняты в табл. 73 одинаковыми.

Суммарные потери урожая ячменя, овса, яровой пшеницы и гороха, при различной величине показателя интенсивности осушения, представлены в табл. 74, 75, 76 и 77.

Таблица 75

Общие потери урожая овса на торфяных почвах (при различных значениях A и $\bar{q}=9$ $л/сек\,км^2$)

Интенсивность осушения A	Потери урожая овса, % полного урожая			
	в мае	в июне	в сентябре	всего ($Y_{то}$)
4000	0,1	0	0	0,1
5600	0,6	0,8	0	1,4
7800	1,9	3,0	0	4,9
9000	3,6	4,5	0,1	8,2
13000	10,8	11,6	4,2	26,6
15600	19,5	16,3	9,2	45,0

Таблица 76

Общие потери урожая яровой пшеницы на торфяных почвах (при различных значениях A и $q=9$ $л/сек\,км^2$)

Интенсивность осушения A	Потери урожая яровой пшеницы, % полного урожая			
	в мае	в июне	в сентябре	всего ($Y_{тп}$)
4000	0,6	0	0	0,6
5600	2,5	0,8	0	3,3
7800	6,5	2,9	0	9,4
9000	10,3	4,2	0,5	15,0
13000	23,2	10,0	7,0	40,2
15600	36,3	12,9	13,6	62,8

Таблица 77

Общие потери урожая гороха на торфяных почвах (при различных значениях A и $\overline{q}=9$ *л/сек км²*)

Интенсивность осушения A	Потери урожая гороха, % полного урожая			
	в мае	в июне	в сентябре	всего ($Y_{тг}$)
4000	0,6	0,0	0	0,6
5600	2,5	0,8	0	3,3
7800	6,5	2,9	0	9,4
9000	10,3	4,2	0,1	14,6
13000	23,2	10,0	3,6	36,8
15600	36,3	12,9	7,3	56,5

По данным табл. 74—77 составлен рисунок 40 и определены следующие связи между показателем интенсивности осушения A и потерями урожая:

для ячменя

$$Y_{тя}=\frac{(A-3500)^2}{4{,}62\cdot 10^6}, \tag{130}$$

для овса

$$Y_{то}=\frac{(A-3500)^2}{3{,}47\cdot 10^6}, \tag{131}$$

для яровой пшеницы и гороха

$$Y_{тпг}=\frac{(A-3000)^2}{2{,}40\cdot 10^6}, \tag{132}$$

С целью упрощения расчетов потери урожая в формулах (130), (131) и (132) выражены в виде квадратичных парабол. В таком случае потери, вычисленные при $A>13000$, не совпадают с данными, помещенными в табл. 74—77. Однако при определении оптимальной интенсивности осушения такая неточность не имеет значения, так как расчеты проводятся при $A<10000$.

Определение расчетной интенсивности осушения торфяных почв, предназначенных для выращивания яровых зерновых и зернобобовых культур

Для ячменя сумма потерь урожая и расходов на осушение ($S_{тя}$) после сложения уравнений (130) и (102) равна

$$S_{тя}=\frac{(A-3500)^2}{4{,}62\cdot 10^6}+\frac{100}{D}\left(\frac{250}{A\sqrt{k}}+6{,}2\right). \tag{133}$$

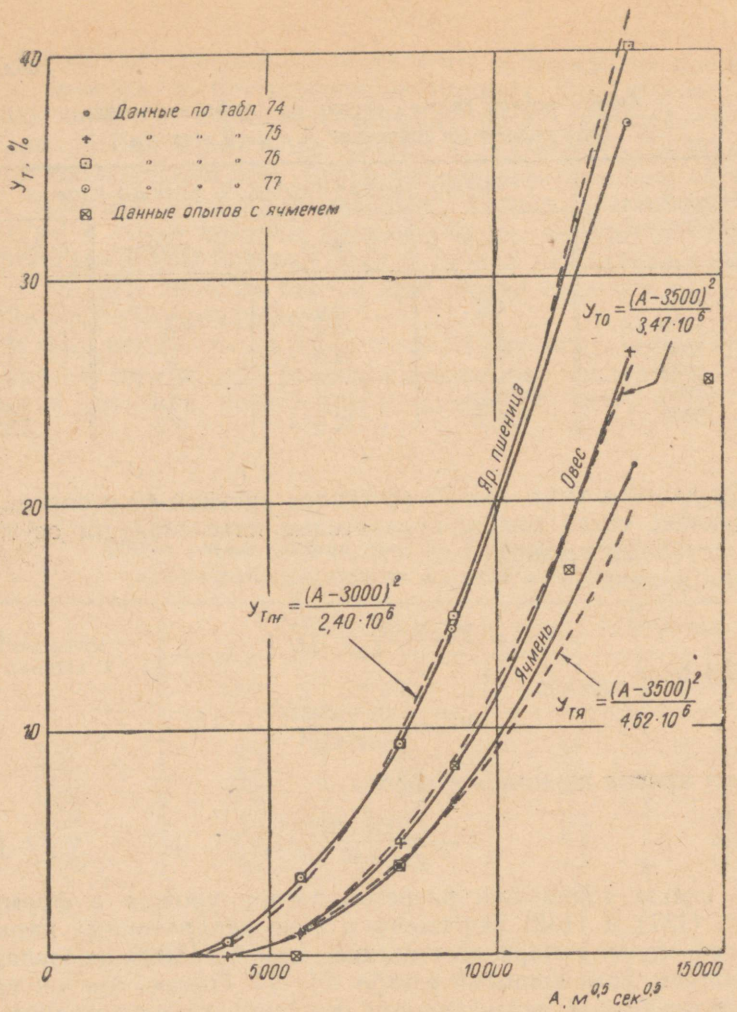


Рис. 40. Зависимость потерь урожая ячменя, овса и яровой пшеницы на торфяных почвах от показателя интенсивности осушения.

На основе выражения (133) для вычисления величины $A_{тя}$ получаем уравнение

$$\frac{2A_{тя}^2}{4,62 \cdot 10^6}(A_{тя} - 3500) = \frac{2,5 \cdot 10^4}{D\sqrt{k}}. \qquad (134)$$

При $k = 0,00002$ *м/сек* и $D = 200$ *руб/га* на основе уравнения (134) получается, что $A_{тя} = 5580$ и при $k = 0,0000025$ и $D = 200$ *руб/га* — $A_{тя} = 7115$.

Для культурных пастбищ при таких же величинах k и D $A_{тп}$ равно соответственно 5765 и 7385.

Отношение $A_{тя}$ к $A_{тп}$ при $k=0{,}00002$ *м/сек* и $D=200$ *руб/га* равно $\frac{5580}{5765}=0{,}97$, а при $k=0{,}0000025$ *м/сек* и $D=200$ *руб/га* $\frac{7115}{7385}=0{,}96$. В средних условиях $\frac{A_{тя}}{A_{тп}}=0{,}965$.

Отсюда следует, что при выращивании ячменя на торфяных почвах расчетный показатель интенсивности осушения необходимо принять в среднем на 3,5% меньшим, чем для культурных пастбищ. Если для последних он был принят равным 7500, то при возделывании ячменя целесообразно принять $A_{тя}=0{,}965\cdot 7500\approx 7200$.

Для овса сумма потерь урожая и расходов на осушение ($S_{то}$) на основе уравнений (131) и (102) составляет

$$S_{то}=\frac{(A-3500)^2}{3{,}47\cdot 10^6}+\frac{100}{D}\left(\frac{250}{A\sqrt{k}}+6{,}2\right). \qquad (135)$$

Минимальное значение $A_{то}$ вычисляется из уравнения

$$\frac{2A_{то}^2}{3{,}47\cdot 10^6}(A_{то}-3500)=\frac{2{,}5\cdot 10^4}{D\sqrt{k}}. \qquad (136)$$

При $k=0{,}00002$ *м/сек* и $D=200$ *руб/га* $A_{то}=5260$,
при $k=0{,}0000025$ *м/сек* и $D=200$ *руб/га* $A_{то}=6630$.

Отношение $A_{то}$ к $A_{тп}$ при $k=0{,}00002$ *м/сек* и $D=200$ *руб/га* равно $5260:5765=0{,}91$, при $k=0{,}0000025$ *м/сек* и $D=200$ *руб/га* — $6630:7385=0{,}90$.

Среднее значение — 0,905.

Таким образом, расчетный показатель интенсивности осушения при выращивании овса на торфяных почвах целесообразно принять равным $A_{то}=0{,}905\cdot 7500=6800$.

Для яровой пшеницы и гороха сумма потерь и расходов на осушение ($S_{тпг}$) на основе уравнений (132) и (102) равна

$$S_{тпг}\frac{(A-3000)^2}{2{,}40\cdot 10^6}+\frac{100}{D}\left(\frac{250}{A\sqrt{k}}+6{,}2\right). \qquad (137)$$

Минимальное значение $A_{тпг}$ вычисляется из уравнения

$$\frac{2A_{тпг}^2}{2{,}40\cdot 10^6}(A_{тпг}-3000)=\frac{2{,}5\cdot 10^4}{D\sqrt{k}}. \qquad (138)$$

При $k=0{,}00002$ *м/сек* и $D=200$ *руб/га* $A_{тпг}=4590$,
при $k=0{,}0000025$ *м/сек* и $D=200$ *руб/га* $A_{тпг}=5810$.

Отношение $A_{тпг}$ к $A_{тп}$ при $k=0{,}00002$ *м/сек* и $D=200$ *руб/га* равно $4590:5765=0{,}795$, при $k=0{,}0000025$ *м/сек* и $D=200$ *руб/га* — $5810:7388=0{,}79$. Среднее значение — 0,79.

Таким образом, расчетный показатель интенсивности осушения при выращивании яровой пшеницы и гороха на торфяных почвах желательно принять равным $0{,}79\cdot 7500\approx 5900$.

По кормовым бобам данных наблюдений для решения вопроса об интенсивности осушения недостаточно. Из табл. 63 и рис. 39 видно, что запаздывание срока посева в мае оказывает на урожай бобов незначительное влияние. Потери урожая от запаздывания весеннего сева бобов можно считать равными потерям для ячменя.

Сроки созревания бобов приблизительно совпадают со сроками созревания гороха и пшеницы. Поэтому потери урожая при уборке бобов можно считать приблизительно равными потерям при уборке гороха и пшеницы. В связи с этим интенсивность осушения земель, предназначенных под кормовые бобы, может быть принята средней между интенсивностью осушения земель, используемых под горох и ячмень. Из сказанного можно предварительно заключить, что показатель интенсивности осушения торфяных почв, используемых для посева бобов, близок к показателю для овса, т. е. $A_T\approx 6800$.

Б. Интенсивность осушения тяжелых суглинистых почв, предназначенных для выращивания яровых зерновых культур

Для исследования интенсивности осушения тяжелых суглинистых почв, предназначенных под яровые зерновые культуры, использована такая же методика, как и для торфяных почв. Режим уровней грунтовых вод и связанные с этим потери урожая определены на основе формул стока, действительных и для тяжелых суглинистых почв.

Уравнение поверхности обеспеченности суточного напора грунтовых вод в мае, необходимое для расчета потерь от запаздывания весеннего посева, имеет следующий вид:

$$H_{c\,v\,P\,P_1\%}=\frac{A\,k_{c\,v\,P\%}}{2}\sqrt{q_{c\,v\,P\%}\,10^{-9}}, \qquad (139)$$

где $k_{c\,v\,P\%}$ — определяется по формуле (68);
$q_{c\,v\,P\%}$ — определяется по формулам (62) и (34).

После замены величин стока в уравнении (139), их значениями (34), (62) и (68), принимая, что $\overline{q}=9$ *л/сек км²* и $k_{95\%}=0$,

получим для вычисления процента обеспеченности суточного напора в мае $P_{1\,c\,V}$ следующее уравнение:

$$P_{1\,c\,V}=\left[\frac{36{,}35-16{,}99\lg(P+1)}{8{,}97\cdot 10^{8}\dfrac{H^2}{A^2}+7{,}70-3{,}60\lg(P+1)}\right]^{3{,}13}-1. \qquad (140)$$

Как и для торфяных почв, продолжительность запаздывания срока посева вычисляется по уравнению

$$c_V=0{,}31\ P_{1\,c\,V}+5.$$

Потери урожая в зависимости от запаздывания срока посева определяются на основе формул (115), (116) и (117).

Среднегодовые потери урожая ячменя, овса, яровой пшеницы и гороха при различной интенсивности осушения, вычисленные на основе интеграла (122), представлены в табл. 78.

Таблица 78

Потери урожая, обусловленные запаздыванием срока весеннего посева ячменя, овса яровой пшеницы и гороха на тяжелых суглинистых почвах (при различных значениях A и $\overline{q}=9$ $л/сек\,км^2$)

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % полного урожая		
	ячмень	овес	яровая пшеница и горох
4000	0,0	0,1	0,4
5600	0,2	0,5	2,1
7800	0,6	1,1	4,6
9000	1,0	1,7	6,2
13000	2,8	4,7	12,7
15600	4,4	7,2	17,6

Для определения потерь урожая во время уборки были использованы уравнения поверхности обеспеченности суточного напора грунтовых вод в августе, сентябре и октябре.

Если в формуле

$$H_{c\,VIII\,0{,}4\,P\,P_1\%}\frac{A\,k_{c\,VIII\,P_1\%}}{2}\sqrt{q_{c\,VIII\,0{,}4\,P\%}\,10^{-9}}$$

$k_{c\,VIII\,P_1\%}$ заменить значением, полученным по формуле (71), и $q_{c\,VIII\,0{,}4\,P\%}$ его значением, полученным по формулам (65) и (44), то при $\overline{q}=9$ $л/сек\,км^2$ и $k_{95\%}=0$ для вычисления процента обеспеченности суточного напора в тех случаях, когда в августе невозможно проводить уборку, получается выражение следующего вида:

$$P_{1\,\text{с VIII}\,0{,}4\,P\%} = \left[\frac{97{,}5 - 48{,}3\lg(P+1)}{3{,}70\cdot 10^{8}\dfrac{H^2}{A^2} + 4{,}16 - 2{,}06\lg(P+1)}\right]^{1{,}45} - 1. \quad (141)$$

При этом следует иметь в виду, что при обеспеченности $P>40\%$ среднесуточный сток в августе равен нулю. Поэтому показатель $P_{1\,\text{с VIII}\,0{,}4\,P\%}$, вычисленный по уравнению (141), соответствует не проценту обеспеченности месячного стока P, а $0{,}4\,P$.

Для сентября и октября $P_{1\,\text{с IX}}$ и $P_{1\,\text{с X}}$ вычисляются по приведенным ранее уравнениям (110) и (111).

Применяя такую же методику, как и в случае торфяных почв, и с учетом возможных сроков посева и созревания были определены потери урожая при уборке ячменя, овса, яровой пшеницы и гороха. Результаты вычислений представлены в табл. 79.

Таблица 79

Потери урожая при уборке ячменя, овса, гороха и яровой пшеницы на тяжелых суглинистых почвах (при различных значениях A, $q=9$ *л/сек км²* и $H=0{,}55$ *м*)

Интенсивность осушения A	Потери при уборке, % полного урожая		
	ячменя	овса и гороха	яровой пшеницы
7800	0	0	0
9000	0,0	0,0	0,1
13000	0,5	1,1	2,0
15600	1,2	2,0	4,0

Потери урожая зерновых культур, обусловленные высоким стоянием грунтовых вод в вегетационный период, как на торфяных, так и на тяжелых суглинистых почвах приняты равными потерям урожая для пастбищ и сенокосов (см. табл. 58).

Суммарные потери урожая ячменя, овса, яровой пшеницы и гороха, вызванные переувлажнением почвы в весенний (май по табл. 78), летний (июнь по табл. 58) и осенний (сентябрь по табл. 79) периоды, представлены в табл. 80, 81, 82 и 83.

Графики на рис. 41 показывают, что суммарные потери урожая на тяжелых суглинистых почвах (Y_c) можно описать следующими уравнениями:

для ячменя

$$Y_{\text{с я}} = \frac{(A-3000)^2}{8{,}70\cdot 10^{6}}, \quad (142)$$

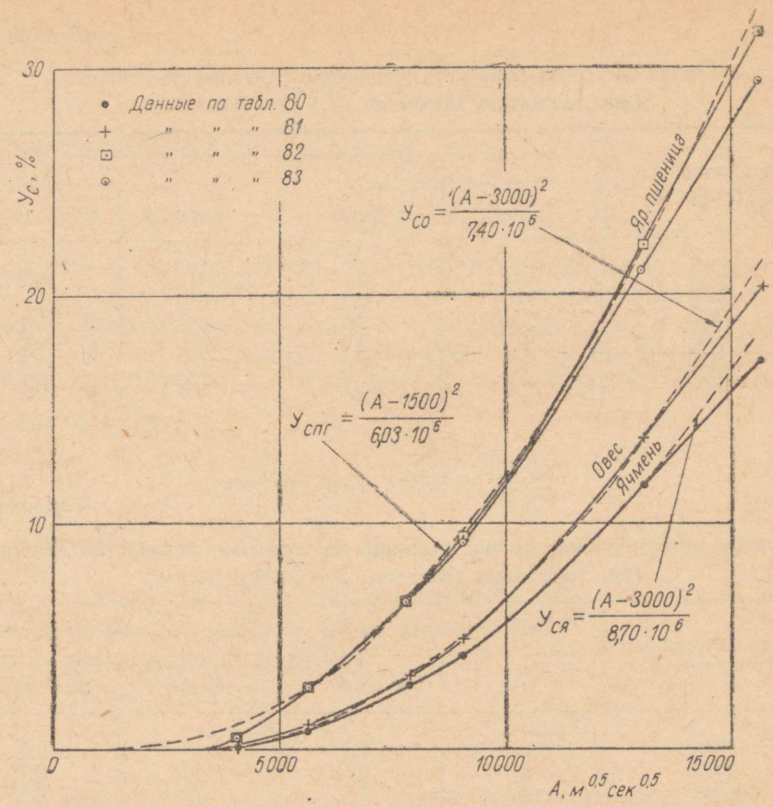


Рис. 41. Зависимость потерь урожая ячменя, овса и яровой пшеницы на тяжелых суглинистых почвах от показателя интенсивности осушения.

Таблица 80

Общие потери урожая ячменя на тяжелых суглинистых почвах (при различных значениях A и $\overline{q}=9$ л/сек км²)

Интенсивность осушения A	Потери урожая ячменя, % полного урожая			
	в мае	в июне	в сентябре	всего ($Y_{ся}$)
4000	0,0	0,1	0	0,1
5600	0,2	0,6	0	0,8
7800	0,6	2,0	0	2,6
9000	1,0	3,0	0,0	4,0
13000	2,8	8,1	0,5	11,4
15600	4,4	11,4	1,2	17,0

Таблица 81

Общие потери урожая овса на тяжелых суглинистых почвах (при различных значениях A и $\overline{q}=9$ л/сек км²)

Интенсивность осушения A	Потери урожая овса, % полного урожая			
	в мае	в июне	в сентябре	всего ($Y_{со}$)
4000	0,1	0,1	0	0,2
5600	0,5	0,6	0	1,1
7800	1,1	2,0	0	3,1
9000	1,7	2,9	0,1	4,7
13000	4,7	7,9	1,1	13,7
15600	7,2	11,1	2,0	20,3

Таблица 82

Общие потери урожая яровой пшеницы на тяжелых суглинистых почвах (при различных значениях A и $\overline{q}=9$ л/сек км²)

Интенсивность осушения A	Потери урожая яровой пшеницы, % полного урожая			
	в мае	в июне	в сентябре	всего ($Y_{спш}$)
4000	0,4	0,1	0	0,5
5600	2,1	0,6	0	2,7
7800	4,6	1,9	0,0	6,5
9000	6,2	2,8	0,1	9,1
13000	12,7	7,3	2,0	22,0
15600	17,6	9,9	4,0	31,5

Таблица 83

Общие потери урожая гороха на тяжелых суглинистых почвах (при различных значениях A и $\overline{q}=9$ л/сек км²)

Интенсивность осушения A	Потери урожая гороха, % полного урожая			
	в мае	в июне	в сентябре	всего ($Y_{сг}$)
4000	0,4	0,1	0	0,5
5600	2,1	0,6	0	2,7
7800	4,6	1,9	0	6,5
9000	6,2	2,8	0,0	9,0
13000	12,7	7,3	1,0	21,0
15600	17,6	9,9	1,8	29,3

для овса

$$Y_{со}=\frac{(A-3000)^2}{7{,}40\cdot 10^6}, \qquad (143)$$

для яровой пшеницы и гороха

$$Y_{спг}\frac{(A-1500)^2}{6{,}03\cdot 10^6}. \qquad (144)$$

После сложения потерь урожая, вычисленных по формулам (142), (143) и (144), с данными, полученными по формуле (102), дифференцирования их суммы и приравнивания результата к нулю получим следующие уравнения для вычисления значений показателя интенсивности осушения $A_с$ на тяжелых почвах:

для ячменя

$$\frac{2A_{ся}^2}{8{,}70\cdot 10^6}(A_{ся}-3000)=\frac{2{,}5\cdot 10^4}{D\sqrt{k}}, \qquad (145)$$

для овса

$$\frac{2A_{со}^2}{7{,}40\cdot 10^6}(A_{со}-3000)=\frac{2{,}5\cdot 10^4}{D\sqrt{k}}, \qquad (146)$$

для яровой пшеницы и гороха

$$\frac{2A_{спг}^2}{6{,}03\cdot 10^6}(A_{спг}-1500)=\frac{2{,}5\cdot 10^4}{D\sqrt{k}}. \qquad (147)$$

Подставляя в уравнения (145), (146) и (147) значения $k=0{,}0000025$ *м/сек* и $D=200$ *руб/га*, получим, что

$$A_{ся}=8160,\ A_{со}=7800 \text{ и } A_{спг}=6740.$$

Соответствующие значения показателя интенсивности осушения на торфяных почвах составили:

$$A_{тя}=7115,\ A_{то}=6630 \text{ и } A_{тпг}=5810.$$

Отношения приведенных значений $A_с$ и $A_т$ следующие:

$$\frac{A_{ся}}{A_{тя}}=\frac{8160}{7115}=1{,}14,\quad \frac{A_{со}}{A_{то}}=\frac{7800}{6630}=1{,}18,$$

$$\frac{A_{спг}}{A_{тпг}}=\frac{6740}{5810}=1{,}16.$$

Отсюда следует, что показатели интенсивности осушения для яровых культур на тяжелых суглинистых почвах на 14—18% больше, чем на торфяных почвах.

Определение расчетной интенсивности осушения минеральных почв, предназначенных для выращивания яровых зерновых культур

На рис. 42 показаны кривые суммарных потерь урожая ячменя и расходов на осушение на тяжелых суглинистых супесчаных и песчаных почвах. Потери урожая на песчаных почвах приняты равными потерям на торфяных почвах, так как режим стока здесь ближе к режиму на торфяных, чем на тяжелых почвах.

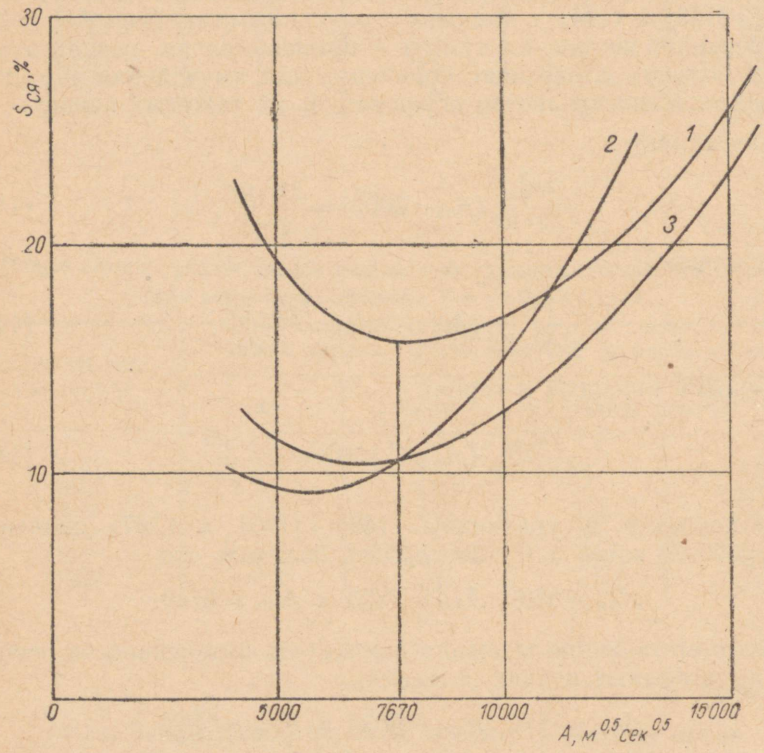


Рис. 42. Зависимость суммы потерь урожая ячменя и расходов на осушение минеральных почв от показателя интенсивности осушения:

1 — тяжелые суглинки k=0,0000025, *2* — пески k=0,00002, *3* — супесь k=0,00001 *м/сек*.

Из рисунка видно, что при минимальном значении кривые имеют такую же пологую форму, как и на торфяных почвах.

Отсюда следует, что и на минеральных почвах расчетный показатель интенсивности осушения может быть принят постоянным как для тяжелых, так и для средних почв. Для песчаных

почв, как показывает рис. 42, расчетный показатель меньше, чем соответствующий показатель для более тяжелых почв.

Если на тяжелых почвах показатель интенсивности осушения для яровых зерновых культур на 14—18% больше, чем для торфяных почв, то для средних почв это увеличение составляет 7,0—9,0%.

Расчетный показатель интенсивности осушения для ячменя на торфяных почвах был принят равным 7200. На средних минеральных почвах этот показатель может быть принят равным $1{,}07 \cdot 7200 = 7700$. Из рис. 42 видно, что этот показатель применим и для тяжелых почв.

Таким образом, при осушении тяжелых и средних минеральных почв под яровые зерновые для расчетного показателя интенсивности осушения целесообразно применять следующие величины:

для ячменя

$$A_{с\,я} = 1{,}07 \cdot 7200 = 7700$$

для овса

$$A_{с\,о} = 1{,}09 \cdot 6800 = 7400$$

для яровой пшеницы и гороха

$$A_{с\,пг} = 1{,}08 \cdot 5900 = 6370.$$

На песчаных почвах расчетные показатели интенсивности осушения желательно принять равными показателю, рекомендуемому для торфяных почв.

3. ИНТЕНСИВНОСТЬ ОСУШЕНИЯ ЗЕМЕЛЬ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПОД ОЗИМЫЕ ЗЕРНОВЫЕ КУЛЬТУРЫ

Для определения потерь урожая озимых зерновых под воздействием весенних затоплений использованы данные исследований Северного научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации (СНИИГиМ), проведенные в колхозах «Кудрова» и «Красный Восход» [18] и представленные в табл. 84 и 85. В этих таблицах показаны результаты полевых опытов, где продолжительность затопления регулировалась путем искусственного задержания и спуска воды. Затопления производились в конце апреля, т. е. в начале весеннего оживления растений.

Сравнение 12-летних (1947—1958) средних данных фенологических и гидрометрических наблюдений [3] показывает, что оживание озимых культур на малых водосборах и осушительных системах происходит в среднем через 7 дней после максимума весеннего паводкового стока. Поэтому при составлении рис. 43

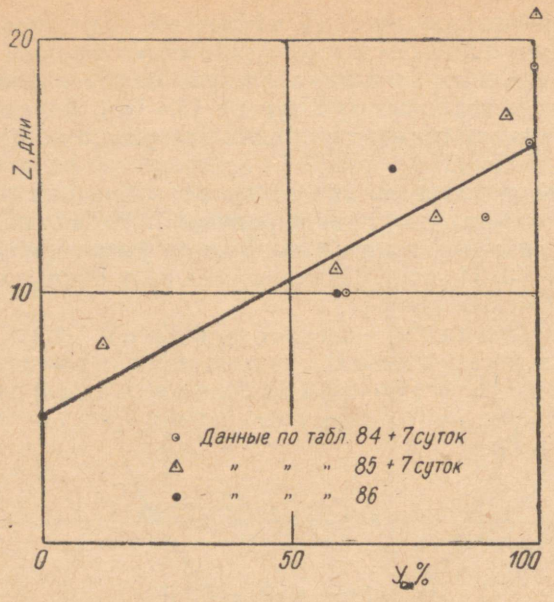


Рис. 43. Зависимость потерь урожая озимой пшеницы от продолжительности весенних затоплений.

на основе данных табл. 84 и 85 продолжительность затопления, представленная в таблицах, увеличена на 7 суток.

На рис. 43 нанесены также данные табл. 86, полученные от опытных баз Эстонского научно-исследовательского института земледелия и мелиорации (ЭНИИЗиМ).

Таблица 84

Влияние весеннего затопления на озимую пшеницу в колхозе «Кудрова» (по данным СНИИГиМ [18])

Продолжительность затопления, дней	Сохранилось растений, %	Урожай			
		соломы		зерна	
		ц/га	%	ц/га	%
0	100	19,5	100	21,4	100
3	86	7,8	40	8,3	39
6	36	2,4	12	2,5	11
9	12	0,4	2	0,3	1
12	0	0,0	0	0,0	0

Таблица 85

Влияние весеннего затопления на урожай озимой пшеницы в колхозе «Красный Восход» (по данным СНИИГиМ [18])

Продолжительность затопления, дней	Сохранилось растений, %	Высота растений, *см*	Длина колоса, *см*	Озерненность колоса, шт.	Засоренность посева, %	Урожай	
						ц/га	%
0	100	109	11,5	51	6	20,5	100
1	94	106	10,5	48	10	18,0	88
4	56	85	7,0	26	25	8,5	41
6	34	75	6,5	22	70	4,5	22
10	9	47	6,5	22	85	1,5	7
14	0	—	—	—	100	0,0	0

Таблица 86

Потери урожая озимых культур в зависимости от продолжительности весеннего затопления (по данным опытных баз ЭНИИЗиМ)

Продолжительность затопления в сутках	Потери урожая, % полного урожая	
	ржи	пшеницы
5	5	0
10	60	40
15	80	70

На основе рис. 43 можно получить следующее уравнение для определения потерь урожая озимой пшеницы:

$$y = 9{,}1(z-5), \qquad (148)$$

где y — потери урожая озимой пшеницы, в процентах от полного урожая,

z — продолжительность затопления, считая со дня наступления весеннего максимума стока, суток.

Кривые обеспеченности стока в период весеннего паводка, необходимые для расчета потерь урожая от затоплений, можно определить по уравнению кривой спада весеннего паводка или по формуле (22) для посевного стока.

$$k_{z\,P\%} = (k_{\text{вес. макс}\,P\%} - k_{\text{гр}})\left(\frac{t_c - z}{t_c}\right)^n + k_{\text{гр}}.$$

А. Интенсивность осушения торфяных почв при возделывании озимых зерновых

На рис. 44 показана кривая обеспеченности весеннего стока установленная через 5 суток после прохождения максимума стока на осушительной системе Рехемяэ, расположенной на торфяных почвах. На рисунке показана также кривая, вычисленная по формуле (22), где $k_{\text{вес. макс } P\%}$ вычислялась по формуле (6а) при $k_{95\%}=0$ и $r=-0{,}04$ (по формуле (7в), где $A_{\text{НО}}=100\%$, $z=5$ суток, $k_{\text{гр}}=0$, $t_{\text{с}}$ вычислялась по формуле (19) и n было принято равным 5,0.

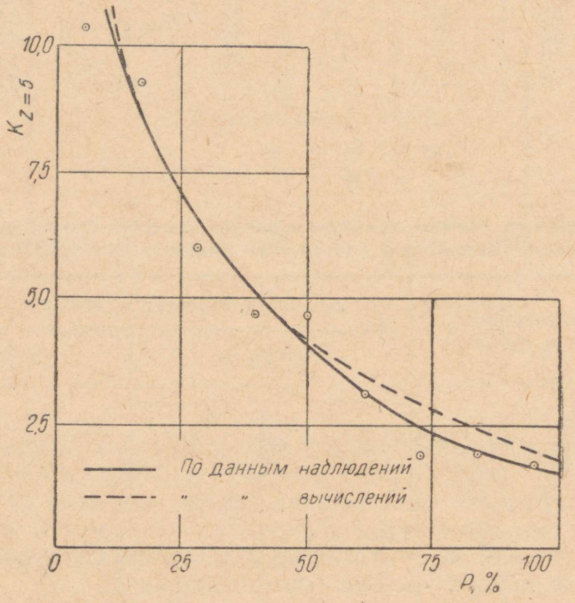


Рис. 44. Кривая обеспеченности весеннего максимального стока с осушенных торфяных почв при $z=5$ суткам.

Из рис. 44 вино, что вычисленная кривая удовлетворительно совпадает с данными наблюдений.

Кривая обеспеченности стока, установленная через 10 суток после весеннего максимума стока на осушительной системе Рехемяэ, сопоставлена на рис. 45 с вычисленной кривой. Вычисление проводилось аналогично предыдущему случаю, только показатель степени n был принят равным 3,7. Вычисленная кривая также с удовлетворительной точностью совпадает с фактической.

Для определения величины стока через 16 суток после прохождения весеннего максимума стока, т. е. для случая, когда урожай озимых зерновых под влиянием затопления может полностью погибнуть, можно использовать формулу (24) для посевного стока. Последняя отличается от формулы (22) только тем,

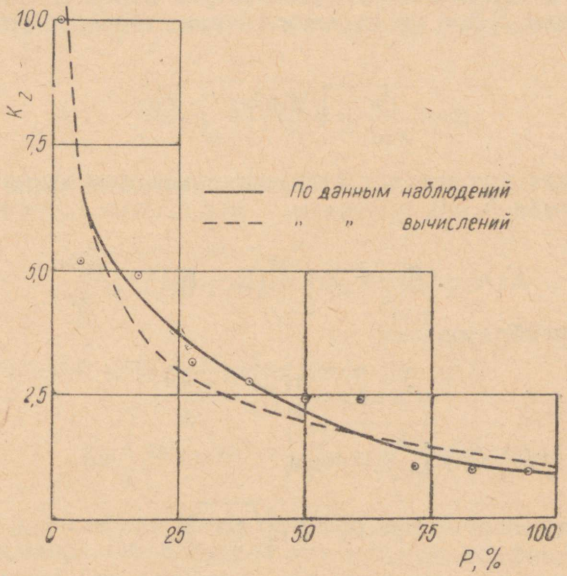


Рис. 45. Кривая обеспеченности весеннего максимального стока с осушенных торфяных почв при $z=10$ суткам.

что процент обеспеченности вычисленного стока следует увеличить на 20% по сравнению с таковым максимального стока, по которому производились вычисления. Таким образом, по формуле (24) величину стока можно определить только при обеспеченности, превышающей 20%. При $P<20\%$ величину стока можно определить путем экстраполяции вычисленной кривой.

Зная режим стока весеннего периода, можно определить потери урожая, вызванные затоплением. Если при данном показателе интенсивности осушения A при повышении уровня грунтовых вод до дневной поверхности модуль стока равен

$$q_1=\frac{4kH^2_{\text{макс}}}{E_1^2}=\frac{4H^2_{\text{макс}}}{A_1^2}, \qquad (149)$$

то при модуле $q_2>q_1$ на данной осушительной системе образуется затопление. Ширина незатопляемой полосы $E_2=2S$, вычис-

ляется по схеме инфильтрационного и грунтового питания. От незатопленной полосы необходимо отводить сток инфильтрационного питания, модуль которого $q_2=p$. Кроме того, незатопленная полоса должна пропускать расход с затопленной полосы, равной $(E_1-E_2)q_2=2q$ в виде грунтового потока.

На основе решения В. А. Ионата [17] половина расстояния между дренами S при смешанном питании определяется по формуле

$$S=-\frac{q}{p}+\sqrt{\frac{q^2+kp(H^2-h_0^2)}{p^2}}. \qquad (150)$$

Подставляя в уравнение (150) используемые выше обозначения и принимая $h_0=0$, получаем

$$E_2=-(E_1-E_2)+\sqrt{(E_1-E_2)^2+\frac{4kH^2}{q_2}}$$

или после преобразования

$$E_2=E_1-\sqrt{E_1^2-\frac{4kH^2}{q_2}}.$$

Заменяя $4kH^2=q_1E_1^2$, получим

$$E_2=E_1-E_1\sqrt{1-\frac{q_1}{q^2}}. \qquad (151)$$

Ширина полосы затопления E_1-E_2 равна

$$E_1-E_2=E_1\sqrt{1-\frac{q_1}{q_2}}.$$

Площадь затопления f в процентах от общей осушенной площади выражается формулой

$$\frac{(E_1-E_2)100}{E_1}=100\sqrt{1-\frac{q_1}{q_2}}. \qquad (152)$$

Формула (152) показывает, что на основе модуля стока q_1 и q_2 можно определить процент затопляемых площадей. При разном показателе интенсивности осушения модуль стока q_1 определяется по формуле (149). Выше было показано, как вычисляется кривая обеспеченности стока $k_{zP\%}$ (на основе формулы (22)) при разных z после прохождения весеннего максимального стока. Для перевода относительных величин стока k_z в модули стока требуется k_z умножить на модуль многолетнего среднегодового стока $\bar{q}$. Таким образом, кривая обеспеченности модуля стока, при котором происходит затопление, определяется

из выражения

$$q_{2P\%} = \overline{q} k_{zP\%}.$$

Зная кривую обеспеченности стока $q_{2P\%}$, можно на основе формулы (152) вычислить процент затопляемых площадей при любой обеспеченности стока, т. е. получить кривую обеспеченности процента затопляемых площадей $\omega_з$, выражаемую уравнением

$$\omega_{зP\%} = 100\sqrt{1 - \frac{q_1}{q_{2P\%}}}. \qquad (153)$$

Сумма процентов затопляемых площадей за столетний период выражается интегралом

$$\int_0^P \omega_{зP\%}\, dP = 100 \int_0^P \sqrt{1 - \frac{q_1}{q_{2P\%}}}\, dP.$$

Среднегодовой процент затопления равен

$$\frac{1}{100} \int_0^P \omega_{зP\%}\, dP = \int_0^P \sqrt{1 - \frac{q_1}{p_{2P\%}}}\, dP. \qquad (154)$$

Однако расчеты по формуле (153) дают завышенные площади затопления. Объясняется это тем, что торфяные почвы в действительности не являются однородными, как это было принято в наших расчетах. Коэффициент фильтрации торфяных почв, по исследованиям У. Х. Томберга [35], сильно убывает по вертикали от дневной поверхности к дрене. На рис. 24 показана кривая модуля стока, установленная на осушительной системе Рехемяэ. На этом же рисунке обозначена кривая модуля стока для случая, когда почва однородна и дрены расположены на водоупоре, выраженная уравнением

$$H = 0{,}105\sqrt{q}. \qquad (155)$$

Из рис. 24 видно, что вычисленная по формуле (155) кривая при малых напорах смещается немного правее эмпирической, при $H = 0{,}48$ *м* кривые пересекаются и в дальнейшем, по мере увеличения напора, вычисленная кривая постепенно удаляется влево от фактической. При максимальном напоре $H = 1{,}0$ *м* вычисленный сток в 1,45 раза меньше, чем по кривой, полученной на основе осреднения данных наблюдений. Отсюда следует, что вследствие лучшей водопроницаемости верхних слоев торфа затопления наблюдаются при больших модулях стока, чем по принятой схеме, исходящей из предположения однородности грунта.

На основе рис. 24 и исследований, проведенных на других осушительных системах, принято, что модули стока на осушительных системах для торфяных почв при максимальном напоре в среднем в 1,5 раза больше, чем принимаемые для данной расчетной схемы. Здесь могут встретиться значительные отклонения от принятого поправочного коэффициента в ту или другую сторону, в зависимости от водопроницаемости почв и условий стока в верхних слоях. Однако для средних расчетных условий приведенная поправка к стоку, образующему затопления, по-видимому, будет приемлемой. Поэтому при вычислении процента затопляемых площадей по формуле (152) величину модуля стока следует увеличить в 1,5 раза, т. е.

$$f = 100\sqrt{1 - \frac{1{,}5q_1}{q_2}} \qquad (152а)$$

и

$$\frac{1}{100}\int_0^P \omega_{3P\%}\,dP = \int_0^P \sqrt{1 - \frac{1{,}5q_1}{q_{2P\%}}}\,dP. \qquad (154а)$$

Таблица 87

Определение процента площади весеннего затопления продолжительностью в 5 суток на торфяных почвах
(при $A = 13000$, $k_{95\%} = 0$, $r = -0{,}04$, $k_{гр} = 0$, $q = 9$ *л/сек км²*)

Показатели	P, %						
	60	50	20	10	5	2	0
$q_{z_5P\%} = 9k_{z_5P\%}$	32,2	37,7	70,0	99,5	131,0	176,0	264
$f = \sqrt{1 - \frac{1{,}5 \cdot 21{,}4}{q_{z_5P\%}}}$	0	0,39	0,74	0,82	0,87	0,90	0,94
$f_{ср}$	0,20	0,56	0,78	0,84	0,88	0,92	
ΔP	10	30	10	5	3	2	
$f_{ср}\Delta P$	2,00	16,80	7,80	4,20	2,64	1,84	
$\sum f_{ср}\Delta P$	35,28						

В табл. 87, 88 и 89 представлены проценты затопляемых площадей при показателе интенсивности $A=13000$, вычисленные по сумме

$$\frac{1}{100}\int_0^P \omega_{3P\%}\,dP \approx \sum_{i-1}^{n}\left(\frac{\overline{f}}{100}\right)_i \Delta P_i.$$

Кривые обеспеченности модуля стока $q_{2P\%}$ в *л/сек км²* определялись для осушенных торфяных почв при $k_{95\%}=0$, $r=-0{,}04$, $k_{гр}=0$ и $\overline{q}=9$ *л/сек км²*.

Модуль стока q_1 был вычислен на основе формулы (149) при $A=13000$, $H=1{,}0-0{,}05=0{,}95$ *м* (с учетом глубины воды в дрене):

$$q_1=\frac{4\cdot 0{,}95^2}{13000^2}=\frac{21{,}4}{10^9}\ м/сек\ м^2=21{,}4\ л/сек\ км^2.$$

Результат расчета по табл. 87 показывает, что при $A=13000$ в течение 5 суток после прохождения весеннего максимального стока под затоплением находится (в среднем за многолетний период) 35,3% всей осушенной площади.

Таблица 88

Определение процента площади весеннего затопления продолжительностью в 10 суток на торфяных почвах
(при $A=13000$, $k_{95\%}=0$, $r=-0{,}04$, $k_{гр}=0$, $\overline{q}=9$ *л/сек км²*)

Показатели	P, %				
	20	10	5	2	0
$q_{z_{10}P\%}=9k_{z_{10}P\%}$	29,7	44,6	63,3	92,3	156,0
$f=\sqrt{1-\frac{1{,}5\cdot 21{,}4}{q_{z_{10}P\%}}}$	0	0,53	0,70	0,81	0,89
$f_{ср}$	0,26	0,62	0,76	0,85	
ΔP	10	5	3	2	
$f_{ср}\Delta P$	2,60	3,10	2,28	1,70	
$\sum f_{ср}\Delta P$	9,68				

Таблица 89

Определение процента площади весеннего затопления продолжительностью в 16 суток на торфяных почвах
(при $A=13000$, $k_{95\%}=0$, $r=-0{,}04$, $k_{гр}=0$, $\overline{q}=9$ *л/сек км²*)

Показатели	P, %					
	10	5	2			
	$P+20$, %					
	30	25	22	15	10	0
$q_{z_{16}P+20\%}=9k_{z_{16}P\%}$	6,3	11,3	20,2	32,0	40,0	60,0
$f=\sqrt{1-\frac{1{,}5\cdot 21{,}4}{q_{z_{16}P+20\%}}}$				0	0,45	0,68
$f_{ср}$				0,22	0,56	
$\Delta(P+20)$				5	10	
$f_{ср}\Delta(P+20)$				1,10	5,60	
$\sum f_{ср}\Delta(P+20)$					6,70	

Из табл. 88 видно, что при $A=13000$ процент площади затопления с продолжительностью 10 суток равен 9,7. Из табл. 89 следует, что при том же значении A площадь затопления с продолжительностью 16 суток составляет 6,7% общей осушенной площади.

Средняя продолжительность затопления на площади $35{,}3-9{,}7=25{,}6\%$ равна $\frac{5+10}{2}=7{,}5$ суток и на площади $9{,}7-6{,}7=3{,}0\%$ — $\frac{10+16}{2}=13$ суткам.

Потери урожая озимой пшеницы от весенних затоплений при продолжительности затопления 7,5 суток составляют по формуле (148) 22,7% и при продолжительности 13 суток — 72,8%. При продолжительности затопления в 16 суток урожай погибает полностью.

Таким образом, потери урожая озимой пшеницы при $A=13000$ составляют $25{,}6\cdot 0{,}23+3{,}0\cdot 0{,}73+6{,}7=14{,}8\%$.

По приведенной выше методике определены потери урожая озимой пшеницы на торфяных почвах при других показателях интенсивности осушения . Результаты расчетов показаны в табл. 90.

Таблица 90

Потери урожая озимых зерновых от весенних затоплений на торфяных почвах (при различных значениях A и $\bar{q}=9$ *л/сек км²*)

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % полного урожая	
	озимой пшеницы	озимой ржи
4000	0	0
5600	0,1	0,1
7800	1,7	1,9
9000	3,6	4,0
13000	14,8	16,3
15600	22,1	24,3

Примечание: Потери урожая ржи, вызванные затоплениями, получены путем увеличения потерь пшеницы (по данным СНИИГиМ [18] и ЭНИИЗиМ) на 10%.

Потери урожая озимых культур от высокого уровня грунтовых вод в мае и июне не отличаются от потерь урожая этого времени для других культур, и их можно принять равными потерям, показанным в табл. 51. При этом следует учесть, что часть урожая погибла уже от весенних затоплений.

Уборка озимых зерновых производится в довольно теплый сезон, в начале и середине августа, когда избыток влаги из почвы удаляется, главным образом, за счет испарения. Поэтому потери от затоплений в период уборки незначительны.

В табл. 70, 71 и 72 был показан расчет потерь при уборке ячменя при $A=13000$. На основе этих таблиц было установлено, что в случае созревания в августе потери при уборке могут составлять 0,15%. Озимые всегда созревают в августе. Считая, что их потери при запаздывании сроков уборки равны потерям ячменя, можно потери в период уборки озимых, при $A=13000$, также принять равными 0,15% урожая. Учитывая, что потери от весенних затоплений, при $A=13000$, составляют 14,8% и от высокого стояния грунтовых вод (по табл. 51 — 13%) — 0,01 (100−14,8) 13,0=11,1%, потери при уборке равны 0,01 (100−14,8−11,1) 0,15=0,11≈0,1% полного урожая.

Таблица 91

Общие потери урожая озимой пшеницы на торфяных почвах (при различных значениях A и $\bar{q}=9$ *л/сек км²*)

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % полного урожая			
	от весенних затоплений	во время вегетации	при уборке	Всего
4000	0	0	0	0
5600	0,1	0,8	0	0,9
7800	1,7	3,0	0	4,7
9000	3,6	4,5	0	8,1
13000	14,8	11,1	0,1	26,0
15600	22,1	15,7	1,9	39,7

Общие потери урожая озимой пшеницы и ржи на торфяных почвах представлены в табл. 91 и 92. Данные этих таблиц показывают, что весенние затопления могут в значительной мере увеличить потери урожая озимых зерновых. Суммарные потери урожая озимых довольно близки к суммам потерь для овса, приведенным в табл. 75. Поэтому показатель интенсивности осушения торфяных почв при возделывании озимой пшеницы и ржи целесообразно принять равным показателю, принимаемому для овса, т. е. $A_{тр}=A_{то}=6800$.

Таблица 92

Общие потери урожая озимой ржи на торфяных почвах (при различных значениях A и $\bar{q}=9$ *л/сек км²*)

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % полного урожая			
	от весенних затоплений	во время вегетации	при уборке	Всего
4000	0	0	0	0
5600	0,1	0,8	0	0,9
7800	1,9	3,0	0	4,9
9000	4,0	4,5	0	8,5
13000	16,3	10,9	0,1	27,3
15600	24,3	15,3	1,8	41,4

Б. Интенсивность осушения тяжелых суглинистых почв при возделывании озимых культур

Для определения режима стока в период весеннего паводка на тяжелых почвах использованы те же самые формулы, что и для торфяных почв. Только r, который в формуле весеннего мак-

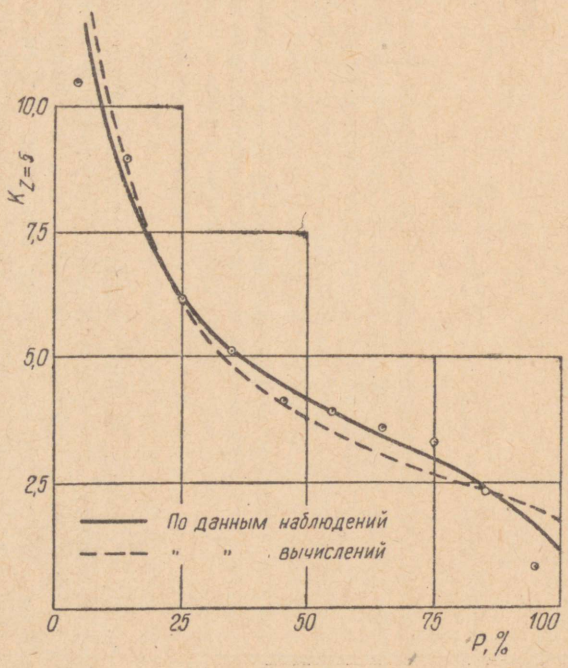


Рис. 46. Кривая обеспеченности весеннего максимального стока с осушенных слабоводопроницаемых почв при $z=5$ суткам.

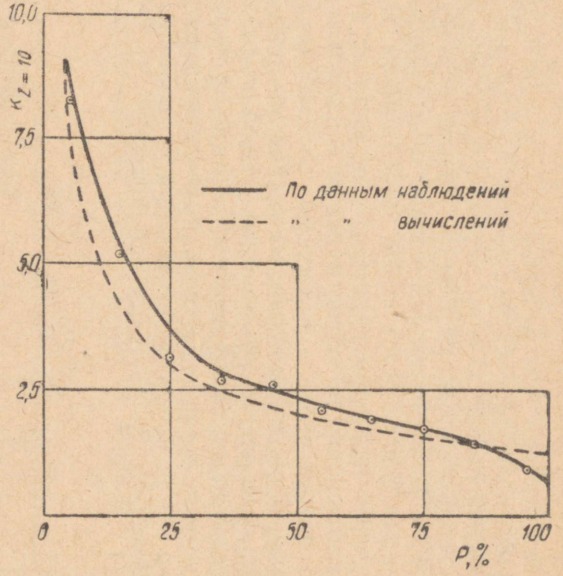


Рис. 47. Кривая обеспеченности весеннего максимального стока с осушенных слабоводопроницаемых почв при $z=10$ суткам.

симального стока (6а) на торфяных почвах был принят равным −0,04, на тяжелых осушенных почвах (по формуле (7в)), где $A_{30}=100\%$, следует принять равным −0,14 и $k_{95\%}=0$.

Показатель степени n в формуле (22) в уравнении кривой спада весеннего паводка в течение первых 5 суток после прохождения максимума стока, по гидрометрическим данным на водосборе магистрального канала Вяо-оя, принят равным 6,0.

На рис. 46 и 47 представлены кривые обеспеченности весеннего стока через 5 и 10 суток после прохождения максимума. Сплошной линией показаны кривые обеспеченности, полученные по данным наблюдений на магистральном канале Вяо-оя, характеризующие режим стока с водосбора со слабоводопроницаемыми почвами. Пунктиром обозначены кривые, вычисленные по формуле (22), где показатель степени кривой спада весеннего паводка через 5 суток после максимума $n=6,0$ и через 10 суток после максимума $n=3,7$. Кривые, приведенные на рисунках, показывают, что результаты вычислений с удовлетворительной точностью совпадают с данными наблюдений.

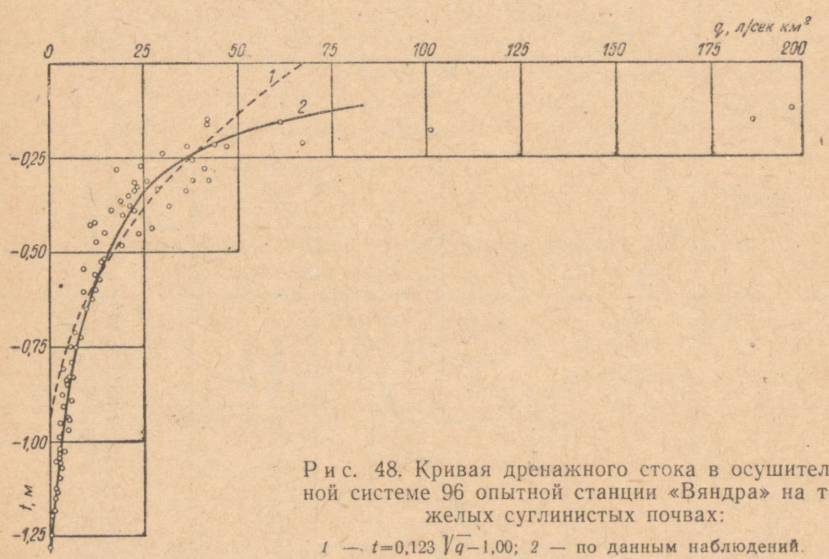


Рис. 48. Кривая дренажного стока в осушительной системе 96 опытной станции «Вяндра» на тяжелых суглинистых почвах:

1 — $t=0,123\sqrt{q}-1,00$; *2* — по данным наблюдений.

Кривая модуля стока с осушительных систем, расположенных на тяжелых почвах, при максимальном напоре еще больше отклоняется от расчетной кривой, чем это было отмечено на торфяных почвах. На рис. 48 показана кривая стока с дренажной системы на тяжелых почвах при выпуклой поверхности земли, образованной вспашкой в свал между бывшими открытыми канавами. Из рисунка видно, что в случае профилирования поверх-

ности затопления могут образоваться только в пониженных местах рельефа. В повышенных местах, где в данном случае измерены уровни грунтовых вод, затопления, очевидно, не бывает, если имеется возможность стекания поверхностных вод. Коэффициент увеличения расчетного максимального стока при определении площади затопления на ровной поверхности почвы зависит от отношения коэффициента фильтрации пахотного и подпахотного слоев. По расчетам В. А. Ионата [17], модуль стока с двухслойной почвы определяется по формуле

$$q = \frac{4k_1[n(H-M)^2+2M(H-M)+M^2]}{E^2}, \qquad (156)$$

где M — мощность нижнего или подпахотного слоя выше дрен,
n — отношение коэффициента фильтрации пахотного слоя и коэффициента фильтрации подпахотного слоя,
k_1 — коэффициент фильтрации нижнего слоя.

В случае суглинистых почв, где $n=20$, при $H=1{,}0$ *м* и $M=0{,}8$ *м* максимальный модуль стока по формуле (156) равен:

$$q_{\text{макс}} = \frac{4 \cdot 1{,}76 \cdot k_1}{E^2}.$$

При однородной почве

$$q_1 = \frac{4k_1 \cdot 1{,}0^2}{E^2},$$

откуда

$$\frac{q_{\text{макс}}}{q_1} = 1{,}76 \quad \text{и} \quad q_{\text{макс}} \approx 1{,}75\, q_1.$$

Таким образом, при определении процента затопляемых площадей на тяжелых суглинистых почвах модуль стока в формуле (154) необходимо увеличить в 1,75 раза.

Потери урожая в зависимости от продолжительности затопления на тяжелых почвах определены по уравнению (148).

Применяя такую же методику, как и в случае торфяных почв, определены потери урожая от весенних затоплений на тяжелых суглинистых почвах (при различном показателе интенсивности осушения).

Потери урожая от высокого уровня грунтовых вод на тяжелых почвах определены на основе данных табл. 58.

Потери при уборке озимых зерновых на тяжелых суглинистых почвах незначительны. На основе формул для поверхности суточного напора грунтовых вод в августе, сентябре и октябре определены потери для полей на глинистых почвах при $A=13000$ и 15600, составляющие соответственно лишь 0,4 и 0,5% полного урожая.

Таблица 93

Общие потери урожая озимой пшеницы на тяжелых суглинистых почвах (при различных значениях A и $\bar{q}=9$ *л/сек км²*)

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % полного урожая			
	от весенних затоплений	в вегетационный период	при уборке	Всего
4000	0	0,1	0	0,1
5600	0,1	0,6	0	0,7
7800	1,3	2,0	0	3,3
9000	2,6	2,9	0	5,5
13000	9,6	7,5	0,4	17,5
15600	18,7	9,8	0,5	29,0

Таблица 94

Общие потери урожая озимой ржи на тяжелых суглинистых почвах (при различных значениях A и $\bar{q}=9$ *л/сек км²*)

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % полного урожая			
	от весенних затоплений	в вегетационный период	при уборке	Всего
4000	0	0,1	0	0,1
5600	0,1	0,6	0	0,7
7800	1,4	2,0	0	3,4
9000	2,9	2,9	0	5,8
13000	10,6	7,4	0,4	18,4
15600	20,6	9,5	0,5	30,6

В табл. 93 и 94 представлены общие потери урожая озимой пшеницы и ржи. Сравнение этих потерь с общими потерями урожая яровых зерновых на тяжелых суглинистых почвах, приведенными в табл. 80, 81, 82 и 83, показывает, что при $A<9000$ потери озимых близки к потерям ячменя и овса, а при $A>9000$ они приближаются к потерям яровой пшеницы и гороха. Такое расхождение обусловлено резким увеличением потерь урожая озимых от весенних затоплений при $A>9000$. Имея в виду, что вредное влияние весенних затоплений может быть в значительной мере устранено отводом поверхностных вод путем бороздования и профилирования, показатель интенсивности осушения тяжелых почв, предназначенных под озимые зерновые, целесообразно брать равным показателю, определенному для овса при его посеве на тяжелых и средних минеральных почвах, а именно $A_{со}=7400$.

4. ИНТЕНСИВНОСТЬ ОСУШЕНИЯ ЗЕМЕЛЬ ПОД ПРОПАШНЫЕ КУЛЬТУРЫ

Потери урожая пропашных культур, вызываемые избытком влаги на осушенных территориях, определены за те же периоды, что и для зерновых культур. Такие пропашные культуры с длинным периодом вегетации, как сахарная свекла, кормовая брюква, морковь, кормовая капуста и т. п., предъявляют большие требования в отношении осушения. Осушительные системы должны обеспечить возможности их раннего посева и поздней уборки.

Посев кукурузы и картофеля проводится позже, при более высоких температурах, когда испарение с поверхности почвы уже оказывает значительное осушительное действие и своевременный посев мало зависит от интенсивности осушения. Однако картофель сильно страдает от временного переувлажнения почвы в летне-осенний период и поэтому осушительная сеть должна быть такой, чтобы обеспечить необходимые условия в период вегетации и уборки.

Средние оптимальные сроки посева корнеплодов можно определить по данным опытов Ю. Хейнсоо [38], представленным в табл. 95.

Таблица 95

Влияние срока посева на урожай сахарной свеклы (ц/га по данным Ю. Хейнсоо [38])

Год		Апрель		Май		Июнь
1953	Срок посева	27	4	11	18	
	Урожай	398,5	339,0	337,9	332,1	
1954	Срок посева	27	4	11	18	
	Урожай	460,4	420,9	383,6	353,5	
1956	Срок посева		15	22	29	5
	Урожай		383,2	357,4	331,7	272,9
1957	Срок посева	30	7	14	21	
	Урожай	326,5	319,5	290,5	237,2	
Средний (исключая 1956 г.)	Срок посева	28	5	12	19	
	Урожай	395,1	366,5	337,3	307,6	
	Урожай, %	100	92,8	85,4	77,9	

При определении средних сроков посева и средних величин урожая, указанных в табл. 95, из четырехлетних данных исключен 1956 г. с необычно поздней весной.

Средние сроки посева и потери урожая сахарной свеклы, определяемые по рис. 49 и табл. 95, сопоставлены со средними сроками посева и потерями урожая яровой пшеницы и гороха, представленными в табл. 62 и 63.

Данные о потерях урожая сахарной свеклы, яровой пшеницы и гороха в зависимости от срока весеннего посева, помещенные на рис. 49, незначительно расходятся друг с другом. Поэтому

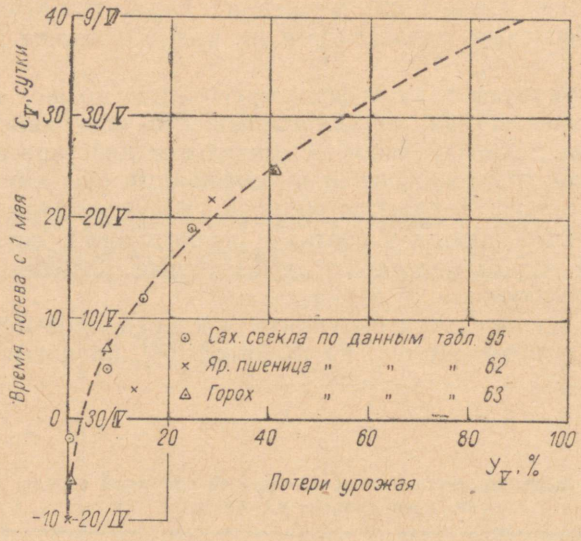


Рис. 49. Зависимость потерь урожая сахарной свеклы от запаздывания срока посева.

потери урожая сахарной свеклы можно вычислить по уравнению (93), использованному для определения потерь урожая яровой пшеницы и гороха. Для других корнеплодов и кормовой капусты данные исследований о влиянии срока посева на урожай в Эстонской ССР отсутствуют. Для определения их величин также применено уравнение (93).

Исходя из приведенных рассуждений, потери урожая от запаздывания срока посева корнеплодов и кормовой капусты можно принять равными потерям яровой пшеницы и гороха, представленным в табл. 66 и 78.

Временное переувлажнение почвы, вызванное летне-осенними ливневыми дождями, сильно влияет на урожай и сохранность картофеля. На основе данных, собранных в производственных условиях, можно считать, что при продолжитель-

ности летне-осенних затоплений в 6 суток урожай картофеля погибает полностью, а при продолжительности затопления в 3 суток погибает около 50% урожая. Таким образом, потери урожая картофеля от затоплений можно определить по уравнению

$$y_к = 16{,}7\, z_л\,, \qquad (157)$$

где $y_к$ — потери урожая картофеля, % от полного урожая,
$z_л$ — продолжительность летне-осенних затоплений, сутки.

Кривые обеспеченности летне-осенних паводков с продолжительностью в $z_л$ суток, необходимые для определения потерь урожая вследствие затопления, можно определить, как и при весенних затоплениях, по уравнению (22) кривой спада паводка

$$k_{z_л P\%} = (k_{\text{летне-ос. макс}\, P\%} - k_{гр}) \left(\frac{t_c - z_л}{t_c}\right)^n + k_{гр}.$$

А. Интенсивность осушения торфяных почв при возделывании пропашных культур

Параметр $r_л$ формулы (11) летне-осеннего максимального стока, вычисляемый по формуле (15в), если процент площади осушенных низинных болот $A_{но}$ составляет 100, а другие параметры равны нулю, имеет следующую величину

$$r_л = 0{,}0047\,(0{,}30 \cdot 100) - 0{,}28 = -0{,}14.$$

При вычислении суточного летне-осеннего максимального стока с осушенного торфяного водосбора, где площадь $F < 100$ км^2 и $k_{95\%} = 0$, формула (11) принимает следующий вид:

$$k_{\text{летне-ос. макс}\, P\%} = \left[\frac{26 - 11{,}5 \lg (P+1)}{100^{0{,}11}}\right]^{1{,}14}.$$

Продолжительность спада паводка t_c определена по формуле (19), а показатель степени кривой спада n при продолжительности спада $z_л = 3$ суткам был принят равным 7,0; при $z_л = 6$ суткам $n = 5$.

На рис. 50, 51 и 52 показаны вычисленные и наблюдавшиеся на осушительной системе Рехемяэ кривые обеспеченности летне-осеннего максимального стока с продолжительностью $z_л = 1$, 3 и 6 суткам. Кривые на рисунках показывают, что результаты вычислений с удовлетворительной точностью совпадают с данными наблюдений.

Зная обеспеченность модуля летне-осеннего максимального стока при различной продолжительности затопления, можно определить площади этих затоплений при различной величине по-

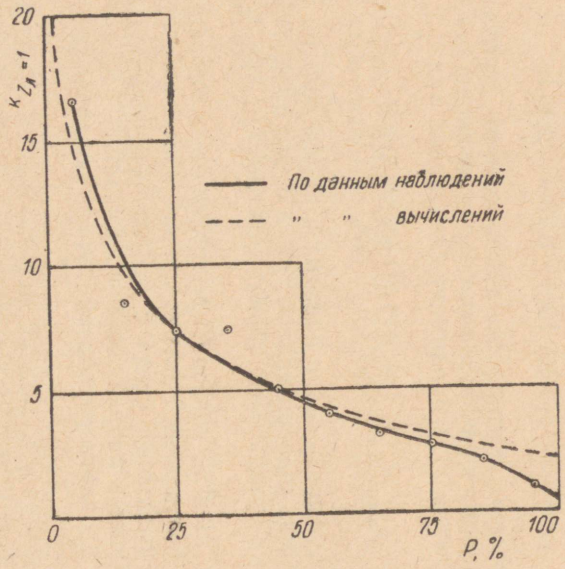


Рис. 50. Кривая обеспеченности суточного летне-осеннего максимального стока с осушенных торфяных почв.

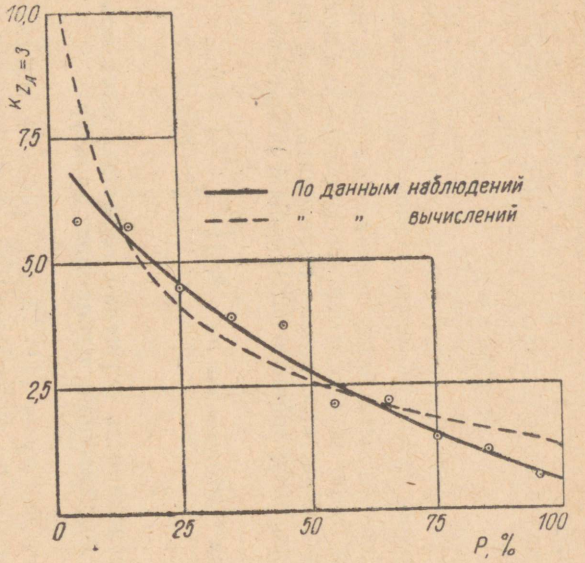


Рис. 51. Кривая обеспеченности летне-осеннего максимального стока с осушенных торфяных почв при $z_л = 3$ суткам.

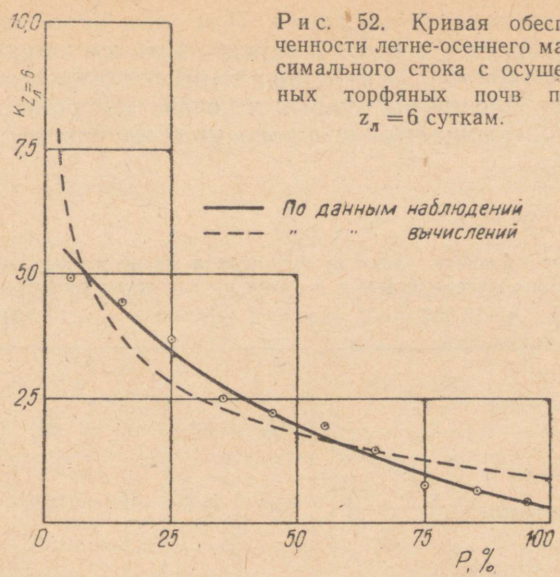


Рис. 52. Кривая обеспеченности летне-осеннего максимального стока с осушенных торфяных почв при $z_л = 6$ суткам.

Таблица 96

Определение процента площади затопления летне-осенних паводков продолжительностью в 1 сутки на торфяных почвах (при $A = 13\,000$, $\bar{q} = 9$ *л/сек км²*, $k_{95\%} = 0$ и $r_л = -0{,}14$)

Показатели	P, %							
	70	50	30	20	10	5	2	0
$q_{\text{летне-ос. макс } P\%} = 9k_{\text{летне-ос. макс } P\%}$	29,3	41,6	59,9	75,6	101,3	126,9	157,2	205,5
$f = \sqrt{1 - \frac{1{,}5 \cdot 21{,}4}{q_{\text{летне-ос. макс } P\%}}}$	0	0,48	0,68	0,76	0,83	0,86	0,89	0,92
$f_{ср}$	0,24	0,58	0	0,80	0,84	0,88	0,90	
ΔP	20	20	10	10	5	3	2	
$f_{ср} \Delta P$	4,80	11,60	7,20	8,00	4,20	2,64	1,80	
$\Sigma f_{ср} \Delta P$	40,24							

казателя интенсивности осушения. При этом использована методика, аналогичная методике определения площади весенних затоплений. В табл. 96, 97 и 98 приведены расчеты площади летне-осенних затоплений на торфяных почвах (в процентах от общей осушенной площади) при продолжительности в 1, 3 и 6 суток.

Таблица 97

Определение процента площади затопления летне-осенних паводков продолжительностью в 3 суток на торфяных почвах (при $A=13\,000$, $\bar{q}=9$ *л/сек км²*, $k_{95\%}=0$ и $r_л=-0{,}14$)

Показатели	P, %					
	30	20	10	5	2	0
$q_{z_{л3}P\%}=9k_{\text{летне-ос. макс}P\%}\left(\frac{t_c-3}{t_c}\right)^{7,0}$	32,9	41,5	57,5	74,1	94,7	133,3
$f=\sqrt{1-\frac{1{,}5\cdot 21{,}4}{q_{z_{л3}P\%}}}$	0,14	0,48	0,66	0,75	0,80	0,8
$f_{ср}$	0,31	0,57	0,70	0,78	0,84	
ΔP	10	10	5	3	2	
$f_{ср}\Delta P$	3,10	5,70	3,50	2,34	1,68	
$\Sigma f_{ср}\Delta P$	16,32					

Из табл. 96 видно, что при A=13000 площадь летне-осенних затоплений продолжительностью в 1 сутки составляет 40,2% всей осушенной площади.

По табл. 97 и 98 процент площади затопления продолжительностью в 3 и 6 суток равен 16,3 и 8,5.

Средняя продолжительность затопления на площади $40{,}2-16{,}3=23{,}9\%$ равна $\frac{1+3}{2}=2$ суткам и на площади $16{,}3-8{,}5+7{,}8\%-\frac{3+6}{2}=4{,}5$ суткам. Потери урожая картофеля, по уравнению (157), в первом случае составляют $16{,}7\cdot 2=33{,}4\%$, а во втором случае $16{,}7\cdot 4{,}5=75\%$. При продолжительности затопления в 6 суток потери урожая равны 100%.

Таблица 98

Определение процента площади затопления летне-осенних паводков продолжительностью в 6 суток на торфяных почвах (при $A=13\,000$, $\bar{q}=9$ *л/сек км²*, $k_{95\%}=0$ и $r_л=-0{,}14$)

Показатели	P, %				
	20	10	5	2	0
$q_{z_{лб}P\%}=9k_{летне\text{-}ос.\ макс\ P\%}\left(\frac{t_c-6}{t_c}\right)^{5,0}$	28,8	40,4	53,8	70,2	102,5
$f=\sqrt{1-\frac{1{,}5\cdot 21{,}4}{q_{z_{лб}P\%}}}$	0	0,45	0,63	0,74	0,83
$f_{ср}$	0,22	0,54	0,68	0,78	
ΔP	10	5	3	2	
$f_{ср}\Delta P$	2,20	2,70	2,04	1,56	
$\Sigma f_{ср}\Delta P$	8,50				

Из сказанного следует, что потери урожая картофеля от летне-осенних затоплений (при $A=13000$) составляют $23{,}9\cdot 0{,}33+7{,}8\cdot 0{,}75+8{,}5\cdot 1{,}0=22{,}2\%$ выращиваемого урожая. Ввиду того, что потери урожая от высокого стояния грунтовых вод в вегетационный период составляют 13,0% (см. табл. 51), потери урожая от затоплений равны $0{,}01\,(100-13)\,22{,}2=19{,}3\%$ полного урожая.

Таблица 99

Потери урожая картофеля на торфяных почвах от летне-осенних затоплений при $\bar{q}=9$ *л/сек км²*

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % полного урожая
4000	0
5600	0,1
7800	2,9
9000	4,9
13000	19,3
15600	28,1

В табл. 99 представлены потери урожая картофеля от летне-осенних затоплений при различных величинах показателя интенсивности осушения.

Другие пропашные культуры менее чувствительны к затоплениям. Они страдают от летних затоплений в июне и июле, однако вероятность таких затоплений незначительна. Поэтому потери урожая от летне-осенних затоплений приняты в расчет только для картофеля.

Потери урожая пропашных культур, обусловленные высоким стоянием грунтовых вод в вегетационный период, выраженные в процентах полного урожая, незначительно отличаются от потерь для зерновых культур и культурных трав. Поэтому здесь можно использовать определенные ранее потери, представленные в табл. 51.

Потери урожая при уборке пропашных культур определены из условия, что время, требуемое для уборки картофеля, равно 15 дням, а корнеплодов и кукурузы — 10 дням. Календарные сроки уборки приняты для картофеля сентябрь и октябрь, для корнеплодов — октябрь и для кукурузы — начало сентября. Нормальная уборка картофеля и кукурузы обеспечивается при глубине грунтовых вод 0,45 *м* или при напоре 1 — 0,45 = 0,55 *м*. При уборке корнеплодов в октябре принято, что

Таблица 100

Определение потерь урожая при уборке картофеля в сентябре на торфяных почвах (при $A=13000$, $\bar{q}=9$ *л/сек км²* и $H=0{,}55$ *м*, % наличного урожая)

Показатели	P, %			
	19	15	9	7,5
$P_{1\,т\,IX}$	50,0	64,0	89,6	100
$P'_{1\,т\,IX}=2P_{1\,т\,IX}-100$	0	28,0	79,2	100
$\overline{F_{1т\,IX}}$	14,0	53,6	89,6	100
ΔP	4	6	1,5	7,5
$\overline{P'_{1\,т\,IX}}\Delta P$	56	322	134	750
$\frac{1}{100}\Sigma\overline{P'_{1\,т\,IX}}\Delta P$	12,6			

Таблица 101

Определение потерь урожая при уборке картофеля в октябре на торфяных почвах (при $A=13000$, $\overline{q}=9$ *л/сек км²* и $H=0{,}55$ *м*, % наличного урожая)

Показатели	P, %			
	49	45	40	36
$P_{1\,T\,X}$	51,6	62,0	80,3	100
$P'_{1\,T\,X}=2{,}07P_{1\,T\,X}-107$	0	21,3	59,2	100
$\overline{P'_{1\,T\,X}}$	10,6	40,2	79,0	100
ΔP	4	5	4	36
$\overline{P'_{1\,T\,X}}\Delta P$	42	201	318	3600
$\frac{1}{100}\Sigma\overline{P'_{1\,T\,X}}\Delta P$	41,6			

уборочные машины имеют уширенные колеса, позволяющие им работать при глубине грунтовых вод 0,40 *м*.

Определение потерь урожая при уборке картофеля представлено в табл. 100 и 101.

Проценты обеспеченности суточного напора грунтовых вод в сентябре $P_{1\,T\,IX}$ и в октябре $P_{1\,T\,X}$, когда проведение уборочных работ невозможно, были определены по формулам (91) и (95).

При числе дней в сентябре $c_{IX}=0{,}30\,P_{1\,T\,IX}\leqslant 15$ урожай картофеля собирается полностью в сентябре. При $c_{IX}>15$ процент неубранного урожая $P'_{1\,T\,IX}$ определяется по уравнению

$$P'_{1\,T\,IX}=\frac{100}{15}(c_{IX}-15),$$

где $\frac{100}{15}$ — урожай или площадь, убранная за 1 день, в процентах от общего урожая или площади картофеля;

$c_{IX}-15$ — число дней, требуемое для уборки картофеля, оставшегося неубранным в сентябре.

Так как $c_{IX}=0{,}30\,P_{1\,T\,IX}$, то

$$P'_{1\,T\,IX}=2P_{1\,T\,IX}-100.$$

Такое же уравнение (93) для $P_{1\,т\,IX}$ было предложено при определении потерь урожая пастбищ в сентябре. В этом случае при $P_{1\,т\,IX}<50\%$ также можно было использовать всю продуктивность пастбищ.

Результат расчета $\frac{1}{100}\Sigma\overline{P'_{1\,т\,IX}}\Delta P=12{,}6\%$ в табл. 100 показывает, что при $A=13000$ в среднем 12,6% урожая картофеля остается неубранным в сентябре и уборка переносится на октябрь.

В октябре доля неубранного урожая $P'_{1\,т\,X}$ (в % от общей площади) определяется по уравнению

$$P'_{1\,т\,X}=\frac{100}{15}[c_X-(31-15)],$$

где $c_X=0{,}31\ P_{1\,т\,X}$ и $P'_{1\,т\,X}=2{,}07\ P_{1\,т\,X}-107$.

Сумма $\frac{1}{100}\Sigma\overline{P'_{1\,т\,X}}\ \Delta P=41{,}6$ в табл. 101 показывает, что в октябре при $A=13000$ в поле остается 41,6% урожая, не убранного в сентябре. Так как в сентябре оказалось невозможным убрать 12,6% наличного урожая, то в октябре остается неубранным $41{,}6\cdot\frac{12{,}6}{100}=5{,}2\%$. В ноябре и декабре уборка не производится. Поэтому потери урожая от запаздывания уборки картофеля (при $A=13000$) составляют 5,2% урожая, находившегося в поле в сентябре. Для определения потерь урожая в процентах от полного урожая необходимо эти потери умножить на коэффициент 0,01 $(100-13{,}0-19{,}3)=0{,}68$. Такой коэффициент получается на основе учета потерь урожая, представленных в табл. 51 и 99, где их величина (при $A=13000$) равна 13,0 и 19,3%. Таким образом, потери урожая при уборке картофеля составляют $0{,}68\cdot5{,}2=3{,}5\%$ полного урожая. Потери урожая при уборке картофеля, при различных величинах показателя A, представлены в табл. 102.

Таблица 102

Потери урожая при уборке картофеля на торфяных почвах (при различных значениях A, $\overline{q}=9$ л/сек км²)

Интенсивность осушения A	Потери при уборке полного урожая
7800	0
9000	0,1
13000	3,5
15600	6,9

Уборка сахарной свеклы, брюквы и других корнеплодов происходит в октябре. Вследствие малой величины испарения в октябре на осушаемых площадях трудно обеспечить режим уровней грунтовых вод, необходимый для передвижения машин. Поэтому при уборке корнеплодов следует использовать машины с уширенными колесами. Можно считать, что уборочные машины смогут работать на торфяниках при глубине грунтовых вод 0,40 *м*.

Принимая, что уборку корнеплодов можно произвести в течение 10 дней, доля неубранного урожая в октябре $P'_{1\,тх}$ определяется по уравнению

$$P'_{1\,тх} = \frac{100}{10}[c_x - (31-10)].$$

Если $c_x = 0{,}31 P_{1\,тх}$, то $P'_{1\,тх} = 3{,}1 P_{1\,тх} - 210$, где $P'_{1\,тх}$ определяется по формуле (95) при напоре $H = 0{,}60$ *м*.

Таблица 103

Определение потерь урожая при уборке корнеплодов в октябре на торфяных почвах (при $A = 13000$, $\overline{q} = 9$ *л/сек км²* и $H = 0{,}60$ *м*, % наличного урожая)

Показатели	P, %			
	37	35	30	29
$P_{1\,тх}$	68,0	76,5	95,6	99,5
$P'_{1\,тх} = 3{,}1\,P_{1\,тх} - 210$	1,0	27,2	86,4	98
$\overline{P'_{1\,тх}}$	14,1	56,8	92,2	100
ΔP	2	5	1	29
$\overline{P'_{1\,тх}}\,\Delta P$	28	284	92	2900
$\frac{1}{100}\Sigma\,\overline{P'_{1\,тх}}\,\Delta P$	33,0			

В табл. 103 представлены потери урожая при уборке корнеплодов (при $A = 13000$) в виде суммы $\frac{1}{100}\sum \overline{P'_{1\,тх}}\Delta P$. Для перевода этой величины (равной 33,0%) в проценты от полного уро-

жая, необходимо ее умножить на коэффициент 0,01 [100—(23,2+10,0)]=0,67, где величины 23,2 и 10,0 представляют собой потери урожая, обусловленные запаздыванием срока весеннего посева и высоким стоянием грунтовых вод в вегетационный период (см. табл. 76 и 77). Потери урожая при уборке корнеплодов (при $A=13000$) равны, таким образом, $0{,}67 \cdot 33{,}0=22{,}1\%$ полного урожая.

Потери урожая при уборке корнеплодов при различных показателях интенсивности осушения A показаны в табл. 104.

Таблица 104

Потери урожая при уборке корнеплодов на торфяных почвах (при различных значениях A и $\overline{q}=9$ *л/сек км²*)

Интенсивность осушения A	Потери при уборке, % полного урожая
5600	0
7800	3,3
9000	7,4
13000	22,1
15600	23,9

Таблица 105

Определение потерь урожая при уборке кукурузы в сентябре на торфяных почвах (при $A=13000$, $\overline{q}=9$ *л/сек км²* и $H=0{,}55$ *м*, % наличного урожая)

Показатели	P, %		
	15	9	7,5
$P_{1\,\text{т}\,\text{IX}}$	64	89,6	100
$P'_{1\,\text{т}\,\text{IX}}=3P_{1\,\text{т}\,\text{IX}}-200$	0	68,8	100
$\overline{P'_{1\,\text{т}\,\text{IX}}}$	34,4	84,4	100
ΔP	6	1,5	7,5
$\overline{P'_{1\,\text{т}\,\text{IX}}}\Delta P$	206	127	750
$\frac{1}{100}\sum \overline{P'_{1\,\text{т}\,\text{IX}}}\Delta P$	10,8		

Уборка кукурузы происходит в первой декаде сентября. При опоздании уборки кукуруза может страдать от заморозков. Если уборка производится в течение 10 дней, то процент неубранного урожая в сентябре $P'_{1\,т\,IX}$ определяется уравнением

$$P'_{1\,т\,IX}=\frac{100}{10}[c_{IX}-(30-10)] \text{ или } P'_{1\,т\,IX}=3P_{1\,т\,IX}-200.$$

Сумма $\frac{1}{100}\sum \overline{P'_{1\,т\,IX}}\Delta P$ в табл. 105 показывает, что потери при уборке кукурузы (при $A=13000$) составляют 10,8% наличного урожая. Так как потери, обусловленные высоким стоянием грунтовых вод в вегетационный период, равны 13,0% (см. табл. 51), то потери при уборке составляют $0{,}01(100-13{,}0\times$ $\times 10{,}8=9{,}4\%$ полного урожая.

В табл. 106 представлены потери при уборке урожая кукурузы при различных величинах показателя интенсивности осушения A.

Таблица 106

Потери урожая при уборке кукурузы на торфяных почвах
(при различных значениях A и $\overline{q}=9$ *л/сек км²*)

Интенсивность осушения A	Потери при уборке, % полного урожая
9000	0
13000	9,4
15600	16,7

Суммарные потери картофеля, корнеплодов и кукурузы, на основе приведенных данных, представлены в табл. 107, 108 и 109.

Таблица 107

Общие потери урожая картофеля на торфяных почвах
(при различных значениях A и $\overline{q}=9$ *л/сек км²*)

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % полного урожая			
	от высокого стояния грунтовых вод	от затоплений	при уборке	Всего
4000	0	0	0	0
5600	0,8	0,1	0	0,9
7800	3,1	2,9	0	6,0
9000	4,7	4,9	0,1	9,7
13000	13,0	19,3	3,5	35,8
15600	20,2	28,1	6,9	55,2

Таблица 108

Общие потери урожая корнеплодов на торфяных почвах (при различных значениях A и $\bar{q}=9$ *л/сек км²*)

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % полного урожая			
	в мае	в июне	при уборке	Всего
4000	0,6	0	0	0,6
5600	2,5	0,8	0	3,3
7800	6,5	2,9	3,3	12,7
9000	10,3	4,2	7,4	21,9
13000	23,2	10,0	22,1	55,3
15600	36,3	12,9	23,9	73,1

Таблица 109

Общие потери урожая кукурузы на торфяных почвах (при различных значениях A и $\bar{q}=9$ *л/сек км²*)

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % полного урожая		
	от высокого стояния грунтовых вод	при уборке	Всего
4000	0	0	0
5600	0,8	0	0,8
7800	3,1	0	3,1
9000	4,7	0	4,7
13000	13,0	9,4	22,4
15600	20,2	16,7	36,9

На рис. 53 показаны кривые суммарных потерь урожая, составленные по данным табл. 107, 108 и 109. Аналитические выражения для кривых потерь урожая различных пропашных культур на торфяных почвах имеют следующий вид:

для кукурузы

$$Y_{т\,ку}=\frac{(A-5000)^2}{3{,}02\cdot 10^6}, \qquad (158)$$

для картофеля

$$Y_{т\,ка}=\frac{(A-400)^2}{2{,}40\cdot 10^6} \qquad (159)$$

и для корнеплодов

$$Y_{т\,ко}=\frac{(A-3000)^2}{1{,}74\cdot 10^6}. \qquad (160)$$

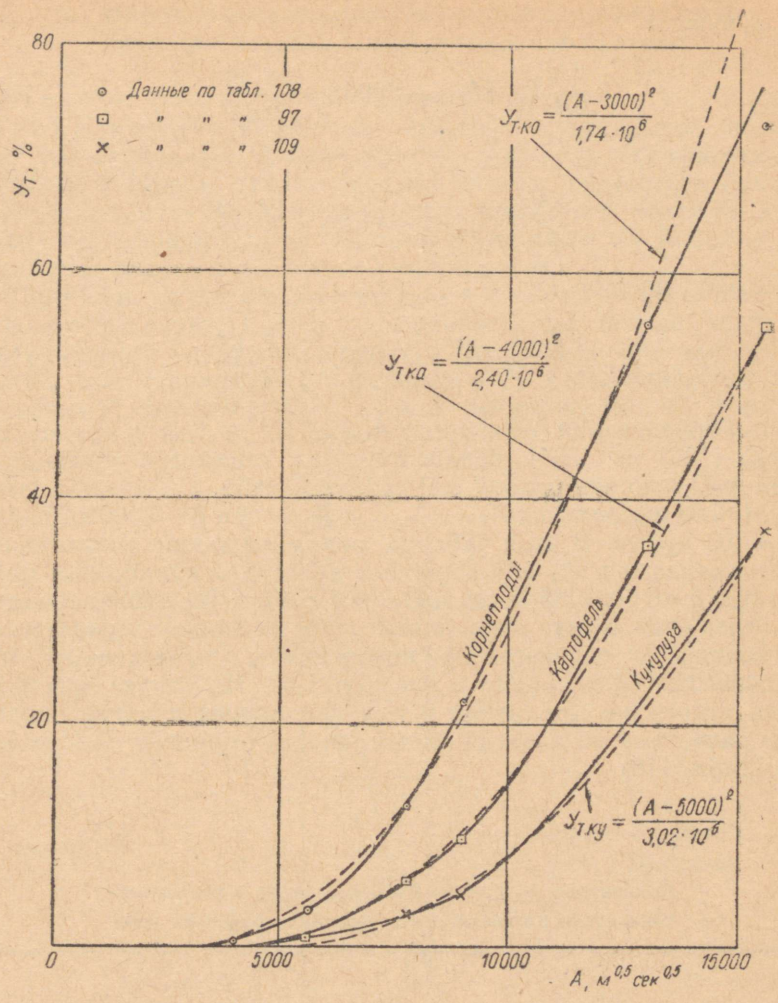


Рис. 53. Зависимость потерь урожая кукурузы, картофеля и корнеплодов на торфяных почвах от показателя интенсивности осушения.

Определение расчетной интенсивности осушения торфяных почв, предназначенных для выращивания пропашных культур.

После сложения уравнений потерь урожая (158), (159) и (169) с уравнением расходов на осушение (102), дифференцирования их суммы и приравнивания результата к нулю получим следующие уравнения для вычисления A_T:

для кукурузы

$$\frac{2A_{\text{т ку}}^2}{3{,}02 \cdot 10^6}(A_{\text{т ку}} - 5000) = \frac{2{,}5 \cdot 10^4}{D\sqrt{k}}, \qquad (161)$$

для картофеля

$$\frac{2A_{\text{т ка}}^2}{2{,}40 \cdot 10^6}(A_{\text{т ка}} - 4000) = \frac{2{,}5 \cdot 10^4}{D\sqrt{k}} \qquad (162)$$

и для корнеплодов

$$\frac{2A_{\text{т ко}}^2}{1{,}74 \cdot 10^6}(A_{\text{т ко}} - 3000) = \frac{2{,}5 \cdot 10^4}{D\sqrt{k}}. \qquad (163)$$

При определении показателя $A_{\text{тку}}$, $A_{\text{тка}}$ и $A_{\text{тко}}$ в уравнениях (161), (162) и (163) реализационная стоимость пропашных культур D принята равной 300 *руб/га*. В табл. 110 представлены результаты вычисления $A_{\text{тку}}$, $A_{\text{тка}}$ и $A_{\text{тко}}$ при $k=0{,}0000025$ *м/сек* и $D=300$ *руб/га*. В этой таблице показаны также вычисленные ранее показатели $A_{\text{т}}$ для зерновых культур и культурных пастбищ при $k=0{,}0000025$ *м/сек* и $D=200$ *руб/га*. Из таблицы видно, что отношение между выбранным ранее расчетным показателем интенсивности осушения и показателем, вычисленным при $k=0{,}0000025$ *м/сек*, равно в среднем 1,02. На основе использования такого же отношения и для пропашных культур определены расчетные показатели интенсивности осушения для последних (табл. 110).

Таблица 110

Показатели $A_{\text{т}}$ при $k=0{,}0000025$ *м/сек* и расчетные показатели интенсивности осушения торфяных почв

Культура	$A_{\text{т}}$ при $k=0{,}0000025$ *м/сек*	Расчетный показатель интенсивности осушения $A_{\text{т расч}}$	$\frac{A_{\text{т расч}}}{A_{\text{т}}}$
Культурные пастбища и сенокосы	7385	7500	1,02
Ячмень	7115	7200	1,01
Овес и озимые	6630	6800	1,03
Яровая пшеница и горох	5810	5900	1,02
Кукуруза	6750	6900	1,02
Картофель	5850	6000	1,02
Корнеплоды	4900	5000	1,02

Б. Интенсивность осушения тяжелых суглинистых почв при возделывании пропашных культур

Потери урожая от запаздывания весеннего посева корнеплодов на тяжелых суглинистых почвах, как уже отмечалось, можно принять равными потерям яровой пшеницы и гороха, представленным в табл. 78. Потери при посадке картофеля и посеве кукурузы вследствие более поздних сроков их проведения как на торфяных, так и на тяжелых суглинистых почвах в расчет не принимаются.

Потери урожая картофеля вследствие летне-осенних затоплений определяются на основе значения летне-осеннего паводкового стока с осушенных тяжелых суглинистых почв. Параметр $r_л$ в формуле (11) для определения летне-осеннего максимального стока, вычисляемый по формуле

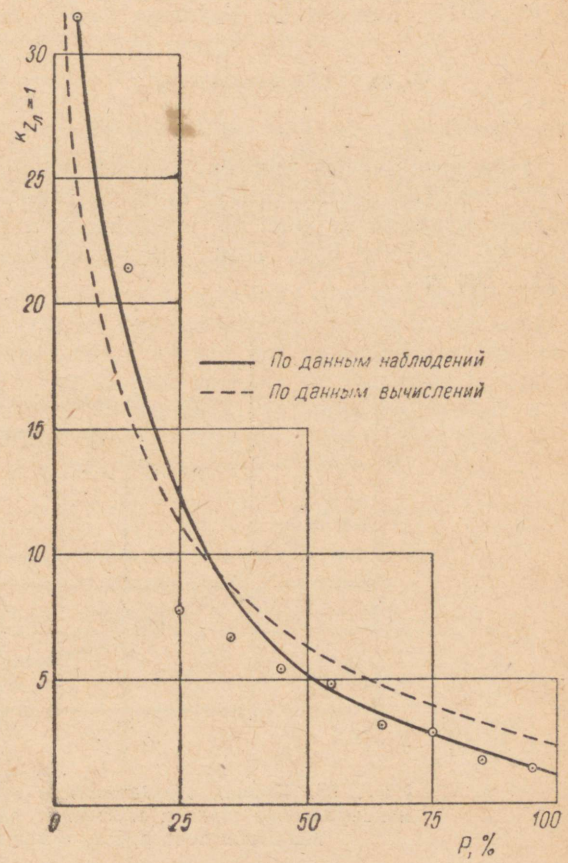


Рис. 54. Кривая обеспеченности суточного летне-осеннего максимального стока с осушенных слабоводопроницаемых почв.

(15в), где процент осушенных земель, располагающихся на слабоводопроницаемых почвах $A_{зо}=100$, а процент других площадей равен нулю, имеет в данном случае следующую величину:

$$r_л = 0{,}0047(-0{,}20 \cdot 100) - 0{,}28 = -0{,}37.$$

На рис. 54 показана кривая обеспеченности суточного летне-осеннего максимального стока, вычисленная по формуле (11), где $F=100$ км^2, $k_{95\%}=0$ и $r_л=-0{,}37$, т. е.

$$k_{\text{летне-ос. макс}\,P\%} = \left[\frac{26-11{,}5\lg(P+1)}{100^{0{,}11}}\right]^{1{,}37}.$$

Эта кривая сопоставлена с данными наблюдений на водосборе со слабоводопроницаемыми почвами (водосбор магистрального канала Вяо-оя).

На рис. 55 и 56 представлены кривые, вычисленные по формуле (22):

$$k_{z_л P\%} = (k_{\text{летне-ос. макс}P\%} - k_{гр})\left(\frac{t_c - z_л}{t_c}\right)^n + k_{гр},$$

где $k_{гр}=0$.

При вычислении ординат кривой обеспеченности летне-осеннего максимального стока продолжительностью $z_л=3$ суткам, представленной на рис. 55, показатель n (в формуле (22) был принят равным 8,0. При продолжительности $z_л=6$ суткам (рис. 56) $n=6{,}5$.

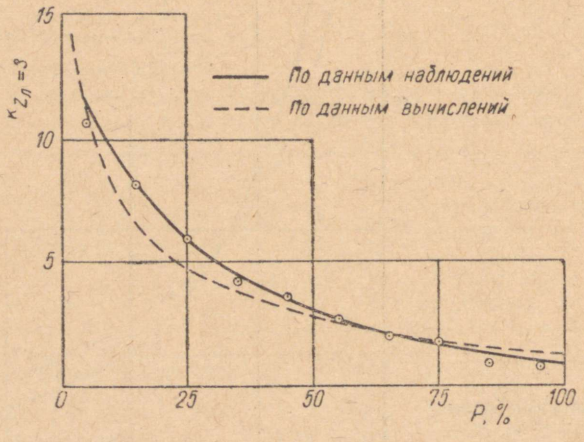


Рис. 55. Кривая обеспеченности летне-осеннего максимального стока с осушенных слабоводопроницаемых почв при $z_л=3$ суткам.

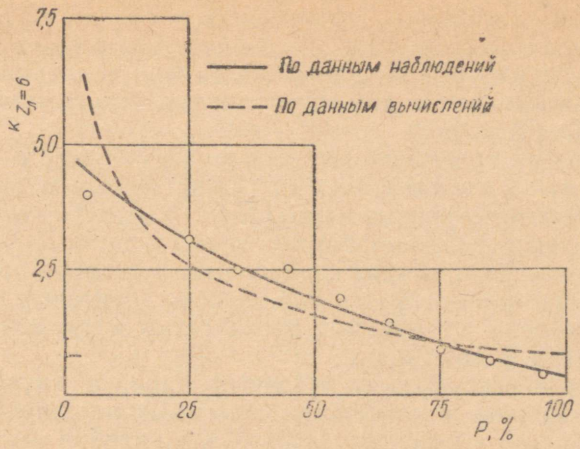


Рис. 56. Кривая обеспеченности летне-осеннего максимального стока с осушенных слабоводопроницаемых почв при $z_л = 6$ суткам.

Из рисунков видно, что вычисленные кривые с удовлетворительной точностью совпадают с данными наблюдений.

На основе значений летне-осеннего максимального стока продолжительностью 1, 3 и 6 суток определены площади затопления продолжительностью в 1, 3 и 6 суток при различной величине показателя интенсивности осушения. Потери урожая в зависимости от продолжительности затопления определены по формуле (157). Расчеты были проведены аналогично расчетам, использованным для торфяных почв. При переводе процентов потерь от затоплений в проценты потерь от полного урожая были также учтены потери от высокого стояния грунтовых вод в основной части вегетационного периода. Результаты этих вычислений представлены в табл. 111.

Таблица 111

Потери урожая картофеля на тяжелых суглинистых почвах вследствие летне-осенних затоплений (при различных значениях A и $\bar{q}=9$ *л/сек км²*)

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % полного урожая
4000	0,1
5600	0,9
7800	5,0
9000	8,5
13000	21,0
15600	30,6

Потери урожая пропашных культур, обусловленные высоким стоянием грунтовых вод в вегетационный период на тяжелых суглинистых почвах, определены, как и для других сельскохозяйственных культур, по табл. 58.

При определении потерь урожая в период уборки пропашных культур на тяжелых суглинистых почвах учтено, что уборка картофеля и кукурузы производится машинами, способными работать при глубине грунтовых вод 0,45 *м* и более. При уборке корнеплодов в октябре принято, что машины могут работать уже при глубине грунтовых вод 0,35 *м*.

Сроки уборки на тяжелых суглинистых и торфяных почвах были приняты одинаковыми.

Процент обеспеченности суточных напоров грунтовых вод, когда невозможно использовать уборочные машины, определен для сентября по уравнению (110) и для октября по уравнению (111). При этом напор H в уравнении (110) принят равным 0,55 *м*, а для октября в уравнении (111) — 0,65 *м*.

В табл. 112 представлены потери урожая при уборке кукурузы, картофеля и корнеплодов. Определение этих потерь было проведено по методике, примененной для торфяных почв.

Потери определены в процентах полного урожая.

На основе данных о потерях урожая вследствие запаздывания срока посева яровой пшеницы и гороха (по табл. 78), потерь урожая от высокого стояния грунтовых вод в вегетационный период (по табл. 58), потерь урожая от летне-осенних затоплений (по табл. 111) и потерь при уборке (по табл. 112) опре-

Таблица 112

Потери урожая при уборке кукурузы, картофеля и корнеплодов на тяжелых суглинистых почвах (при различных значениях A и $\overline{q}=9$ *л/сек км²*)

Интенсивность осушения A	Потери при уборке, % полного урожая		
	кукурузы	картофеля	корнеплодов
5600	0	0	0
7800	0	0	1,0
9000	0	0	3,8
13000	0,5	0,7	16,2
15600	2,3	1,6	21,8

делены суммарные потери урожая кукурузы, картофеля и корнеплодов при различной величине показателя интенсивности осушения (табл. 113, 114 и 115).

Таблица 113

Общие потери урожая кукурузы на тяжелых суглинистых почвах (при различных значениях A и $\overline{q}=9$ *л/сек км²*)

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % полного урожая		
	от высокого стояния грунтовых вод	при уборке	Всего
4000	0,1	0	0,1
5600	0,6	0	0,6
7800	2,0	0	2,0
9000	3,0	0	3,0
13000	8,3	0,5	8,8
15600	12,0	2,3	14,3

Таблица 114

Общие потери урожая картофеля на тяжелых суглинистых почвах (при различных значениях A и $\overline{q}=9$ *л/сек км²*)

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % полного урожая			
	от высокого стояния грунтовых вод	от летне-осенних затоплений	при уборке	Всего
4000	0,1	0,1	0	0,2
5600	0,6	0,9	0	1,5
7800	2,0	5,0	0	7,0
9000	3,0	8,5	0	11,5
13000	8,3	21,0	0,7	30,0
15600	12,0	30,6	1,6	44,2

Таблица 115

Общие потери урожая корнеплодов на тяжелых суглинистых почвах (при различных значениях A и $\overline{q}=9$ *л/сек км²*)

Интенсивность осушения A	Потери урожая, % полного урожая			
	от запаздывания весеннего посева	от высокого стояния грунтовых вод	при уборке	Всего
4000	0,4	0,1	0	0,5
5600	2,1	0,6	0	2,7
7800	4,6	2,0	1,0	7,6
9000	6,2	3,0	3,8	13,0
13000	12,7	8,3	16,2	37,2
15600	17,6	12,0	21,8	51,4

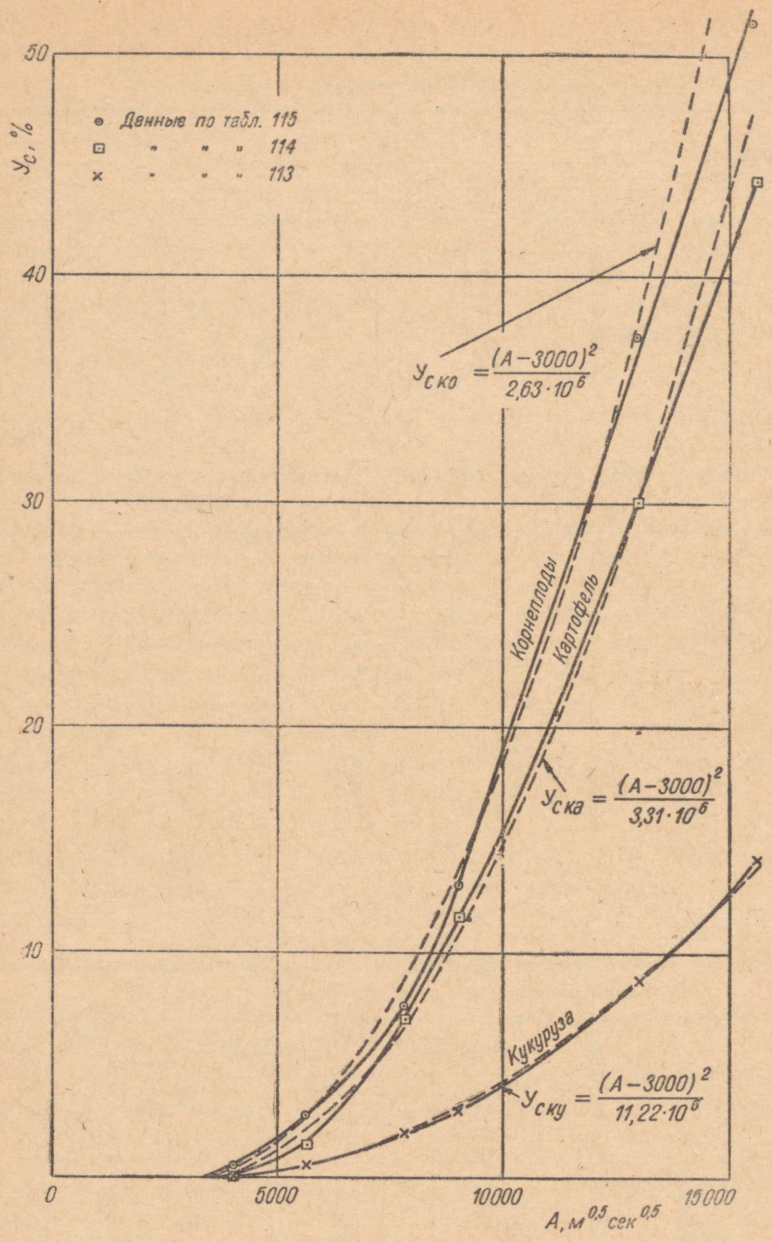


Рис. 57. Зависимость потерь урожая кукурузы, картофеля и корнеплодов на тяжелых суглинистых почвах от показателя интенсивности осушения.

Данные табл. 113, 114 и 115 представлены в графическом виде на рис. 57. Аналитические выражения потерь урожая пропашных культур на тяжелых суглинистых почвах имеют следующий вид:
для кукурузы

$$Y_{\text{с ку}} = \frac{(A-3000)^2}{11{,}22 \cdot 10^6}, \tag{164}$$

для картофеля

$$Y_{\text{с ка}} = \frac{(A-3000)^2}{3{,}31 \cdot 10^6} \tag{165}$$

и для корнеплодов

$$Y_{\text{с ко}} = \frac{(A-3000)^2}{2{,}63 \cdot 10^6}. \tag{166}$$

На основе выражений (164), (165) и (166) и уравнения (102) получим для определения величины показателя интенсивности осушения A_c, при которой сумма потерь урожая и расходов осушения минимальна, следующие уравнения:
для кукурузы

$$\frac{2A^2_{\text{с ку}}}{11{,}22 \cdot 10^6}\ (A_{\text{с ку}}-3000) = \frac{2{,}5 \cdot 10^4}{D\sqrt{k}}, \tag{167}$$

для картофеля

$$\frac{2A^2_{\text{с ка}}}{3{,}31 \cdot 10^6}\ (A_{\text{с ка}}-3000) = \frac{2{,}5 \cdot 10^4}{D\sqrt{k}} \tag{168}$$

и для корнеплодов

$$\frac{2A^2_{\text{с ко}}}{2{,}63 \cdot 10^6}\ (A_{\text{с ко}}-3000) = \frac{2{,}5 \cdot 10^4}{D\sqrt{k}}. \tag{169}$$

Таблица 116

Показатели A_c при $k=0{,}0000025$ *м/сек* и расчетные показатели интенсивности осушения на тяжелых суглинистых почвах

Культура	A_c при $k=0{,}0000025$ *м/сек*	Расчетный показатель интенсивности осушения $A_{\text{с расч}}$	$\frac{A_{\text{с расч}}}{A_c}$
Культурные пастбища и сенокосы	8190	8300	1,01
Ячмень	8160	8200	1,01
Овес и озимые	7800	8000	1,03
Яровая пшеница и горох	6740	6850	1,02
Кукуруза	7840	8000	1,02
Картофель	5690	5800	1,02
Корнеплоды	5390	5500	1,02

В табл. 116 представлены результаты вычисления $A_{с\,ку}$, $A_{с\,кз}$ и $A_{с\,ко}$ по уравнениям (167), (168) и (169), где $D=300$ *руб/га* и $k=0{,}0000025$ *м/сек*. В таблице показаны также отношения выбранных ранее расчетных величин $A_{с\,расч}$ для зерновых культур и культурных пастбищ к вычисленным величинам $A_с$ при $D=200$ *руб/га* и $k=0{,}0000025$ *м/сек*.

Сравнение табл. 110 и 116 показывает, что при одинаковых величинах многолетнего годового стока и коэффициентах фильтрации расчетные показатели интенсивности осушения тяжелых суглинистых почв на 18% больше, чем для торфяных почв. Исключение составляет картофель, выращивание которого на тяжелых почвах требует на 3% большей интенсивности осушения, чем на торфяных почвах. Такое положение объясняется большим влиянием летне-осенних затоплений на урожай картофеля. Продолжительность летне-осенних затоплений на тяжелых почвах гораздо больше, чем на торфяных.

При осушении средних минеральных почв под пропашные культуры для расчетного показателя интенсивности осушения можно применять средние величины из показателей на торфяных и тяжелых суглинистых почвах. Поскольку расхождения в этих показателях в обоих случаях незначительны, допустима линейная интерполяция, в результате которой получаем:

для кукурузы

$$\frac{6900+8000}{2}=7450,$$

для картофеля

$$\frac{6000+5900}{2}=5950$$

и для корнеплодов

$$\frac{5000+5500}{2}=5250.$$

Для песчаных почв расчетные показатели интенсивности осушения желательно принять равными показателям, рекомендуемым для торфяных почв.

5. ПОКАЗАТЕЛЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСУШЕНИЯ И РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ДРЕНАМИ ПРИ РАСПОЛОЖЕНИИ ДРЕН ВЫШЕ ВОДОУПОРА В НЕОДНОРОДНЫХ ГРУНТАХ

Результаты исследования интенсивности осушения, полученные выше, относились к однородным грунтам при расположении дрен на водоупоре.

Уравнение кривой дренажного стока в зависимости от показателя интенсивности осушения A при укладке дрен на водоупоре является следующим:

$$q=\frac{4H^2}{A^2} \qquad (75б)$$

и

$$E=A\sqrt{k}.$$

При укладке дрен выше водоупора уравнение кривой дренажного стока имеет следующий вид (по А. Н. Костякову [22]):

$$p=\frac{\frac{\pi}{2}k\left(\frac{\alpha+\beta}{90}\right)(h-h_0)}{l\left(\ln\frac{2l}{d}-1\right)},$$

где p — интенсивность инфильтрации,
h — напор грунтовых вод над дреной в середине междудренья,
h_0 — глубина воды в дрене,
l — половина расстояния между дренами,
d — диаметр дрен,

$$\frac{\alpha}{90}=\frac{a}{l}\left(1+0{,}8\ln\frac{l}{d}\right);\quad \frac{\beta}{90}=\sqrt{\frac{2}{\pi}}\left(\frac{h+h_0}{l}\right)\left(\ln\frac{2l}{d}-1\right);$$

a — расстояние от дрены до водоупора.

Если обозначить $l=\frac{E}{2}$, $h=H$, $h_0=0$, $p=q$ и заменить $\frac{\alpha}{90}$ и $\frac{\beta}{90}$ их соответствующими значениями, то формула А. Н. Костякова примет следующий вид:

$$q=\frac{4kH^2}{E^2}+\frac{6{,}28\gamma akH}{E^2}, \qquad (170)$$

где

$$\gamma=\frac{1+0{,}8\ln\frac{E}{2a}}{\ln\frac{E}{d}-1}.$$

При использовании формулы С. Ф. Аверьянова [1]

$$E=2H\sqrt{\frac{k}{q}\left(1+\frac{2a}{H}\right)a}$$

и

$$q=\frac{4\alpha kH^2}{E^2}+\frac{8\alpha akH}{E^2}, \qquad (170а)$$

где

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{2a}{E} 2{,}94 \lg \frac{2a}{\pi d}};$$

d — диаметр дрен.

Сравнение формул (170) и (170а) показывает, что коэффициенты $6{,}28\gamma$ во втором члене правой стороны формулы (170) заменены в формуле (170а) коэффициентами 8α. Коэффициент α входит также в первый член формулы (170а), однако в формуле (170) его нет. Если этот первый член учитывает величину стока из зоны, расположенной выше дрен, то вводить туда дополнительный коэффициент не требуется. Таким образом, можно считать, что

$$6{,}28\gamma = 8\alpha$$

и коэффициент γ (по С. Ф. Аверьянову) выражается следующей формулой:

$$\gamma = \frac{8}{6{,}28}\alpha = \frac{1{,}27}{1 + 2{,}94 \frac{2a}{E} \lg \frac{2a}{\pi d}}.$$

Заменяя в формуле (170)

$$\frac{E}{\sqrt{k}} = A_1,$$

получим

$$q = \frac{4H^2}{A_1^2} + \frac{6{,}28\gamma aH}{A_1^2}. \qquad (171)$$

Количество воды, отводимой осушительной сетью, остается неизменным независимо от глубины залегания водоупора, если нет притока со стороны. В таком случае и модули стока по формулам (75б) и (171) должны равняться между собой, т. е.

$$\frac{4H^2}{A^2} = \frac{4H^2}{A_1^2} + \frac{6{,}28\gamma aH}{A_1^2},$$

откуда

$$A_1 = A\sqrt{1 + \frac{1{,}57\gamma a}{H}}. \qquad (172)$$

Формула (172) показывает, что при залегании водоупора ниже дрен показатель интенсивности осушения следует увеличить по сравнению со случаем, когда дрены уложены на водоупоре. Это увеличение зависит от толщины водопроницаемого слоя, расположенного ниже дрен a и от напора грунтовых вод H. Однако напор грунтовых вод является величиной переменной, а показатель A, как и расстояние между осушителями, не может изменяться в зависимости от напора. Поэтому при

проектировании осушительных систем для показателя A следует принять какое-то постоянное значение.

При определении потерь урожая в зависимости от показателя интенсивности осушения в расчет были приняты, главным образом, потери, обусловленные запаздыванием сроков весеннего посева, высоким стоянием грунтовых вод в вегетационный период и запаздыванием уборки. Своевременный посев и уборка урожая возможны при глубине грунтовых вод более 0,45 *м*. В первой части вегетационного периода глубина грунтовых вод должна быть больше 0,80 *м*. Следовательно, показатель интенсивности осушения на осушительных системах, где дрены залегают выше водоупора, необходимо выбирать таким образом, чтобы кривая дренажного стока при глубине грунтовых вод более 0,45 *м* незначительно отличалась от кривой, выраженной уравнением (75б, см. стр. 223).

Кривую дренажного стока — в том случае, если показатель A соответствует расчетной величине $A_р$, дрены расположены в однородном грунте на водоупоре и глубина их укладки равна 1,0 *м* — назовем «нормальной кривой стока». Выражается она уравнением

$$q = \frac{4H^2}{A_р^2}. \qquad (75в)$$

Модуль стока по нормальной кривой стока при глубине грунтовых вод 0,45 *м* равен

$$q = \frac{4(1-0{,}45)^2}{A_р^2} = \frac{1{,}21}{A_р^2}. \qquad (173)$$

При пересечении кривой дренажного стока с нормальной кривой на глубине 0,45 *м* на основе формул (171) и (173) можно записать

$$\frac{1{,}21}{A_р^2} = \frac{4(h-0{,}45)^2}{A_1^2} + \frac{6{,}28\gamma a(h-0{,}45)}{A_1^2}, \qquad (174)$$

откуда

$$A_1 = 1{,}82(h-0{,}45)A_р\sqrt{1+\frac{1{,}57\gamma a}{h-0{,}45}},$$

где h — глубина заложения дрен, *м*.

Если коэффициент фильтрации слоя грунта, находящегося ниже дрен k_2, отличается от коэффициента фильтрации верхних слоев k_1, то аналогично формуле (170) получим

$$q = \frac{4k_1H^2}{E^2} + \frac{6{,}28\gamma ak_2H}{E^2}. \qquad (170а)*$$

* Предполагается, что дрена расположена на границе двух слоев.

В случае пересечения с нормальной кривой на глубине 0,45 *м*

$$\frac{1{,}21}{A_p^2}=\frac{4(h-0{,}45)^2k_1}{E^2}+\frac{6{,}28\gamma a(h-0{,}45)k_2}{E^2},$$

откуда

$$E=1{,}82(h-0{,}45)A_p\sqrt{k_1+\frac{1{,}57\gamma ak_2}{h-0{,}45}}$$

или

$$E=1{,}82(h-0{,}45)A_p\sqrt{k_1\left[1+\frac{1{,}57\gamma ak_2}{(h-0{,}45)k_1}\right.}=\delta A_p\sqrt{k_1}, \qquad (175)$$

где

$$\delta=1{,}82(h-0{,}45)\sqrt{1+\frac{1{,}57\gamma ak_2}{(h-0{,}45)k_1}}. \qquad (175а)$$

Уравнение дренажного стока после подстановки в формулу (170а) вместо E его значения, получаемого по формуле (175), принимает вид

$$q=\frac{4H^2}{\delta^2A_p^2}+\frac{6{,}28\gamma ak_2H}{\delta^2A_p^2k_1}. \qquad (176)$$

На рис. 58 представлены кривые стока, вычисленные по формуле (176) при $A_p=7500$, $h=1{,}0$ *м*, $a=1{,}0$ *м*, $\gamma=0{,}6$ при $\frac{k^2}{k_1}=1$

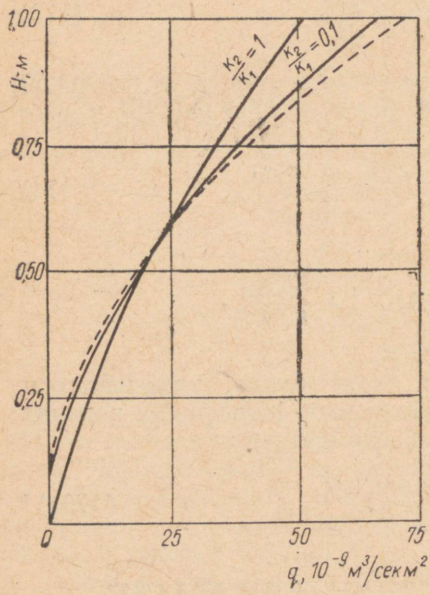


Рис. 58. Кривые дренажного стока при $q=9{,}0$ *л/сек км²*, $A_p=7500$, $h=1{,}0$ *м*, $a=1{,}0$ *м*, $\gamma=0{,}6$, $k_2:k_1=1$ и 0,1.

— — — — — нормальная кривая.

и $\frac{k^2}{k_1}=0{,}1$. Кроме того, на рисунке показана пунктиром также нормальная кривая стока, вычисленная по формуле $q=\frac{4H^2}{7500^2}$.

Рис. 58 показывает, что кривая стока в случае укладки дрен выше водоупора и при глубине грунтовых вод больше 0,45 *м* расположена правее нормальной кривой. Таким образом, при равных модулях стока в зоне глубины грунтовых вод более 0,45 *м* напоры для нормального случая будут выше реальных и потери урожая от запаздывания посева, уборки и в вегетационный период — меньше, чем при укладке дрен на водоупоре. Только потери от затопления могут оказаться в первом случае несколько больше, чем во втором.

В торфяных почвах коэффициент фильтрации по глубине залежи уменьшается. По У. Х. Томбергу [35], закономерность изменения k имеет следующий вид:

$$k_\tau=\frac{k_{\tau_0}}{10^{\alpha(\tau-\tau_0)}}, \tag{177}$$

где k_τ — коэффициент фильтрации на глубине τ;
k_{τ_0} — коэффициент фильтрации на глубине τ_0;

$$\alpha=\frac{1}{10^{0{,}32+0{,}06\tau_0}k_{\tau_0}^{0{,}10}}. \tag{178}$$

Здесь τ_0 в *м* и k_{τ_0} в *см/сек*.

Для кривой дренажного стока У. Х. Томбергом предложена следующая формула [35]:

$$q=3{,}06u\frac{k_{др}}{\alpha E^2}\left(\frac{10^{\alpha H}-1}{2{,}3\alpha}-H\,10^{-\alpha a}\right), \tag{179}$$

здесь q — модуль стока, $м^3/сек\ м^2$;
$k_{др}$ — коэффициент фильтрации торфа на глубине укладки дрен, *м/сек*;
α — определяется по формуле (178);
E — расстояние между дренами, *м*;
H — напор грунтовых вод, *м*;
a — толщина слоя торфа ниже дрен, *м*;
u — поправочный коэффициент, определяемый по табл. 117.

Таблица 117

Значение коэффициента u в формуле (179)

H, *м*	0,10	0,20	0,30	0,40	0.50	0,60	0,70	0,80
u	0,31	0,46	0,59	0,72	0,82	0,90	0,95	0,99

Если кривую стока, выражаемую формулой (179), заставить пересечься с нормальной кривой при глубине грунтовых вод 0,45 *м* или при $H=h-0{,}45$, где h — глубина укладки дрен, то на основе формул (179) и (75в) получим следующее равенство:

$$3{,}06u\frac{k_{др}}{\alpha E^2}\left[\frac{10^{\alpha(h-0{,}45)}-1}{2{,}3\alpha}-(h-0{,}45)\,10^{-\alpha a}\right]=\frac{4(1-0{,}45)^2}{A_р^2}.$$

После подстановки

$$\frac{E^2}{k_{др}}=A_1^2$$

$$A_1=A_р\sqrt{\frac{2{,}53u}{\alpha}\left[\frac{10^{\alpha(h-0{,}45)}-1}{2{,}3\alpha}-(h-0{,}45)\,10^{-\alpha a}\right]}=\beta A_р, \quad (180)$$

где

$$\beta=\sqrt{\frac{2{,}53u}{\alpha}\left[\frac{10^{\alpha(h-0{,}45)}-1}{2{,}3\alpha}-(h-0{,}45)\,10^{-\alpha a}\right]}, \quad (180а)$$

Подставляя в формулу (179) $\frac{E^2}{k_{др}}=A_1^2=\beta^2A_р^2$, получим, что

$$q=\frac{3{,}06u}{\alpha\beta^2A_р^2}\left(\frac{10^{\alpha H}-1}{2{,}3\alpha}-H10^{-\alpha a}\right). \quad (181)$$

На рис. 59 показана кривая дренажного стока, вычисленная по формуле (181), при $A_р=7500$, $h=1{,}0$ *м*, $a=1{,}0$ *м* и $\alpha=0{,}83$. В этом случае β по формуле (180а) равна 1,54. На этом же рисунке пунктиром показана нормальная кривая стока при $A_р=7500$. Рисунок показывает, что при глубине грунтовых вод больше 0,45 *м* кривая дренажного стока в торфяных грунтах совпадает с нормальной кривой.

Для случая, когда толщина слоя торфа равна глубине дрен и ниже дрен расположен водопроницаемый грунт, уравнение кривой стока, на основе уравнений (179) и (170), можно представить в следующем виде

$$q=3{,}06u\frac{k_{др}}{\alpha E^2}\left(\frac{10^{\alpha H}-1}{2{,}3\alpha}-H\right)+\frac{6{,}28\gamma ak_2H}{E^2}. \quad (182)$$

Первая часть правой стороны уравнения (182) определяет сток с торфяной почвы, а вторая часть — сток из слоя, находящегося ниже дрен.

В торфяных почвах, когда дрены укладываются на водоупоре и глубина грунтовых вод равна 0,45 *м*

$$q=\frac{3{,}06uk_{др}}{\alpha E^2}\left[\frac{10^{\alpha(h-0{,}45)}-1}{2{,}3\alpha}-(h-0{,}45)\right].$$

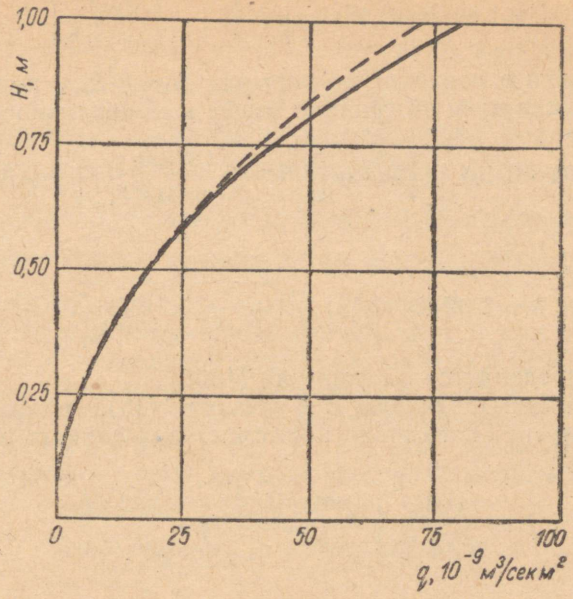


Рис. 59. Кривая дренажного стока в торфяных почвах при $\overline{q}=9{,}0$ *л/сек км²*, $A_{\text{р}}=7500$, $h=1{,}0$ *м*, $u=1{,}0$ *м*, $\alpha=0{,}83$

– – – – – нормальная кривая.

В однородных почвах, когда дрены уложены на водоупоре и глубина грунтовых вод равна 0,45 *м*

$$q=\frac{4k_1(h-0{,}45)^2}{E^2}.$$

При равной величине q и E получаем

$$k_1=\frac{3{,}06u}{4(h-0{,}45)^2\alpha}\left[\frac{10^{\alpha(h-0{,}45)}-1}{2{,}3\alpha}-(h-0{,}45)\right]k_{\text{др}}$$

или

$$k_1=\beta_1^2 k_{\text{др}}, \qquad (183)$$

где

$$\beta_1^2=\frac{0{,}765u}{(h-0{,}45)^2\alpha}\left[\frac{10^{\alpha(h-0{,}45)}-1}{2{,}3\alpha}-(h-0{,}45)\right]. \qquad (180б)$$

Для минеральных почв, где коэффициент фильтрации для слоя, находящегося выше дрен, равен k_1 и ниже дрен k_2, было получено, что

$$E=1{,}82(h-0{,}45)A_{\text{р}}\sqrt{k_1\left[1+\frac{1{,}57\gamma a k_2}{(h-0{,}45)k_1}\right]}.$$

Подставляя в последнюю формулу $k_1=\beta_1^2 k_{\text{др}}$, получим для случая укладки дрен на границе торфа и минерального грунта

$$E=1{,}82(h-0{,}45)A_{\text{р}}\sqrt{\beta_1^2 k_{\text{др}}\left[1+\frac{1{,}57\gamma a k_2}{(h-0{,}45)\beta_1^2 k_{\text{др}}}\right]}=\beta_1\delta_1 A_{\text{р}}\sqrt{k_{\text{др}}}, \tag{184}$$

где

$$\delta_1=1{,}82(h-0{,}45)\sqrt{1+\frac{1{,}57\gamma a k_2}{(h-0{,}45)\beta_1^2 k_{\text{др}}}}; \tag{184а}$$

β_1 — определяется по формуле (180б).

После замены величины E в формуле (181) формулой (184) уравнение дренажного стока принимает для данного случая следующий вид:

$$q=\frac{3{,}06u}{\alpha\beta_1^2\delta_1^2 A_{\text{р}}^2}\left(\frac{10^{\alpha H}-1}{2{,}3\alpha}-H\right)+\frac{6{,}28\gamma a k_2 H}{\beta_1^2\delta_1^2 A_{\text{р}}^2 k_{\text{др}}}. \tag{185}$$

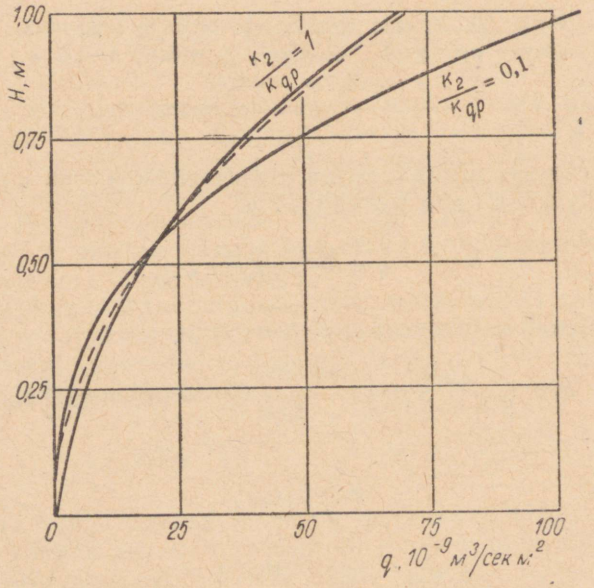


Рис. 60. Кривая дренажного стока, когда дрены уложены на границе торфа и минерального грунта, при $\overline{q}=9{,}0$ *л/сек км²*, $A_{\text{р}}=7500$, $h=1{,}0$ *м*, $a=1{,}0$ *м*, $\alpha=0{,}83$, $k_2:k_1=1{,}0$ и $0{,}1$

— — — — нормальная кривая.

На рис. 60 показаны кривые дренажного стока, вычисленные по формуле (185) при $A_р=7500$, $h=1{,}0$ *м*, $a=1{,}0$ *м*, $\alpha=0{,}83$. Кривые вычислены для случая, когда $\frac{k_2}{k_{др}}=1$ и $\frac{k_2}{k_{др}}=0{,}1$. Сравнение этих кривых с нормальной кривой стока показывает, что кривая для случая $\frac{k_2}{k_{др}}=1$ почти совпадает с нормальной кривой. При глубине грунтовых вод больше 0,45 *м* кривая стока для $\frac{k_2}{k_{др}}=0{,}1$ расположена немного левее нормальной кривой, а при малых глубинах грунтовых вод отклоняется от нее вправо. Можно убедиться, что в заданных условиях и при пересечении кривых стока с нормальной кривой на глубине 0,45 *м* от дневной поверхности обеспечивается режим грунтовых вод, близкий к режиму, при котором была определена нормальная кривая.

В слоистых почво-грунтах, если дрены укладываются на водоупоре, в случае двух слоев кривая модуля стока определяется, по В. А. Ионату, уравнением (156):

$$q=\frac{4k_1[n(H-M)^2+2M(H-M)+M^2]}{E_2},$$

где k_1 — коэффициент нижнего слоя почвы, расположенного выше дрен;

k_0 — коэффициент фильтрации верхнего слоя почвы;

$$n=\frac{k_0}{k_1}.$$

Если подставить $\frac{E^2}{k_1}=A_1^2$, то в случае пересечения кривой стока двухслойного грунта с этой кривой однородного грунта при глубине грунтовых вод 0,45 *м*, т. е. при $H=h-0{,}45$ *м*, получим

$$\frac{4[n(h-0{,}45-M)^2+2M(h-0{,}45-M)+M^2]}{A_1^2}=\frac{4(h-0{,}45)^2}{A_р^2},$$

откуда

$$A_1=A_р\sqrt{\frac{n(h-0{,}45-M)^2+2M(h-0{,}45-M)+M^2}{(h-0{,}45)^2}}=\beta_2 A_р, \qquad (186)$$

где

$$\beta_2=\frac{1}{h-0{,}45}\sqrt{n(h-0{,}45-M)^2+2M(h-0{,}45-M)+M^2}. \qquad (186а)$$

Для случая, когда дрены расположены выше водоупора, уравнение стока в слоистой почве может быть представлено в виде

$$q=\frac{4k_1[n(H-M)^2+2M(H-M)+M^2]}{E^2}+\frac{6{,}28\gamma a k_2 H}{E^2}. \qquad (187)$$

Аналогично формуле (184) можно в данном случае для E записать следующую формулу:

$$E=1{,}82(h-0{,}45)A_p\sqrt{\beta_2^2k_1\left[1+\frac{1{,}57\gamma ak_2}{(h-0{,}45)\beta_2^2k_1}\right]}=\beta_2\delta_2A_p\sqrt{k_1},\quad(188)$$

где

$$\delta_2=1{,}82(h-0{,}45)\sqrt{1+\frac{1{,}57\gamma ak_2}{(h-0{,}45)\beta_2^2k_1}}.\quad(188а)$$

После подстановки E по формуле (188) в уравнение (187) получим

$$q=\frac{4[n(H-M)^2+2M(H-M)+M^2]}{\beta_2^2\delta_2^2A_p^2}+\frac{6{,}28\gamma ak_2H}{\beta_2^2\delta_2^2A_p^2k_1}.\quad(189)$$

На рис. 61 показаны кривые дренажного стока, определенные по уравнению (189) при условии, что $A_p=7500$, $h=1{,}0$, $n=5$, $\gamma=0{,}6$, $a=1{,}0$ *м*, $k_1=k_2$ и M в одном случае равно 0,1, а в другом 0,5 *м*. При этом, если $M=0{,}1$ *м*, то β_2 (по формуле (186а) равна 1,92 и δ_2 по формуле (188а) равна 1,21, если же $M=0{,}5$ *м*, то $\beta_2=1{,}01$ и $\delta_2=1{,}64$.

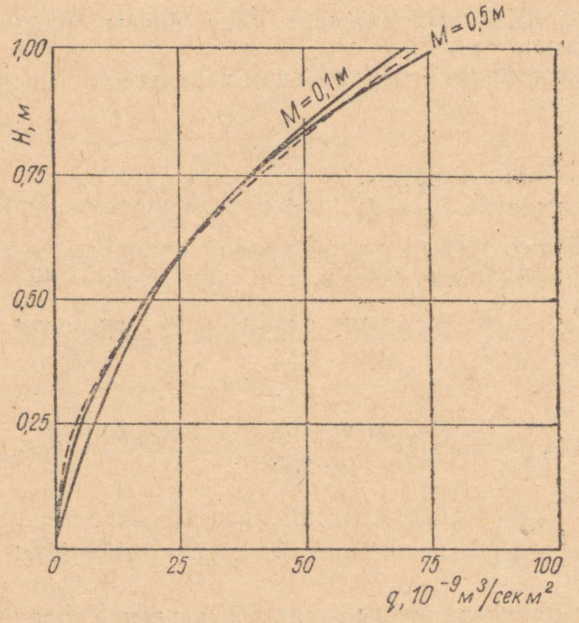


Рис. 61. Кривые дренажного стока в слоистом грунте при $q=9{,}0$ *л/сек км²*, $A_p=7500$, $h=1{,}0$ *м*, $a=1{,}0$ *м*, $\gamma=0{,}6$, $n=5$, $k_1=k_2$, $M=0{,}1$ и $0{,}5$ *м*
— — — — нормальная кривая.

Кривые на рис. 61 показывают, что в данных условиях кривые стока почти совпадают с нормальной кривой.

При значениях n меньше 5 (и больше) имеют место большие отклонения, чем при $n=5$, однако при пересечении кривых стока с нормальной кривой на глубине грунтовых вод 0,45 *м* условия для растениеводства, по-видимому, близки к нормальным.

Из приведенных выше рассуждений становится ясно, что показатели интенсивности осушения, определенные в условиях, когда дрены находятся в однородном грунте на водоупоре и глубина их укладки равна 1,0 *м*, могут быть использованы для вычисления расчетных расстояний между дренами и в других реальных случаях.

Уравнение нормальной кривой стока $q=\frac{4H^2}{A_p^2}$ было определено при условии, что модуль многолетнего среднего годового стока равен 9 *л/сек км²*.

Нормальные кривые стока, представленные на рис. 58, 59, 60 и 61, могут применяться только при $\bar{q}=9$ *л/сек км²*. При других значениях среднего годового стока модуль дренажного стока любого периода следует умножить на коэффициент $\frac{9}{\bar{q}}$, где $\bar{q}$ — многолетний средний годовой модуль стока, который наблюдается на осушаемой территории. На коэффициент $\frac{9}{\bar{q}}$ необходимо умножить и все абсциссы нормальной кривой стока. Таким образом, общий вид уравнения нормальной кривой дренажного стока следующий:

$$\frac{9q}{\bar{q}}=\frac{4H^2}{A_p^2} \text{ и } q=\frac{4H^2\bar{q}}{9A_p^2}. \qquad (190)$$

Формула (190) показывает, что в общем случае расчетную величину показателя интенсивности осушения A_p следует умножить на коэффициент $\sqrt{\frac{9}{\bar{q}}}$.

При определении потерь урожая в зависимости от показателя интенсивности осушения были использованы кривые обеспеченности напоров грунтовых вод ($H_{p\%}$) весенних и осенних месяцев. На основе формулы (75)

$$H=\frac{A}{2}\sqrt{q}$$

или

$$H_{p\%}=\frac{A}{2}\sqrt{q_{p\%}},$$

где $H_{P\%}$ — ординаты кривой обеспеченности напора грунтовых вод,

$q_{P\%}$ — ординаты кривой обеспеченности стока.

Формулы кривых обеспеченности стока были представлены выше в единицах многолетнего годового стока (k). Поэтому при переходе от относительных величин к модулям стока необходимо их умножить на модуль многолетнего среднегодового стока. Таким образом, $q_{P\%} = \bar{q} k_{P\%}$ и $H_{P\%} = \frac{A}{2}\sqrt{\bar{q} k_{P\%}}$.

Это показывает, что $H_{P\%}$ и (в зависимости от последнего) потери урожая связаны с величиной произведения $A\sqrt{\bar{q}}$.

При определении обеспеченности (продолжительности) периода, в течение которого невозможна работа на осушаемых участках, значение P_1 в формулах (92), (94), (97) и т. п. также связано с произведением $A^2 q$ (см. формулы (91), (95) и т. п.).

Если принять, что $A\sqrt{\bar{q}} = \alpha A$, то сумма потерь урожая культурных пастбищ, сенокосов и затрат на осушение составляет на основе уравнения (103)

$$S_{\text{тп}} = \frac{(\alpha A - 3500)^2}{5{,}36 \cdot 10^6} + \frac{100}{D}\left(\frac{250}{\alpha A \sqrt{k}} + 6{,}2\right).$$

После дифференцирования по A и приравнивания к нулю получим

$$\frac{2\alpha^2 A^2}{5{,}36 \cdot 10^6}(\alpha A - 3500) = \frac{2{,}5 \cdot 10^4}{D\sqrt{k}}.$$

Последнее уравнение отличается от уравнения (104) только величиной коэффициента перед A. Если в уравнении (104) этот коэффициент был равен 1, то теперь его величина α.

Из сказанного следует, что расчетные показатели A, полученные при $\bar{q} = 9$ *л/сек км²*, при иных величинах $\bar{q}$ следует умножить на коэффициент $\sqrt{\frac{9}{\bar{q}}}$.

Приведенные выше формулы (175), (184) и (188), по которым расстояние между дренами определяется на основе A_p, также действительны лишь при $\bar{q} = 9$ *л/сек км²*. При других значениях $\bar{q}$ показатель A_p в формулах для определения E следует умножить на так наз. гидрологический коэффициент $\sqrt{\frac{9}{\bar{q}}}$, где $\bar{q}$ измеряется в *л/сек км²*.

Таким образом, расстояние между дренами, в зависимости от показателя A_p, можно определить по следующим формулам:

на торфяных почвах

$$E = 3\beta A_p \sqrt{\frac{k_{др}}{\overline{q}}}, \qquad (180в)$$

на торфяных почвах, где водопроницаемый грунт расположен ниже дрен

$$E = 3\beta_1 \delta_1 A_p \sqrt{\frac{k_{др}}{\overline{q}}}, \qquad (184б)$$

на минеральных почвах, где коэффициент фильтрации слоев, находящихся выше и ниже дрен, равен или неравен

$$E = 3\delta A_p \sqrt{\frac{k_1}{\overline{q}}}, \qquad (175б)$$

на минеральных почвах, где выше дрен расположен двухслойный грунт

$$E = 3\beta_2 \delta_2 A_p \sqrt{\frac{k_1}{\overline{q}}}, \qquad (188б)$$

где $\overline{q}$ — модуль многолетнего среднего годового стока, *л/сек км²*;

$k_{др}$ — коэффициент фильтрации торфа на глубине укладки дрен, *м/сек*;

k_1 — коэффициент фильтрации слоя грунта *M*, расположенного непосредственно выше дрен, *м/сек*.

Формулы (180а), (180б), (186а), (175а), (184а) и (188а) для определения коэффициентов β, β_1, β_2, δ, δ_1, и δ_2 были получены на основе уравнений кривых дренажного стока при различных условиях залегания грунтов. При этом было принято, что кривые стока пересекались с нормальной кривой при глубине грунтовых вод в 0,45 *м*. Однако при использовании формул глубина воды в дрене была принята равной нулю, а также не были учтены потери напора при входе воды в дрену. С целью учета этих потерь в формулах β и δ напор грунтовых вод уменьшен на 0,05 *м*, т. е. вместо $H = h - 0{,}45$ взято $H = h - 0{,}50$. С учетом последней поправки формулы β и δ принимают следующий вид:

для торфяных почв

$$\beta = \sqrt{\frac{2{,}53u}{\alpha}\left[\frac{10^{\alpha(h-0{,}50)} - 1}{2{,}3\,\alpha} - (h - 0{,}50)\,10^{-\alpha a}\right]} \qquad (180г)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{0{,}765\,u}{\alpha(h-0{,}50)^2}\left[\frac{10^{\alpha(h-0{,}50)} - 1}{2{,}3\,\alpha} - (h - 0{,}59)\right]} \qquad (180д)$$

$$\delta_1 = 1{,}82(h - 0{,}50)\sqrt{1 + \frac{1{,}57\,\gamma\,ak_2}{(h-0{,}50)\,\beta_1^2 k_{др}}} \qquad (184в)$$

для минеральных почв

$$\delta = 1{,}82(h-0{,}50)\sqrt{1+\frac{1{,}57\,\gamma\, ak_2}{(h-0{,}50)k_1}} \qquad (175в)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{h-0{,}50}\sqrt{n(h-0{,}50-M)^2+2M(h-0{,}50-M)+M^2} \qquad (186в)$$

и

$$\delta_2 = 1{,}82(h-0{,}50)\sqrt{1+\frac{1{,}57\,\gamma\, ak_2}{(h-0{,}50)\beta_2^2 k_1}}, \qquad (188в)$$

где k_2 — коэффициент фильтрации слоя грунта, расположенного ниже дрен, *м/сек*;

$n = \frac{k_0}{k_1}$;

k_0 — коэффициент фильтрации верхнего слоя почвы, расположенного выше дрен и выше слоя M, коэффициент фильтрации которого равен k_1.

Исходя из условия, что кривые дренажного стока должны пересекаться с нормальной кривой при глубине грунтовых вод 0,45 *м*, необходимо иметь в виду, что коэффициенты фильтрации слоев, находящихся ниже 0,45 *м* от поверхности почвы, играют существенную роль при определении расстояний между дренами.

Результаты исследований А. И. Михальцевича [25] на приборе ЭГДА показывают, что при расположении дрен в слабопроницаемом грунте сильно снижается приток к дренам из зоны, расположенной ниже дрен. В том случае, если отношение мощности слабопроницаемого слоя к половине расстояния между дренами уменьшается с 0,136 до 0,034, приток к дрене из нижней зоны увеличивается на 1—6%. Такое увеличение притока установлено А. И. Михальцевичем при отношении коэффициентов фильтрации нижнего, более водопроницаемого слоя к коэффициенту фильтрации слоя, где расположены дрены, равном 13 : 1.

Полевые данные наблюдений ЭНИИЗиМ на опытном участке в совхозе «Тылла» показали, что при наличии под дренами слабоводопроницаемого слоя мощностью около 0,1 *м* последующие нижние слои, обладающие водопроницаемостью в 10 и более раз большей, чем у верхнего слоя, находящегося под дренами, влияют на приток к дрене почти таким же образом, как и верхний слабоводопроницаемый слой.

По вопросу влияния водопроницаемых слоев грунта, находящихся ниже уровня укладки дрен, на приток к дренам имеется пока мало данных. Сравнение модуля стока, измеренного в осушительных системах, со стоком, определенным по формулам (170) и (182), показывает, что в глинистых, тяжелых и средних суглинистых почвах мощность так наз. активного слоя, расположенного ниже дрен, в большинстве случаев остается менее одно-

го метра (обычно 0,5—0,8 *м*). В легких суглинках, супесях и песках мощность активного слоя зависит от фактической мощности более водопроницаемых слоев. При определении стока по формулам (170) и (182) было принято значение коэффициента γ, определенное А. Н. Костяковым.

В натуре почво-грунты обычно неоднородны и состоят из различных слоев, коэффициент фильтрации которых может изменяться в больших пределах. Кроме того, мощность и водопроницаемость слоев почво-грунта может изменяться на незначительных расстояниях. Поэтому определение расстояния между дренами представляет в таких сложных случаях большие затруднения. Некоторые специалисты считают, что из-за сложности и многочисленности факторов вообще нет смысла определять расстояние между дренами по формулам и рекомендуют пользоваться соответствующими стандартными таблицами, где по механическому составу почвы выбирают густоту осушительной сети. Практика осушения показывает, что при применении стандартных таблиц интенсивность осушения во многих случиях определяется неправильно, в чем убеждаются уже после выполнения дорогих строительных работ. Вследствие этого не достигаются и ожидаемые результаты. Особенно большие ошибки наблюдаются при осушении почв, подстилаемых хорошо водопроницаемыми слоями.

При неправильном учете коэффициента фильтрации и мощности водопроницаемого пласта, в котором расположены дрены, ошибки в определении расстояний между дренами достигают десятков метров.

Наряду с данными о механическом составе почвы по отдельным слоям необходимо знать также коэффициент фильтрации этих слоев, определяя их полевыми методами. Коэффициенты фильтрации необходимо определить в зонах, расположенных выше и ниже горизонта укладки дрен. При определении коэффициента фильтрации желательно, чтобы глубина грунтовых вод на исследуемом участке превышала 0,45 *м*.

При определении расстояний между дренами в тех случаях, когда зона, расположенная под дреной, состоит из двух слоев и сама дрена уложена в менее проницаемый слой, в практических расчетах можно принимать, что эта зона однородна и имеет коэффициент фильтрации, равный коэффициенту фильтрации менее проницаемого слоя, а мощность его принять равной сумме мощностей обоих слоев.

Для уточнения расчетного коэффициента фильтрации в данном случае, на основе данных А. И. Михальцевича [25] и полевых наблюдений ЭНИИЗиМ, можно представить следующую интерполяционную формулу:

$$k_a = \frac{9a_1 + a}{10a_1 n + a} k_{a_2},$$

где k_a — применяемый коэффициент фильтрации слоя a, расположенного ниже дрен;
k_{a_1} — коэффициент фильтрации слоя a_1;
k_{a_2} — коэффициент фильтрации слоя a_2;
a_1 — мощность менее водопроницаемого слоя, где расположены дрены;
a_2 — мощность более проницаемого слоя, расположенного ниже слоя a_1;

$$a=a_1+a_2;\quad n=\frac{k_{a_2}}{k_{a_1}}.$$

Показатель интенсивности осушения A_p, входящий в формулы для определения расстояний между дренами, для отдельных культур приведен в табл. 110 и 116. Осушенные территории используются обычно под севообороты, состоящие из различных культур. Расчетный показатель интенсивности осушения для отдельного севооборота определяется как средневзвешенный из показателей для культур, входящих в севооборот. При этом вес каждого показателя желательно брать в соответствии с долей данной культуры в севообороте (в кормовых единицах).

В условиях Эстонской ССР за основу проектирования осушительных систем приняты показатели интенсивности осушения, представленные в табл. 118.

Таблица 118

Показатели интенсивности осушения земель A_p, предназначенные для использования под севообороты лугопастбищных, зерновых и пропашных культур в Эстонской ССР (при $\overline{q}=9$ *л/сек км²*)

Почвы	Севообороты		
	лугопастбищные	зерновые	пропашные
Торфяные и песчаные	7400	7000	5950
Средние и тяжелые минеральные	7800	7400	6250

6. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ ОСУШЕНИЯ

С целью исследования вопроса о влиянии интенсивности осушения на урожай сельскохозяйственных культур были заложены опытные участки в совхозах и на опытных базах. Опытные участ-

ки были выбраны на объектах, водные свойства почв (проницаемость) которых были более или менее одинаковы. Располагая на таких почвах дренажные системы с различным расстоянием между дренами, можно было при одинаковой агротехнике в условиях одного и того же севооборота установить оптимальное расстояние междудренья.

Указанные эксперименты проводились в Эстонской ССР на опытных базах ЭНИИЗиМ «Тоома» и «Карья», на опытной станции «Вяндра» и в совхозах «Ойдрема» и «Тылла».

Для участка в совхозе «Ойдрема» в основу расчета были положены средние значения урожая за восемь лет, в «Тоома» — за шесть лет, в «Карья», «Вяндра» и «Тылла» — за три года.

В табл. 119, 120, 121, 122 и 123 представлены экономические показатели опытных участков, обработанные О. Я. Кийсом и У. Х. Томбергом [19].

Таблица 119

Экономические показатели осушения полевого севооборота на торфяных почвах в совхозе «Ойдрема» (по данным О. Я. Кийса и У. Х. Томберга [19])

Показатели	Единица измерения	Расстояние между дренами, *м*				
		30	45	60	80	120
Стоимость мелиоративных работ	*руб/га*	465	405	375	352	330
Средний урожай	*корм. ед/га*	2520	2345	2160	2025	1855
Годовые затраты на мелиорацию	*руб/га*	22,8	19,4	17,6	16,4	15,1
Суммарные годовые производственные затраты	*руб/га*	140	133	128	124	119
Себестоимость кормовой единицы	коп/корм. ед.	5,55	5,66	5,92	6,12	6,41
Окупаемость капитальных вложений	лет	8,6	8,6	9,6	11	13,8

Табл. 119 показывает, что себестоимость продукции минимальна и срок окупаемости капиталовложений наиболее короток при расстоянии между дренами, равном 30 *м*. В условиях опытного участка совхоза «Ойдрема», где мощность торфа после осадки составляла 2,5 *м*, глубина укладки дрен $h=0{,}95$ *м*, $k_{др}=0{,}000014$ *м/сек*, $\overline{q}=11$ *л/сек км²* и $A_р=7000$ (см. табл. 118), расстояние между дренами по формуле (180в), где β — по формуле (180г) при $\alpha=0{,}80$, $u=0{,}82$ и $a=2{,}50-0{,}95=1{,}55$, равно $1{,}32$, $E=3\cdot 1{,}32\cdot 7000\sqrt{\frac{0{,}000014}{11}}=31{,}2$ *м*.

Оптимальное расстояние между дренами в «Тоома» (см. табл. 120) находится между 15 и 30 метрами (по данным авторов таблицы — 24 *м*). Мощность тофра на опытном участке в

Таблица 120

Экономические показатели осушения для культурных пастбищ на торфяных почвах опытной базы «Тоома» (по данным О. Я. Кийса и У. Х. Томберга [19])

Показатели	Единица измерения	Расстояние между дренами, *м*			
		15	30	45	60
Стоимость мелиоративных работ	*руб/га*	360	228	184	162
Затраты на закладку культурных пастбищ	*руб/га*	160	160	160	160
Средний урожай	*корм. ед/га*	3020	2723	2193	1280
Годовые затраты на мелиорацию	*руб/га*	32	22	18	16
Суммарные годовые производственные затраты	*руб/га*	74	64	60	78
Себестоимость кормовой единицы	коп/корм. ед.	2,45	2,35	2,74	6,1
Окупаемость капитальных вложений	лет	2,4	1,7	1,8	6,2

«Тоома» после осадки равна 1,5—2,0 *м*, глубина укладки дрен $h=0{,}8$ *м*, коэффициент фильтрации на глубине 1,0 *м* $k_{1,0}=0{,}000010$ *м/сек* и на глубине дрен (по формуле (177) $k_{др}=0{,}000015$ *м/сек*, $\overline{q}=10$ *л/сек км*^{2} и $A_р=7400$. Расстояние между дренами на основе этих данных по формуле (180в), где значение β определялось по формуле (180г), при мощности торфа 1,5 *м* равно 0,75 и при мощности торфа 2,0 *м* — $\beta=0{,}80$, составляет $E_1=3\cdot 0{,}75\cdot 7400\sqrt{\frac{0{,}000015}{10}}=20{,}4$ *м* и $E_2=3\cdot 0{,}80\times 7400\sqrt{\frac{0{,}000015}{10}}=21{,}8$ *м*.

На основе табл. 121 можно заключить, что на опытной базе «Карья» себестоимость кормовой единицы минимальна при расстоянии между дренами, равном 15 *м*. Минимальный срок окупаемости капитальных вложений наблюдается при расстоянии между дренами, равном 30 *м*. Следовательно, оптимальное расстояние между дренами на данном участке составляет около 20 *м*. При такой интенсивности осушения себестоимость продукции увеличивается приблизительно на 2% по сравнению с минимальным ее значением, а срок окупаемости капиталовложений увеличивается лишь на 0,1 года.

При расстоянии между дренами, равном 20 *м* (по данным У. Х. Томберга), глубине укладки дрен $h=1{,}15$ *м*, мощности торфа 0,9 *м*, коэффициенте фильтрации торфа на условной глубине 1,0 *м* 0,000002 *м/сек* средний коэффициент фильтрации торфа в слое 0,5 *м* ниже поверхности земли составляет 0,0000045 *м/сек*.

Таблица 121

Экономические показатели осушения полевого севооборота на мелких торфяниках опытной базы «Карья» (по данным У. Х. Томберга [36])

Показатели	Единица измерения	Расстояние между дренами, *м*				
		10	15	20	30	40
Стоимость мелиоративных работ	*руб/га*	841	650	556	461	414
Средний урожай	*корм. ед/га*	4800	4600	4400	4000	3600
Годовые затраты на мелиорацию	*руб/га*	34,7	28,0	24,7	21,3	19,7
Суммарные годовые производственные затраты	*руб/га*	160,0	150,4	146,2	141,6	138,4
Себестоимость кормовых единиц	коп/корм. ед.	3,33	3,27	3,32	3,54	3,84
Окупаемость капитальных вложений	лет	4,6	3,7	3,3	3,2	3,5

Под торфом расположен слой тяжелого суглинка мощностью 0,35 *м* с коэффициентом фильтрации 0,000002 *м/сек*, под суглинком — песок с коэффициентом фильтрации 0,00001 *м/сек*, $\overline{q}=10$ *л/сек км*^{2} и $A_р=7000$. При использовании формулы (188б), где β_2 (по формуле (186в) при $n=\frac{0,0000045}{0,000002}=2,2$ и $M=1,15-0,9=$ $=0,25$, равна 1,20, δ_2 (по формуле (188в) при $\gamma=0,60$, $k_1=k_2=$ $=0,000002$ *м/сек* и $a=0,80$, равна 1,59, расстояние между дренами $E=3\cdot 1,20\cdot 1,59\cdot 7000\cdot\sqrt{\frac{0,000002}{10}}=17,9$ *м*.

Данные табл. 122 показывают, что в «Вяндра» себестоимость кормовой единицы и срок окупаемости капиталовложений минимальны при расстоянии между дренами, равном 15 *м*.

Таблица 122

Экономические показатели осушения полевого севооборота на тяжелых суглинистых почвах на опытной станции «Вяндра» (по данным О. Я. Кийса [20])

Показатели	Единица измерения	Расстояние между дренами, *м*			
		10	15	20	25
Стоимость мелиоративных работ	*руб/га*	537	367	283	231
Средний урожай	*корм. ед/га*	3758	3523	2858	2344
Годовые затраты на мелиорацию	*руб/га*	21,5	14,7	11,4	9,2
Суммарные годовые производственные затраты	*руб/га*	139,6	130,4	125,6	121,2
Себестоимость кормовой единицы	коп/корм. ед.	3,71	3,70	4,40	5,20
Окупаемость капитальных вложений	лет	4,8	3,6	4,8	9,0

Глубина укладки дрен при расстоянии между дренами 15 *м* равна 1,0 *м*, коэффициент фильтрации слоев грунта выше и ниже дрен равен 0,000002 *м/сек*, $\overline{q}=8{,}5$ *л/сек км*^{2}, $A_р$ (по табл. 118) принято равным 7400 и $a=0{,}8$ *м*.

На основе формулы (175б), где δ, определенное по формуле (175в), при $\gamma=0{,}60$ равно 1,44, получается, что расстояние $E=3\cdot 1{,}44\cdot 7400\sqrt{\frac{0{,}000002}{8{,}5}}=15{,}5$ *м*.

По данным табл. 123, в совхозе «Тылла» себестоимость единицы прибавки урожая и срок окупаемости капиталовложений минимальны при расстоянии между дренами, равном 37 *м*.

Таблица 123

Экономические показатели осушения пропашных культур на временно избыточно увлажненных супесях совхоза «Тылла» (по данным О. Я. Кийса и Э. А. Соовика)

Показатели	Единица измерения	Расстояние между дренами, *м*		
		25	37	50
Стоимость осушения	*руб/га*	390	330	295
Средний прирост урожая под влиянием осушения	*корм. ед/га*	1458	1393	630
Годовые затраты на осушение	*руб/га*	16	14	13
Суммарные производственные затраты на прирост урожая	*руб/га*	66	61	31
Себестоимость кормовой единицы прироста урожая	коп/корм. ед.	4,52	4,37	4,92
Окупаемость капитальных вложений	лет	2,5	2,2	7,0

На этом участке глубина укладки дрен равна 1,06 *м*, коэффициент фильтрации слоев, расположенных ниже и выше уровня укладки дрен $k_1=k_2=0{,}000007$ *м/сек*, $\overline{q}=4{,}3$ *л/сек км*^{2} (по данным Э. А. Соовика), мощность активного слоя (в зоне, расположенной ниже горизонта укладки дрен) принята равной $a=0{,}8$ *м* и $A_р=6250$ (см. табл. 118). Используя эти параметры, получаем, что δ (по формуле (175в)) при $\gamma=0{,}60$ равна 1,56, а расстояние между дренами по формуле (175б) $E=3\cdot 1{,}56\cdot 6250\sqrt{\frac{0{,}000007}{4{,}3}}=$ $=37{,}3$ *м*.

Приведенные данные производственных опытов на полях с различными севооборотами в различных почвенных условиях показывают, что определение расстояний между дренами на основе принятых выше показателей (интенсивность осушения) дает в условиях Эстонской ССР вполне удовлетворительные результаты.

На основе сравнения кривых дренажного стока, построенных по данным полевых измерений в осушительных системах, с нормальной кривой, определяемой по формуле (190), можно также судить о соответствии работы этих систем требованиям, предъявляемым для производства сельскохозяйственных культур. В таких случаях, когда на осушенном участке кривая фактического дренажного стока не совпадает с нормальной кривой и располагается левее нее, отмечаются потери урожая и трудности в проходимости машин на осушенной территории в период посева и уборки.

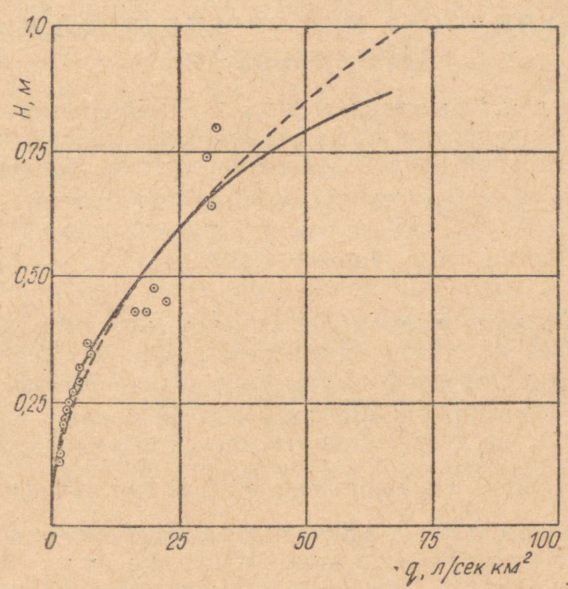


Рис. 62. Кривая дренажного стока осушенного участка опытной станции «Вяндра», — — — — нормальная кривая при $\bar{q}=8{,}5$ *л/сек км²* и $A_p=7400$.

На рис. 62 в качестве примера показана (сплошной линией) кривая дренажного стока осушенного участка опытной станции «Вяндра» при расстоянии между дренами 15 *м*. Сравнение этой кривой с нормальной кривой при $A_p=7400$ и $\bar{q}=8{,}5$ показывает удовлетворительное совпадение в нижних их частях. Следовательно, данная опытная система соответствует предъявляемым ей требованиям, что было показано и выше.

ГЛАВА III

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДУЛЕЙ СТОКА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОСУШИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

§ 11. МОДУЛИ СТОКА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДИАМЕТРА ДРЕНАЖНЫХ ТРУБ

Диаметр дренажных труб определяется по стоку, поступающему в дренаж при максимальном напоре. Из формулы для нормальной кривой дренажного стока следует, что при $H_{макс} = 1{,}0$ *м* и $\overline{q} = 9$ *л/сек км*^{2}, модуль стока равен

$$q_{р.макс} = \frac{4 \cdot 1{,}0^2}{A_р^2}.$$

В этой формуле максимальный расчетный сток $q_{р.макс}$ выражен в *м*^{3}*/сек м*^{2}. Чтобы определить $q_{р.макс}$ в *л/сек км*^{2}, необходимо правую сторону формулы умножить на коэффициент 10^9. Выше было сказано, что при значениях $\overline{q}$ больше или меньше 9 *л/сек км*^{2} $A_р$ следует умножить на гидрологический коэффициент $\sqrt{\frac{9}{\overline{q}}}$, где 9 и $\overline{q}$ выражены в *л/сек км*^{2}. Таким образом, формула для модуля дренажного стока, на основе которого можно определить диаметр дренажных труб, принимает следующий вид:

$$q_{р.макс} = \frac{4 \cdot 1{,}0^2 \cdot 10^9 \overline{q}}{9A_р^2} = \frac{0{,}445 \cdot 10^9 \overline{q}}{A_р^2}, \qquad (191)$$

где $q_{р.макс}$ и $\overline{q}$ выражены в *л/сек км*^{2}.

§ 12. МОДУЛИ СТОКА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ КАНАЛОВ И ВОДОПРИЕМНИКОВ

При глубине грунтовых вод 0,45 *м* модуль дренажного стока, по нормальной кривой стока, равен

$$q_{0{,}45} = \frac{4(1-0{,}45)^2 \cdot 10^9 \overline{q}}{9A_р^2} = \frac{0{,}134 \cdot 10^9 \overline{q}}{A_р^2}. \qquad (192)$$

Из условия, что при глубине грунтовых вод $>0{,}45$ *м* кривая стока должна быть близка к нормальной кривой, вытекает, что уровни воды в магистральных каналах и водоприемниках необходимо проектировать так, чтобы при данной глубине грунтовых вод (0,45 *м*) не создавалось подпора в осушительных системах. Поэтому при уровне воды, близком к уровню укладки устьев коллекторов, магистральные каналы и водоприемники должны пропускать расход, соответствующий модулю стока, выражаемого формулой (192). Однако сток с более значительных по площади водосборов магистральных каналов и водоприемников зарегулирован больше, чем с малых водосборов осушительных систем. Поэтому в весенний посевной период модуль стока с водосборов магистральных каналов и водоприемников больше, чем с осушительных систем. Наоборот, в период летне-осенних паводков модуль стока с осушительных систем при глубине грунтовых вод 0,45 *м* обычно больше, чем в магистральных каналах и водоприемниках.

Для подтверждения сказанного определен модуль стока с осушенного торфяного участка и с водосбора водоприемника в период весеннего посева и во время летне-осенних паводков. Если значение расчетного показателя интенсивности осушения принять равным $A_р=7500$, то при глубине грунтовых вод в 0,45 *м* модуль стока (по формуле (192) будет равен

$$q_{0{,}45}=\frac{0{,}134\cdot 10^9\,\bar{q}}{7500^2}=2{,}38\,\bar{q}.$$

При использовании формулы (24) посевного стока

$$k_{z\,P+20\%}=(k_{\text{вес. макс}\,P\%}-k_{\text{гр}})\left(\frac{t_c-z}{t_c}\right)^n+k_{\text{гр}},$$

где $k_{\text{вес. макс}\,P\%}$ вычисляется по формуле (6а), при $k_{95\%}=0$ и $r=-0{,}04$ (по формуле (7в), где $A_{\text{но}}=100\%$, $z=16$ суткам, $k_{\text{гр}}=0$, t_c вычислялся по формуле (19), $n=3{,}7$ и $P=2\%$, определен $k_{z_{16}2+20\%}=2{,}24$. (См. табл. 89, где при равных условиях, при $P=2\%$, $q_{z_{16}P+20\%}=9\,k_{z_{16}P+20\%}=20{,}2$ или $k_{z_{16}P+20\%}=\frac{20{,}2}{9}=2{,}24$.)

В водоприемнике, площадь водосбора которого $F=200$ *км*^{2}, $k_{95\%}=0{,}11$, $r=0{,}04$, $z=16$, $k_{\text{гр}}=0{,}2$, $n=3{,}7$ и $P=2\%$, $k_{z_{16}2+20\%}$ по формуле (24) равен 2,78.

Приведенный расчет показывает, что при данных условиях сток (в единицах среднего годового стока) в период посева в водоприемнике на 24% больше, чем с осушительной системы.

В летне-осенний период во время спада паводка, определяемого по формуле (22), где летне-осенний максимальный сток определен по формуле (11), при $k_{95\%}=0$, $r_л=-0{,}14$, $z_л=6$ суткам, $k_{\text{гр}}=0$, $n=5{,}0$ и $P=40\%$ значение $\kappa_{z_л 40\%}=2{,}13$.

В водоприемнике, площадь водосбора которого $F=200$ *км*^{2}, $r_л=-0{,}15$, $k_{95\%}=0{,}11$, $z_л=6$, $k_{гр}=0{,}2$, $n=5{,}0$ и $P=40\%$, по формуле (22) (где вместо $k_{вес.\,макс\,P\%}$ взято $k_{летне\text{-}ос.\,макс\,P\%}$) $k_{z_л 40\%}=1{,}73$.

Отсюда следует, что при летне-осенних паводках сток в данном водоприемнике на 23% меньше стока с осушительной системы.

Таким образом, сток с осушительной системы, расположенной на торфяных почвах, при глубине грунтовых вод 0,45 *м* в весенний период примерно во столько же раз меньше стока в магистральном канале, во сколько в летне-осенний период сток из осушительной сети больше стока в водоприемнике. Однако обеспеченность данного стока в посевной период равна обеспеченности весеннего максимального стока (2%) плюс 20% за счет выпадающих дождей в период весеннего спада. Таким образом, она равна 2+20=22%, а в летне-осенний период — 40%.

Из сказанного можно заключить, что разница модулей стока в осушительной системе и водоприемнике в среднем незначительна и не позволяет снизить расчетные модули стока. Отсюда следует, что для обеспеченности свободного стока с осушительных систем при глубине грунтовых вод 0,45 *м* и больше магистральные каналы и водоприемники (при горизонте воды, равном отметке дна устьев коллекторов) должны пропускать расходы, соответствующие модулю стока, определенному по формуле (192) $q_{0{,}45}=0{,}134\cdot 10^9\overline{q}:A_p^2$.

На рис. 63 показаны кривые стока водоприемника реки Тыдва, протекающей по осушенной территории совхоза «Саку». Площадь водосбора реки Тыдва в данном створе равна 186 *км*^{2}, $k_{95\%}=0{,}11$, $r_л=-0{,}15$ и средний многолетний годовой модуль стока $\overline{q}=8{,}6$ *л/сек км*^{2}. Осушительные системы около водоприемника расположены на низинном торфянике с толщиной слоя торфа, равной 0,9 *м*. Коэффициент фильтрации торфа на глубине 0,9 *м* равен 0,0018 *см/сек*. Участок осушен открытыми канавами глубиной 1,70 *м* и с расстояниями между ними в 150 *м*. Ширина дна канав равна 0,4 *м* и уклон их откосов составляет 1—1,5. Канавы врезаны на 0,80 *м* в песок, и толщина слоя песка ниже дна канав составляет 0,90 *м*. Коэффициент фильтрации песка равен 0,01 *см/сек*.

Самая нижняя сплошная линия на рис. 63 представляет кривую стока в водоприемнике. Уровни воды в водоприемнике отсчитываются от средней отметки поверхности почвы осушенного участка.

Вторая снизу сплошная линия является кривой стока с осушительной системы в случае отсутствия подпора со стороны водоприемника. Кривая построена по формуле

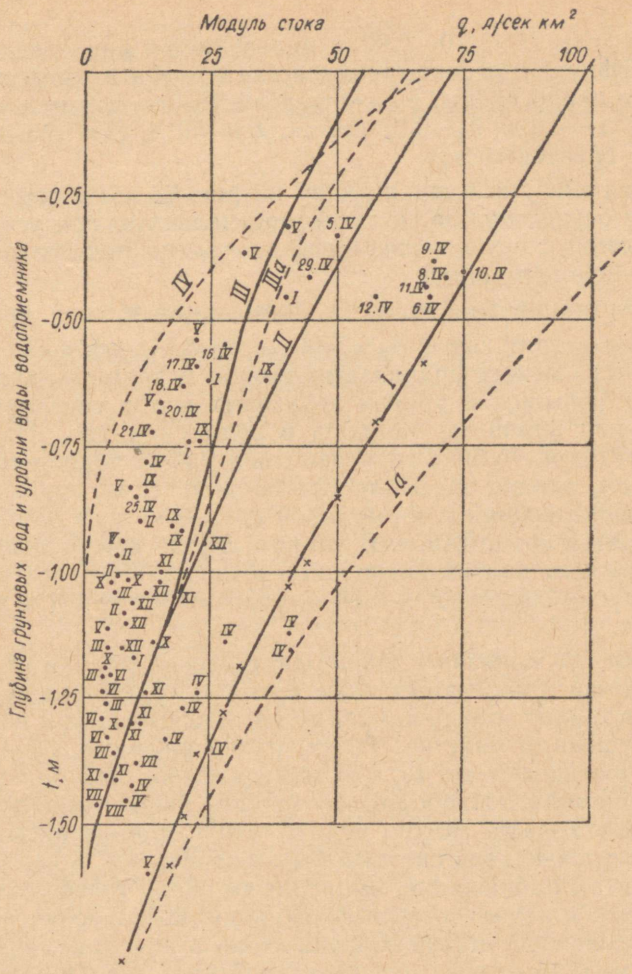


Рис. 63. Кривые стока водоприемника реки Тыдва и прилегающей осушительной системы совхоза «Саку»:

I — кривая стока в водоприемнике, *Ia* — кривая для учета расхождений в размерах стока в водоприемнике и осушительной системе, *II* — кривая стока из примыкающей к водоприемнику осушительной системы без влияния подпора со стороны водоприемника, *III* — кривая стока с осущительной системы с учетом влияния подпора, *IIIa* — предполагаемая форма кривой стока с осушительной системы; *IV* — нормальная кривая стока при $\bar{q}$=8,6 *л/сек км²* и *A* =7500. Данные наблюдений с октября 1961 по май 1964 г. на осушительной системе совхоза «Саку», расположенной на торфяных почвах. Цифры у точек обозначают месяц наблюдений.

$$q = \frac{4 \cdot 10^7 k_1 H^2}{E^2} + \frac{6{,}28 \cdot 10^7 \gamma a k_2 H}{E^2},$$

где k_1 — при $H > 1{,}70 - 0{,}90$ *м* определяется как среднее значение коэффициентов фильтрации песка и торфа, в середине междудренья и около дрены, γ — определяется по формуле А. Н. Костякова, $a = 0{,}9$ *м*, $k_2 = 0{,}01$ *см/сек*, $E = 150$ *м*, $H = 1{,}70$ — t и t — глубина грунтовых вод.

Третья снизу сплошная линия на рис. 63 изображает кривую стока из осушительной системы, определенную при условии, что модуль стока с осушительной системы равен модулю стока с водосбора водоприемника.

Четвертая кривая является нормальной кривой дренажного стока, соответствующей $A_p = 7500$ и $\overline{q} = 8{,}6$ *л/сек км*^{2}.

Разность между ординатами второй и третьей кривой представляет повышение уровня грунтовых вод в середине междудренья под влиянием подпора в водоприемнике. Из рисунка видно, что при глубине грунтовых вод 0,45 *м* подпор составляет уже 26 *см*, однако здесь это вполне допустимо, так как третья кривая пересекается с нормальной кривой не на глубине 0,45 *м*, а на глубине лишь 0,18 *м*. В данном случае при больших глубинах грунтовых вод интенсивность осушения больше требуемой, а при глубинах, меньших 0,18 *м*, условия могут быть хуже требуемых.

На рис. 63 показаны также фактические модули стока в водоприемнике и соответственные глубины грунтовых вод в середине расстояния между канавами на прилегающем к водоприемнику осушенном участке. Точки, расположенные левее третьей кривой, указывают на то, что модуль стока был большим, чем в водоприемнике. Наоборот, по точкам, расположенным правее от третьей кривой, можно судить, что в данное время модуль стока с осушительной системы был меньше, чем в водоприемнике. По датам наблюдений, выписанным около точек, можно установить, что в начале весеннего периода, когда почва находится в промерзшем состоянии, модуль стока в водоприемнике всегда больше модуля стока с осушительной системы. После оттаивания почвы модули паводкового стока с талых почв в зимние месяцы, а также в летне-осенний период с осушительной системы обычно больше, чем в водоприемнике.

Если замеренные одновременно модули стока с осушенной системы больше, чем в водоприемнике, то влияние подпора со стороны водоприемника меньше максимального и такие точки должны располагаться между второй и третьей кривой (см. рис. 63). Таким образом, фактическая кривая стока с данной осушительной системы должна располагаться между второй и третьей кривой. Только в начальный период весенних паводков,

до оттаивания замерзшей почвы, точки будут находится левее этой кривой.

С целью исследования расположения фактической кривой стока осушительной системы определены модули летне-осеннего максимального стока с равной обеспеченностью в осушительной системе и водоприемнике. Для расчета была использована формула (11)

$$k_{\text{летне-ос. макс } P\%} = \left[\frac{26-11{,}5\lg(P+1)}{(F+1)^{0{,}11}}\right]^{1-k_{95\%}} - r_{л}$$

и

$$q_{\text{летне-ос. макс } P\%} = k_{\text{летне-ос. макс } P\%}\,\bar{q} \qquad (11а)$$

При определении среднесуточного модуля летне-осеннего максимального стока с осушительной системы F был принят равным 100 *км*², $k_{95\%}=0$, $r_{л}=-0{,}14$ и $\bar{q}=8{,}6$ *л/сек км*².

Для водоприемника было принято, что $F=186$ *км*², $k_{95\%}=-0{,}11$, $r_{л}=-0{,}15$ и $\bar{q}=8{,}6$ *л/сек км*².

На рис. 63 прерывистой линией I*а* показана условная кривая стока водоприемника для случая, когда модули летне-осеннего среднесуточного максимального стока в осушительной системе и в водоприемнике при равной обеспеченности были бы равны. Эта кривая получена таким путем, что при модулях среднесуточного летне-осеннего максимального стока в водоприемнике и в осушительной системе, определенных по формуле (11а), при равном проценте обеспеченности P, уровень воды в водоприемнике и осушительной системе считается равным. Расхождение между кривыми I и I*а* показывает увеличение напора грунтовых вод в осушительной системе или уменьшение подпора со стороны водоприемника вследствие неравенства модулей стока в осушительной системе и водоприемнике.

Если в водоприемнике модуль стока меньше, чем в осушительной системе, и напор грунтовых вод равен расхождению между кривыми II и I*а* на рис. 63, то кривая стока с осушительной системы принимает вид III*а*.

Из рис. 63 видно, что в данном случае при максимальном стоке с осушительной системы повышение уровня грунтовых вод, с учетом неравенства модулей летне-осеннего среднесуточного максимального стока в водоприемнике и осушительной системе, составляет 0,15—0,18 *м*.

При этом в осушительной системе обеспечивается модуль максимального стока, равный 64 *л/сек км*², являющийся близким к расчетному (см. нормальную кривую IV). Такое положение получается потому, что при глубине грунтовых вод 0,45 *м* кривая стока с осушительной системы находится на 0,45 *м* ниже нормальной. Поэтому при использовании осушенного участка

под культурные пастбища и сенокосы расстояние между осушительными канавами можно было бы увеличить. Однако в случае торфяных почв необходимо иметь в виду, что после первичной осадки и уплотнения торфа глубина канав постепенно уменьшается. Это уменьшение, связанное с минерализацией верхних слоев торфа, составляет обычно 1—2 *см* в год. Кроме того, ожидается уменьшение коэффициента фильтрации вследствие уплотнения торфа. Таким образом, можно считать, что наличие запаса в глубине осушительных канав или в расстояниях между осушителями в данном случае вполне обосновано. На минеральных почвах такой запас был бы излишним.

С целью более рационального использования осушенных торфяников в первые годы после освоения на них можно возделывать пропашные культуры, так как в это время осушители еще имеют некоторый запас глубины.

Возникает вопрос, в какой мере можно уменьшить потери урожая от затопления картофеля и озимых зерновых, если уменьшить подпор в устьях осушителей при пропуске максимального расчетного стока.

Для решения этого вопроса необходимо, с одной стороны, выяснить увеличение потерь урожая от уменьшения пропускной способности водоприемника и, с другой, определить уменьшение эксплуатационных расходов водоприемника вследствие уменьшения расчетного (максимального) стока, т. е. требуется знание двух функций

$$y_п = f_1(q_{р.макс})$$

и

$$y_в = f_2(q_{р.макс}),$$

где $y_п$ — годовые потери урожая от затопления на 1 *га*;
$y_в$ — годовая эксплуатационная стоимость водоприемника на 1 *га* осушаемой территории;
$q_{р.макс}$ — максимальный расчетный модуль стока.

Используя эти функции в узких интересующих нас пределах изменения $q_{р.макс}$, можно отказаться от определения вида данных функций и определить только тангенсы касательных к кривым в соответствующих пределах $\Delta y_п : \Delta q_{р.макс}$ и $\Delta y_в : \Delta q_{р.макс}$.

В табл. 90 и 101 представлены потери урожая озимых зерновых и картофеля вследствие затопления при различных показателях интенсивности осушения. Зная показатель интенсивности осушения, можно определить $q_{р.макс}$ по формуле (191). В табл. 124 показаны потери урожая от затопления при $A=7800$ и 9000 или $q_{р.макс}=66$ и 49 *л/сек км²*. Если $\overline{q}=9$ *л/сек км²*, получаем их из табл. 90 и 99.

Для определения годовых эксплуатационных затрат по водо-

приемнику на 1 *га* осушенной территории при максимальных расчетных модулях стока 66—49 *л/сек км*^{2} составлена табл. 125. Для получения приведенных в этой таблице величин выбран водоприемник осушительной системы совхоза «Саку» с площадью водосбора $F=186$ *км*^{2}. Площадь осушенного участка, находящаяся в зоне подпора от водоприемника f, равна около 300 *га*. За площадь, находящуюся под влиянием подпора водоприемника, принята территория, высота поверхности которой меньше 0,9 *м* над уровнем воды в водоприемнике при модуле стока $\frac{0{,}445 \cdot 10^9 \cdot 9}{9000^2} = 49$ *л/сек км*^{2}. Длина отрегулированного участка водоприемника составляет 4,1 *км*. Водоприемник имеет уклон дна, равный 0,00025. Общий объем вынутого грунта при регулировании водоприемника составил 34670 *м*^{3}, что на 1 *га* подтопляемой территории дает 115,6 *м*^{3} со стоимостью 0,63 *руб/м*^{3}.

Таблица 124

Потери урожая озимых зерновых и картофеля вследствие затопления на торфяных почвах (при $\bar{q}=9$ *л/сек км*^{2})

Интенсивность осушения A	Модуль максимального стока $q_{р.макс}$ *л/сек км*^{2}	Потери урожая, % полного урожая		
		ржи	картофеля	Всего
7800	66	1,9	2,9	4,8
9000	49	4,0	4,9	8,9
$\Delta q_{р.макс} =$	17 $\Delta y=$	—2,1	—2,0	—4,1

Годовые амортизационные и эксплуатационные расходы по водоприемнику были приняты равными 5% строительной стоимости.

При модуле стока 66 *л/сек км*^{2} уровень воды в водоприемнике находится на 0,57 *м* ниже поверхности подтапливаемого участка (см. рис. 63, кривая I). Если уменьшить модуль расчетного максимального стока до 49 *л/сек км*^{2}, уровень воды в водоприемнике оставить прежним (0,57 *м* ниже поверхности почвы), то объем вынимаемого грунта уменьшится на 15000 *м*^{3} и составит на 1 *га* подтапливаемой территории $(34670-15000):300=65{,}5$ *м*^{3}.

Из рис. 63 видно, что при полном затоплении сечения водоприемника пропускается 100 *л/сек км*^{2}, или в 1,5 раза больше расчетного максимального стока.

В данном случае отношение площади водосбора к подтапливаемой площади составляет $F:f=183:3=62$. В табл. 125 пока-

Таблица 125

Годовые эксплуатационные затраты по водоприемнику р. Тыдва на 1 *га* подтапливаемой территории (в руб.)

Расчетный летне-осенний максимальный сток		Объем земляных работ водоприемника на 1 *га* подтапливаемой территории при различных отношениях $F:f$, $м^3$			Годовая эксплуатационная стоимость водоприемника на 1 *га* подтапливаемой территории ($\Delta y_в$) при различных отношениях $F:f$, руб.		
Обеспеченность, %	Модуль, *л/сек км²*	1	31	62	1	31	62
17	66	1,87	57,8	115,6	0,058	1,82	3,63
25	49	1,06	32,8	65,5	0,033	1,03	2,06
$\Delta q_{р.макс} = 17$				$\Delta y_в = 0{,}025$	0,79		1,57

заны изменения годовых эксплуатационных расходов по водоприемнику $\Delta y_в$ при различных отношениях площади водосбора водоприемника к подтапливаемой площади.

Как видно из табл. 125, изменение эксплуатационных расходов по водоприемнику $\Delta y_в$ при изменении модуля расчетного максимального стока с 66 до 49 *л/сек км²* зависит от отношения $F:f$ и определяется в данном случае уравнением $\Delta y_в = 0{,}025 \frac{F}{f}$, где угловой коэффициент $0{,}025 = \frac{0{,}025}{1} = \frac{0{,}79}{31}$, т. е. равен годовой эксплуатационной стоимости водоприемника на 1 *га* площади водоприемника, или

$$\frac{\Delta y_в}{\Delta q_{р.макс}} = \frac{0{,}025F}{17f} = 0{,}0015 \frac{F}{f}.$$

На основе табл. 124 можно установить, что при уменьшении максимального дренажного стока с 66 до 49 *л/сек км²* потери урожая от затопления озимой ржи увеличиваются на 2,1%, а картофеля на 2,0% полного урожая. Если считать, что стоимость урожая ржи на 1 *га* составляет 200 руб. и картофеля — 450 руб., то потери ржи в данном случае равны $\Delta y_р = 200 \cdot 2{,}1 : 100 - 4{,}1$ *руб/га* и картофеля $\Delta y_{ка} = 450 \cdot 2{,}0 : 100 = 9{,}0$ *руб/га*.

Отсюда

$$\frac{\Delta y_р}{\Delta q_{р.макс}} = \frac{4{,}1}{17} = 0{,}24 \quad \text{и} \quad \frac{\Delta y_{ка}}{\Delta q_{р.макс}} = \frac{9{,}0}{17} = 0{,}53.$$

Увеличение модуля расчетного максимального стока при определении поперечного сечения водоприемника не обосновано в том случае, если увеличение стоимости земляных работ ($\Delta y_в : \Delta q_{р.макс}$) при этом больше, чем уменьшение потерь урожая от затопления ($\Delta y_р : \Delta q_{р.макс}$). В таком случае на подтапливаемой территории нецелесообразно выращивать культуры, страдающие от подтопления.

При выращивании озимой ржи увеличение модуля расчетного максимального стока обосновано, если

$$\frac{\Delta y_р}{\Delta q_{р.макс}} \geqslant \frac{\Delta y_в}{\Delta q_{р.макс}}, \quad 0{,}24 \geqslant 0{,}0015 \frac{F}{f} \text{ и } \frac{F}{f} \leqslant 160,$$

а для картофеля при

$$0{,}53 \geqslant 0{,}0015 \frac{F}{f} \text{ и } \frac{F}{f} \leqslant 353.$$

Приведенные соотношения показывают, что при использовании подтапливаемого участка под озимые и картофель создание подпоров в осушителях за счет уменьшения поперечных сечений водоприемника не обосновано, за исключением случаев, когда площадь подтопления представляет собой узкую полосу, расположенную вдоль водоприемника.

В этом случае, если доля озимых и картофеля в севообороте составляет примерно 30%,

$$\frac{\Delta y_п}{\Delta q_{р.макс}} = \frac{0{,}24 + 0{,}53\,30}{2 \cdot 100} = 0{,}115$$

и увеличение модуля расчетного максимального стока обосновано, если

$$\frac{\Delta y_п}{\Delta q_{р.макс}} \geqslant \frac{\Delta y_в}{\Delta q_{р.макс}}; \quad 0{,}115 \geqslant 0{,}0015 \frac{F}{f},$$

откуда $F : f \leqslant 77$.

На основе использования приведенной выше методики были определены представленные в табл. 126 отношения $F : f$ в почвах, подстилаемых водопроницаемыми слоями, при различных величинах площади водосбора водоприемника. При отношениях $F : f$ меньших, чем указано в табл. 126, потери урожая севооборота, где процент озимых и картофеля составляет около 30, больше, чем годовые расходы на дополнительное углубление водоприемника.

Основной расчет сечения водоприемника при составлении табл. 126 был проведен на основе модуля стока, определенного по формуле (192)

$$q = \frac{0{,}134 \cdot 10^9 \bar{q}}{A_p^2},$$

где было принято, что $A_p = 7800$ и $\bar{q} = 9$ *л/сек км²*.

При расчетном модуле стока, равном $q = 0{,}134 \cdot 10^9 \cdot 9 : 7800^2 = 20$ *л/сек км²*, уровень воды в водоприемнике принят на 1,40 *м* ниже его бровки, соответствующего в среднем глубине закладки устьев коллекторов.

Для выполнения условия, что затопления на прилегающем к водоприемнику осушенном участке начинались не ранее, чем примерно при модуле стока в осушительной системе определяемом по формуле (191), водоприемник должен пропускать расход, соответствующий модулю стока в осушительной системе:

$$q_{\text{р. макс}} = \frac{0{,}445 \cdot 10^9 \cdot 9}{7800^2} = 66 \text{ л/сек км}^2,$$

не создавая подпора в осушительной сети.

Процент обеспеченности P модуля стока 66 *л/сек км²* на основе формулы летне-осеннего максимального стока (11а)

$$q_{\text{летне-ос. макс } P\%} = \bar{q}\left[\frac{26 - 11{,}5 \lg(P+1)}{(F+1)^{0{,}11}}\right]^{1 - k_{95\%} - r_л}$$

в осушительных системах на торфяных почвах, где $F \leqslant 100$ *км²*, $k_{95\%} = 0$, $r_л = -0{,}14$ и $\bar{q} = 9$ *л/сек км²*, равен 26.

Модуль летне-осеннего максимального стока с обеспеченностью в 26% в водоприемнике, где $F = 186$ *км²*, $k_{95\%} = 0{,}11$, $r_л = -0{,}15$ и $\bar{q} = 9$ *л/сек км²*, по формуле (11а) равен 51,5 *л/сек км²*. Уровень воды при модуле стока 51,5 *л/сек км²*, по кривой I на рис. 63, равен 0,82 *м* ниже поверхности почвы. Учитывая, что расстояние между осушителями в данном случае меньше расчетного (так как кривая II находится ниже нормальной кривой IV), при составлении табл. 126 принято, что при обеспеченности летне-осеннего максимального стока с обеспеченностью в 26% уровень воды в водоприемнике находится на 0,9 *м* ниже его бровки.

В случае, если сечение водоприемника, определенное по основному требованию, при уровне воды 0,9 *м* ниже бровки пропускает летне-осенний максимальный сток с обеспеченностью в 26% или больше, то дополнительных углубительных работ в водоприемнике не требуется. Дополнительной работой по углублению водоприемника является, таким образом, разность между сечением водоприемника, определенным по пропуску максимального расчетного стока (с обеспеченностью в 26% при уровне воды 0,9 *м* ниже бровки), и сечением, установленным по основному расчетному модулю стока (по формуле (192) при

уровне устьев коллекторов 1,4 *м* ниже бровки), умноженным на длину участка водоприемника, подлежащего регулированию.

Для установления годовой эксплуатационной стоимости водоприемника на *км*² площади его водосбора необходимо определить относительную длину регулируемого участка водоприемника $l = L : F$, где L — фактическая длина регулируемого участка в данном месте.

По примеру осушительной системы совхоза «Саку», l около речки Тыдва принята равной 4,1 *км* : 186 *км*² = 0,022 *км* на 1 *км*² площади водосбора водоприемника.

Стоимость земляных работ s была принята, по упомянутому примеру, равной 0,63 *руб/м*³ и амортизационные и эксплуатационные исчисления принимались в размере 5% строительной стоимости.

Отношения $F : f$ в табл. 126 определены при различных величинах площади водосбора водоприемника и при продольных уклонах русла водоприемника $J = 0{,}00025$ и 0,001.

Таблица 126

Отношения площади водосбора водоприемника к подтапливаемой площади ($F : f$), при которых обосновано углубление водоприемника с целью использования подтапливаемых торфяников, подстилаемых песком, под полевые севообороты (при $s = 0{,}63$ *руб/м*³ и $l = 0{,}022$ *км/км*²)

Уклон	Площадь водосбора, *км*²					
	50	100	150	200	400	800
0,00025	810	181	116	82	54	35
0,001	∞	∞	338	183	98	64

Из табл. 126 видно, что в данных условиях требования для выращивания культур полевого севооборота удовлетворяются при площади водосбора водоприемника $F \leqslant 50$ *км*² без дополнительных руслоуглубительных работ. При уклоне водоприемника 0,001 такие дополнительные работы не требуются даже при $F \leqslant 100$ *км*².

На рис. 64 показаны кривые связи между отношением $F : f$, составленные на основе табл. 126.

Нижнюю кривую на рис. 64 при уклоне $J = 0{,}00025$ можно представить в виде гиперболы следующего типа:

$$\frac{F}{f} = \frac{13700}{F - 30}. \qquad (193)$$

Для верхней кривой при $J = 0{,}001$ можно записать

$$\frac{F}{f} = \frac{31200}{F - 30}.$$

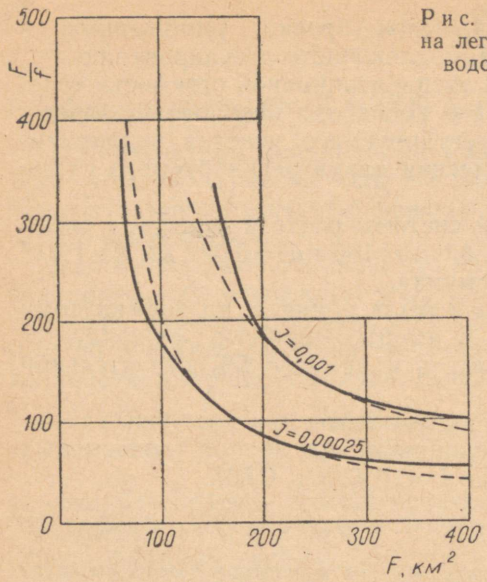


Рис. 64. Зависимость отношения $F:f$ на легких почвах от площади водосбора водоприемника при $s=0{,}63$ *руб/м*³ и $l=0{,}022$ *км/км*².

При увеличении уклона J в 4 раза (с 0,00025 до 0,001) параметр гиперболы увеличится в $31200=13700=2{,}28$ раза. Таким образом, этот параметр равен уклону водоприемника в степени n, где n определяется из уравнения

$$4{,}0^n=2{,}28 \quad \text{и} \quad n \lg 4{,}0=\lg 2{,}28,$$

откуда

$$n=\frac{\lg 2{,}28}{\lg 4{,}0}=0{,}60.$$

При уклоне $J=0{,}00025$ можно теперь записать, что

$$13700=0{,}00025^{0{,}60}x,$$

откуда

$$x=\frac{13700}{0{,}00025^{0{,}60}}=1{,}98\cdot 10^6$$

или $13700=1{,}98\cdot 10^6 J^{0{,}60}$.

Подставляя последнее выражение в уравнение (193), получим

$$\frac{F}{f}=\frac{1{,}98\cdot 10^6 J^{0{,}60}}{F-30}. \qquad (194)$$

Годовые эксплуатационные расходы по водоприемнику при составлении табл. 126 и рис. 64 были определены, исходя из

стоимости земляных работ в 0,63 *руб/м*³. При иной стоимости земляных работ эксплуатационные расходы по водоприемнику при определении значения параметра гиперболы в формуле (194) следует умножить на коэффициент $\frac{0{,}63}{s}$, где s — стоимость земляных работ при регулировании водоприемника в *руб/м*³.

При определении расходов на углубление русла водоприемника было принято, что относительная длина регулируемого участка l равна 0,022 *км* на 1 *км*² площади водосбора. При иной величине l параметр гиперболы в формуле (194) необходимо также умножить на коэффициент $\frac{0{,}022}{l}$, где l — относительная длина регулируемого участка водоприемника в *км/км*².

Таким образом, для отношения $F : f$ можно получить формулу следующего вида:

$$\frac{F}{f} = \frac{1{,}98 \cdot 10^6 \cdot 0{,}63 \cdot 0{,}022 \cdot f^{0{,}60}}{(F-30)sl}$$

или

$$F = \frac{30sl + \sqrt{900s^2l^2 + 0{,}11 \cdot 10^6 f^{0{,}60} fsl}}{2sl}, \qquad (195)$$

где F — площадь водосбора водоприемника, *км*²;
f — площадь подтапливаемого участка, *км*²;
s — стоимость земляных работ при регулировании водоприемника, *руб/м*³;
l — относительная длина регулируемого участка водоприемника, *км/км*².

Относительно формулы (195) следует заметить, что она действительна только в тех случаях, когда осушаемые почвы подстилаются хорошо проницаемыми слоями, а сверху, до глубины 0,9 *м*, почва состоит из менее проницаемых слоев. В таких условиях фильтрационные воды поступают в осушительную сеть, главным образом, через водопроницаемые нижние слои. При уменьшении напора грунтовых вод под влиянием подпора со стороны водоприемника увеличивается мощность нижнего действующего слоя. Поэтому приток в осушительную систему изменяется сравнительно мало, хотя напор может измениться значительно. Следовательно, подпор уровней воды в водоприемнике оказывает здесь на действие осушительной сети меньшее влияние, чем на слабопроницаемых почвах.

С помощью формулы (195) можно ориентировочно определить величину площади водосбора, когда подтапливаемые площади, подстилаемые хорошо водопроницаемыми слоями, обоснованно осушать под полевые севообороты и где целесообразно использование их под культурные сенокосы и пастбища. Если фактическая площадь водосбора водоприемника больше, чем F,

получаемая по формуле (195), то экономически необоснованно углублять русло водоприемника в степени, требуемой для выращивания в севообороте озимых, картофеля и корнеплодов. Если на таких площадях необходимо устранить влияние подтопления, то целесообразно осушать их польдером. Таким образом, формула (195) показывает также, в каких условиях при выращивании в севообороте озимых, картофеля и корнеплодов на пойменных участках, подстилаемых песками, целесообразно использовать польдерные системы.

Кривые на рис. 64 так же, как и данные табл. 126, показывают, что при площади водосбора водоприемника меньше 50 *км*^{2} условия для выращивания озимых и пропашных культур в зоне влияния подтопления водоприемника обеспечены без дополнительных работ, если сечение водоприемника определено по основному требованию. При площади водосбора водоприемника, колеблющегося в пределах от 100 до 200 *км*^{2}, имеются еще довольно благоприятные условия для использования подтапливаемых участков под полевые севообороты. При площади водосбора от 200 до 300 *км*^{2} и при уклоне $J=0{,}00025$ для выращивания в севообороте озимых и пропашных культур в зоне влияния подпора водоприемника, где почвы подстилаются песками, требуются отношения $F:f$ меньше, чем 82 и 55. При площади водосбора более 300 *км*^{2} углубление русла водоприемника с целью использования подтапливаемых площадей под полевые севообороты целесообразно только в редких случаях.

В том случае, если пойменные почвы подстилаются слабопроницаемыми слоями, создание условий для выращивания культур, чувствительных к затоплению, значительно труднее. Здесь при максимальном расчетном стоке невозможно допускать подпора в осушительной сети со стороны водоприемника, так как это вызывало бы значительное уменьшение стока из осушительной сети. Небольшой подпор может быть допущен только за счет различия размеров модуля летне-осеннего максимального стока в водоприемнике и в осушительной системе.

На рис. 63 влияние различия в размерах модуля стока в водоприемнике и осушительной системе представлено разностью ординат между кривыми I и I*a* (для случая осушительной системы совхоза «Саку» и водоприемника реки Тыдва). При модуле стока 66 *л/сек км*^{2} эта разность составляет 0,24 *м*. Используя в формуле (11) летне-осеннего максимального стока такие же параметры, какие были приняты для реки Тыдва и изменяя только величину площади водосбора F, получим график влияния различия размеров модуля стока на уменьшение подпора ΔH (рис. 65).

В почвах, подстилаемых песками, этот график не был использован. Здесь было учтено влияние неравности модулей стока

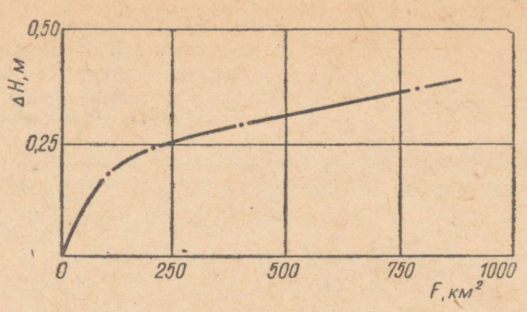


Рис. 65. Уменьшение подпора со стороны водоприемника в зависимости от площади его водосбора при модуле стока, равном 66 *л/сек км²*, в аналогичных условиях осушительной системы совхоза «Саку» и водоприемника реки Тыдва.

с помощью определения модуля стока в водоприемнике и осушительной системе при равном проценте обеспеченности. Однако при водосборах водоприемника с $F<100$ *км²* график дает бо́льшие возможности для интерполяции.

Если принять, что в почвах, подстилаемых слабопроницаемыми слоями, глубина осушительной сети и максимальный напор грунтовых вод равен 1,0 *м*, то при выращивании полевых культур уровень воды в водоприемнике при модуле стока 66 *л/сек км²* должен быть ниже бровки на 1,0 *м* минус ΔH, определенное по рис. 65.

При определении дополнительных руслоуглубительных работ по водоприемнику с целью создания возможностей для выращивания полевых культур, уровень воды в водоприемнике, при расчетном модуле стока, определяемом по формуле (192), в случае слабопроницаемых подпочв принят равным 1,20 *м*. Этот уровень зависит от глубины укладки устьев коллекторов, расположенных здесь значительно выше, чем в почвах, подстилаемых хорошо проницаемыми слоями, где целесообразно применять более глубоко заложенные осушительные системы.

В табл. 127 представлены отношения площади водосбора к осушаемой площади на почвах, подстилаемых средне- и слабопроницаемыми слоями, когда целесообразно проектировать водоприемники на пропуск летне-осеннего максимального стока. При определении отношений, представленных в табл. 127, были использованы стоимость земляных работ (s) и относительная длина регулируемого участка водоприемника (l), аналогичные тем, что были приняты при составлении табл. 126.

По данным табл. 127 составлен рис. 66.

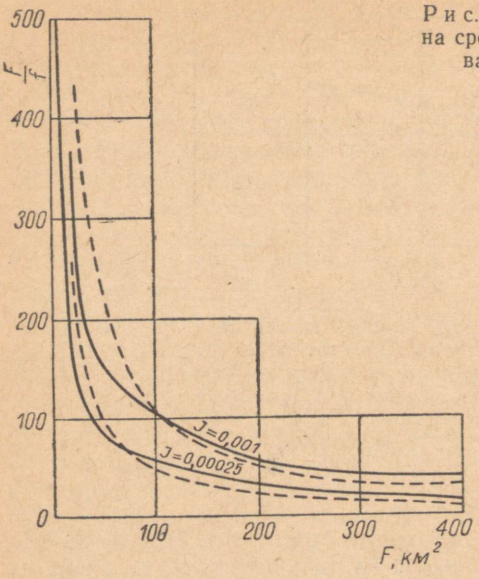


Рис. 66. Зависимость отношения $F:f$ на средне- и слабоводопроницаемых почвах от площади водосбора при $s=0{,}63$ *руб/м*³ и $l=0{,}022$ *км/км*².

Таблица 127

Отношения площади водосбора водоприемника к подтапливаемой площади ($F:f$), при которых обоснованно углубление водоприемника с целью использования подтапливаемых почв, подстилаемых средне- и слабопроницаемыми слоями, под полевые севообороты (при $s=0{,}63$ *руб/м*³ и $l=0{,}022$ *км/км*²)

Уклон	Площадь водосбора магистрального канала или водоприемника F, *км*²						
	2	5	20	50	100	200	400
0,00025	∞	554	156	86	60	35	18,5
0,001	∞	∞	375	158	107	59	36

Сравнение табл. 126 и 127 и рис. 64 и 66 показывает, что в случае, если глубина закладки коллекторов равна 1,2 *м* и почвы подстилаются слабопроницаемыми грунтами, требования, предъявляемые к магистральным каналам и водоприемникам осушительных систем полевыми севооборотами, выполнить значительно труднее, чем при закладке коллекторов на глубину в 1,4 *м* на почвах, подстилаемых песками. Если в первом случае дополнительное углубление русла требовалось при площади водосбора более 50 *км*², то во втором случае такие работы необходимы уже при площади водосбора более 2 *км*².

Кривые, приведенные на рис. 66, удовлетворяют следующему уравнению:

$$\frac{F}{f}=\frac{0{,}52\cdot 10^6 J^{0{,}56}}{F}. \qquad (196)$$

С учетом стоимости земляных работ и относительной длины регулируемого участка водоприемника получается аналогично случаю подстилания почв песками:

$$\frac{F}{f}=\frac{0{,}52\cdot 10^6\cdot 0{,}63\cdot 0{,}022\, J^{0{,}56}}{Fsl}. \qquad (197)$$

или

$$F=84{,}9\, J^{0{,}28}\sqrt{\frac{f}{sl}}. \qquad (198)$$

Следует отметить, что отношения $F:f$, представленные в табл. 126 и 127, определены для сравнительно благоприятных условий, когда относительная длина регулируемого участка водоприемника — малое число ($l=0{,}022$). Такие условия наблюдаются обычно в тех случаях, когда подтапливаемые участки расположены непосредственно вблизи (выше) участков, на которых водоприемник имеет хороший уклон и не требует регулирования.

Если водоприемник требует регулирования на всем его протяжении, то величина l может быть в десятки раз больше, чем было принято при составлении табл. 126 и 127.

Длина водоприемника зависит от формы водосбора. Если принять, что для заболоченного водосбора длина регулируемого участка водоприемника или длина главного русла равна $L=1{,}5\sqrt{F}$, то

$$l=\frac{1{,}5\sqrt{F}}{F}=\frac{1{,}5}{\sqrt{F}}. \qquad (199)$$

Подставляя в формулу (199) $F=50$ км², получим $l=1{,}5:\sqrt{50}=0{,}21$, т. е. l почти в 10 раз больше, чем было принято при составлении табл. 127. Если значение l увеличивается в несколько раз, то отношение $F:f$, вычисляемое по формуле (197), уменьшается во столько же раз. Таким образом, в полностью заболоченном водосборе, где $l=0{,}21$, отношения $F:f$ получаются в 10 раз меньше, чем представленные в табл. 127. Отсюда следует, что при регулировании водоприемника на полном его протяжении и при почвах, подстилаемых средне- и слабопроницаемыми грунтами, использование пойменных участков под полевые севообороты экономически целесообразно только в ограниченных случаях. Севообороты, содержащие озимые и картофель, целесообразно в данном случае помещать на территории, где осушители расположены выше уровня, соответствующего расчетному

максимальному стоку в водоприемнике, определенному по формуле (191). Такие полевые севообороты также целесообразно располагать в районе магистральных каналов с площадью водосбора, меньшей 5 *км*^{2}.

В том случае, если почвы подстилаются песками, при регулировании водоприемника на полном его протяжении отношения, приведенные в табл. 126, следует также уменьшить приблизительно в 10 раз. Следовательно, углубление русла водоприемника с целью обеспечения выращивания озимых и картофеля в севообороте экономически целесообразно также лишь в отдельных случаях. При площади водосбора, меньшей 50 *км*^{2}, глубине коллекторов более 1,40 *м* и мощности верхних менее проницаемых почв около 0,90 *м* условия для выращивания озимых и картофеля обеспечиваются без дополнительных работ по водоприемникам, сечение которых определено по основному расчетному расходу, соответственно модулю стока, вычисленному по формуле (192).

В тех случаях, если водоприемники требуют регулирования только на коротких участках, т. е. когда относительная длина регулирования водоприемника l является малым числом и равна около 0,02, углубление водоприемника может быть рекомендовано в пределах, приведенных в табл. 126 и 127.

Приведенные выше рассуждения дают основание прийти к выводу, что расчетный летне-осенний максимальный сток с осушительных систем на торфяных и песчаных почвах, соответственно показателям интенсивности осушения, представленным в табл. 118, для зерновых культур по формуле (191) равен

$$q_{\text{р. макс}} = \frac{0{,}445 \cdot 10^9 \overline{q}}{7000^2} = 9{,}1\overline{q}.$$

При этом уровень воды в водоприемнике должен располагаться не менее, чем на 0,9 *м* ниже осушаемой поверхности.

В осушительных системах на торфяных почвах, где $k_{95\%} = 0$, $r_л = -0{,}14$ и $F = 100$ *км*^{2}, летне-осенний максимальный сток при обеспеченности $P = 17\%$ по формуле (11) равен

$$k_{\text{летне-ос. макс } 17\%} = \left| \frac{26{,}0 - 11{,}5 \lg (17+1)}{100^{0{,}11}} \right|^{1{,}14} = 9{,}1$$

и

$$q_{\text{летне-ос. макс } 17\%} = 9{,}1\overline{q}.$$

В средних и тяжелых почвах

$$q_{\text{р. макс}} = \frac{0{,}445 \cdot 10^9 \overline{q}}{7400^2} = 8{,}1\overline{q}.$$

В осушительных системах на средних и тяжелых почвах, при $k_{59\%}=0$, $r_л=-0{,}26$ и $F=100$ *км*^{2}, летне-осенний максимальный сток при обеспеченности $P=31\%$ по формуле (11) равен

$$k_{\text{летне-ос. макс }31\%}=\left[\frac{26{,}0-11{,}5\lg(31+1)}{100^{0{,}11}}\right]^{1{,}26}=8{,}1$$

и

$$q_{\text{летне-ос. макс }31\%}=8{,}1\bar{q}.$$

При этом уровень воды в водоприемнике должен стоять не менее, чем на 1,0 *м* ниже поверхности осушаемой почвы.

Таким образом, осушенные почвы целесообразно использовать под зерновые севообороты в следующих условиях:

а) на мелких торфяниках, подстилаемых песками, где мощность торфа не менее 0,9 *м* и не более глубины закладки осушителей. Уровень воды в водоприемнике, соответствующий 17% обеспеченности летне-осеннего максимального стока, должен располагаться на высоте подошвы торфяного слоя или ниже его,

б) на мощных торфяниках или на маломощных торфяниках, или на маломощных песчаных грунтах, подстилаемых средне- и слабопроницаемыми грунтами, если уровень воды в водоприемнике, при пропуске расходов летне-осеннего максимального стока 17% обеспеченности остается на высоте дна осушителей или располагается ниже этого уровня,

в) на средних и слабопроницаемых минеральных почвах, если уровень воды в водоприемнике, при обеспеченности летне-осеннего стока в 31%, остается на высоте дна осушителей или располагается ниже этого уровня.

Однако углубление русла водоприемника с целью создания возможности использования пойменных территорий под зерновые севообороты с озимыми и картофелем целесообразно только в отдельных случаях.

Для установления пригодности участков под пропашные культуры можно пользоваться следующими критериями:

а) на мелких торфяниках, подстилаемых песками, при пропуске летне-осеннего максимального стока 7% обеспеченности, уровень воды в водоприемнике должен располагаться не выше границы раздела торфа и песка и не ниже 0,9 *м* от поверхности осушаемой почвы,

б) на глубоких торфяниках, на мелких торфяниках и легких почвах, подстилаемых средне- и слабопроницаемыми грунтами, при пропуске летне-осеннего максимального стока обеспеченностью в 7%, уровень воды в водоприемнике должен располагаться не выше отметки дна осушителей,

в) на средних и слабопроницаемых минеральных почвах, при пропуске летне-осеннего максимального стока с обеспеченностью в 17%, уровень воды в водоприемнике должен быть не выше дна осушителей.

Углубление русла водоприемника с целью использования пойменных участков под севообороты пропашных культур более обоснованно, чем в случае зернового севооборота. Выше было показано, что в этом случае отношение $F:f$ для картофеля равно 353, при тех же условиях для севооборота, где озимые и картофель занимают около 30%, отношение $F:f$ составляет 77. Поэтому отношения $F:f$, представленные в табл. 126 и 127, при севообороте, составленном из таких чувствительных к затоплениям культур, как картофель, следует умножить на коэффициент

Таблица 128

Расчетные показатели для проектирования осушительных систем в Эстонской ССР

Расчетный показатель	Севообороты культур					
	лугопастбищных		зерновых		пропашных	
	Почвы					
	торфяные и песчаные	средние и тяжелые минеральные	торфяные и песчаные	средние и тяжелые минеральные	торфяные и песчаные	средние и тяжелые минеральные
Показатель интенсивности осушения, A_p $м^{0,5}$ $сек^{0,5}$	7400	7800	7000	7400	5950	6250
Расчетный сток для определения диаметра дренажных труб	$8,1\bar{q}$	$7,3\bar{q}$	$9,1\bar{q}$	$8,1\bar{q}$	$12,6\bar{q}$	$11,4\bar{q}$
Величины расчетного стока для каналов и водоприемников при его пропуске на уровне нижней кромки устьев коллекторов	$2,44\bar{q}$	$2,20\bar{q}$	$2,74\bar{q}$	$2,44\bar{q}$	$3,81\bar{q}$	$3,44\bar{q}$
Расчетный процент обеспеченности летне-осеннего максимального стока для каналов и водоприемников. Пропуск расчетного расхода производится: а) в песчаных почвах при расположении уровней в канале ниже 0,9 *м* от поверхности осушаемой почвы, б) в средне- и слабопроницаемых грунтах при расположении уровней в канале ниже дна осушителей			17	31	7	17

353 : 77 = 4,6. В таком случае при определении площади F в формулах (195) и (198) величину f необходимо умножить на коэффициент 4,6.

На основе приведенных выше рассуждений составлена табл. 128, где представлены расчетные показатели, используемые при проектировании осушительных систем в Эстонской ССР.

Целесообразность использования осушенных земель под зерновые севообороты и пропашные культуры в непосредственной близости от магистральных каналов и водоприемников определяется на основе использования формул (195) и (198). При этом необходимо иметь в виду, что в случае пропашных культур подтопляемая площадь должна быть увеличена в 4,6 раза.

§ 13. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показатели, рекомендуемые для использования при проектировании осушительных систем, разработаны на основе исследований, проведенных главным образом на территории Эстонской ССР. Для определения потерь урожая от избытка влаги в почве были использованы исследования, проведенные на опытной базе «Тоома» [30], [43] и в совхозе «Ойдрема» [48]. Использование полученных результатов дало возможность определить связь между урожаем и уровнем грунтовых вод для первого и второго месяцев вегетационного периода. Эта связь не является тесной, однако позволяет в первом приближении определить потери урожая в зависимости от интенсивности осушения. Данные дальнейших опытов, проведенных на полях опытной базы «Карья», опытной станции «Вяндра» и совхоза «Тылла», показали приемлемость такой методики определения потерь.

Требования различных растений к водному режиму почвы, как известно, мало изменяются от климатических условий. Поэтому результаты определения потерь урожая от избытка влаги в почве при принятой интенсивности осушения, определенные для одного климатического района, по-видимому, могут быть использованы при производстве расчетов для других районов.

Потери урожая от запаздывания сроков посева и уборки в зависимости от продолжительности этого запаздывания могут быть различными в разных климатических условиях. Однако судить о том, как влияют климатические факторы на потери урожая при запаздывании сроков посева и уборки, трудно из-за отсутствия таких исследований. Можно предполагать, что влияние климатических факторов на указанные потери урожая в разных районах отличается незначительно, так как обычно везде необходимо соблюдение условия, что периоды посева и уборки не должны превышать 10—12 дней.

Таким образом можно считать, что требования растений к водному режиму почвы в разных климатических условиях изменяются в общем незначительно. Водный же режим почвы зависит главным образом от климатических факторов.

Для характеристики водного режима почвы в приведенных выше исследованиях были использованы данные по режиму уровней грунтовых вод и стоку с осушительных систем.

Основные параметры стока определялись по кривым обеспеченности месячного и суточного стока по месяцам вегетационного периода. Ординаты кривых обеспеченности были выражены в долях от годового стока. Такой прием позволяет расширить полученные формулы для вычисления ординат кривых обеспеченности стока в других климатических и гидрологических условиях, где внутригодовое распределение осадков и стока имеет аналогичный характер, но абсолютная величина осадков и стока может быть иной.

Первые месяцы вегетационного периода являются решающими в развитии растений. Распределение стока в этот период носит в различных районах обычно аналогичный характер, так как в это время происходит сработка запасов воды, накопленных за зимний период.

В осенний период, во время уборки, колебания в распределении стока имеют большие пределы. Однако потери урожая при уборке, отмеченные при проведении этих исследований, составляют лишь незначительную долю всех потерь.

Сказанное выше дает основание сделать вывод, что результаты данных исследований можно использовать в различных климатических и гидрологических условиях, в особенности в северных и северо-западных районах СССР, где гидрологические условия наиболее близки к условиям Эстонской ССР. Можно ожидать, что приведенные выше основы проектирования осушительных систем не потребуют дополнительных поправок при применении их в этих районах.

Для иллюстрации сказанного нами сопоставлены данные, полученные из других районов, с результатами исследований, проведенных в ЭССР.

В табл. 129 приведены данные Латвийского научно-исследовательского института мелиорации и гидротехники, полученные на Петерлаукской опытно-мелиоративной станции. Согласно этой таблице минимальная себестоимость продукции и максимальная рентабельность вложенных в дренаж средств имеет место при расстоянии между дренами, равном 22 *м*, и глубине закладки дрен, равной 1,5 *м*.

По данным П. Б. Свиклиса [31] для этого участка на глубине 0,25—0,50 *м* от поверхности земли частицы размером $<0{,}01$ *мм* составляют около 56—60%, а на глубине 0,50—0,90 *м* — около 66% общего объема грунта. Коэффициент фильтрации состав-

Экономические показатели осушения зерновых культур на глинистых почвах Петерлаукской опытно-мелиоративной станции Латвийской ССР (по данным Я. Я. Бергмана [8])

Глубина дрен, *м*	Расстояние между дренами, *м*	Урожай озимой пшеницы, *ц/га*	Себестоимость 1 *т* зерна, руб.	Чистый доход с 1 *га* при закупочной цене 11 руб/*ц*, руб.	Прирост чистого дохода на 1 *га* в результате дренажа, руб.	Стоимость гончарного дренажа на 1 *га*, руб.	Рентабельность вложенных в дренаж средств, %
0,9	22	22,8	72,5	85,6	21,2	359	5,9
	16	25,4	67,7	107,3	42,9	435	9,8
	10	27,0	68,5	112,2	47,7	604	7,9
1,2	22	29,0	60,2	134,4	70,0	439	15,9
	16	29,5	61,3	143,8	79,3	525	15,1
	10	30,0	64,9	135,4	71,0	715	9,9
1,5	22	30,7	59,1	156,4	92,0	520	17,7
	16	31,1	60,4	154,3	89,9	608	14,8
	10	31,6	64,8	142,7	78,3	826	9,5
На недренированном поле		19,4	76,6	64,4	—	—	—

ляет 0,0000005—0,0000014 *м/сек*. Годовой слой стока на опытном участке, по данным Я. Е. Уйска [37], равен 99,7 *мм*, что составляет 3,2 *л/сек км*^{2}.

Принимая, что коэффициенты фильтрации при глубине укладки дрен $h=1{,}50$ *м* в слоях, где расположены дрены, равны $k_1=k_2=0{,}0000005$ *м/сек*, $\overline{q}=3{,}2$ *л/сек км*^{2}, $\gamma=0{,}60$, $a=0{,}8$ *м* и $A_D=7400$, получим по формуле (175в) $\delta=2{,}41$ и расстояние между дренами по формуле (175б):

$$E=3\cdot 2{,}41\cdot 7400\sqrt{\frac{0{,}0000005}{3{,}2}}=21{,}1\ м.$$

Данное расстояние между дренами довольно близко к расстоянию, полученному на основе экономических предпосылок.

Вблизи города Архангельска на торфяниках заложены опытные участки с различными расстояниями между дренами и канавами [42]. Коэффициент фильтрации на участке «Зеленец» в слое торфа 0,10—1,0 *м* изменяется от 0,005 до 0,0002 *см/сек*. Подстилающие грунты имеют коэффициент фильтрации 0,00001—

—0,00006 *см/сек*. Коэффициенты фильтрации определялись методом откачки воды из скважины и вычислялись по формуле Доната с поправкой СНИИГиМ. По формуле Г. Д. Эркина, коэффициент фильтрации получается приблизительно в 9 раз меньше, чем по Донату с поправкой СНИИГиМ. Поэтому принимаем, что коэффициент фильтрации торфа, по Эркину, в среднем равен $k_1 = \frac{0{,}00005+0{,}000002}{2 \cdot 9} = 0{,}0000029$ *м/сек* и подстилающего грунта $k_2 = \frac{0{,}0000001+0{,}0000006}{2 \cdot 9} = 0{,}000000039$ *м/сек*. Если глубина укладки дрен равна 1,0 *м*, мощность торфа 1,0 *м*, $\bar{q} = 10$ *л/сек км*^{2} (по карте Б. Д. Зайкова, 1946 г.), то по формуле (175в) при $\gamma = 0{,}6$ и $a = 0{,}8$ *м*, $\delta = 0{,}91$. Так как величина коэффициента фильтрации торфа на глубине дрен неизвестна, то расстояние между дренами определяется по формуле (175б).

При использовании территории под культурные сенокосы, если $A_p = 7400$,

$$E = 3 \cdot 0{,}91 \cdot 7400 \sqrt{\frac{0{,}0000029}{10}} = 10{,}9 \text{ м}.$$

При зерновом севообороте, когда $A_p = 7000$,

$$E = 3 \cdot 0{,}91 \cdot 7000 \sqrt{\frac{0{,}0000029}{10}} = 10{,}3 \text{ м}.$$

В табл. 130 представлены данные об урожаях на осушенных дренажем опытных участках в пойме р. Двины.

Таблица 130

Урожайность сельскохозяйственных культур на осушенных дренажем торфяных участках в пойме Сев. Двины (по данным А. В. Шуравилина [42])

Участок	Расстояние между дренами, *м*	Многолетние и однолетние травы (сено)	Зерновые (овес, ячмень, озимая рожь)	Овощные (капуста, брюква)
		ц/га		
«Зеленец» (1959—1961 гг.)	20	44,3		
	30	41,5		
	40	39,8		
Опытное болотное поле (1934—1938 и 1957—1961 гг.)	10	40,0	24,3	367,6
	20	48,8	23,5	366,4
	30	50,7	22,5	351,5

Некоторые данные экономических расчетов в статье А. В. Шуравилина приводятся только при расстоянии между дренами,

равном 20 *м*. В выводах статьи сказано, что при осушении пойменных болот Европейского Севера рекомендуются расстояния между дренами для пропашных и зерновых культур 10—20 *м*, для пастбищ 30 *м* и для лугов 40 *м*. Эти выводы сходятся с нашими данными для зерновых культур. Однако увеличение урожая трав на опытном болотном поле при увеличении расстояний между дренами, по-видимому, не является закономерным результатом.

Поэтому рекомендации, сделанные на основе этих данных, требуют уточнения.

Приведенные данные показывают, что расчетные показатели для проектирования осушительных систем, представленные в табл. 128, могут применяться в различных климатических условиях.

Из зарубежных данных об интенсивности осушения представляет интерес опыт осушения в Нидерландах.

И. Весселинг [50] приводит данные по одному такому опытному участку. Расстояние между дренами на участке I составляло 17 *м*, на участке II — 30 *м* и на участке III — 30 *м*. Глубина укладки дрен колебалась от 0,90 до 1,2 *м*. Коэффициенты фильтрации, определенные по методу восстановления уровня грунтовых вод в скважине, представлены в табл. 131.

Таблица 131

Коэффициенты фильтрации на опытном участке в Нидерландах

Участок	Глубина, *м*	Коэффициент фильтрации, *м/сутки*	Глубина, *м*	Коэффициент фильтрации, *м/сутки*
I	0,95—1,45	0,53	0,95—1,90	0,23
	0,95—1,40	0,58	0,95—1,90	0,29
	0,95—1,35	0,47	0,95—1,85	0,43
II	1,00—1,40	0,14	1,00—1,90	0,35
	1,00—1,35	0,13	1,00—1,95	0,27
	1,00—1,40	0,11	1,00—1,95	0,27
III	0,95—1,35	0,25	0,95—1,90	0,26
	0,95—1,30	0,24	0,95—1,90	0,30
	0,95—1,40	0,26	0,95—1,90	0,25

В табл. 132 показаны теоретические расстояния между дренами, определенные по формуле Хоогхаудта

$$l^2 = \frac{8K_0 d m_0 + 4K_в m_0^2}{s},$$

где l — расстояние между дренами, *м*,
K_0 — коэффициент фильтрации слоев, расположенных ниже дрен, *м/сутки*,
$K_в$ — коэффициент фильтрации слоев, расположенных выше дрен, *м/сутки*,
m_0 — напор грунтовых вод, *м*,
s — слой стока, *м/сутки*,
d — толщина эквивалентного слоя ниже дрен (определяется по таблице Хоогхаудта).

Таблица 132

Расстояние между дренами на опытном участке в Нидерландах

Участок	Фактическое	Теоретическое по Хоогхаудту	По нашим расчетам
I	17	16	24,6
II	30	13,5	12,9
III	30	14,5	18,2

Примечание. Расстояния между дренами определены по формуле Хоогхаудта при средней глубине дрен, равной 1,0 *м*, $m_0=0{,}5$ *м* и $s=0{,}007$ *м/сутки*.

На основе формул (175б) и (175в) при $A_р=7400$, $\gamma=0{,}60$, $a=0{,}80$ и $\overline{q}=9$ *л/сек км²* определены расстояния между дренами, представленные в последней графе табл. 132. При этом коэффициент фильтрации k_1 для каждого участка был принят как средний из трех значений коэффициентов фильтрации, определенных в слое 0,95—1,45 *м*. Величина k_2 для первого участка определена как среднее из всех шести значений коэффициентов фильтрации, измеренных на данном участке. Для второго и третьего участка k_1 было принято равным k_2. Здесь более глубокие слои имеют большую водопроницаемость, чем слои, в которых расположены дрены. Поэтому слои ниже дрен приняты равными коэффициенту фильтрации слоев, в которые уложены дрены.

Данные табл. 132 показывают, что на втором участке расчетное расстояние между дренами по Хоогхаудту больше, чем по нашим расчетам. На первом и третьем участке, наоборот, расстояния, вычисленные по предлагаемым нами формулам, в 1,5—1,25 раза больше принятых в Нидерландах. Эти расхождения обусловлены различием величин расчетного модуля стока и иными принципами учета влияния слоев, находящихся ниже горизонта укладки дрен. Нам не известен модуль годового стока на опытном участке в Нидерландах. Принимая, что на данном опытном участке $\overline{q}=9$ *л/сек км²*, получим, что модуль расчетного стока, при глубине грунтовых вод 0,5 *м*, равен $\frac{0{,}007\cdot 10^9}{8{,}64\cdot 10^4}=81$ *л/сек км²* =

$\frac{81}{9} = 9\overline{q}$. По табл. 128 величина расчетного модуля стока для полевого севооборота на средних и тяжелых почвах равна 2,44, т. е. в 3,7 раза меньше, чем в Нидерландах. Так как расстояние между дренами изменяется обратно пропорционально квадратному корню из величины расчетного стока, то расстояния между дренами, вычисленные по нашим формулам, в связи с меньшей величиной расчетного стока должны быть в $\sqrt{3,7} = 1,92$ раза больше, чем в Нидерландах. Однако вследствие разницы в способах учета влияния нижних слоев расстояния между дренами при одних и тех же почвенных и гидрогеологических условиях, по данным приведенного выше примера, в среднем только на 30% меньше, чем по нашим расчетам. Учитывая, что на полях в Нидерландах выращивают также пропашные культуры, такое расхождение в показателе интенсивности осушения является вполне объяснимым.

В ФРГ расстояние между дренами определяется по графику, помещенному в Наставлении по дренажу (DJN 1185) [45]. В табл. 133 показаны расстояния между дренами для разных почвенных условий при глубине укладки дрен 1,0 *м* и при сумме средних годовых осадков 600 *мм*.

Таблица 133

Расстояние между дренами по графику Наставления по дренажу (DJN 1185) в ФРГ при глубине укладки дрен 1,0 *м*, сумме средних годовых осадков 600 *мм* и уклоне местности менее 2%

Грунт	Размеры частиц, %			Расстояние между дренами, *м*	
	<0,02 *мм*	<0,01 *мм*	<0,002 *мм*	по DJN1185	по нашим расчетам
Песок	10	7	4	22	38
Суглинистый песок	25	20	12	15	27
Песчаный суглинок	35	26	17	12,5	23
Суглинок	45	36	24	11	18
Глинистый суглинок	57	45	31	9,5	14,5
Глина легкая	72	60	45	8	10

На основе материалов по определению коэффициента фильтрации и механического состава почвы для условий Эстонской ССР можно предложить следующую формулу:

$$k = \frac{0.000018}{10^{0,022D}}, \qquad (200)$$

где k —коэффициент фильтрации, *м/сек*,
D — процент фракций с диаметром менее 0,01 *мм*.

Следует отметить, что приведенная связь между коэффициентом фильтрации и количеством частиц физической глины (в %) довольно слаба. Однако для характеристики средних условий такая связь может быть использована.

В табл. 133 представлены данные о проценте частиц диаметром <0,01, полученные на основе графика типового распределения процентного содержания частиц для каждого вида почв. Такой график помещен в Наставлении по дренажу DJN 1185.

Определяя по формуле (200) коэффициент фильтрации для грунтов, представленных в табл. 133, и используя формулы (175в) и (175б) при $A_р=7400$ и $\bar{q}=9$ *л/сек км²*, получим расстояния между дренами, показанные в последней графе табл. 133.

Сравнение данных показывает, что расстояния между дренами, полученные по нашим расчетам, в 1,25—1,84 раза больше, чем по Наставлению дренажа. Если учесть, что модуль годового стока $\bar{q}=9$ *л/сек км²* в климатических условиях ФРГ формируется при годовых осадках около 700 *мм*, то при сравнении расстояний, определенных по Наставлению DJN 1185, данные в табл. 133 расстояния следует умножить на основе рекомендаций указанного наставления на коэффициент $\sqrt[3]{\frac{600}{700}}=0{,}95$.

Однако такая поправка не изменяет существенно результатов. Таким образом, можно считать, что расстояния между дренами и показатель интенсивности осушения по немецким нормам для севооборота зерновых в среднем в 1,7 раза меньше, чем по показателям, представленным в табл. 128. Для севооборота пропашных культур данное расхождение значительно сокращается. В этом случае расстояние между дренами по немецким нормам получается в среднем в 1,4 раза меньшим, чем на основании приведенных выше рассуждений.

Расстояния между дренами, представленные в табл. 133, относятся к однородным грунтам. Для слоистых грунтов расстояние между дренами по немецким нормам определяется как средневзвешенное из расстояний, полученных для случаев, когда отдельные слои грунта залегают на всю глубину области фильтрации. При этом на пашне в расчет принимаются лишь слои, расположенные на 0,25 *м* ниже поверхности почвы и на 0,25 *м* ниже глубины укладки дрен.

Для случая, когда верхний слой почвы до глубины 0,7 *м* состоит из легкой супеси (частиц <0,01 *мм* — 7% и <0,02 *мм* — 10%), а нижний слой (до 1,8 *м* и более) представлен тяжелым суглинком (<0,01 *мм*—45% и <0,02 *мм*—57%), расстояние между дренами, по немецким нормам, для пашни при глубине

укладки дрен, равной 1,0 *м*, и количестве годовых осадков 600 *мм* равно

$$E = \frac{(0{,}7-0{,}25)\cdot 22+(1{,}0-0{,}70+0{,}25)9{,}5}{1{,}0} = 15 \text{ м}.$$

На основе формулы (186в) для данного случая, где $k = 0{,}000018 : 10^{0{,}022\cdot 7} = 0{,}0000126$ *м/сек*, $k_1 = 0{,}000018 : 10^{0{,}022\cdot 45} = 0{,}00000184$ *м/сек* (см. формулу (200), $n = 0{,}0000126 : 0{,}00000184 = 6{,}85$, $h = 1{,}0$ *м* и $M = 1{,}0-0{,}7 = 0{,}3$ *м*, получается, что $\beta_2 = 1{,}26$.

По формуле (188в) при $\gamma = 0{,}6$, $a = 0{,}8$ *м* и $k_2 = k_1 = 0{,}0000018$ *м/сек* $\delta_2 = 1{,}27$.

Расстояние между дренами при $\overline{q} = 9$ *л/сек км*^{2}, $A_р = 7400$ и полученных β_2 и δ_2 по формуле (188б) равно $E = 3 \cdot 1{,}26 \cdot 1{,}27 \cdot \sqrt{\frac{0{,}0000018}{9}} = 15{,}9$ *м*.

Приведенный пример показывает, что в случае, когда дрены расположены в слабопроницаемом грунте, а верхний слой хорошо поницаем, расхождение между расстояниями E, определенными по немецким нормам и по приведенным выше формулам для зерновых культур незначительно. Для пропашных культур $E = 3 \cdot 1{,}26 \cdot 1{,}27 \cdot 6250 \sqrt{\frac{0{,}0000018}{9}} = 13{,}4$ *м*, т. е. меньше немецких норм.

В США для влажной зоны страны рекомендуются следующие расстояния между дренами и глубины укладки дрен (табл. 134) [44].

Таблица 134

Расстояние между дренами, рекомендуемое в США (перевод с округлением в метрические меры)

Вид почвы	Расстояния между дренами, *м*	Глубина укладки дрен, *м*
Глина	11—18	0,8—0,9
Суглинок тяжелый (Глинистый суглинок)	15—24	0,8—1,1
Суглинок средний (Илистый суглинок)	18—37	0,9—1,3
Суглинок легкий (Песчаный суглинок)	24—90	0,9—1,3

Сравнение данных табл. 133 и 134 показывает, что меньшие расстояния между дренами в каждом интервале табл. 134 почти

равны расстояниям для соответствующего вида почвы, представленным в последней графе табл. 133. Если допустить, что меньшие величины расстояний могут быть рекомендованы для влажной зоны США, где норма годового стока равна около 9 *л/сек км²* при глубине укладки дрен 1,0 *м*, наши рекомендации по интенсивности осушения полей под зерновые сходятся с данными США.

В Англии на тяжелых глинистых почвах рекомендуется применять очень малые расстояния между дренами. В табл. 135 представлены расстояния между дренами в зависимости от глубины их заложения, применяемые в Англии [27].

Таблица 135

Расстояния между дренами в зависимости от глубины их заложения и характера грунтов, рекомендуемые в Англии

Глубина дрен	Расстояние между дренами, *м*		
	в легких грунтах	в средних грунтах	в тяжелых глинистых грунтах
1,8	18—22	15—18	7—11
1,5	15,5—18,0	12—15	6,5—9,0
1,2	12—15	10—12	4,5—7,0
0,9	9—11	7—9	4,0—5,5
0,6	6,5—7,5	5—6,5	3—4
0,45	4,5—5,5	4—5	2—3

Для глинистого грунта, где $k_1=k_2=0{,}00000086$ *м/сек*, частицы диаметром $<0{,}01$ *мм* составляют 60%, $h=0{,}9$ *м*, $\gamma=0{,}6$, $a=0{,}8$ и $\bar{q}=18$ *л/сек км²*, расстояние между дренами по формулам (175в) и (175б) получается:
при $A_д=7400$

$$E=3\cdot 1{,}24\cdot 7400\sqrt{\frac{0{,}00000086}{18}}=6{,}0\ м$$

и при $A_д=6250$ $E=5{,}1$ *м*.

Для средних суглинков при приведенных показателях для пропашных культур получается следующее расстояние между дренами:

$$E=3\cdot 1{,}24\cdot 6250\sqrt{\frac{0{,}0000031}{18}}=9{,}6\ м$$

и для легких суглинков

$$E=3\cdot 1{,}24\cdot 6250\sqrt{\frac{0{,}0000051}{18}}=12{,}4\ м.$$

Первое ознакомление с рекомендуемыми для условий Англии расстояниями между дренами создает впечатление о том, что

эти расстояния занижены. Однако приведенный выше расчет показывает, что для пропашных культур, выращиваемых во влажной зоне (в районе возвышенностей), данная интенсивность осушения практически целесообразна.

Для луговых и лугопастбищных культур столь интенсивное осушение, по-видимому, оправдывается тем, что вегетационный период этих культур захватывает и влажный зимний период, когда интенсивность испарения незначительна и отвод излишка воды должен осуществляться только дренажной сетью.

При малых расстояниях между дренами годовые затраты на осушение довольно высоки, так, например, по формуле (102) в глинистых почвах при $k=0{,}00000086$ *м/сек*, $A_р=7400$ и $D=200$ *руб/га* годовые затраты на осушение составляют:

$$R=\frac{100}{200}\left(\frac{250}{7400\sqrt{0{,}00000086}}+6{,}2\right)=21{,}4\%.$$

Отсюда следует, что себестоимость продукции в таких условиях, т. е. при расстоянии между дренами, равном 10 *м* и $\bar{q}=9$ *л/сек км*^{2} (см. последнюю графу табл. 133), за счет устройства осушения увеличится на 21,4% реализационной стоимости. Заметное увеличение себестоимости продукции при осушении дренажем глинистых почв заставляет искать более дешевых способов осушения. Поэтому при осушении глинистых почв в Англии широко применяется кротовый дренаж в сочетании с разреженным гончарным дренажем (с проницаемой засыпкой).

Изложенные данные показывают, что при более тяжелых условиях работы дренажа, когда в слоистых грунтах дрены расположены в менее проницаемом слое, в рекомендуемой интенсивности осушения нет существенных расхождений. Однако при более легких условиях расстояния между дренами, применяемые в разных странах, значительно меньше, чем определенные на основе наших исследований.

Сравнение интенсивности осушения в разных странах показывает также, что показатели интенсивности осушения, определенные нами для условий Эстонской ССР, применимы также в разных климатических и почвенных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверьянов С. Ф. Горизонтальный дренаж при борьбе с засолением орашаемых земель. АН СССР, Москва, 1959.
2. Аверьянов С. Ф. и Цюй Син-е. Расчет дренажа при наличии инфильтрации. Известия АН СССР, ОТН, № 3, 1957.
3. Агроклиматический справочник по Эстонской ССР. Гидрометеоиздат, Ленинград, 1960.
4. Алексеев Г. А. Расчет дождевых осадков на основе применения кривых и поверхностей распределения вероятностей. Труды ГГИ, вып. 26 (80). Гидрометеоиздат, Ленинград, 1950.
5. Алексеев Г. А. Расчет вероятных максимальных расходов воды и объемов снеговых и дождевых паводков. Труды ГГИ, вып. 38 (92). Гидрометеоиздат, Ленинград, 1953.
6. Аносова Л. С. Средний многолетний сток рек Латвийской ССР. Сб. Вопросы осушения и освоения осушенных земель. Изд. АН Лат. ССР, Рига, 1958.
7. Аносова Л. С. Нормы стока начала предпосевного и посевного периодов для территории Латвийской ССР. Труды Лат. НИИГиМ, № 1, Елгава, 1962.
8. Бергман Я. Я. Вопросы экономики мелиорации и эффективности использования осушенных земель. Материалы совещания по вопросам осушения земель с применением закрытого дренажа 18—22 июня 1957 года, Рига, Москва, 1958.

8а. Булавко А. Г. Влияние осушения болот на элементы водного баланса рек Белорусского Полесья. Гидрометеоиздат, Москва, 1961.

9. Воскресенский К. П. Гидрологические расчеты при проектировании сооружений на малых реках, ручьях и временных водостоках. Гидрометеоиздат. Ленинград, 1956.

9а. Временные технические условия и нормы для проектирования осушительных систем на минеральных избыточно увлажненных почвах Белорусской ССР. Сельхозгиз БССР, Минск, 1962.

10. Гидрологические расчеты при осушении болот и заболоченных земель. Под редакцией К. Е. Иванова. Гидрометеоиздат, Ленинград, 1963.
11. Давыдов Л. К. Водоносность рек СССР, ее колебания и влияние на нее физико-географических факторов. Гидрометеоиздат, 1947.
12. Дубах А. Д. Гидрология болот. Гидрометеоиздат, Свердловск—Москва, 1944.
13. Зайков Б. Д. Средний сток и его распределение на территории СССР. Гидрометеоиздат, Ленинград, 1946.
14. Иванов К. Е. Гидрология болот. Гидрометеоиздат, Ленинград, 1953.
15. Ивицкий А. И. Предпосевной период и предпосевно-посевной сток в условиях БССР. Труды института болотного хозяйства. Том 1, Минск, 1939.
16. Ивицкий А. И. Влияние осушения болот на режим рек. Сб.: К вопросу освоения и развития производительных сил Полесья. Изд. АН БССР, 1949.

16а. Ивицкий А. И. Основы проектирования расчетов осушительных систем Полесья. Автореферат диссертации. Москва, 1957.

17. Ионат В. А. Расчет горизонтального дренажа в неоднородных грунтах. Эстонский н.-и. институт земледелия и мелиорации. Таллин, 1962.
18. Карелин Т. И. Влияние затопления на полевые культуры. Гидротехнический сборник Северного н.-и. института гидротехники и мелиорации, вып. X, Ленинград, 1939.
19. Кийс О. и Томберг У. Народно-хозяйственная эффективность осушения болот и экономическое расстояние между дренами (на эст. яз. Сборник «Maaparandus» Eesti Vabariiklik Põllu- ja Metsamajanduse Teaduslik-Tehniline Ühing, Tallinn, 1961.
20. Кийс О. Экономически обоснованное расстояние между дренами при осушении глинистых почв (на эст. яз.). Сборник научных трудов I. Эстонский н.-и. институт земледелия и мелиорации. Саку, 1962.
21. Клюева К. А. Влияние заболоченности водосбора на средний многолетний сток рек Белорусской ССР. Труды ГГИ, вып. 52/106, 1956.
22. Костяков А. Н. Основы мелиорации. Сельхозгиз, Москва, 1951.
23. Кузин П. С. Испарение с поверхности суши на территории СССР. Труды ГГИ, вып. 26 (80). Гидрометеоиздат, Ленинград, 1950.
24. Крицкий С. И. и Менкель М. Ф. Гидрологические основы речной гидротехники. Изд. АН СССР, 1950.
24а. Марченас В. И. Определение бывового расхода для расчета водоприемников и магистральных каналов осушительных систем. Автореферат диссертации, Каунас, 1957.
24б. Мацевичус И., Пошка А. Определение максимальных расходов для расчета водоприемников и отводящих каналов в Литовской ССР. Информационный бюллетень Лит. НИИГиМ № 3. Каунас, 1960.
24в. Мацевичус И., Пошка А. Определение максимального ливневого стока с малых водосборов в условиях Литовской ССР. Информационный бюллетень Лит. НИИГиМ № 3, Каунас, 1960.
25. Михальцевич А. И. К вопросу осушения болот Полесья редкой сетью глубоких каналов. Труды института X. Белорусский н.-и. институт мелиорации и водного хозяйства. Минск, 1962.
26. Молчанов А. А. Гидрологическая роль сосновых лесов на песчаных почвах. Изд. АН СССР, Москва, 1952.
27. Нефедов В. Д. Мелиорация земель в Англии. «Гидротехника и мелиорация» № 3, 1958.
28. Огиевский А. В. Гидрология суши. Сельхозгиз, 1951.
28а. Основные положения по проектированию закрытого дренажа в условиях Латвийской ССР. Рига, 1962.
29. Поляков Б. В. Гидрологический анализ и расчеты. Гидрометеоиздат, Ленинград, 1948.
29а. Практические рекомендации по применению закрытого дренажа в северо-западной зоне РСФСР, Ленинград, 1962.
30. Райдла А. И. Культурные пастбища на торфяных почвах и их значение в зеленом конвейере (на эст. яз.). Сборник «50 aastat sookultuurialast uurimistööd Eestis». Eesti Riiklik Kirjastus. Tallinn, 1958.
30а. Сарма Б. Я. Методика определения режима водоприемников для проектирования осушительных систем средней зоны Прибалтики. Автореферат диссертации. Ленинград, 1965.
31. Свиклис П. Б. Об изменении водопроницаемости дренированных дерново-карбонатных почво-грунтов. Исследования по вопросам строительства и эксплуатации осушительных систем. Академии наук Латвийской ССР, Рига, 1957.
31а. Свиклис П. Б. Общая характеристика дренажного стока по сезонам, годам и периодам гидравлического действия дренажа. Труды Лат. НИИГиМ № 3 (10), Рига, 1965.
32. Романов В. В. Испарение с болот европейской территории СССР. Гидрометеоиздат, Ленинград, 1962.
33. Соколовский Д. Л. Речной сток. Гидрометеоиздат, Ленинград, 1959.

34. Соколовский Д. Л. Гидрологические водохозяйственные расчеты при проектировании малых ГЭС. Гидрометеоиздат, Ленинград, 1946.
34а. Технические условия и нормы проектирования осушительных систем. Изд. МСХ СССР, Москва, 1957.
35. Томберг У. Х. Формулы для определения притока воды в дрене и расстояния между дренами в торфяном грунте при внутреннем питании. Бюллетень научно-технической информации 8. Эстонский научно-исследовательский институт земледелия и мелиорации. Саку, 1962.
36. Томберг У. Х. Исследование вопросов осушения низинных болот для выращивания зерновых культур в условиях острова Сааремаа (на эст. яз.). Сборник научных трудов IV. Эстонский н.-и. институт земледелия и мелиорации. Саку, 1964.
37. Уйска Я. Е. Исследования систематического гончарного дренажа. Сборник «Исследования по гончарному дренажу и народнохозяйственной рентабельности мероприятий». Академия наук Латвийской ССР. Рига, 1955.
38. Хейнсоо Ю. Подготовка к посеву и посев семян сахарной свеклы (на эст. яз.). Журнал «Sotsialistlik Põllumajandus» nr. 7, 1963.
39. Хоммик К. Т. Весенний максимальный сток. Известия Академии наук Эстонской ССР. Том IV, серия биологическая № 1, 1957.
40. Хоммик К. Т. Влияние осушения на режим стока в условиях Эстонской ССР. Таллин, 1958.
41. Хоммик К. Т. Влияние осушения на режим стока. Сборник научных трудов IV. Эстонский н.-и. институт земледелия и мелиорации. Саку, 1964.
41а. Щебеко В. Ф. Испарение и транспирация с поверхности торфяных почв. Труды института Белорусского НИИМиВХ, том VII, Минск, 1956.
42. Шуравилин А. В. Опыт осушения болот в пойме р. Сев. Двины. «Гидротехника и мелиорация» № 5, 1964.
43. Эйзен И. Влияние интенсивности осушения на торфяную почву и развитие растений (на эст. яз.). Сборник «50 aastat sookultuurialast uurimistööd Eestis». Eesti Riiklik Kirjastus. Tallinn, 1960.
43а. Яковлев Б. И. Дренажный сток из суглинистых почв с атмосферным питанием. Труды Белорусской сельскохозяйственной Академии, том XXXV, Минск, 1961.
43б. Янголь А. М. Нормы дренажного стока для проектирования и эксплуатации закрытого дренажа. Осушение болотных и заболоченных почв нечерноземной зоны европейской части СССР. Изд. АСХН БССР, Минск, 1960.
44. Agricultural Eigineers' Handbook. Mc Graw-Hill Book Company, Inc. New-York, Toronto London, 1961.
45. DIN 1185 Dränanweisung. Deutsche Normen März 1959. Beuth-Vertrieb GMBH. Berlin W 15. Köln.
46. Haller, E. Suviteravilja külviaja valikust. Tallinn, 1947.
47. Hommik, K. Über die Abflussverhältnisse bei Hochwasser. VI Baltische Hydrologische Konferenz. Berlin, 1938.
48. Tomberg, U. Soomaade drenaažkuivenduse kogemusi Oidermaa sovhoosis. Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn, 1958.
49. Maaparanduse Käsiraamat. Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn,
50. Wesseling, J. The relation between rainfall, drain discharge and depth of the water table in tile-drained land. Netherlands Yournal of agricultural Sciense. 6 (I), 1958.
51. Väljaots, H. Kultuurkarjamaade rajamine. Eesti Riiklik Kirjastus. Tallinn, 1953.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 6

ГЛАВА I

Расчет стока рек Эстонской ССР и влияние осушения на режим стока

§ 1. Средний годовой сток 9
§ 2. Средний минимальный сток 15
§ 3. Весенний максимальный сток 16
§ 4. Летне-осенний максимальный сток 35
§ 5. Сток посевного периода 47
§ 6. Средний сток в мае 59
§ 7. Средний летний сток 69
§ 8. Средний осенний сток 80

ГЛАВА II

Определение глубины грунтовых вод и расчетной интенсивности осушения

§ 9. Режим стока и глубина грунтовых вод в осушительных системах 89
1. Кривые обеспеченности среднемесячного и среднего летнего стока и глубины грунтовых вод на торфяных почвах в осушительной системе Рехемяэ 89
2. Кривые обеспеченности среднесуточного стока за отдельные месяцы вегетационного периода в осушительной системе Рехемяэ 100
3. Кривые обеспеченности среднемесячного стока и глубины грунтовых вод отдельных месяцев вегетационного периода в тяжелых суглинистых почвах 102
4. Кривые обеспеченности среднесуточного стока со слабоводопроницаемых почв 112
§ 10. Расчетная интенсивность осушения 115
1. Интенсивность осушения культурных сенокосов и пастбищ . 117
А. Интенсивность осушения культурных сенокосов и пастбищ на торфяных почвах 118
Б. Интенсивность осушения культурных пастбищ и сенокосов на тяжелых суглинистых почвах 147
2. Интенсивность осушения земель под яровые зерновые культуры 153

А. Интенсивность осушения торфяных почв под яровые зерновые 159
Б. Интенсивность осушения тяжелых суглинистых почв, предназначенных для выращивания яровых зерновых культур 176
3. Интенсивность осушения земель, используемых под озимые зерновые культуры 183
А. Интенсивность осушения торфяных почв при возделывании озимых зерновых 186
Б. Интенсивность осушения тяжелых суглинистых почв при возделывании озимых культур 194
4. Интенсивность осушения земель под пропашные культуры . 199
А. Интенсивность осушения торфяных почв при возделывании пропашных культур 201
Б. Интенсивность осушения тяжелых суглинистых почв при возделывании пропашных культур 215
5. Показатель интенсивности осушения и расстояние между дренами при расположении дрен выше водоупора в неоднородных грунтах 222
6. Результаты опытной проверки рекомендаций по интенсивности осушения 238

ГЛАВА III

Определение расчетных модулей стока при проектировании осушительных систем

§ 11. Модули стока при определении диаметра дренажных труб . . 244
§ 12. Модули стока при определении поперечных сечений магистральных каналов и водоприемников 244
§ 13. Заключение 265
Литература 276

ОСНОВЫ РАСЧЕТА ОСУШИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
На русском языке

Бюро научно-технической информации
Министерства сельского хозяйства
Эстонской ССР
Таллин, ул. Техника, 24.

Редактор И. Апананский
Технический редактор К. Юус
Корректор А. Зиниченко

Сдано в набор 20 VII 1965 г. Подписано к печати 14. VI 1966 г. Бумага 60×90,1/16. Печатных листов 17,5. Учетно-издательских листов 16,1. Тираж 1000 экз. МВ-06810. Заказ № 5799. Типография им. Ханса Хейдеманна, ЭССР, г. Тарту, ул. Юликооли, 11/19. I.

Цена 91 коп.

91 коп.

IX
1A-4951

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00648938 1