

Таблица 3.35 – Основные характеристики водонепроницаемого слоя по годам исследований

Номер точки	Место и дата определения	Глубина промерзания, см	Мощность водонепроницаемого слоя, см	Глубина залегания водонепроницаемого слоя, см	Средняя объемная влажность, %	Средняя температура почвы, °С
1	2	3	4	5	6	7
1	загон 04.03.1986	30	10	10	69,52	-1
2		34	12	4	73,11	-1,1
3		33	18	0	72,10	-1,7
4		33	11	4	72,30	-1,3
5		36	12	5	70,58	-1,2
6		36	13	5	68,50	-1,5
1	загон 03.03.1987	23	9	3	66,70	-2,5
2		29	18	0	68,5	-4,4
3		33	17	0	71,5	-4,3
4		28	14	0	72,34	-3,5
5		26	16,5	0	72,15	-3,9
6		30	14	2	68,93	-3,5
1	загон 15.03.1988	26	7	5	65,50	-3,3
2		26	0	-	-	-
3		22	0	-	-	-
4		28/	0	-	-	-
5		26	0	-	-	-
6		26	0	-	-	-
1	борозда 04.03.1986	17	0	-	-	-
2		19	0	-	-	-
3		19	0	-	-	-
4		18	2	0	77,22	-0,8
5		19	3	0	79,00	-0,8
6		19	0	-	-	-
1	борозда 03.03.1987	14	0	-	-	-
2		12,5	2	0	79,00	-1,2
3		16	0	-	-	-
4		13	3,5	0	74,50	-1,3
5		13,5	2	0	79,00	-1,2
6		16	0	-	-	-
1	борозда 15.03.1988	20	7	0	74,15	-3,8
2		19	0	-	-	-
3		16	0	-	-	-
4		21	0	-	-	-
5		17	0	-	-	-
6		19	0	-	-	-

Как уже отмечалось, зима 1987–1988 гг. была теплее предшествующих лет и стала точкой отсчета для общего потепления климата. Бесснежная зима способствовала глубокому промерзанию почвы, поэтому запас холода, оцениваемый по температуре почвы, был не ниже прошлых лет. Это особенно характерно для предвесеннего состояния почвы. Кратковременное наступление холода не обеспечило значительного влагонакопления в зоне промерзающего слоя почвы. В то же время длительные оттепели при положительной температуре привнесли дополнительное количество тепла в мерзлый слой. Указанные факторы не способствовали значительному перераспределению и накоплению влаги в мерзлом слое почвы. Водонепроницаемый слой не образовался ни на одной из точек, за исключением точки 1, где локально увеличена плотность почвы. Анализируя все варианты возникновения водонепроницаемого слоя, необходимо также отметить, что его формирование происходило при влажности торфа не ниже  $0,77 W_{нв}$  и при температуре от  $-1,0$  °С и ниже. Эти значения влажности и температуры могут использоваться для предварительной оценки состояния водосбора в предвесенний период.

### 3.5.3. Полевые исследования аномальных процессов, обуславливающих гидротермический режим инфильтрации талых вод на осушенных торфяниках

Отсутствие продолжительных наблюдений за стоком талых вод на осушенных торфяниках не позволяет применять традиционные способы их обобщения, а обилие внешних и внутренних факторов вносит значительные расхождения в наблюдаемые величины. Поэтому генетический анализ процессов формирования стока талых вод позволит усовершенствовать гидрологические расчеты регулирующей и проводящей сети. В задачу анализа входит выявление закономерностей инфильтрации

талых вод на осушенных торфяниках в зависимости от уровня грунтовых вод, уровня воды в водоприемниках, метеорологических условий, а также оценка влияния землеройных животных на дренированность пахотного горизонта.

Почвы осушенных торфяников представляют собой органогенное анизотропное вещество, которое по целому ряду характеристик кардинально отличается от минеральных почв – более высокой теплоемкостью, пониженной температуро- и теплопроводностью, наличием усадочных процессов при механическом воздействии, набуханием при водонасыщении, минерализацией во времени и т. д. Комплексный характер исследований в полевых условиях позволяет обеспечить учет всех факторов и получить достоверные зависимости.

*Общая характеристика формирования половодий за годы наблюдений*

Для анализа использованы данные полевых исследований, полученные автором на Полесской опытно-мелиоративной станции за 1986–1988 гг. Опытный участок имеет площадь 100 га, находится в пойме р. Бобриск.

Годы наблюдений различались своей суровостью и обеспеченностью по осадкам. Приходные составляющие водного баланса – осадки за период снеготаяния и запас воды в снеге на начало половодья по годам исследований приведены в таблице 3.36.

Таблица 3.36 – Суммарный запас влаги на опытном участке в период снеготаяния

Годы	Осадки, мм	Запас воды в снеге, мм	Сумма, мм
1986	0,3	47,0	47,3
1987	3,0	52,5	55,5
1988	26,4	0,0	26,4

Величина осадков получена по данным болотной станции ПОМС, а запас воды в снеге получен по данным маршрутных снегомерных съемок в предпаводковый период.

Термический режим и режим влажности в первые два года сформировали водонепроницаемый слой на всех без исключения точках наблюдения, однако это, как видно из комплексных графиков, представленных на рисунках 3.39–3.41, не сказалось на замедлении половодья.

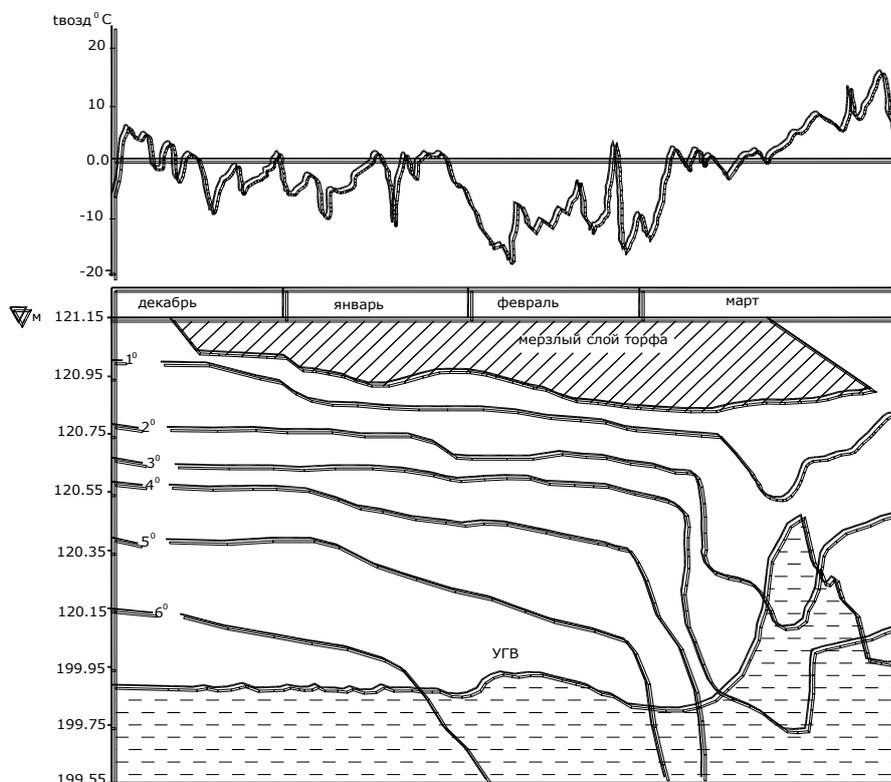


Рисунок 3.39 – Комплексный график изменения уровенного и теплового режима почв (ПОМС, зима 1985–1986 гг.)

С началом установления положительных температур в каждом из годов наблюдений начинался активный подъем уровня грунтовых вод. Как правило, продолжительность подъема совпадает с про-

должительностью таяния снежного покрова. В весну 1986 г. продолжительность схода снега составляла 13 дней, в весну 1987 г. – 6 дней, в весну 1988 г. снежный покров сошел за один день.

Интенсивность подъема уровня грунтовых вод тесно увязывается с температурой воздуха при наличии снежного покрова. Положительная температура воздуха обеспечивает активное снеготаяние, а естественная дренированность площади водосбора способствует этому процессу. Максимальная величина суточного подъема была зафиксирована весной 1987 г. и равнялась 42 см. Общий подъем уровня грунтовых вод за период наблюдений составил: 1986 г. – 68 см, 1987 – 102 см, 1988 г. – 28 см. Особенно резко происходил подъем УГВ в период выпадения осадков в виде дождя.

Наблюдения за режимом УГВ в опытных точках свидетельствуют о том, что подъем УГВ происходил как за счет инфильтрации талых вод, так и вследствие подпитки со стороны водоприемника Б-1-2-3 и ограждающих каналов Б-1-2, Б-1-4. В таблице 3.37 приведены отметки уровня грунтовых вод в относительных единицах в водоприемнике и в центре тяжести водосбора.

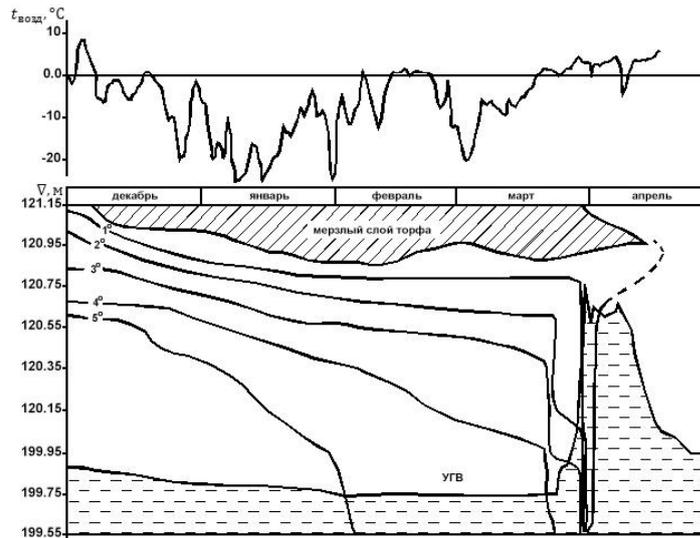


Рисунок 3.40 – Комплексный график изменения уровня и теплового режима почв (ПОМС, зима 1986–1987 гг.)

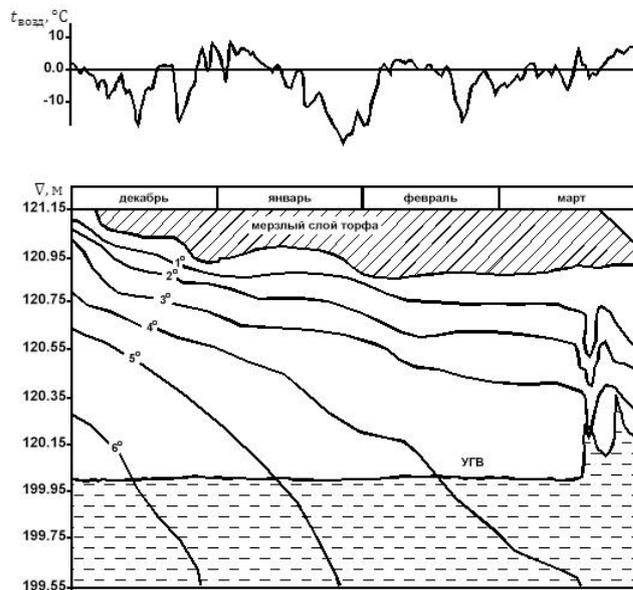


Рисунок 3.41 – Комплексный график изменения уровня и теплового режима почв (ПОМС, зима 1987–1988 гг.)

Как следует из таблицы 3.37, по всем датам контрольных измерений уровень воды в водоприемнике превышал уровень грунтовых вод на водосборе, т. е. имел место подпор воды в коллекторах, вода двигалась по ним обратным током, вследствие чего УГВ также поднимался. Это явление имеет простое объяснение – на начало паводка каналы всегда занесены снегом, и сток по ним отсутствует. Причем плотность снега в каналах всегда выше, чем на полях, в 1,5–2 раза и достигает 0,35–0,4 г/см<sup>3</sup>.

Таблица 3.37 – Отметки УГВ на период снеготаяния

Дата наблюдений	Отметка УГВ у канала Б-1-2-3, т.1	Отметка УГВ в центре тяжести водосбора, т.3
10.03.1986	19.93	19.88
13.03.1986	19.98	19.92
18.03.1986	20.11	20.06
20.03.1987	19.81	19.79
25.03.1987	19.88	19.87
28.03.1987	20.13	20.06

Характерной особенностью, проявившейся в годы исследований, как следует из рисунков 3.39–3.41, является очень резкое изменение температуры слоя почвы, наиболее близко расположенного к уровню грунтовых вод, с началом стабилизации положительных температур. В последующем, со сдвижкой не более одних суток, наблюдается перелом в ходе изотерм с более низкими значениями. Процесс во все годы наблюдений идет от более теплых слоев к более холодным, т. е. снизу вверх. Одновременно наблюдается оттаивание мерзлого слоя почвы снизу, но крайне незначительными темпами, не более 1–2 мм/сут. Очевидно, процесс объясняется тем, что миграционный поток влаги ослабевает и, охлажденный в верхних горизонтах, в виде гравитационной влаги поступает к уровню грунтовых вод, вызывая заметное охлаждение в первую очередь наиболее теплых слоев; или, по другой гипотезе, имеют место локальные участки с очень высокой величиной инфильтрации талых вод, от которых происходит растекание водяного бугра и охлаждение, таким образом, в первую очередь верхнего слоя грунтовых вод.

Признаком появления поверхностного стока в годы наблюдений, за исключением 1988 г., явилось затопление микропонижений талыми водами. В стадии активного нарастания поверхностного стока ежегодно затоплялось до 25–30 % площади водосбора. В среднем глубина воды в микропонижениях составляла 10–12 см. Максимальный объем талого стока в отдельных крупных микропонижениях достигал 570 м<sup>3</sup>.

Водонепроницаемый слой в весну 1987 г. сформировался у поверхности, в результате площадь затопления оказалась выше на 5–10 %, чем весной 1986 г. Величина осадков весной этого года составила 25 мм, что усугубило общую картину затопления. Площадь затопления водосбора возросла до 40 %. Часть стока по траншеям, вырытым экскаватором, была сброшена в проводящую сеть. Остальная часть затопленных бессточных микропонижений подверглась длительному, свыше 11 дней, вымоканию. Продолжительность затопления в 1986 г. была короче и составила 8 дней.

Скорость понижения воды в бессточных микропонижениях различна в пространстве и во времени. Это связано с неодинаковой пористостью, разной степенью естественной дренированности почвы землеройными животными и корневыми остатками, мощностью водонепроницаемого слоя и другими факторами. Очень существенная разница и в понижении уровня воды в микропонижениях в течение суток. При отсутствии ледового покрова эта разность достигает пятикратной величины. Максимальное понижение наблюдается во второй половине дня, минимальное – в утренние часы. Это связано с температурой воздуха и соответственно с температурой воды.

Одной из общих закономерностей во все годы наблюдений явилось формирование талых воронок. Их наблюдали многие исследователи [584, 595]. Формируются воронки на южном и юго-западном склонах. Их диаметр обычно не превышает 15–20 см. Поверхность почвы талика наиболее часто ориентирована навстречу лучам солнца при максимальной его высоте, около полудня. Наиболее крупные талики образуются в бороздах, затопленных талой водой. Они представляют собой полосы длиной 1,5–2,0 м, шириной 10–15 см, редко больше, в наиболее пониженной части борозды.

Ускоренному процессу оттаивания способствуют:

- меньшая глубина промерзания в бороздах, примерно в два раза;
- большая поглощающая способность тепла поверхностью откосов борозды за счет их крутизны;
- увеличение угла падения солнечных лучей за счет их преломления в слое воды к поверхности откоса борозды;
- большая аккумулирующая емкость поглощенного тепла за счет большей глубины слоя воды в борозде.

На практике взвешенное состояние оттаявшего слоя торфа в таликах под слоем воды делает невозможным измерение его мощности. Это свидетельствует о том, что почва находится в стадии полного насыщения с установившейся фильтрацией воды, для которой могут быть применены законы Дарси.

*Исследование влияния землеройных животных на дренированность почвенного покрова*

На формирование естественной дренированности почвенного покрова водосбора существенное влияние оказывают землеройные животные. С целью исследования этих процессов ежегодно во все периоды наблюдений производился визуальный осмотр поверхности поля. Выявлено, что в осенний период, сразу после освобождения полей от зерновых, активизируются землеройные животные, особенно мышь-полевка и кроты, они активно дренируют верхний пахотный горизонт почвы.

Для того чтобы оценить, насколько велико их влияние на степень естественной дренированности почвенного покрова водосбора, в пределах лизиметрического полигона был выбран участок, характерный для основного массива. Участок представлял собой прямоугольник площадью 66 тыс. м<sup>2</sup>. В пределах этого участка была разбита сеть квадратов размерами 4x4 м, в которых производился подсчет количества входных и выходных отверстий. Для мыши-полевки их число составило 0,0584 шт. на 1 м<sup>2</sup>, или 58400 шт. на 1 км<sup>2</sup>. Полученные результаты хорошо согласуются с данными исследований И. И. Акимушкина [29], Б. С. Виноградова [70], согласно которым на 1 км<sup>2</sup> площади леса проживает от 40 до 60 тыс. грызунов, в частности мышей-полевков. К сожалению, данные по количеству грызунов, обитающих на торфяниках, отсутствуют. Диаметр входных и выходных отверстий колеблется от 4 до 6 см при общем заглублении хода до 8 см. Установить точное количество гнезд не представляется возможным, однако раскопки найденных показали, что гнезда заглублены под поверхность почвы на 35–40 см и представляют собой сферическую поверхность диаметром 10–12 см, укрытую слоем растительных остатков. Учитывая, что максимальная глубина промерзания почвы в наблюдаемые зимы не превышала этой величины, а была на уровне или даже несколько ниже, то следует, что гнезда располагались в талой зоне. Система таких дрен, имеющая прямой выход в талую зону, является источником аномального перетока талых поверхностных вод в грунтовый сток.

Одновременно была составлена схема кротовин, представленная на рисунке 3.42. Установлено, что преимущественное направление кротовин совпадает с направлением вспашки. Кротовины приурочены к микропонижениям, в отличие от ходов мыши-полевки, обитающей на повышенных участках. Общая длина кротовых ходов на исследуемом участке составила 3260 м. На 1 м<sup>2</sup> площади приходится 0,0403 м кротовин, что превышает искусственную дренированность участка. Диаметр кротовин заметно выше и колеблется от 6 до 8–9 см. Ходы заглублены на отдельных участках до 25–30 см, т. е. практически это уже подпахотный горизонт. По данным П. П. Григорьева [201], система второстепенных и третьестепенных дрен заканчивается отвесными на глубину до 35–40 см тупиками при длине кротовин 5,0 км на гектар. По сведениям этого же автора, на поверхность выносятся от 3,0 до 12 м<sup>3</sup> земли. Эти разрыхленные очаги поверхности почвы способны активно фильтровать воду.

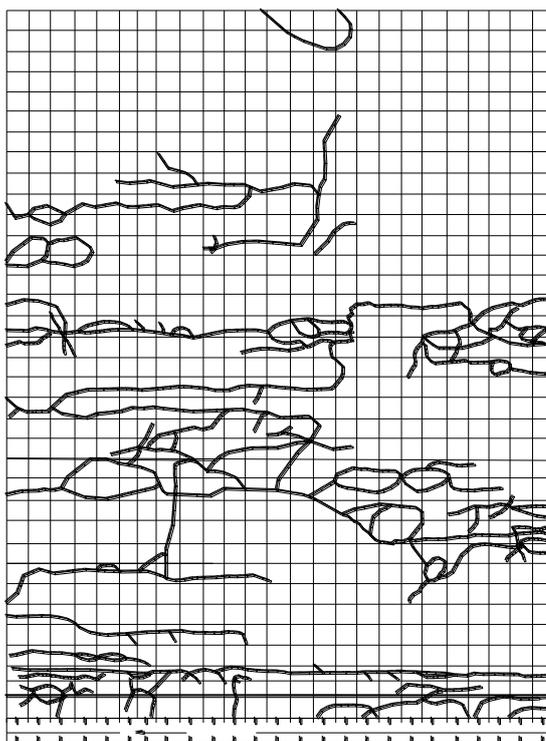


Рисунок 3.42 – К оценке степени дренированности почвы землеройными животными (ПОМС, зима 1987–1988 гг.)

Немаловажное значение для разрушения модельного хода движения влаги имеет и трещиноватость почвы, которая возникает в результате естественного иссушения почвы морозами и ветрами после обильного увлажнения осенними дождями. Образуется довольно равномерно распределенная сеть трещин в виде правильного восьмиугольника. Ширина трещин достигала 4 мм при визуальной и инструментально оцениваемой глубине около 8 см. Фактическую глубину трещин, переходящих в микротрещины, измерить полевыми инструментами невозможно. Вполне вероятно, что они распространены до подошвы пахотного горизонта.

*Исследование инфильтрации талых вод при переменном уровне грунтовых вод и процессов формирования поверхностного стока на осушенных торфяниках*

Управление водным режимом осушенных территорий невозможно без научно обоснованных мелиоративных мероприятий, основой которых является знание физических свойств почв и возможности желаемого их изменения. В частности, для выполнения гидрологических расчетов при проектировании мелиоративных систем, расчета междренних расстояний, установления расчетных расходов сбросных и сопрягающих сооружений и других действий необходимо знание закономерностей инфильтрации талых вод и ее абсолютной величины в динамике гидрологических процессов, т. е. при подъеме и снижении уровня грунтовых вод. Ввиду сложности проведения экспериментальных работ и большой их трудоемкости в научной литературе отсутствуют данные по инфильтрации талых вод применительно к осушенным торфяникам Белорусского Полесья. Полученные автором данные могут быть использованы в качестве поверочных величин при внедрении в практику гидрологических и агрометеорологических расчетов математических моделей. В задачу исследований входит установление абсолютных величин инфильтрации талых вод и функциональных зависимостей от внешних факторов при переменном уровне грунтовых вод.

*Методика исследования инфильтрации талых вод при переменном уровне грунтовых вод*

Методика проведения полевого эксперимента формировалась под решение поставленной задачи. В связи с этим исследование инфильтрации талых вод было разбито на два этапа. Первый этап включал исследование инфильтрации до уровня грунтовых вод во время снеготаяния, когда возможно появление поверхностного стока, второй – исследование инфильтрации талой воды из микропонижений.

Для исследования инфильтрации талой воды на первом этапе в предпаводковый период, обычно в середине февраля, по шести точкам опытного участка отрывались шурфы глубиной 1,0 м. В шурфах с южной затененной стороны на глубине около 80 см отрывались горизонтальные ниши шириной 40–50 см и длиной как можно дальше от вертикальной стенки. Обычно эта величина, исходя из физических возможностей, составляла около 60 см. Потом в свод ниши домкратом вдавливались цинковые цилиндрические емкости (поливальные лейки с обрезанным верхом). Емкости были оборудованы пьезометрической шкалой и патрубками для отвода проинфильтровавшейся воды в емкость. Дно емкости покрывалось слоем стеклохолста и промытым гравийным фильтром толщиной 1,0–1,5 см. На поверхности почвы снежный покров сохранялся ненарушенным, в естественной структуре. Учитывая небольшую площадь приемной поверхности емкости, замеры объема проинфильтровавшейся воды производились один раз в сутки с 9 до 10 часов. Параллельно фиксировалось состояние снежного покрова на исследуемой поверхности и степень его схода. Среднесуточная интенсивность инфильтрации  $i$  (мм/сут) была определена по формуле

$$i = \frac{10 \cdot V}{S \cdot \tau_{\phi}} \cdot 1440, \quad (3.134)$$

где  $V$  – объем проинфильтровавшейся воды, мм;  $S$  – площадь емкости, см;  $\tau_{\phi}$  – фактическое время между двумя измерениями, мин;  $i$  – величина инфильтрации, мм/сут.

Второй этап исследований соответствовал бесснежному периоду паводка, когда часть талой воды поверхностным стоком была аккумулирована в микропонижениях. Исследование инфильтрации талой воды осуществлялось путем регулярных инструментальных измерений уровня воды в микропонижениях. Наблюдения за уровнем велись по шести микропонижениям, расположенным в непосредственной близости от точек установки лизиметрического оборудования. Отсчет показателей уровня воды велся от репера в виде деревянной рейки, опирающейся нижним концом на подстилающий песок, верхний был установлен на уровне с поверхностью почвы и преимущественно в наиболее пониженной части микропонижения. Рядом с репером устанавливалась сигнальная вежа для определения его местоположения. Измерения велись регулярно, два-три раза за световой день, в зависимости от погодных условий. Наблюдения начинались после схода снежного покрова, соответствующего окончанию исследований на первом этапе, т. е. процесс исследований был непрерывным. Необходи-

мо еще раз отметить, что получить материал данного направления исследований оказалось возможным лишь в весенние паводки 1986 и 1987 гг., так как имел место поверхностный сток. Весной 1988 г. поверхностный сток отсутствовал, так как не сформировался водонепроницаемый слой и не было снежного покрова. Интенсивность инфильтрации на втором этапе (мм/сут) была определена путем измерения уровня воды в микропонижениях. Расчет велся по формуле

$$i = \frac{\nabla_1 - \nabla_2 - I + O}{\tau_{\phi}} \cdot 1440, \quad (3.135)$$

где  $\nabla_1 - \nabla_2$  – предыдущий и последующий уровни измерения, мм;  $I$  – испарение, мм;  $O$  – осадки за интервал наблюдений, мм.

Распределение осадков за время наблюдений было принято по данным ПОМС. В январе 1988 г., когда наступила чрезвычайно продолжительная оттепель, повлекшая за собой полное исчезновение снежного покрова и частичное оттаивание почвы, создавалась угроза того, что к весеннему паводку может быть не накоплен запас воды в снеге, достаточный для формирования поверхностного стока. Поэтому в качестве гаранта получения информации было решено использовать метод рам, широко известный в литературе. Для этого на типичных площадках в пределах (до 5 м) установки лизиметрического оборудования по периметру квадрата со сторонами 2x2 м отрывались траншеи треугольного профиля глубиной до 10–12 см и шириной до 20 см, после чего стенки траншей планировались и тщательно уплотнялись. Выброшенный торф измельчался в отдельной емкости, заливался водой и перемешивался до образования пульпы однородной консистенции. Этой массой траншеи заливались послойно по периметру так, чтобы не происходило образования воздушных полостей. Для формирования надземной части насыпи была установлена дощатая опалубка на высоту 10 см, межстеночная полость которой заполнялась в той же технологической последовательности. В каждой раме уровень воды при контрольном замере определялся лабораторным игольчатым уровнемером. Долив воды в раму производился через заглушенную трубку с боковой перфорацией. Это позволило предотвратить размыв поверхности почвы при доливах. Кратность опыта была однократной. Перед началом опытов на расстоянии 45–50 см от рам (превышающем глубину промерзания) отбирались образцы почвы для определения их водно-физических характеристик. После окончания отбора, для того чтобы шурф не работал как дрена, он засыпался истолченным и предельно насыщенным торфом в последовательности выемки и тщательно уплотнялся. Ввиду того, что опыт непродолжительный, занимал световой день, испарение определялось по снижению уровня в мерном стакане.

#### *Методика и результаты измерения испарения с водной поверхности микропонижений*

При продолжительных опытах весной 1986 и 1987 гг. велись наблюдения за испарением с водной поверхности. Наличие защитной лесополосы в непосредственной близости от опытного участка сильно влияло на формирование потока воздушных масс. Особенно мощно оно проявлялось при северо-западном и северном направлении ветра, так как в этом случае участок попадал в зону затишья. Поэтому было принято, что использование теоретических и эмпирических зависимостей может внести большие погрешности в величины испарения с поверхности воды. Предпочтение было отдано непосредственному измерению испарения на местности. Испарение определяли с помощью испарителя в виде прямоугольной емкости со сторонами 50x60 см и глубиной 10 см. Площадь испаряющей поверхности была принята равной площади стандартного испарителя ГГИ-3000. В основу метода измерения слоя испарившейся воды было положено измерение объема воды в емкости. Для этого в дне испарителя был устроен штуцер, отводящий патрубок от которого отводился в приямок. Объем сливаемой в приямок или доливаемой воды замерялся с помощью мерного сосуда. Слой испарившейся воды между смежными замерами определялся по формуле

$$I = \frac{10 \cdot (P_{\beta_1} - P_{\beta_2})}{S_{\text{и}}}, \quad (3.136)$$

где  $P_{\beta_1}$  и  $P_{\beta_2}$  – количество воды в начале и конце контрольного срока, мл;  $S_{\text{и}}$  – площадь испарителя, см<sup>2</sup>; 10 – переводной коэффициент.

Испаритель был установлен на первой точке балансового участка в непосредственной близости от затопленного микропонижения. Применение данной методики позволило определить величину испарения с точностью до 0,01 мм.

#### *Результаты исследования инфильтрации талых вод при переменном уровне грунтовых вод*

Интенсивность инфильтрации талых вод в период снеготаяния (назовем его на первом этапе) была определена по формуле (3.134). Результаты расчета приведены в таблице 3.38.

Анализируя результаты расчета, необходимо отметить, что объем инфильтрующейся воды до уровня грунтовых вод зависит в первую очередь от продолжительности снеготаяния. Например, весной 1986 г., когда продолжительность схода снега составила 13 дней, слой проинфильтровавшейся воды за это время по шести точкам наблюдения составил от 40 до 60 % общего запаса влаги на дату полного схода снежного покрова. В то же время весной 1987 г. при продолжительности схода снежного покрова 7 дней слой проинфильтровавшейся воды составил от 13 до 26 %, а весной 1988 г. все осадки ушли на пополнение почвенной влаги до уровня грунтовых вод.

Таблица 3.38 – Интенсивность инфильтрации талых вод в интервале времени: начало паводка – дата схода снежного покрова

Дата	Номер наблюдаемой точки					
	1	2	3	4	5	6
10.03.1986	0,5	0,0	0,0	1,0	1,5	1,0
11.03.1986	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12.03.1986	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
13.03.1986	0,5	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0
14.03.1986	0,3	0,0	0,5	1,0	0,0	0,0
15.03.1986	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16.03.1986	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17.03.1986	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18.03.1986	4,0	3,0	3,0	1,0	2,0	2,0
19.03.1986	1,5	3,0	4,0	4,0	3,0	3,5
20.03.1986	3,0	2,0	4,0	6,0	6,0	3,0
21.03.1986	9,0	10,5	7,0	8,0	3,0	5,0
22.03.1986	3,0	10,5	8,0	9,0	4,0	3,0
23.03.1987	0,3	1,0	0,2	1,0	1,2	0,6
24.03.1987	1,3	1,0	0,5	0,8	1,0	0,5
25.03.1987	1,0	0,5	0,5	1,2	0,0	0,3
26.03.1987	0,0	0,5	0,2	0,1	0,0	0,5
27.03.1987	0,5	0,5	0,4	1,5	0,4	0,5
28.03.1987	4,0	3,2	2,7	3,2	4,0	3,4
17.03.1988	8,5	3,5	6,5	4,5	7,0	8,0
18.03.1988	0,0	2,5	0,0	3,5	1,5	4,0
19.03.1988	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20.03.1988	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21.03.1988	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22.03.1988	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23.03.1988	1,1	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0
24.03.1988	3,0	1,5	3,0	2,5	3,5	2,0
25.03.1988	6,0	6,0	9,5	6,0	6,5	4,0
26.03.1988	7,0	9,0	8,0	7,0	7,5	12,0

Анализируя изменение интенсивности инфильтрации во времени, можно видеть влияние температуры воздуха на процесс инфильтрации. Так, начиная с 17 марта 1986 г. и 27 марта 1987 г. сравнительно ровный и невысокий ход инфильтрации нарушался в сторону резкого увеличения ее величины. Объясняется это тем, что наряду с ростом средних суточных положительных температур 6,5 и 7,4 °С соответственно уже сформировались первые проталины на исследуемых площадках. Это привело к повышению температуры инфильтрующейся воды и к резкому повышению интенсивности инфильтрации. Естественно, водоотдача со снега также возрастает, благодаря чему растет объем талых вод. Основными факторами, вызывающими разброс данных при схожих метеорологических условиях, исходя из опыта предшественников [157, 158, 575, 584], можно назвать в первую очередь влажность и плотность почвы, а также уклон местности. В нашем случае средние уклоны микропонижений, на склонах которых были установлены лизиметры описанной конструкции, имеют значения, приведенные в таблице 3.39.

Таблица 3.39 – Средние уклоны поверхности исследуемых микропонижений

Номер исследуемой точки	т.1	т.2	т.3	т.4	т.5	т.6
Уклон	0,0036	0,0027	0,00071	0,0011	0,00229	0,00224

Величина накопления талых вод в микропонижениях водосбора является важным и необходимым элементом, раскрывающим процесс формирования поверхностного стока талых вод. Для этого

по результатам мензульной съемки были определены площади водосборов каждого из 6 исследуемых микропонижений. Результаты приведены в таблице 3.40.

Таблица 3.40 – Площади водосборов микропонижений, м<sup>2</sup>

Номер исследуемой точки					
1	2	3	4	5	6
937	887	11704	680	2625	1872

На основании обработки материалов мензульной съемки были построены топографические характеристики микропонижений (рис. 3.43). По известным уровням талой воды в микропонижениях на дату полного схода снежного покрова 23.03.1986 и 29.03.1987 были определены величины объема поверхностного стока и площади затопления. Результаты величин накопления поверхностного стока и соответствующих площадей затопления (зеркала водной поверхности) приведены в таблицах 3.41 и 3.42.

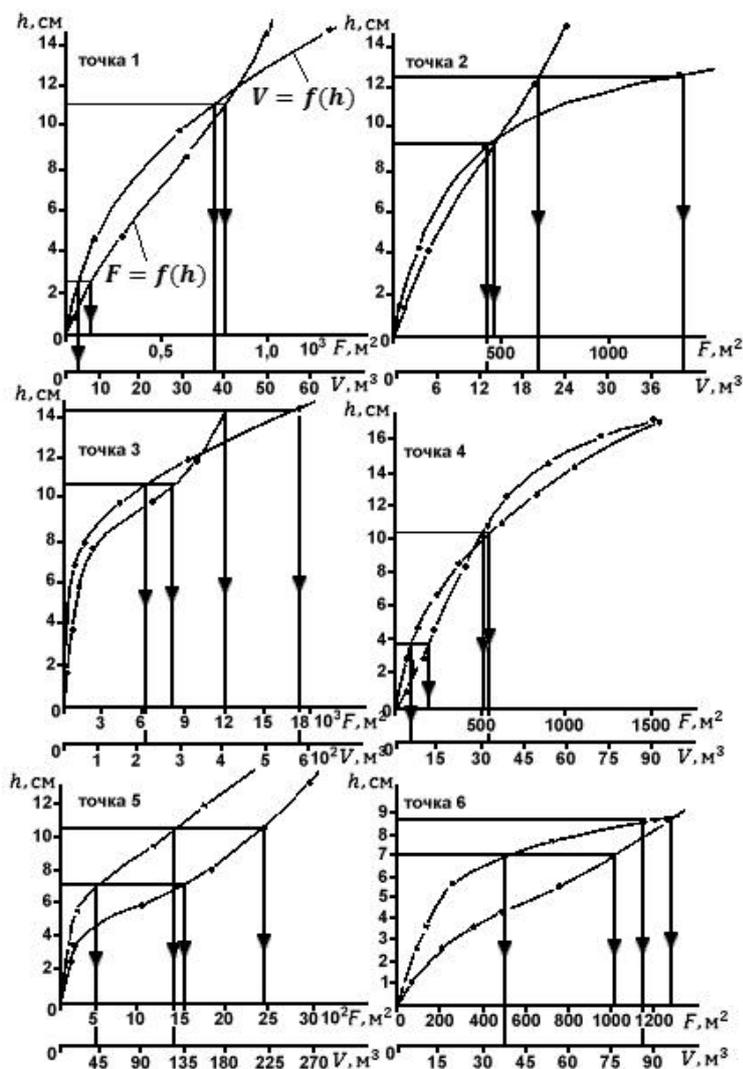


Рисунок 3.43 – Топографические характеристики микропонижений

Таблица 3.41 – Объем накопления талого стока, в исследуемых микропонижениях, м<sup>3</sup>

Годы	Номер исследуемой точки					
	1	2	3	4	5	6
1986	4,0	13	208	4,64	44,31	38,44
1987	38,0	42,0	570,0	30,0	126,0	85,0

Таблица 3.42 – Площадь водного зеркала исследуемых микропонижений, м<sup>2</sup>

Годы	Номер исследуемой точки					
	1	2	3	4	5	6
1986	80,0	480	8100	200	1400	1040
1987	800,0	680	11000	500	2450	1230

Пример расчета интенсивности инфильтрации талой воды из микропонижений при переменном уровне грунтовых вод (второй этап) приведен в таблице 3.43. В качестве примера рассматривается расчет инфильтрации талой воды на точке 2 опытного участка в 1987 г. Этот год являлся наиболее характерным, так как продолжительность затопления почвы была наибольшей, имелись случаи ночных заморозков и продолжительных осадков.

Таблица 3.43 – Пример расчета интенсивности инфильтрации талой воды, по данным измерения понижения уровня воды в микропонижении на т. 2 в марте-апреле 1987 г., мм/сут

Дата, время	Интервал времени, мин	Отметки уровня воды, мм	Снижение уровня воды, мм	Осадки, мм	Испарение, мм	Инфильтрация, мм/сут
23.09.1986 9 час 15 мин	315	123	1,0	2,8	0,0	17,37
14 час 30 мин	280	122	1,0	2,5	0,0	18,00
19 час 10 мин	1130	121	0,0	10,96	0,0	13,96
30.03.1987 14 час 00 мин	330	121	-1,0	3,0	0,0	8,72
19 час 30 мин	350	122	1,0	3,30	0,0	7,08
31.03.1987 9 час 40 мин	325	121	1,0	0,6	0,36	5,49
15 час 05 мин	250	120	2,0	0,5	0,34	12,44
19 час 15 мин	905	118	6,0	0,5	0,38	9,89
01.04.1987 10 час 20 мин	365	112	2,0	0,0	0,54	5,76
16 час 25 мин	215	110	2,0	0,0	0,46	10,31
20 час 00 мин	790	108	6,0	0,0	0,8	9,47
02.04.1987 9 час 10 мин	585	102	2,0	0,0	1,0	2,46
18 час 15 мин	905	100	2,0	0,0	0,15	2,94
03.04.1987 11 час 00 мин	300	98	2,0	0,0	0,2	8,64
16 час 00 мин	1055	96	3,0	0,0	0,26	3,73
04. 04.1987 9 час 35 мин	405	93	3,0	0,0	1,05	6,93
16 час 20 мин	200	90	2,0	0,0	0,70	12,24
19 час 40 мин	940	88	5,0	0,0	1,15	5,89
05.04.1987 11 час 20 мин	230	83	-1,0	0,5	0,6	-
15 час 20 мин	250	84	-2,0	0,3	0,9	-
19 час 20 мин	1235	86	-1,0	2,1	0,0	-
06.04.1987 15 час 55 мин	185	87	1,0	0,5	0,0	11,67
19 час 00 мин	900	86	5,0	1,8	0,0	10,98
07.04.1987 10 час 00 мин	615	81	7,0	0,0	1,2	14,98
20 час 15 мин	905	74	6,0	0,0	0,4	10,18
08.04.1987 11 час 20 мин	300	68	4,0	0,6	1,2	22,07
16 час 20 мин	195	64	2,0	0,4	0,8	17,72
19 час 35 мин	805	62	6,0	0,1	0,15	10,52
09.04.1987 9 час 00 мин	530	56	14,0	0,0	1,3	41,56
17 час 30 мин	990	42	18,0	0,0	0,5	26,90
10.04.1987 10 час 00 мин	620	24	24,0	0,0	2,0	60,38
20 час 20 мин		0,0				

Активный приток поверхностных надмерзлотных вод в дни выпадения осадков искажает процесс исследований, нарушает баланс и выражается в том, что величина подъема уровня воды в микропонижениях превышает величину осадков. Этот процесс не имеет места при промерзшей почве в начале исследований 29, 30, 31 марта, так как часть стока задерживалась за счет шероховатости и неровностей почвы, а часть шла на заполнение емкости (порового пространства) над водонепроницаемым слоем.

Аналогичным образом производился расчет интенсивности инфильтрации и по другим точкам и годам исследований. Построенные зависимости изменения интенсивности инфильтрации талой воды на осушаемых торфяниках во времени по 6 наблюдаемым точкам представлены на рисунке 3.44.

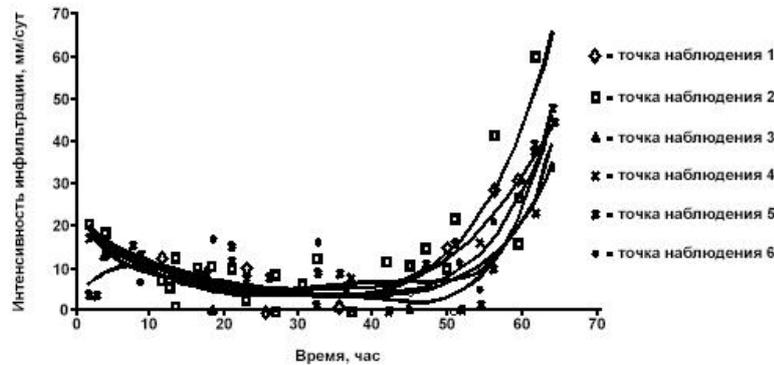


Рисунок 3.44 – Изменение интенсивности инфильтрации во времени в затопленных микропонижениях

Как следует из графика, изменение величины инфильтрации во времени носит классический характер: 1-я фаза – снижение инфильтрации, 2-я фаза – стабилизация инфильтрации и 3-я фаза – рост инфильтрации до значений коэффициента фильтрации талой почвы. Продолжительность каждой из фаз определяется конкретными физическими, тепловыми характеристиками почвы и метеорологическими условиями региона. Высокие значения инфильтрации на начальной стадии измерений обусловлены процессами впитывания талой воды в мерзлый слой почвы и просачивания ее до УГВ, так как на этом этапе происходит активный подъем УГВ. На этапе, когда все поровое пространство заполнено талой водой, имеет место чистая инфильтрация. При возрастающем притоке тепла более активно происходят фазовые превращения в границах пограничного слоя движения влаги, увеличивается поровое пространство, количество несвязной влаги и, в конечном итоге, величина инфильтрации. Однако при ночных заморозках происходит существенное замедление или даже прекращение инфильтрации. На заключительном этапе прохождения паводка, хотя и отмечены ночные заморозки, наблюдается активный рост инфильтрации на всех без исключения точках во все годы наблюдений. Среднесуточное понижение воды с 8–9 мм возрастает до 25–30 мм, а в отдельных случаях до 70 мм. Данный процесс наблюдается при остаточной мощности мерзлого слоя 41–49 % первоначальной величины, т. е. 14–17 см и глубине воды в микропонижении 2–5 см.

Весна 1988 года оказалась бесснежной. Водонепроницаемый слой не сформировался, поэтому для исследования инфильтрации талых вод был использован страховочный вариант – метод заливных рам. С целью рациональной компоновки проведения опытов 18 марта опыт проводился на точках 1 и 2 одновременно, 19 марта опыты проводились на точках 3 и 4, а 20 марта – на точках 5 и 6. Опыты проводились в соответствии с изложенной методикой в однократной повторности. Вода в начале опыта подавалась нулевой температуры, но в процессе опыта постепенно прогревалась. Температура воздуха в процессе опыта измерялась. На рисунке 3.45 приведены графические зависимости изменения во времени температуры воздуха и интенсивности инфильтрации во времени.

Анализируя графические зависимости изменения интенсивности инфильтрации во времени, построенные по результатам опытов, можно видеть, что они подчиняются общему закону изменения инфильтрации во времени. Как видно на рисунке 3.45, величина инфильтрации в установившемся режиме практически не изменяется во времени в случае постоянной температуры. Это легко видеть по результатам опытов, проведенных 19 марта, когда температура воздуха была ниже нуля, а температура воды равной нулю. В опытах, проводимых 18 и 20 марта, после активного снижения величины инфильтрации явно наблюдался ее подъем с ростом температуры воздуха, а следовательно, и воды, причем приращение было тем больше, чем выше величина инфильтрации в опыте. При сравнимой величине температуры воды для точки 2 приращение составляет более 2,5 мм/сут, в то же время для точки 5 не более 0,8 мм/сут. Этот факт является дополнительным подтверждением зависимости величины инфильтрации от температуры инфильтрующейся воды. Однако абсолютные значения величин

инфильтрации и в начальной стадии, и в установившемся режиме весьма сильно разнятся даже в пределах небольшого опытного участка. Для двух крайних кривых эти значения равны соответственно 4,0 и 41,6 мм/сут. Более глубокий анализ позволил выявить, что прослеживается явная зависимость между величиной инфильтрации в установившемся режиме, влажностью и плотностью почвы. Кроме того, явно заметна четкая закономерность между временем стабилизации процесса инфильтрации и влажностью почвы. Этот факт имел место в процессе проведения и других исследований.

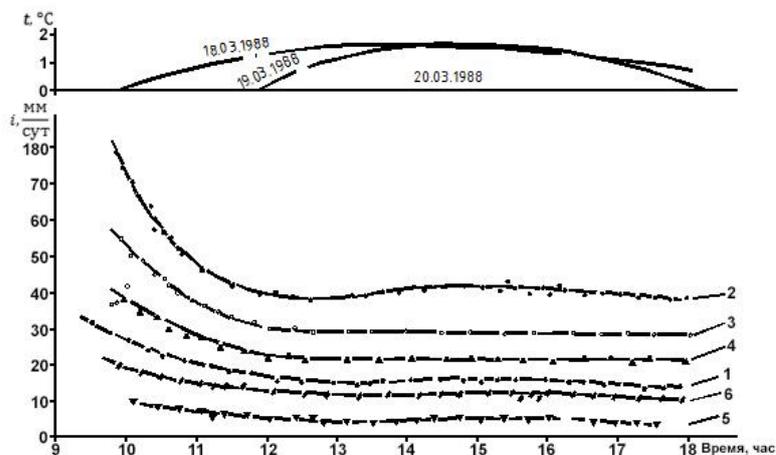


Рисунок 3.45 – Изменение величины инфильтрации во времени при различной влажности и плотности почвы, % и г/см<sup>3</sup> (1) 55,3/0,24; 2) 50,35/0,227; 3) 52,51/0,217; 4) 54,55/0,225; 5) 61,82/0,225; 6) 56,40/0,23) и температуры воздуха

*Новое в конструкции лизиметра-испарителя для измерения баланса влаги*

Измерение баланса почвенной влаги невозможно без лизиметров. Они бывают различной конструкции и принципа работы. Предлагаемая конструкция [221] является усовершенствованной конструкцией лизиметра-испарителя [220] П. И. Закржевского. Особенностью данной конструкции является обеспечение возможности взвешивания монолита грунта с помощью гидравлических весов. Технический результат заключается в повышении точности взвешивания монолита и снижении материальных и экономических затрат.

Конструкция лизиметра-испарителя приведена на рисунке 3.46. Обозначения: 1 – монолит грунта, 2 – цилиндрическая емкость, 3 – установочное гнездо, 4 – весоизмерительное устройство, 5 – корпус, 6 – жидкость, 7 – эластичная диафрагма, 8 – крышка с отверстиями, 9 – перегородки, 10 – секции, 11 – патрубки нечетных секций, 12 – патрубки четных секций, 13 – опорные пластины, 14 – пластины компенсации атмосферного давления и температурного воздействия, 15, 16 – пьезометры, 17 – гидростатически уравновешенный бачок, 18 – соединительный шланг, 19 – колодец грунтовых вод, 20 – распределитель воды, I-III-V – нечетные номера секций, II-IV-VI – четные номера секций.

Устройство содержит монолит грунта 1, помещенный в цилиндрическую емкость 2, установленную заподлицо с поверхностью земли в установочное гнездо 3 на весоизмерительное устройство 4, которое состоит из корпуса 5, заполненного жидкостью 6 и разделенного перегородками 9 на секции 10, нечетные номера I-III-V которых соединены патрубками нечетных секций 11, а четные II-IV-VI – патрубками четных секций 12. К корпусу 5 весоизмерительного устройства 4 через эластичную диафрагму 7 герметично закреплена крышка с отверстиями 8, под которую соосно отверстиям крышки уложены опорные пластины 13 и пластины компенсации атмосферного и температурного воздействия 14. К одной из нечетных и одной из четных секций герметично подключены пьезометры 15 и 16. К цилиндрической емкости 2 с монолитом грунта 1 подсоединено подпитывающее устройство, состоящее из гидростатически уравновешенного питающего бачка 17 и гибкого соединительного шланга 18, помещенных в колодец грунтовых вод 19, распределителя воды 20, находящегося в цилиндрической емкости 2 под монолитом грунта 1.

Изменение гидрологического режима территории, испарение с поверхности монолита грунта приводят к изменению в колодце грунтовых вод 19 положения гидростатически уравновешенного бачка 17, вода из которого или в который по соединительному шлангу 18 перетекает в распределитель воды 20 или вытекает из него. Эти явления приводят к изменению веса монолита грунта и соответственно показаний пьезометров. Прирост веса или снижение его можно найти по формуле

$$P = \rho gh, \tag{3.137}$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $h$  – разность показаний пьезометров.

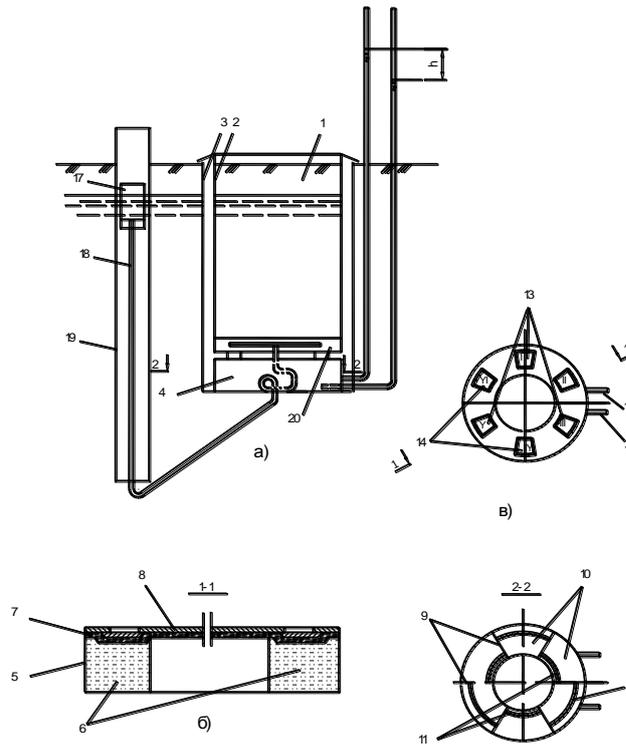


Рисунок 3.46 – Конструкция лизиметра-испарителя для измерения баланса влаги  
 (а) продольный разрез лизиметра-испарителя; б) продольный разрез весоизмерительного устройства;  
 в) вид сверху весоизмерительного устройства; г) поперечный разрез весоизмерительного устройства)

Применение предлагаемого взвешивающего устройства позволяет обеспечить компактность лизиметра-испарителя и повысить точность взвешивания монолита грунта.

*Исследование инфильтрации талых вод при постоянном уровне грунтовых вод на осушенных торфяниках*

Инфильтрация талых вод через пористую среду, какой является почва, подчиняется определенным закономерностям. Эти закономерности обуславливают как внешние факторы, такие как климатические условия и антропогенная деятельность человека, так и внутренние: водно-физические и тепловые свойства почвы или уровень грунтовых вод. Постоянство уровня грунтовых вод приводит к изменению процессов льдонакопления в мерзлой зоне за счет миграции влаги и формирования таким образом условий для образования водонепроницаемого слоя. Целью выполненных исследований являлось установление закономерности интенсивности инфильтрации от положения уровня грунтовых вод на осушенных торфяниках при естественных климатических условиях.

На участке было установлено 36 лизиметров. Из них 12 лизиметров переменного уровня, 12 лизиметров постоянного уровня пленочной конструкции с поддержанием уровня на глубине 50 см и 12 лизиметров постоянного уровня пленочной конструкции с поддержанием уровня грунтовых вод на глубине 75 см. Площадь поверхности лизиметров постоянного уровня была равной 3000 см<sup>2</sup>, что соответствовало стандартной площади испарителей ГТИ-3000.

Лизиметры были установлены в шести точках группами по четыре штуки – два с поддержанием УГВ 50 см и два – 75 см, чем обеспечивалась двукратная повторяемость опыта в исследуемой точке по каждому уровню грунтовых вод.

*Методика исследований инфильтрации талых вод при постоянном уровне грунтовых вод*

Задачей исследований явилось установление величины и зависимостей инфильтрации талых вод от обуславливающих ее факторов при различном положении уровня грунтовых вод и неограниченном подтоке влаги к промерзающему слою почвы.

Предложенная технология изготовления лизиметров и их конструкция защищены авторскими свидетельствами на изобретения [219, 564], что обеспечило их надежную работу в течение всего периода исследований.

Способ изготовления лизиметров и их конструкция рассмотрены ниже. Интенсивность инфильтрации талой воды мм/сут. определялась по формуле

$$i = \left[ \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot d^2 \cdot \tau_{\text{фак}}} \right] \cdot 10 \cdot 1440; \quad (3.138)$$

где  $d$  – диаметр приемной емкости (в установке был 80 мм);  $V$  – объем проинфильтровавшейся влаги, мл;  $\tau_{\text{фак}}$  – фактическое время между двумя измерениями, мин.

*Результаты исследований инфильтрации талой воды при постоянном уровне грунтовых вод*

С наступлением весеннего паводка регулярно, два раза и более в сутки производились замеры уровня воды в сливной емкости. Проинфильтровавшаяся вода откачивалась на поверхность, объем ее измерялся мерной емкостью, а время между измерениями фиксировалось. Обработка результатов измерений позволила получить предельно возможную информацию об интенсивности инфильтрации талой воды на осушенных торфяниках в естественных полевых условиях при различном уровне грунтовых вод и характере изменения ее во времени. Осредненные ее значения приведены на рисунке 3.47.

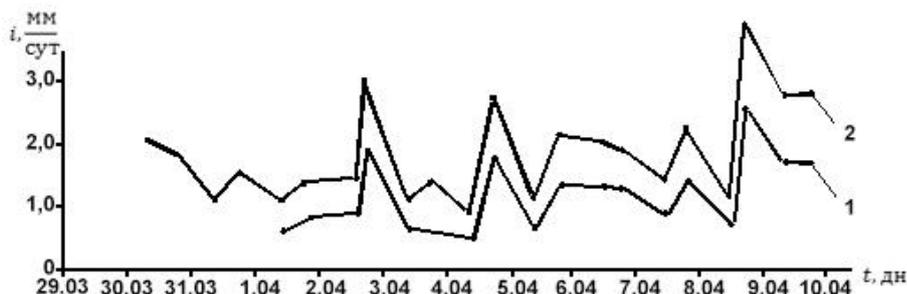


Рисунок 3.47 – Изменение величины инфильтрации талых вод в лизиметрах во времени при постоянном уровне грунтовых вод на примере точки 1 опытного участка, 1987 г. (1 – уровень грунтовых вод 50 см; 2 – то же 75 см)

Как и предполагалось, она наиболее низкая у лизиметров с высоким положением уровня грунтовых вод, ее значения в начальной стадии составляют 0,5–1,0 мм/сут. Колебания интенсивности инфильтрации при изменяющейся температуре воды также имеют место и подчиняются тому же закону, что и при глубоком и переменном положении уровня грунтовых вод, т. е. с ростом температуры растет и величина интенсивности инфильтрации. Однако амплитуда этих колебаний не столь высока и имеет тенденцию, как следует из рисунка 3.47, к снижению с повышением уровня грунтовых вод. На рисунке 3.47 показано изменение величины инфильтрации во времени в лизиметрах с уровнем грунтовых вод 50 и 75 см для точки 1 в 1987 г.

Как и при переменном и глубоком уровне грунтовых вод в данном случае также отсутствует какая-либо связь между величиной инфильтрации и суммой положительных температур.

К сожалению, используемое оборудование для измерения влажности в лизиметрах в зимний период оказалось ненадежным, и это не позволило получить динамику влажности за зимний период. По истечении 1,5–2 месяцев после установки приборы выходили из строя, так как происходила кристаллизация раствора соли в соединительных трубках и датчиках влажности Корчунова.

В заключение отметим, что имели место случаи, когда инфильтрация в лизиметрах с уровнем грунтовых вод 50 см отсутствовала на протяжении всего паводка. Как правило, при этом на поверхности лизиметров образовывалась ледяная корка толщиной 10,5–2,0 см.

*Способ изготовления лизиметров постоянного уровня и их конструкции*

На рисунке 3.48 показана схема лизиметра постоянного уровня пленочной конструкции.

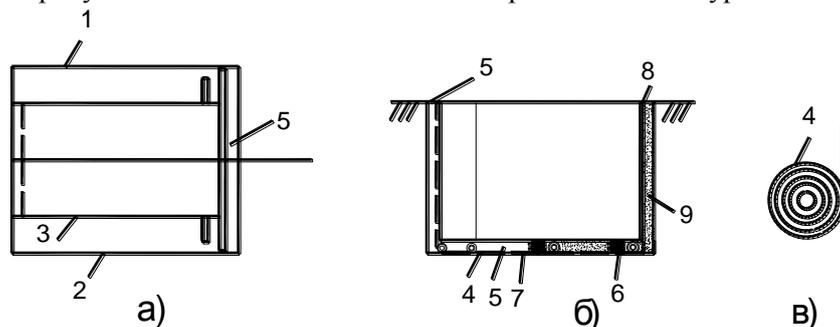


Рисунок 3.48 – Технологическая схема лизиметра постоянного уровня пленочной конструкции (а) план; б) разрез; в) заготовка рулона с эластичным водонепроницаемым материалом)

Способ изготовления лизиметра реализуется следующим образом. Изначально разбивают контур будущего лизиметра в плане. При исследованиях на ПОМС размеры лизиметров были приняты 50x60 см, что соответствовало стандартной величине площади в 3000 см<sup>2</sup> лизиметров ГГИ-3000, после чего с двух сторон относительно будущего монолита 3 отрывались траншеи 1 и 2. Ширина траншей принималась несколько больше высоты монолита с той целью, чтобы эластичный материал 4, например, техническая полиэтиленовая пленка, могла выйти выше монолита и сформировать контур. Пленка заданных размеров предварительно сворачивалась в рулон. У входной торцевой стороны выполнялась прорезь 5 режущим элементом 6 в виде деревянной рейки с односторонней искусственной шероховатостью до дна 7 с заходом режущего элемента на горизонталь дна 7. Вертикальные стенки пропила в торфяных грунтах довольно устойчивы, и вертикальный пропил можно уверенно выполнять до дна. Не вынимая режущий элемент 6, в прорезь 5 опускают рулон с пленкой 4. Положение рулона с некоторым зазором фиксируют относительно режущего элемента, чтобы не повредить пленку, а верхний конец закрепляют на дневной поверхности. Прорезь 5 между пленкой 4 и массивом засыпают грунтом 9 этого же горизонта и уплотняют. На следующем этапе опять выполняют пропил на глубину 5–20 см по дну, раскатывают рулон, а прорезь со стороны траншеи 1 и 2 заполняют и уплотняют. Такая операция – пропил-раскатывание-заполнение прорези с уплотнением – производится поэтапно до выхода на вторую вертикальную стенку. Вторую вертикальную прорезь в случае устойчивых связных грунтов можно также выполнять на всю высоту. После этого режущий элемент извлекают, прорезь между пленкой и окружающим массивом заполняют грунтом в его естественной последовательности и уплотняют. Пленку со стороны траншеи поднимают, заворачивают вовнутрь траншей, углы закрепляют, а траншеи засыпают в последовательности естественного сложения грунтов с послойным уплотнением.

Конструкция лизиметра постоянного уровня в оснащённом оборудовании состоянии представлена на рисунке 3.49.

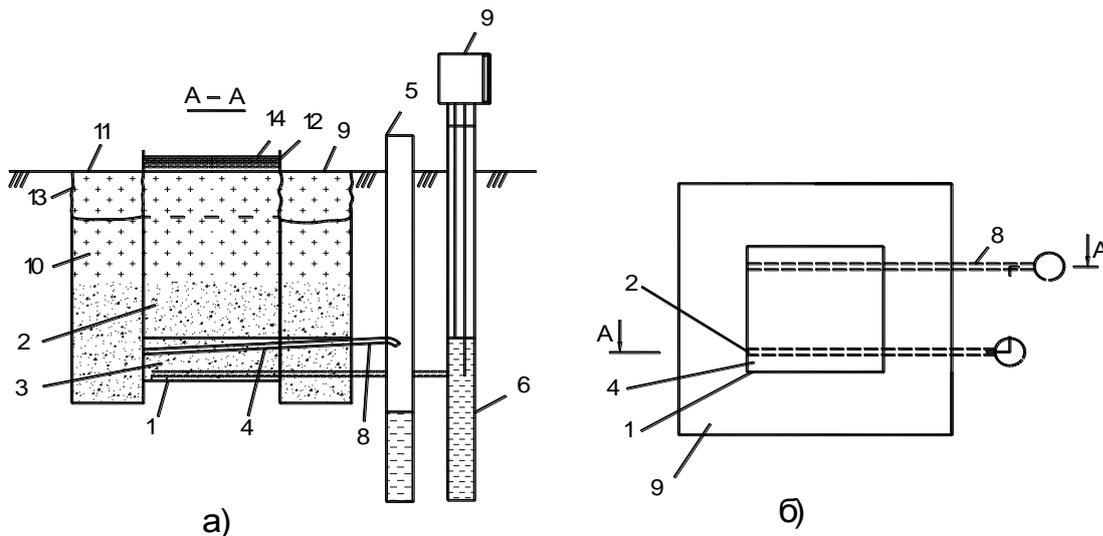


Рисунок 3.49 – Конструкция пленочного лизиметра постоянного уровня (а) разрез устройства, б) план)

Лизиметр состоит из гибкой водонепроницаемой изоляции 1, монолита 2 с отстойником 3, отводящей дрены 4, приемной емкости 5, устройства по поддержанию уровня грунтовых вод: емкости 6, бачка 7, например сосуда Мариотта, подающей дрены 8. Замкнутая в плане емкость 9, образованная из водонепроницаемой изоляции, уложенной по стенкам траншеи 10, засыпана грунтом 11 до максимальной глубины промерзания. Внутренняя стенка 12 емкости 9 герметично соединена с изоляцией 1 монолита 2 по его периметру, а наружная 13 совпадает с бровкой противоположной стороны траншеи 10. Выступающая кромка изоляции над монолитом 2 образует емкость 14 для талых вод.

В период весеннего половодья талая вода ограничена от растекания выступающей изоляцией 1 лизиметра и поверхностью монолита 2. Она скапливается слоем  $h$  на его поверхности в емкости 14, равным запасу воды в снеге, и инфильтруется через мерзлый монолит 2. Плотной обжатой по всему периметру изоляция 1 не допускает контактной фильтрации воды по стенкам монолита. Герметичное соединение внутренней стенки 12 замкнутой емкости 9 и изоляции 1 также не допускает движения влаги между ними, исключает передачу тепла, а тем самым и оттаивание контактирующего с ними грунта. Это позволяет удерживать изоляцию 1 монолита 2 в стационарном обжатом положении, чем и предотвращается контактная фильтрация талых вод по периметру монолита. Система отвода про-

инфильтровавшейся воды работает в обычном режиме. Проинфильтровавшаяся вода достигает уровня грунтовых вод отстойника 3 и по отводящей дрене 4 сбрасывается в приемную емкость 5, где и измеряется.

В вегетационный период, когда грунт обладает естественными фильтрационными свойствами, напорной инфильтрации практически не существует. При расходовании воды из отстойника 3 на испарение, т. е. при понижении уровня грунтовых вод, происходит автоматический долив, например, с помощью бачка Мариотта в емкость 6, а из нее по подающей дрене 8 вода подается в отстойник 3.

Таким образом, предлагаемое устройство может использоваться круглогодично для измерения элементов водного баланса.

*Методика лабораторного эксперимента по исследованию инфильтрации талых вод*

Задачей лабораторного эксперимента являлось установление зависимостей интенсивности инфильтрации талых вод от степени освоения торфяных почв, а также плотности и влажности.

Исследования проводили в полевых условиях на опытном участке. Это позволило достичь полного тождества термического режима исследуемых образцов почвы с окружающим массивом, создать полную аналогию процессов промерзания сверху, исключив искусственные мероприятия по боковой теплоизоляции образцов.

Монолиты (образцы) почвы для исследования изменения величины инфильтрации талой воды сквозь мерзлую почву в зависимости от плотности заготавливались на неосушенном болоте, на осушенном торфянике первой и второй очереди строительства в двукратной повторности. Для исследования изменения интенсивности инфильтрации в зависимости от влажности было заготовлено шесть монолитов. Четыре монолита были подвержены сушке. Они запрессовывались в цилиндры высотой 60 см и площадью поперечного сечения 1000 см<sup>2</sup>. Данные монолиты в процессе сушки были открыты сверху. Сушка производилась электротенами в закрытом отапливаемом помещении трансформаторной подстанции. Контроль за влажностью велся путем периодического взвешивания монолитов.

На следующем этапе поочередно в каждый из четырех монолитов, подвергшихся сушке, пресом были задавлены цилиндры площадью 500 см<sup>2</sup> и высотой 50 см. Аналогично, как и в предыдущем случае, цилиндры были оборудованы поддонами со сливными патрубками и обратными фильтрами. Меры по предотвращению контактной фильтрации были приняты те же. Отбор проб почвы на влажность производился из межстеночной полости на всю высоту монолита. На месте установки монолитов предварительно был вырыт котлован (рис. 3.50) с размерами: ширина – 1,20 м, длина – 3,0 м, глубина – 0,8 м.

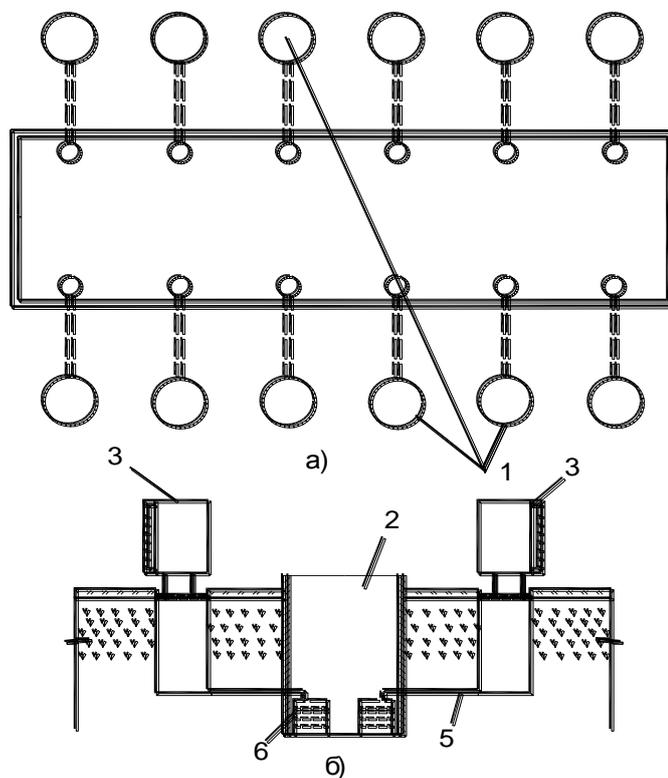


Рисунок 3.50 – Схема опытной установки лабораторного эксперимента (а – план, б – разрез: 1 – исследуемые монолиты, 2 – котлован, 3 – бачок Мариотта, 4 – сливной патрубок, 5 – приемная емкость)

В гнезда, устроенные в боковых стенках котлована, были установлены заготовленные монолиты. Технологией предусматривалась защита водоотводящих патрубков чехлами от давления грунта. Парубки укладывались с незначительным, порядка 2–3° уклоном в сторону монолита, обеспечивающим уровень воды в поддоне 1,0–1,5 см при сливе проинфильтровавшейся воды. Длина патрубков и удаление монолитов от стенки котлована назначались из учета трехкратной глубины промерзания и была принята равной 1,2 м. Для обеспечения устойчивости стенок котлована от обрушения они были закреплены досками по всему периметру и на всю высоту. Пазухи монолитов засыпались грунтом в его естественной последовательности с послойным уплотнением. В итоге монолиты и котлован изолировались от атмосферы водонепроницаемой технической пленкой и оставлялись в таком состоянии до начала паводка.

Начавшаяся продолжительная оттепель в середине февраля 1987 г. способствовала проведению эксперимента. Средняя глубина промерзания на этот период составила 26 см. После вскрытия монолитов от снега на внутренней поверхности пленки за декабрь, январь и 18 дней февраля образовался слой конденсационной влаги толщиной 1,5–2,0 мм. Такая величина испарения влаги не могла существенно изменить влагосодержания монолитов. Температура поверхности почвы всех монолитов на начало проведения эксперимента составляла 1,0 °С. Определить температурный профиль и профиль влажности на всю высоту монолита на момент проведения эксперимента не представлялось возможным из-за отсутствия необходимого измерительного оборудования. Подробные водно-физические свойства монолитов на момент консервации представлены в таблице 3.44.

Таблица 3.44 – Характеристика основных водно-физических свойств исследуемых монолитов почвы

Слой	Номер монолита																	
	1			2			3			4			5			6		
	W,%	ρ, г/см <sup>3</sup>	n,%	W,%	ρ, г/см <sup>3</sup>	n,%	W,%	ρ, г/см <sup>3</sup>	n,%	W,%	ρ, г/см <sup>3</sup>	n,%	W,%	ρ, г/см <sup>3</sup>	n,%	W,%	ρ, г/см <sup>3</sup>	n,%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0-10	70,6	0,2	84,0	71,8	0,24	86,3	33,0	0,29	86,0	35,2	0,29	84,3	66,0	0,22	83,0	67,0	0,22	87,2
10-20	76,5	0,24	82,0	77,4	0,23	87,2	48,0	0,25	86,0	51,3	0,25	85,7	69,0	0,27	88,0	68,0	0,27	85,3
20-30	80,0	0,18	87,0	78,5	0,17	90,3	58,0	0,32	81,0	62,3	0,32	82,0	72,5	0,29	90,0	74,7	0,29	83,3
30-40	80,0	0,15	89,0	79,6	0,16	89,0	52,0	0,27	85,0	54,1	0,27	84,5	74,5	0,18	90,0	76,2	0,18	88,3
40-50	81,0	0,15	90,0	81,0	0,15	91,2	35,0	0,26	52,0	37,1	0,26	52,0	79,0	0,16	90,0	78,2	0,16	90,0
Слой	Номер монолита																	
	7			8			9			10			11			12		
	W,%	ρ, г/см <sup>3</sup>	n,%	W,%	ρ, г/см <sup>3</sup>	n,%	W,%	ρ, г/см <sup>3</sup>	n,%	W,%	ρ, г/см <sup>3</sup>	n,%	W,%	ρ, г/см <sup>3</sup>	n,%	W,%	ρ, г/см <sup>3</sup>	n,%
0	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
0-10	45,0	0,22	87,0	43,2	0,22	87,7	33,0	0,22	87,0	35,2	0,22	86,6	18,0	0,27	87,0	21,2	0,27	84,4
10-20	53,0	0,27	84,0	52,3	0,27	84,1	42,0	0,27	84,0	43,3	0,27	84,7	41,0	0,27	84,0	43,3	0,27	84,1
20-30	56,0	0,29	83,0	57,2	0,26	83,8	46,0	0,29	83,0	47,9	0,29	84,3	47	0,29	83,0	48,1	0,29	83,8
30-40	67,0	0,18	88,0	68,0	0,18	89,0	53,0	0,18	88,0	52,0	0,18	88,3	48,0	0,18	88,0	49,0	0,18	89,0
40-50	71,0	0,16	90,0	72,0	0,16	90,0	58,0	0,16	90,0	59,2	0,16	90,0	52,0	0,16	89,0	53,0	0,16	90,0

Вода на поверхность монолитов подавалась нулевой температуры. Напор воды на поверхности монолитов поддерживался постоянным (1,0 см) с помощью бачка Мариотта. Опыты по исследованию инфильтрации проводились в течение трех суток с 9–10 часов утра до наступления темноты, 19 час 00 мин – 19 час 30 мин. Сливные патрубки на момент прекращения эксперимента заглушались. Это позволило избежать обезвоживания монолитов. С возобновлением опытов сливной патрубков открывался, гравитационная влага, накопившаяся в сливном патрубке, сбрасывалась. Результаты опыта считались действительными с того момента, когда величина инфильтрации сравнивалась с последними значениями предыдущих суток.

*Результаты лабораторного эксперимента*

По результатам лабораторного эксперимента получены зависимости изменения интенсивности инфильтрации во времени. На рисунке 3.51 представлены зависимости для пар монолитов (5, 6) и (7, 8). Аналогичные зависимости получены и для остальных пар монолитов (3, 4), (9, 10), (11, 12). Они показывают, что закон изменения инфильтрации во времени один и тот же для всех пар монолитов вне зависимости от влажности, плотности, освоения. Имеет место ярко выраженный период впитывания, после чего наступает период установившейся фильтрации. Исключением является пара монолитов (1, 2) с почвой с неосушенного болота. В них впитывание происходило в первые 24 минуты

эксперимента. Слой впитывания составил 4 и 3 мм соответственно для монолита 1 и 2. Инфильтрация талых вод через монолиты отсутствовала на протяжении всего эксперимента, с 18 по 20 февраля 1987 г. Таким образом, при незначительной отрицательной температуре ( $-1^{\circ}\text{C}$ ) и высокой влажности 76,4 % сформировался водонепроницаемый слой, препятствующий движению влаги. Анализируя графические зависимости впитывания и инфильтрации талой воды через монолиты, можно отметить, что величина инфильтрации тем выше, чем ниже влажность при равной или сравнимой плотности почвы. Для образцов почвы с одинаковой плотностью эта зависимость по результатам эксперимента аппроксимируется уравнением

$$i = \exp(0.1896) \cdot W^{-3.36}, \quad (3.139)$$

где  $W$  – объемная влажность почвы в относительных единицах, %.

Время впитывания тем короче, а объем тем больше, чем ниже влажность. Постоянная температура воды в  $^{\circ}\text{C}$  не влечет изменения величины инфильтрации в установившемся режиме. Для остальных монолитов основные результаты анализа лабораторного эксперимента сведены в таблицу 3.45.

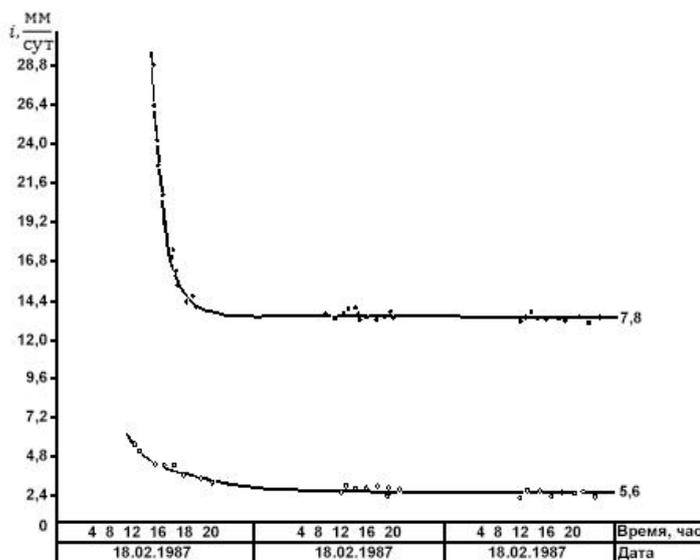


Рисунок 3.51 – Средние величины впитывания и инфильтрации в монолитах 5, 6 и 7, 8

Таблица 3.45 – Основные результаты лабораторного эксперимента

№ п/п	Наименование показателей	Номер монолита					
		1	3	5	7	9	11
		2	4	6	8	10	12
1	Время начала эксперимента	11 50	12 10	9 35	11 20	12 00	12 40
		11 50	12 17	9 25	11 25	12 00	12 46
2	Средняя влажность слоя 0–40 см почвы, %	76,77	47,75	70,5	52,25	43,5	38,5
		76,82	49,72	71,47	55,1	44,6	40,4
3	Средняя плотность слоя 0–40 см почвы, %	0,20	0,28	0,24	0,24	0,24	0,24
		0,20	0,28	0,24	0,24	0,24	0,24
4	Конец активной стадии впитывания, начало инфильтрации, час		12 50	11 05	12 31	12 42	13 26
			13 0	11 07	12 46	12 37	13 00
5	Объем впитавшейся влаги до начала инфильтрации, мм		3380	870	820	4190	4875
			277	635	540	4050	4640
6	Время стабилизации процесса инфильтрации, час		15 45	19 02	17 30	16 10	13 26
			16 30	13 40	18 08	16 28	13 00
7	Средняя величина установившейся инфильтрации, мм/сут		49,7	2,48	13,6	672	2760

*Теоретическое обоснование природы формирования талых вод в весенний период*

Выше отмечалось, что в бороздах и западинах формируются талые воронки благодаря тому, что в них создается микроклимат, отличный от основной части массива. Эти воронки и западины являются очагами повышенной инфильтрации талых вод к уровню грунтовых вод. Искусственное создание их попутно при проведении вспашки за счет правильно выбранного направления, профиля

борозды сможет значительно ускорить перевод талых вод в грунтовый сток. Поэтому поиск направления вспашки почвы для ориентации профиля борозды и ее направления с целью наиболее полного поглощения солнечной энергии для ускоренного оттаивания являются задачей данного моделирования.

*Общие сведения и постановка задачи*

Борозда аппроксимируется параболическим цилиндром. Система координат  $(oxyz)$  выбрана таким образом, что плоскость  $(xoy)$  лежит в плоскости земли, ось  $z$  – вертикальна, плоскость  $(xoz)$  – плоскость симметрии борозды; точки пересечения параболического цилиндра в системе координат  $(oxyz)$ :  $(0, -a, 0)$ ,  $(0, a, 0)$ ,  $(0, 0, -H)$ ,  $H$  – максимальная глубина борозды. Плоскость  $y'o'z$  проходит через Солнце;  $\theta$  – угол между плоскостями  $(yoz)$  и  $(y'o'z)$ ;  $-a'$  и  $a'$  – значение  $y'$  координаты точек пересечения плоскостей  $(y'o'z)$ ,  $(xoy)$  и поверхности параболического цилиндра;  $i$  – угол падения солнечных лучей;  $r$  – угол преломления. Ось  $oY'$  системы координат лежит в плоскости земли и направлена с востока на запад, ось  $oX$  – с юга на север,  $\varphi$  – угол между осями  $oy$  и  $oY'$  или между осями  $ox$  и  $oX'$ .

Постановка задачи. Так как талые воронки формируются в донной части борозды, то следует предположить, что на ее поверхности существуют точки, для которых плотность поглощенной лучистой энергии, проинтегрированная по некоторому промежутку времени, достигнет максимума в сравнении с другими точками. Задача заключается в том, чтобы найти координату таких точек в системе координат  $(xoy)$  (рис. 3.52).

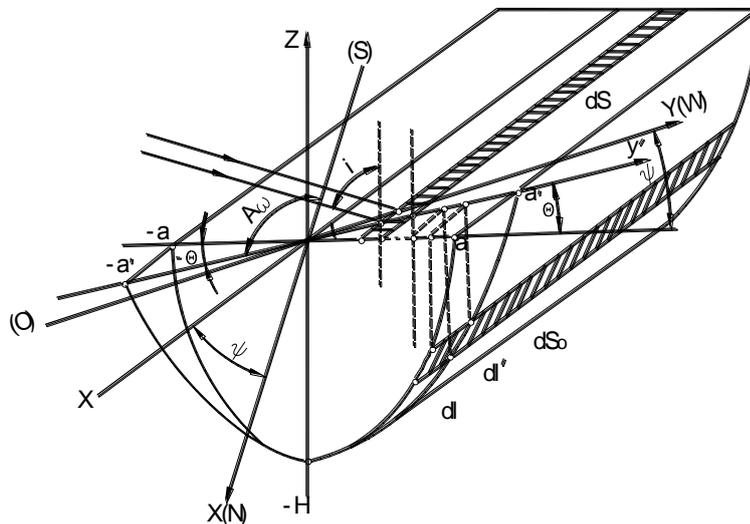


Рисунок 3.52 – Расчетная схема к определению радиационного излучения Солнца на поверхности борозды

*Учет прямого солнечного излучения*

На рисунке 3.53 показано сечение борозды, представленной в виде параболического цилиндра, плоскостью, проходящей через Солнце. Сечение параболического цилиндра плоскостью  $y'o'z$  представляет собой параболу, пересекающую ось  $oy'$  в точках  $(-a', 0)$  и  $(a', 0)$ , где

$$a' = a / \cos \theta, \tag{3.140}$$

где  $\theta = \theta(\tau)$  – это угол между плоскостями  $(y'o'z)$  и  $(yoz)$ . Рассмотрим точку  $A$  параболы,  $y'$ , координата которой равна  $y'_0$ . Пусть  $i$  – угол падения лучей. Найдем координату  $y'$  той точки  $B$  на оси  $oy'$ , преломленный луч света от которой падает в точку  $A$ . Закон преломления для точки  $B$  запишется в виде

$$\sin i = n \sin r, \tag{3.141}$$

где  $n$  – показатель преломления среды.

Уравнение прямой  $BA$  имеет вид

$$z = A(y' - y'_0), \tag{3.142}$$

где  $A = \text{tg}(\pi/2 + r) = -\text{ctg } r = -\cos r / \sin r$  – угловой коэффициент прямой.

Выражая  $\sin r = \sin i / n$  и учитывая, что  $\cos r = (1 - \sin^2 r)^{0.5} = (1 - \sin^2 i / n^2)^{0.5}$ , получим  $A = -(n^2 - \sin^2 i)^{0.5} / \sin i$ . Тогда получим

$$Z = -(n^2 - \sin^2 i)^{0.5} (y' - y'_0) / \sin i. \tag{3.143}$$

Уравнение параболы, как легко видеть, может быть записано в виде

$$Z = (Hy'^2 / a'^2) - H. \tag{3.144}$$

Прямая, определяемая уравнением (3.143), пересекает параболу, определяемую уравнением (3.144) в точке  $A$  с координатой  $(y'-y'_0)$ . Это предполагает решение уравнения  $\frac{Hy'_0{}^2}{a^2} - H = \frac{(n^2 \sin^2 i)^{0.5} (y' - y'_0)}{\sin i}$ .

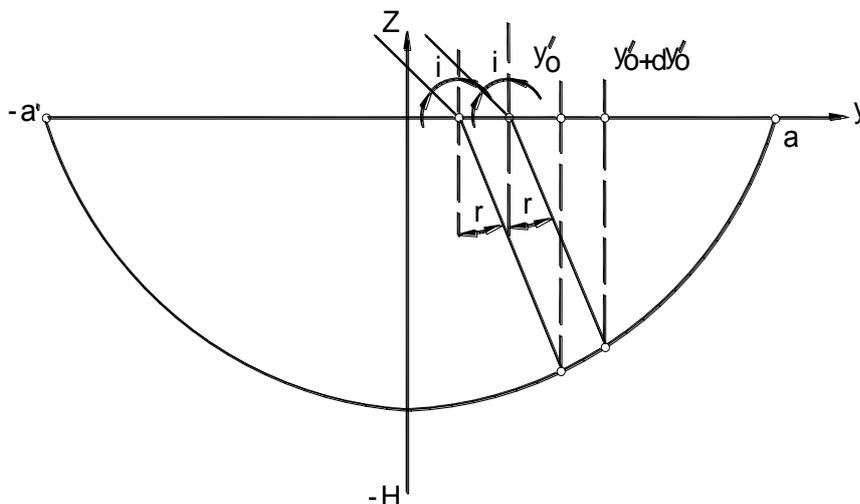


Рисунок 3.53 – Расчетная схема борозды, проходящей через Солнце

Решая уравнение, находим для  $y'$  координаты точки  $B$

$$\bar{y} = y'_0 + \frac{H \sin i}{(n^2 - \sin^2 i)^{0.5}} \left( \frac{y'_0}{a^2} - 1 \right). \quad (3.145)$$

Рассмотрим бесконечно малый участок параболы между точками  $A$  и  $A'$ , координаты которых равны соответственно  $y'_0$  и  $(y'_0 + dy'_0)$ . Ему соответствует участок на оси  $y'_0$  между точками  $B$  и  $B'$  с координатами  $y'$  и  $(y' + dy')$ , где величина  $dy'$  может быть найдена дифференцированием выражения (3.145)

$$d\bar{y} = dy'_0 \left[ 1 - \frac{2H \sin i}{a^2 (n^2 - \sin^2 i)^{0.5}} \right] \quad (3.146)$$

Проведем через точки  $A, A'$  и  $B, B'$  прямые, параллельные оси борозды. Рассмотрим участок борозды единичной длины вдоль оси  $oX$ . Тогда на поверхности борозды выделится элементарная площадка  $dS_0$ , освещаемая теми лучами, которые падают на площадку  $dS$ , лежащую в горизонтальной плоскости ( $xoy$ ). Координаты  $y'$  и  $y$  точек этих площадок, лежащих на прямой, параллельной оси  $ox$ , связаны соотношением

$$y' = y / \cos \theta. \quad (3.147)$$

Ширина полосы, соответствующая площадке  $dS$  в направлении оси  $oy$  равна, поэтому  $d\bar{y} = \cos \theta dy' = \cos \theta dy'_0 \left[ 1 + \frac{2H \sin i y'_0}{a^2 (n^2 - \sin^2 i)^{0.5}} \right]$ . Поскольку  $\cos \theta dy' = dy_0$ , где  $y_0$  и  $(y_0 + dy_0)$  – это  $y$  координаты пересечения с плоскостью  $yoZ$  прямых, проходящих через точки  $A, A'$  соответственно, параллельных оси  $ox$ ,  $y'_0 = y_0 / \cos \theta$ , то

$$dy = dy_0 \left[ 1 + \frac{2H \sin i \cos \theta y_0}{a^2 (n^2 - \sin^2 i)^{0.5}} \right], \quad (3.148)$$

и площадь полоски  $dS$  единичной длины будет равна

$$dS = dy \times 1 = dy_0 \left[ 1 + \frac{2H \sin i \cos \theta y_0}{a^2 (n^2 - \sin^2 i)^{0.5}} \right]. \quad (3.149)$$

Найдем теперь площадь  $dS_0$  полоски на поверхности борозды, на которую после преломления падает часть потока солнечной энергии, направленного на площадку  $dS$ . Уравнение параболы, являющееся сечением параболического цилиндра плоскостью ( $yoZ$ ), имеет вид, показанный на рисунке 3.54

$$Z = (Hy' / a^2) - H, \quad (3.150)$$

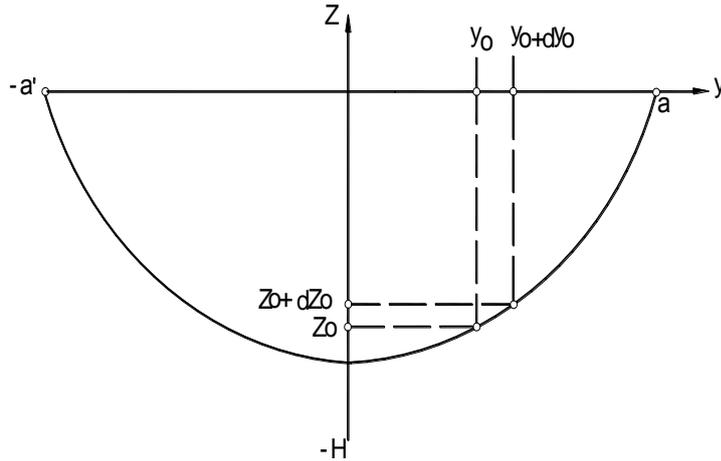


Рисунок 3.54 – Расчетная схема к определению эквивалента площади поверхности воды и борозды

Элемент дуги параболы  $dl = -(dy^2 + dz^2)^{0.5} = dy(1 + (dz/dy)^2)^{0.5}$  и из (3.150) имеем  $dz/dy = 2Hy/a^2$ . Тогда длина дуги параболы между точками с  $y$  координатами  $y_0$  и  $(y_0 + dy_0)$  будет равна

$$dl = dy_0(1 + (2Hy_0/a^2)^2)^{0.5}. \quad (3.151)$$

Поскольку площадку  $dS$  на поверхности борозды имеет единичную длину, то ее площадь равна

$$dS_0 = dl \times 1 = dy_0(1 + (2Hy_0/a^2)^2)^{0.5}. \quad (3.152)$$

Пусть  $G \perp$  – плотность потока прямого солнечного излучения, т. е. энергия, переносимая ежесекундно прямым солнечным излучением через единичную площадку перпендикулярно направлению излучения на площадку  $dS$ , лежащую в горизонтальной плоскости ( $oxy$ ). Ежесекундная величина энергии будет равна  $dG = G \perp dS \cos i = G \perp \cos i \left[ 1 + \frac{2H \sin i \cos \theta y_0}{a^2(n^2 - \sin^2 i)^{0.5}} \right] dy_0$ .

Пусть далее  $A_B$  альbedo воды. Пренебрегая поглощением энергии в воде, запишем уравнение для ежесекундно падающей на площадку  $dS_0$  борозды энергии в виде

$$dG_o = (1 - A_B)dG = G \perp (1 - A_B) \cos i = \left[ 1 + \frac{2H \sin i \cos \theta y_0}{a^2(n^2 - \sin^2 i)^{0.5}} \right] dy_0. \quad (3.153)$$

Плотность потока, падающей на площадку  $dS_0$  энергии прямого излучения (энергетическая освещенность) запишется в виде  $G_{np} = dG_o/dS_0$ , что с учетом (3.152) и (3.153) дает

$$G_{np} = \frac{G \perp (1 - A_B) \cos i \left[ 1 + \frac{2H \sin i \cos \theta y_0}{a^2(n^2 - \sin^2 i)^{0.5}} \right]}{\left[ 1 + (2Hy_0/a^2)^2 \right]^{0.5}}. \quad (3.154)$$

Для нахождения альbedo воды воспользуемся вытекающими из формулы Френеля выражениями для коэффициентов отражения составляющей световой волны в поляризованных взаимно перпендикулярных плоскостях

$$\beta \perp = \left[ \frac{\cos i - n \cos r}{\cos i + n \cos r} \right]^2; \quad \beta \parallel = \left[ \frac{n \cos i - \cos r}{n \cos i + \cos r} \right]^2. \quad (3.155)$$

Для прямого солнечного излучения интенсивность указанных составляющих одинакова и равна половине интенсивности световой волны. Поэтому для альbedo имеем

$$A_B = 0.5(\beta \perp + \beta \parallel). \quad (3.156)$$

Используя закон преломления  $\sin i = n \sin r$  и зависимости (3.155), запишем выражение (3.156) в виде

$$A_B = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\cos i - (n^2 - \sin^2 i)^{0.5}}{\cos i + (n^2 - \sin^2 i)^{0.5}} \right)^2 + \left( \frac{n \cos i - (n^2 - \sin^2 i)^{0.5}/n}{n \cos i + (n^2 - \sin^2 i)^{0.5}/n} \right)^2 \right]. \quad (3.157)$$

С учетом (3.157) выражение для плотности потока энергии, падающей на поверхность борозды, примет вид

$$G_{np} \frac{G \perp \cos i \left[ 1 + (2H \sin i \cos \theta y_o) / (a^2 (n^2 - \sin^2 i)^{0.5}) \right]}{\left[ 1 + (2Hy_o / a)^2 \right]^{0.5}} (1 - A_b). \quad (3.158)$$

Величины  $G \perp, i, \theta$  в формуле (3.158) являются функциями времени. Значения  $G \perp(\tau)$  табулированы, табулированы также значения  $(h_o - 90^\circ - i)$  высоты солнца над горизонтом. Найдем угол  $\theta$  с задаваемыми таблично значениями азимута Солнца, отсчитываемыми от направления на юг ( $A_o$ ).

Пусть  $\varphi$  – угол, определяющий ориентацию борозды относительно направления на юг (рис. 3.52) (меньший из двух углов, образуемых осью борозды с направлением на юг). Тогда если учесть, что азимуты, отсчитываемые от направления на юг к востоку, считаются отрицательными, а к западу – положительными и если под  $\theta$  понимать меньший из двух углов между вертикальной плоскостью, проходящей через солнце, и плоскостью, перпендикулярной оси борозды, то связь между углами выглядит, как следует из рисунка 3.52, следующим образом

$$\theta = (\varphi - A_o - 90^\circ) \text{ или } = (270^\circ + A_o - \varphi). \quad (3.159)$$

При использовании формулы (3.159) следует учесть, что в зависимости от моментов времени  $\tau_*$  и  $\tau_*$  освещаются разные стороны борозды. Таким образом, формула (3.158) примет вид

$$G_{np} = \frac{G \perp \sin i h_o \left[ 1 + (2H \cosh_o |\sin i(\varphi - A_o)| y_o) / (a^2 (n^2 - \cos^2)^{0.5} h_o) \right]}{1 + (2Hy_o / a)^2} \times \left. \left[ 1 - \frac{1}{2} \left| \frac{\cos i - (n^2 - \sin^2 i)^{0.5}}{\cos i + (n^2 - \sin^2 i)^{0.5}} \right| + \left( \frac{n \cos i - (n^2 - \sin^2 i)^{0.5} / n}{n \cos i + (n^2 - \sin^2 i)^{0.5} / n} \right)^2 \right] \right\}. \quad (3.160)$$

В формуле (3.160) переход к преимущественному освещению другой части поверхности осуществляется в момент времени  $\tau_*$ , в который  $\sin i(\varphi - A_o)$  изменяет знак.

В приведенном примере не учитывались эффекты, которые могут возникнуть у края борозды вблизи точки  $y'$ , координата которой близка к  $(-a')$ . При восходе Солнца, когда  $i = i_o = 90^\circ$ , угол преломления находится из соотношения  $\sin r_o = 1/n$ . Принимая  $n = 1,33$ , получаем  $r_o = 0,85 = 48,8^\circ$  и  $\text{tg} r_o = 1,14$ . Найдем тангенс угла наклона касательной к параболе (рис. 3.55) в точке С с  $y'$ -координатой, равной  $(-a')$ .

$$\frac{dz'}{dy} = \frac{2Hy'}{a'^2} \quad \text{и} \quad \left. \frac{dz}{dy} \right|_{y'=-a'} = -\frac{2Hy'}{a'^2}. \quad (3.161)$$

На рисунке 3.55 этот угол наклона касательной обозначен через  $\alpha$ .

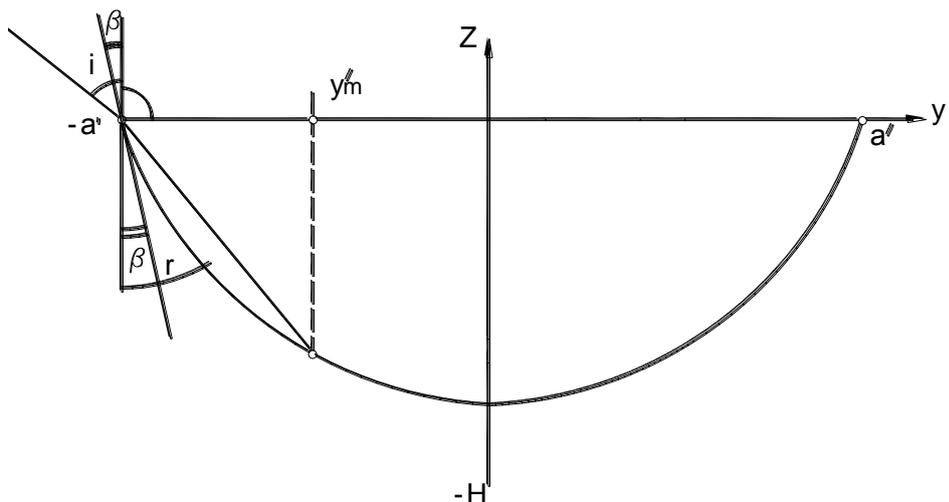


Рисунок 3.55 – Расчетная схема к определению минимальной координаты освещаемых точек

Введя в рассмотрение угол  $\beta = \alpha - 90^\circ$ , для которого  $\text{tg} \beta = -\text{ctg} \alpha - a'/2H$ , легко видеть, что при  $r < \beta$ , т. е. при  $\text{tg} \beta > \text{tg} r_o$  или  $a'/2H > 1,14$ , даже при восходе Солнца освещаются точки поверхности борозды со всеми  $y'$ -координатами в пределах от  $(-a')$  до  $a'$ . Если это условие не выполнено, то часть поверхности борозды, прилегающая к точке с  $y'$ -координатой, равной  $(-a')$ , не освещается совсем. Минимальная координата  $y'_{om}$  освещаемых точек найдется следующим образом.

Уравнение прямой, составляющей угол  $r$  с вертикалью и проходящей через левый край борозды, имеет вид  $Z = -ctgr(y' + a') = (-cosr / sin r)(y' + a') = -\frac{(1 - \sin^2 i / n^2)^{0.5}(y' + a')}{\sin i / n}$ , или

$$Z = -(n^2 - \sin^2 i)^{0.5}(y' + a') / \sin i. \quad (3.162)$$

Решая совместно уравнения (3.162) и (3.144)  $Hy'^2/a^2 - H = -(n^2 - \sin^2 i)^{0.5}(y' + a') / \sin i$ , находим для координаты  $y'_{om}$  выражение

$$y'_{om} = a' - \left[ a'^2 (n^2 - \sin^2 i)^{0.5} / (H \sin i) \right]. \quad (3.163)$$

Таким образом, при  $a'/2H < 1.14$  формула (3.160) для  $G_{np}$  справедлива лишь для точек, координата которых удовлетворяет условию  $y' > y'_{om}$ . При убывании угла  $i$  от  $90^\circ$  в момент восхода (в этот момент значение  $y'_{om}$  минимально и равно  $y'_{om} = -a' - a'^2(n^2 - 1)^{0.5}/H$ ) точки начинают освещаться и с меньшими координатами. Для любой точки с  $y'$  координатой в интервале  $(-a', a' - a'^2(n^2 - 1)^{0.5}/H)$  существует значение угла  $i$ , начиная с которого эта точка освещается. Это значение находят из (3.164)

$$i = \arcsin \frac{n}{\left[ 1 + H^2(a - y_o)^2 / a'^4 \right]^{0.5}}. \quad (3.164)$$

Рассуждения справедливы, конечно, и для правого края борозды при симметричном относительно нормали падении света. Поскольку поверхность борозды достаточно шероховата, можно считать, что плотность потока поглощенной энергии не зависит от угла падения преломленного света на поверхность борозды (иначе говоря, альbedo поверхности борозды не зависит от угла падения света на эту поверхность). Пусть  $\chi$  – некоторый коэффициент, определяющий долю поглощаемой энергии. Из изложенного вытекает следующий порядок действий (рис. 3.56).

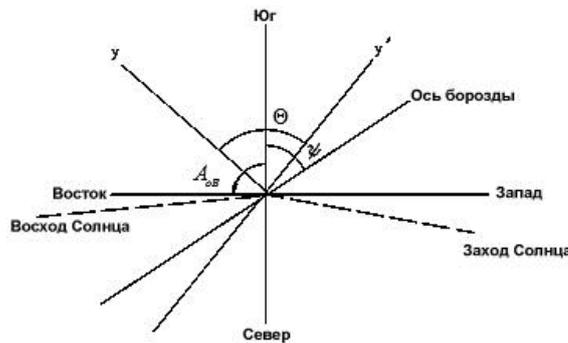


Рисунок 3.56 – Расчетная схема к определению угла  $\theta$

На плане провести ось борозды под известным углом  $\varphi$  к направлению на юг. Отметить азимут восхода Солнца  $A_{0B}$  и провести ось  $y'$  в направлении, противоположном направлению восхода Солнца. Перпендикулярно оси борозды провести ось  $y$  в том направлении, при котором угол  $\theta$  между осями  $y$  и  $y'$  будет меньше  $90^\circ$ . Найти угол  $\theta$ .

Если выполняется условие  $\frac{a'}{2H} - \frac{a}{2H \cos \Theta} - \frac{a}{|\sin(\varphi - A_{0B})| 2H} \geq 1.14$ , то вся поверхность борозды начнет освещаться сразу. Следует найти по таблицам момент времени  $\tau_*$ , в который  $\sin i (\varphi - A_0) G_{np}(\tau) = 0$ . Если таких моментов два (это возможно для достаточно северных широт), то мы их обозначим через  $\tau_*$  и  $\tau_{**}$ . Плотность поглощенной энергии в точке борозды с координатной  $y_o$  на этом этапе определится выражением  $G_{1\text{погл.нр.}} = \chi \int_{\tau_6}^{\tau_*} G_{np.}(\tau) d\tau$  или  $G_{1\text{погл.нр.}} = \chi \left[ \int_{\tau_6}^{\tau_*} G_{np.}(\tau) d\tau + \int_{\tau_{**}}^{\tau_3} G_{np.}(\tau) d\tau \right]$ .

На втором этапе от  $\tau_*$  до  $\tau_3$  или от  $\tau_*$ , до  $\tau_{**}$ , где  $\tau_3$  – момент захода Солнца, освещение происходит относительно оси борозды с другой стороны. Соответствующее выражение для  $(G'_{np}(\tau))$  получается из (3.160) заменой  $y_o$  на  $(-y_o)$ . Таким образом, на втором этапе имеем  $G_{2\text{погл.нр.}} = \chi \int_{\tau_*}^{\tau_3} G'_{np.}(\tau) d\tau$  или

$$G_{2\text{погл.нр.}} = \chi \int_{\tau_*}^{\tau_{**}} G'_{np.}(\tau) d\tau. \text{ Полный поток поглощенной энергии в точке с координатой } y_o \text{ за световой день равен } G_{\text{погл.нр.}} = \chi \left[ \int_{\tau_6}^{\tau_*} G_{np.}(\tau) d\tau + \int_{\tau_*}^{\tau_3} G'_{np.}(\tau) d\tau \right] \text{ или } G_{\text{погл.нр.}} = \chi \left[ \int_{\tau_6}^{\tau_*} G_{np.}(\tau) d\tau + \int_{\tau_*}^{\tau_{**}} G'_{np.}(\tau) d\tau + \int_{\tau_{**}}^{\tau_3} G_{np.}(\tau) d\tau \right]. \quad (3.165)$$

Если условие  $a/2H |(\sin(\varphi - A_{0B}))| > 1,14$  не выполнено, то расчет усложняется. Для точек, координаты  $y'_o$  которых удовлетворяют условию

$$a' - a'^2(n^2 - 1)^{0.5} / H < y < -a' + a'^2(n^2 - 1)^{0.5} / H, \quad (3.166)$$

где  $a' = a |(\sin(\varphi - A_{0B}))|$ .

Справедливо по-прежнему выражение (3.165). Для точек с координатами  $y'_o = y_o / (\sin(\varphi - A_{0B}))$ , удовлетворяющими условиям  $y'_o (-a', a' - a'^2(n^2 - 1)^{0.5} / H$  и  $y'_o (a', -a' + a'^2(n^2 - 1)^{0.5} / H$ , нужно вначале решить уравнение относительно  $\tau$  уравнение, вытекающее из (3.164)

$$\cosh_o = n / [1 + H^2 \sin^2(\varphi - A_o)^2 (a - y_o)^2 / a^4]^{0.5} \quad (3.167)$$

Это уравнение может иметь либо один ( $\tau_{*1}$ ), либо несколько ( $\tau^*, 1, 2, 3, \dots$ ) корней в зависимости от ориентации борозды и координат  $y_o$  выбранной точки. В интервале ( $\tau_b, \tau_{*1}$ ) точки типа I не освещены, на интервале ( $\tau_{*1}, \tau_{*2}$ ) – освещены, и так продолжается до достижения момента времени  $\tau_*$ , в который изменяется сторона преимущественного освещения. В определенный момент условие (3.167) перестает влиять на освещенность точек, и так продолжается до момента  $\tau_3$  или  $\tau_{**}$ , если последний существует. Пусть, например, значение  $\tau_*$  лежит между  $\tau_{*i-1}$  и  $\tau_{*i+1}$ , а  $\tau_{**}$  между  $\tau_{*k}$  и  $\tau_{*k+1}$ , и тогда плотность поглощенной энергии для точек типа I запишется в виде

$$G_{\text{погл. пр.}} = \left[ \int_{\tau_{*1}}^{\tau_{*2}} G_{\text{пр.}}(\tau) d\tau + \int_{\tau_{*3}}^{\tau_{*4}} G_{\text{пр.}}(\tau) d\tau + \dots + \int_{\tau_{*1}}^{\tau_{*i}} G_{\text{пр.}}(\tau) d\tau + \int_{\tau_{*k}}^{\tau_{**}} G'_{\text{пр.}}(\tau) d\tau + \int_{\tau_{**}}^{\tau_{*k+1}} G_{\text{пр.}}(\tau) d\tau + \dots \right] \quad (3.168)$$

при условии, что ( $i$ ) и ( $k$ ) – нечетные числа. Для упрощения записи выражений для  $G$  можно воспользоваться следующим графическим построением. На рисунке 3.57 показана ось времени, на которой последовательно отмечены моменты времени  $\tau_b, \tau_{*1}, \dots, \tau_3$ . Прямоугольником отмечены промежутки времени, для которых точки типа I освещены. На рисунке показана ситуация, соответствующая формуле (3.168), когда ( $i$ ) и ( $k$ ) – нечетные числа. На оси времени отмечены также моменты  $\tau_*$  и  $\tau_{**}$ , фиксирующие моменты изменения подинтегральной функции для точек типа I (напомним, что  $G'_{\text{пр.}}(\tau)$  отличается от  $G_{\text{пр.}}(\tau)$  заменой ( $y$ ) на ( $-y_o$ ).

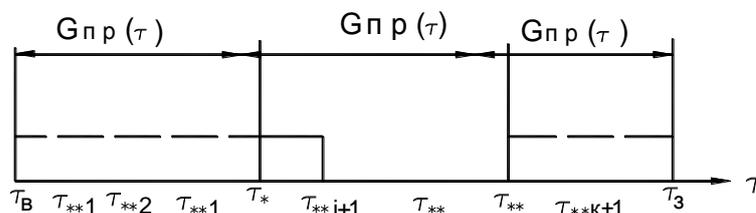


Рисунок 3.57 – Расчетная схема для определения пределов интегрирования для точек типа I

Рассмотрение точек II производится аналогично, только вместо уравнения (3.167) нужно решать уравнение

$$\cosh_o - n / [1 + H^2 \sin^2(\varphi - A_o)(a + y_o)^2 / a^4]^{0.5}, \quad (3.169)$$

корни которого обозначаются далее  $\tau_{**1}, \tau_{**2}$ . Условия ограничения (3.168) играют роль лишь в интервале времени  $\tau_*$ ,  $\tau_{**}$  графическая диаграмма имеет следующий вид (рис. 3.58).

Диаграмма построена для случая, когда  $i$  – нечетное, а  $k$  – четное число. Отдельного исследования требует случай, когда область, оговариваемая условием (3.166), отсутствует, а области точек типа I и II перекрываются. Легко видеть, что этот случай реализуется если  $H/a' > (n^2 - 1)^{0.5}$  или  $H/a' > 0.88$ .

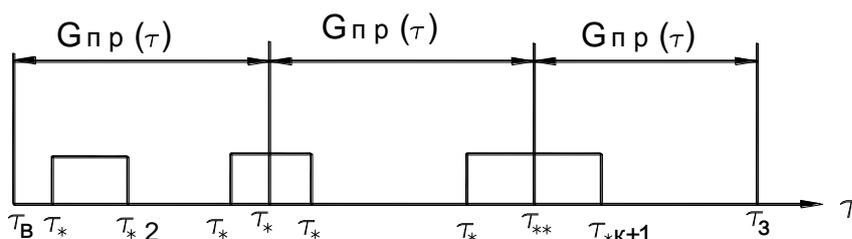


Рисунок 3.58 – Расчетная схема для определения пределов интегрирования для точек типа II

При этом для точек  $-a' < y_o' < a' + a'^2(n^2 - 1)^{0.5} / H$  мы имеем, очевидно, ситуацию описанного выше типа для точек I, а для точек  $a' < y_o' < a' - a'^2(n^2 - 1)^{0.5} / H$  ситуацию для точек типа II. Для промежуточных точек,  $-a + a'^2(n^2 - 1)^{0.5} / H < y_o' < -a' + a'^2(n^2 - 1)^{0.5} / H$ , которые назовем точками типа I-II, ситуация отли-

чается тем, что для них в любом из временных интервалов  $(\tau_b, \tau_*)$ ,  $(\tau_*, \tau_{**})$ ,  $(\tau_{**}, \tau_3)$  играют роль ограничения (3.167) и (3.168). Значения  $(\tau_*, \tau_{**})$  определяют лишь моменты замены подинтегральной функции  $G$  на  $G'$ , и наоборот.

*Результаты математического моделирования распределения энергии солнечного излучения по поверхности затопленной борозды*

Моделирование распределения энергии солнечного излучения проводилось, как изложено в теории вопроса, с учетом принятых выше допущений. В расчетах были приняты табулированные значения среднемноголетнего солнечного излучения при средней облачности для исследуемого участка ПОМС по рекомендациям, изложенным в специальной литературе [567]. Табулированные значения высоты и азимута Солнца получены из «Астрономического ежегодника» и были привязаны к среднемноголетней дате начала весеннего паводка, 19 марта. По топографическим данным направление борозд на юг-север образуют угол  $\varphi$ , равный  $22^\circ 32'$ .

Выяснение количественной и качественной оценки распределения солнечной энергии было начато с определения ее полного освещения по формуле (3.164). Условие по расчету не выполняется. Это означает, что часть поверхности борозды, прилегающая к точке с  $y'$ -координатой  $(-a)$  не освещается вовсе. Минимальная ее координата, как было отмечено, может быть найдена по уравнению (3.164). Вычисление функции, табулированной во времени  $y = \sin(\varphi - A_0)$  показало, что существует момент времени, когда она обращается в ноль. Физическое объяснение этого явления, привязываясь к исследуемой широте местности, заключается в том, что для каждой точки поверхности борозды существует один момент времени, соответствующий переходу точки из состояния затенения в освещение, и наоборот.

Решение трансцендентного уравнения (3.167) было произведено графо-аналитическим методом относительно независимой переменной по времени. Результаты расчета для борозды исследуемого участка приведены на рисунке 3.59. Пересечение кривой косинуса высоты Солнца с кривыми, выбранными с шагом 2 см,  $y$ -координат точек поверхности борозды дало искомые моменты времени, или пределы интегрирования. Как видно из рисунка 3.59, момент времени, соответствующий совпадению точек всех  $y$ -координат в одной точке, соответствует изменению преимущественной стороны освещения.

Решение уравнения (3.165), подинтегральная функция которого приведена выше, осуществлялось численным методом с шагом во времени, равным 15 минутам. Полученное значение соответствовало количеству энергии прямого солнечного излучения, поглощаемого поверхностью борозды под слоем талой воды в 30 см.

Аналогичным образом были проведены расчеты для типовой борозды при различной ее ориентации относительно направления на юг. Результаты расчетов иллюстрируются на рисунке 3.60, который демонстрирует, что с увеличением угла  $\varphi$  от  $0$  до  $90^\circ$  количество поглощаемой энергии солнечного излучения поверхностью борозды растет, а при дальнейшем увеличении угла  $\varphi$  с той же интенсивностью уменьшается. Функция симметрична относительно ординаты в  $90^\circ$ . Максимальное количество энергии соответствует направлению борозды запад-восток.

Уже отмечалось, что талые воронки образуются в наиболее пониженной части борозды, затопленной водой, в виде полосы шириной 10–12 см. Поэтому была сделана попытка оценить влияние ориентации борозды на количество поглощаемой солнечной энергии прямого излучения на полосу дна с координатами от  $-6$  до  $+6$  см, т. е. 12 см, но какой-либо связи установить не удалось. Как видно по рисунку 3.61, количество поглощаемого прямого солнечного излучения остается практически неизменным при любом угле поворота борозды. Максимальная амплитуда суточного накопления энергии не превышает  $30\text{--}40 \text{ Дж/м}^2$ . Объясняется это тем, что существующее затенение точек этих  $y$ -координат очень кратковременное и во время низкой солнечной активности соответствующее моментам восхода и захода Солнца. Вследствие этого считаем, что принятое допущение правомерно.

В расчетах количества поглощаемой солнечной энергии в виде прямого излучения с большими  $y$ -координатами нет необходимости, так как ясно, что их затенение более длительно, мощность мерзлой толщи больше, процесс оттаивания направлен нормально к поверхности борозды, т. е. под некоторым углом к мерзлой полосе.

Кроме того, просчитывалась величина прямого радиационного излучения, приходящаяся на полосу борозды в 1 см длиной в 1,0 м при натурном положении борозды на опытном участке. Установлено, что наибольшее количество прямой радиации приходится на точку с координатой  $y = 5,0$  см, смещенную к северному откосу борозды (рис. 3.62), что подтверждается проведенными натурными исследованиями.

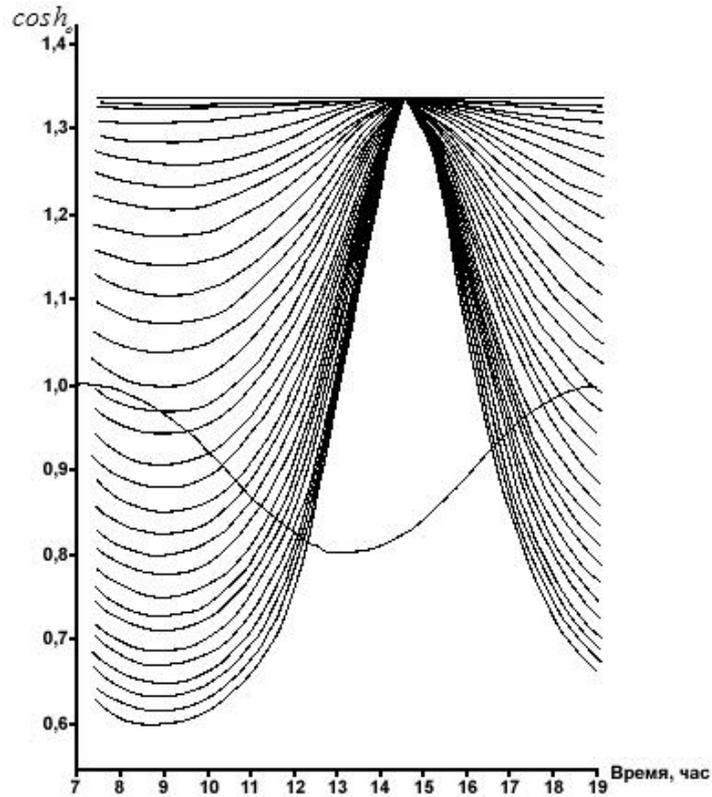


Рисунок 3.59 – Расчетная схема к определению пределов интегрирования трансцендентного уравнения (3.167)

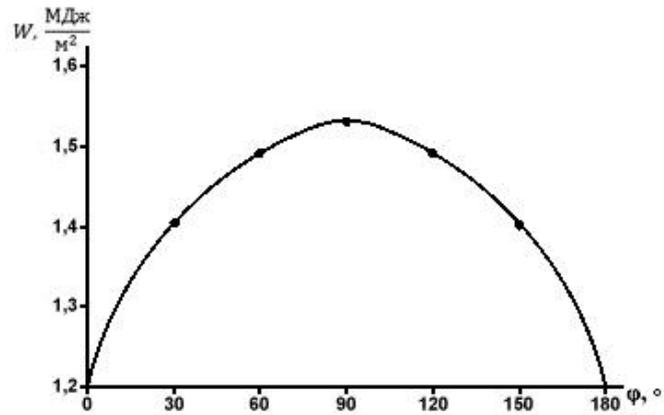


Рисунок 3.60 – Зависимость количества поглощаемого прямого радиационного излучения Солнца поверхностью затопленной борозды от ее ориентации относительно сторон света

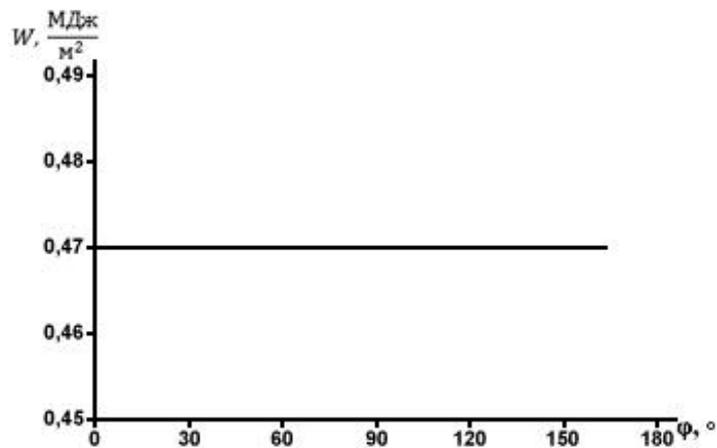


Рисунок 3.61 – Зависимость количества поглощаемого прямого радиационного излучения Солнца полоской борозды с у-координатами (-6) – (+6) см от ориентации относительно сторон света

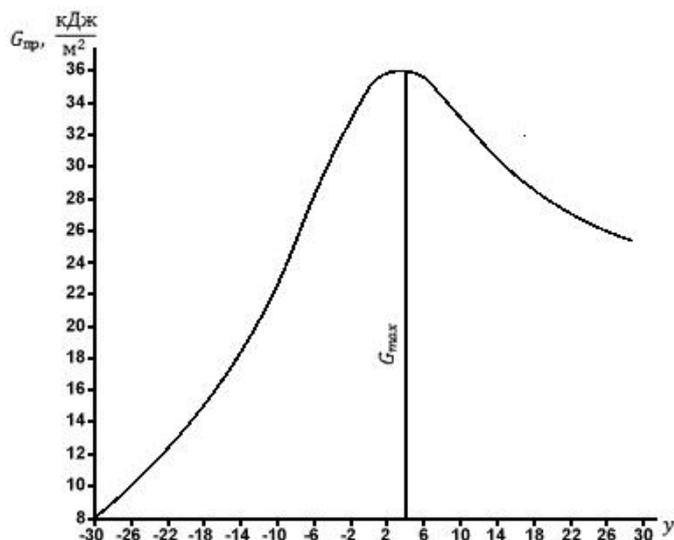


Рисунок 3.62 – Связь количества прямого радиационного излучения, приходящегося на полосу борозды в 1,0 см длиной 1,0 м и вышележащий слой талой воды

Представляет определенный интерес выяснение закономерностей поглощения прямой солнечной радиации донной частью борозды при различной ширине борозды по верху. При моделировании задавалась различная ширина борозды: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 1,0; 1,2 м. Результаты представлены на рисунке 3.63.

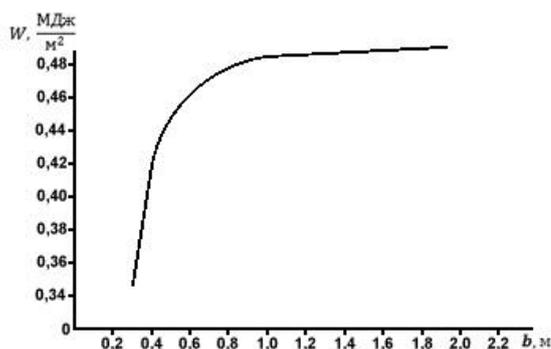


Рисунок 3.63 – Зависимость количества поглощаемого прямого радиационного излучения Солнца полосой борозды с у-координатами (-6) – (+6) см от ширины борозды

Как видно на рисунке 3.63, с увеличением ширины борозды от 0,3 м наблюдается резкий рост количества поглощаемой энергии до ширины борозды по верху 0,7–0,8 м. Начиная с ширины 0,8 м кривая упирается, и с 1,2 м рост приема энергии прекращается. Физическим объяснением этого факта является то, что начиная с этой ширины борозды по верху прекращается затенение точек с любыми у-координатами в любое дневное время.

*Обобщение закономерностей инфильтрации талых вод на осушенных торфяниках Полесья, находящихся длительно в сельскохозяйственном использовании*

Данная часть является завершающим этапом исследования инфильтрации талых вод на осушенных торфяниках Белорусского Полесья, длительно находящихся в эксплуатации. Конечной целью исследований явилось установление эмпирической зависимости интенсивности инфильтрации талых вод во времени от определяющих ее факторов. Корректное оперирование этим параметром крайне необходимо для определения величины расчетного расхода сопрягающих сооружений и междурядного расстояния, оптимизации сроков начала полевых работ.

Исследование частных регрессионных связей позволило установить, что наблюдаются устойчивые связи интенсивности инфильтрации и:

- осенней влажности почвы, коэффициент корреляции связи равен 0,64;
- температуры воздуха, коэффициент корреляции связи равен 0,53;
- уровня грунтовых вод, коэффициент корреляции связи равен 0,4;
- плотности почвы, коэффициент корреляции связи равен 0,26;
- глубины промерзания, коэффициент корреляции связи равен 0,12.

Совершенно отсутствует связь интенсивности инфильтрации и мощности снежного покрова.

Для вывода обобщающей эмпирической зависимости были обработаны результаты полевых исследований за весь период наблюдения. Данная зависимость содержит в себе посредством коэффициентов дополнительное приращение инфильтрации, вызванное деятельностью землеройных животных и действием сформировавшихся за зимний и весенний период талых воронок.

По материалам полевых исследований был сформирован ряд наблюдений, включающий в себя пять приведенных факторов, каждый из которых содержал 654 события. Ряд был сформирован с учетом требований математической статистики по объему выборочной совокупности с исключением случайных величин. Статистическая обработка ряда позволила установить эмпирическое уравнение, описывающее процесс инфильтрации и имеющее вид

$$i = 0.000148 \left[ \frac{H_{УГВ}}{\rho_n} \right]^{\frac{1}{W}} + 1.056 \frac{(t+1)^{2.5}}{h_m^{0.5}}, \quad (3.170)$$

где  $i$  – интенсивность инфильтрации, мм/сут;  $H_{УГВ}$  – предзимний уровень грунтовых вод, см;  $W$  – предзимняя объемная влажность слоя 0–40 см в относительных единицах, %;  $t$  – температура воздуха,  $^{\circ}C$ ;  $h_m$  – глубина промерзания почвы, см;  $\rho_n$  – плотность талой почвы, г/см<sup>3</sup>.

Коэффициент корреляции связи равен 0,88.

Полевыми исследованиями установлено, что во все годы наблюдений в период снеготаяния наблюдалась инфильтрация талой воды через мерзлый слой почвы на всех шести точках наблюдения. Суммарные величины инфильтрации за период снеготаяния по точкам наблюдения приведены в таблице 3.46.

Таблица 3.46 – Суммарная инфильтрация талой воды сквозь мерзлую почву осушенного торфяника за период снеготаяния, мм

Годы наблюдений	Слои инфильтрации талой воды по точкам наблюдения опытного участка, мм						
	т.1	т.2	т.3	т.4	т.5	т.6	Среднее
1986	22,6	22,9	27,0	30,5	18,5	17,5	21,4
1987	7,1	6,7	4,5	7,8	6,6	5,8	6,4
1988	25,6	23,5	27,5	25,0	26,0	27,0	25,8

Теплофизические расчеты мерзлого слоя, результаты которых приведены в публикациях [29, 34], показывают, что в 1986 и 1987 гг. к началу весеннего снеготаяния в наблюдаемых точках сформировался водонепроницаемый слой, который должен был блокировать просачивание талой воды и сформировать поверхностный сток. Свидетельством этого факта явилось затопление микропонижений в весенние половодья 1986 и 1987 гг. к концу снеготаяния, приуроченных к местам установки измерительного оборудования, равно как и всех прочих микропонижений водосбора. Сопоставим величину инфильтрации, измеренную инструментальным методом, с рассчитанной по балансу. При этом примем во внимание, что в микропонижениях на поле задерживается до 25,8 мм талой воды, по данным 1988 г., когда сформировался поверхностный сток и произошло затопление микропонижений. Объем инфильтрации воды из затопленного микропонижения будет состоять из количества воды, образующейся от таяния снега  $h_w$  и от выпавших осадков  $O_w$  за время таяния на площади в границах затопленного микропонижения за вычетом объема воды в микропонижении  $V_m$  плюс поверхностный сток  $Y_n$  с площади водосбора  $F$ . Последний будет состоять из снегозапасов и осадков за вычетом инфильтрации  $I$  в период снеготаяния и задержанной воды естественной шероховатостью почвы  $h_o$ . Тогда имеем

$$Y = [(h_w + O_w) - (I + h_o)]F. \quad (3.171)$$

Слой инфильтрации из затопленного микропонижения получим, разделив объем инфильтрационного стока на площадь затопленного микропонижения. Результаты расчетов приведены в таблице 3.47.

Выполненные расчеты показывают, что в 1986 и 1987 гг. микропонижения затапливались за счет таяния снега в месте его нахождения и поверхностного стока с частных водосборов. Объем воды от таяния снега на площади образования затопленных микропонижений превышал приток в 21,6 раза, соответственно площадь затопления составила до 90 % всей контролируемой в опыте площади. Процесс образования больших по площади микропонижений происходил сливанием их при подъеме уровня воды в тающем снеге смежных понижений рельефа. На затопленной, таким образом, пониженной части торфяника, находящегося длительно в сельскохозяйственном использовании, продолжительность затоплений достигала от 1 до 10–14 суток. Озимые зерновые в таких условиях сильно страдают, поэтому необходимы мероприятия по организации отвода талых вод.

Таблица 3.47 – Инфильтрация в период снеготаяния на площади, занятой затопленными микропонижениями (по балансу)

№ точек наблюдения	Объем воды в снеге на площади микропонижений, м <sup>3</sup>	Объем воды в снеге на частных водосборах, м <sup>3</sup>	Объем потерь на частных водосборах, м <sup>3</sup>	Поверхностный сток талых вод, м <sup>3</sup>	Объем воды в микропонижениях, м <sup>3</sup>	Объем инфильтрации по балансу, м <sup>3</sup>	Слой инфильтрации по балансу, мм
	$(h_{w+} O_w) F_d$	$(h_{w+} O_w) \Delta F$	$(I + h_o) \Delta F$	$Y_n$	$V_m$	$V_b$	$I_b$
1986 год							
1	3,78	40,53	35,23	5,23	4,0	0,60	-
2	22,7	19,25	16,90	2,35	13,0	9,70	12,10
3	383,0	170,46	164,0	6,46	208,0	175,0	21,60
4	9,46	22,7	23,50	-	4,60	4,86	24,30
5	66,22	57,94	45,40	12,54	44,30	21,92	15,65
6	49,19	39,35	30,03	9,32	38,40	10,79	10,37
1987 год							
1	44,0	7,3	3,52	4,01	38,0	6,0	7,5
2	37,4	15,79	7,26	8,52	42,0	4,6	-
3	605,0	38,70	18,26	22,4	570,0	35,0	3,2
4	27,5	9,9	4,75	5,15	30,0	2,5	-
5	135,0	9,63	4,41	5,22	126,0	9,0	3,7
6	68,0	35,31	15,65	20,26	85,0	17,0	-

*Предложения по организации отвода талых вод*

Для отвода талых вод, скопившихся в микропонижениях, могут быть использованы: ложбины, ложбины с подложбинным коллектором, сопрягающие воронки открытого и закрытого типов.

Ложбины для отвода поверхностного стока могут быть трассированы при обследовании полей в период весеннего половодья. В это время микропонижения затоплены талыми водами и между ними хорошо просматриваются седловины. Ложбины с подложбинным коллектором предпочтительней, так как подложбинный коллектор разгружает ложбину, способствует уменьшению скоростей поверхностного стока. Их следует устраивать при уклонах меньше 0,002.

Сопрягающие воронки открытого типа. Ширину воронки на входе следует принимать ширине ложбины по урезу воды при пропуске расчетного расхода воды. Воронка работает в режиме быстрого тока, уклон которого равен уклону откоса канала с допустимой скоростью на размыв 1,0 м/с.

Воронки закрытого типа конструктивно состоят из входного оголовка типа колодца-поглотителя поверхностного стока, закрытого водовода, оголовка устья, сопрягающей воронки с проводящим каналом.

*Определение величины расчетного расхода сопрягающих сооружений*

Талые воды формируют поверхностный сток при насыщении снега талой водой до его поверхности. Запас воды в снеге к моменту поверхностного стекания составляет

$$h_{\text{сн.нас.}} = \frac{h_c \gamma_c}{\gamma_c + (\rho_l - \gamma_c) / \rho_l}, \tag{3.172}$$

где  $h_c$  – высота снега до снеготаяния, см;  $\gamma_c$  – объемная плотность снега г/см<sup>3</sup>;  $\rho_l$  – плотность льда, г/см<sup>3</sup>.

Таяние слоя снега  $h_c$  определяет время затопления  $\tau_n$  поверхностным стоком микропонижений. Рассчитать его можно по сумме среднесуточных температур, используя температурный коэффициент таяния  $h_{tc} = 4-5$  мм/1<sup>0</sup>С и режим температур воздуха для конкретной весны. Как правило, для расчета открытой проводящей сети и сооружений на ней принимается 10%-ная обеспеченность весеннего половодья.

Учитывая, что потери воды на инфильтрацию пропорциональны длительности снеготаяния, получим объем поверхностного стока талых вод, который необходимо отвести через сопрягающее сооружение – быстроток сопрягающей воронки или водовод закрытой воронки.

$$Q_p = \frac{Y_n}{\tau_n} = \frac{(h'' - i\tau_{cx})F}{\tau_n 36400}, \tag{3.173}$$

где  $\tau_{cx}$  – длительность снеготаяния, сут;  $i$  – интенсивность инфильтрации, мм/сут;  $\tau_n$  – длительность поверхностного стока, сут;  $F$  – площадь водосбора микропонижений, м<sup>2</sup>.

*Пример определения величины расчетного расхода сопрягающего сооружения*

Сущность метода заключается в пошаговом вычислении величины проинфильтрованной талой воды сквозь мерзлую почву и выделении, таким образом, поверхностного стока, который и должен быть отведен гидротехническим сооружением. В качестве примера выбран характерный 1986 г.

Ход температуры воздуха, по данным ПОМС, до даты схода снега представлен в таблице 3.48.

Таблица 3.48 – Ход температуры воздуха за период снеготаяния, °С

Время, час. Дата	0	3,0	6,0	9,0	12,0	15,0	18,0	21,0	Ср.
06.03.1986	1,8	1,9	1,3	1,3	2,6	3,0	2,1	2,2	2,0
07.03.1986	0,4	-1,0	-1,0	-1,0	-0,1	3,0	2,9	0,8	0,5
08.03.1986	-2,0	-3,3	-3,6	-3,5	-2,0	-0,2	-0,1	-0,1	-1,9
09.03.1986	-0,2	0,3	0,0	0,1	0,4	1,7	2,0	-0,4	0,5
10.03.1986	1,0	0,4	0,5	0,1	0,2	0,4	0,3	0,1	0,4
11.03.1986	-0,6	-0,6	-0,5	-0,4	0,2	0,8	0,6	0,3	0,0
12.03.1986	-0,2	-0,5	-1,0	-1,0	-0,2	2,2	3,0	0,0	0,3
13.03.1986	-0,6	-1,4	-1,5	-2,2	-1,8	-0,9	-0,7	-1,4	-1,3
14.03.1986	-2,6	-2,4	-2,8	-2,7	-2,3	-1,7	-0,3	-3,8	-2,3
15.03.1986	-1,4	-5,2	-6,2	-3,8	-2,7	-1,0	-0,7	-3,7	-3,5
16.03.1986	-3,1	-4,7	-6,8	-4,3	0,3	2,3	3,4	-0,4	-1,7
17.03.1986	-2,0	-3,8	-5,5	-4,1	-2,1	5,0	5,1	-0,6	-0,5
18.03.1986	-1,6	-3,2	-4,0	-3,0	2,8	6,1	6,5	0,5	0,5
19.03.1986	-1,0	-2,2	-3,6	-2,0	3,6	5,8	6,0	1,2	1,0
20.03.1986	-2,1	-2,6	-4,5	-3,0	3,3	7,1	7,4	0,8	0,8
21.03.1986	-0,6	-2,2	-3,6	-2,1	1,0	2,7	2,2	-0,7	-0,4
22.03.1986	-2,4	-2,8	-3,0	-0,9	2,9	4,5	4,4	0,6	0,4

Таяние снега происходило в дневное и вечернее время, кроме дней с отрицательной температурой. Средняя глубина залегания УГВ на дату схода снега составила 136 см. Водно-физические характеристики почв балансового участка по шести точкам отбора, необходимые для расчета, приведены в таблице 3.49.

Таблица 3.49 – Водно-физические характеристики почв балансового участка и снежного покрова

Место отбора проб почвы	г.1	г.2	г.3	г.4	г.5	г.6	Среднее
$\rho_n$ , г/см <sup>3</sup>	0,24	0,227	0,217	0,22	0,225	0,23	0,226
$W$ , в отн.ед.	0,61	0,67	0,66	0,655	0,61	0,63	0,639
$h_{np}$ , см	28,3	30,4	33,2	32,9	29,8	31,8	31,06
$h_c$ , см	17,0	22,0	17,0	28,0	20,0	18,0	20,3
$\gamma_c$ , г/см <sup>3</sup>	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31

Расчет интенсивности инфильтрации талой воды ведем по средним значениям водно-физических характеристик почв водосбора для периодов с температурой воздуха больше 0°С. Для первого дня снеготаяния инфильтрация составила  $i = 0.000148 \left[ \frac{136}{0.226} \right]^{0.639} + 1.056 \frac{(1.8+1.0)^{2.5}}{\sqrt{31.06}} = 3.62 \text{ мм/сут.}$

Аналогичным образом рассчитаны значения интенсивности инфильтрации по остальным периодам снеготаяния. Результаты приведены в таблице 3.50.

Таблица 3.50 – Ход интенсивности инфильтрации за период снеготаяния

Дата	Продолжительность таяния снега, час	Количество проинфильтровавшейся воды, мм	Количество проинфильтровавшейся воды нарастающим итогом, мм
06.03.1986	24	3,49	3,49
07.03.1986	12	1,75	5,24
08.03.1986	0	0	5,24
09.03.1986	18	2,62	7,86
10.03.1986	18	3,49	11,35
11.03.1986	12	1,75	13,1
12.03.1986	0	1,31	14,41
13.03.1986	0	0	14,41
14.03.1986	0	0	14,41
15.03.1986	0	0	14,41
16.03.1986	9	1,74	16,15
17.03.1986	6	0,87	17,02
18.03.1986	12	1,74	18,76
19.03.1986	12	1,74	20,05
20.03.1986	12	1,74	22,24
21.03.1986	9	1,31	23,55
22.03.1986	12	2,62	26,17

Общая величина инфильтрации талых вод до даты схода снега составляет, как следует из таблицы 3.50, 26,17 мм.

$$\text{Получим запас воды в снеге } h_{\text{сн.нас.}} = \frac{0,3 \cdot 20,3}{0,3 + \frac{0,9 - 0,3}{0,9}} = 6,304 \text{ см} = 63,04 \text{ мм.}$$

Отсюда следует, что имеет место поверхностный сток. Его величина, пренебрегая испарением со снега, составит: 63,04 – 26,17 = 36,87 мм. Определим продолжительность поверхностного стока  $\tau_{\text{п}}$ . Слой талой воды, формирующийся от таяния снега, можно найти по формуле

$$h_s = h_t \cdot \tau_{\text{таян}} \cdot t, \quad (3.184)$$

где  $h_t$  – температурный коэффициент таяния снега, мм/сут на 1 °С;  $\tau_{\text{таян}}$  – продолжительность таяния снега, в долях суток;  $t$  – средняя температура воздуха за период таяния, °С.

Результаты расчета посуточного слоя талой воды сведем в таблицу 3.51.

Таблица 3.51 – Расчет посуточного слоя талой воды

Дата	Температурный коэффициент таяния, мм/сут	Слой талой воды, мм	Слой талой воды нарастающим итогом, мм
06.03.1986	4,2	8,51	8,51
07.03.1986	4,2	3,30	11,81
08.03.1986	4,2	0	11,81
09.03.1986	4,2	2,36	14,17
10.03.1986	4,2	1,57	15,74
11.03.1986	4,2	0,99	16,73
12.03.1986	4,2	2,74	19,47
13.03.1986	4,2	0	19,47
14.03.1986	4,2	0	19,47
15.03.1986	4,2	0	19,47
16.03.1986	4,2	3,15	22,62
17.03.1986	4,2	5,30	27,92
18.03.1986	4,2	6,87	34,79
19.03.1986	4,2	8,19	42,98
20.03.1986	4,2	9,76	52,74
21.03.1986	4,2	3,09	55,83
22.03.1986	4,2	8,08	63,91

Из таблицы 3.51 следует, что с 17.03.1986 формируется поверхностный сток, который продолжается до даты схода снега – 22.03.1986. Продолжительность поверхностного стока составляет 5 дней. С учетом полученных данных расчетный расход сбросного сооружения для локального водосбора площадью 11 000 м<sup>2</sup> как максимально наблюдаемого на опытном участке составит

$$Q_p = \frac{(63,04 - 26,17)}{5 \cdot 86400} \times 11000 = 0,938 \text{ л/с.}$$

По полученному расходу с учетом топографии местности подбирается тип водосбросного сооружения с учетом рекомендаций, изложенных выше.

*Основные выводы*

1. Осушенные торфяные почвы, находящиеся длительно в сельскохозяйственном использовании, характеризуются неоднородностью водно-физических свойств по профилю. Существует устойчивая закономерность нарастания плотности с глубиной до подошвы пахотного горизонта с последующим ее снижением. Диапазон изменения плотности – от 0,17 до 0,29 г/см<sup>3</sup>, коэффициента фильтрации – от 0,45 до 2,51 м/сут.

2. Неравномерность глубины промерзания осушенных торфяников определяется микрорельефом почвы и его водно-физическими и тепловыми свойствами. Глубина промерзания торфа в борозде в 2 и более раза меньше, чем на загоне. Наблюдается устойчивое постоянство во времени и пространстве положения относительных глубин промерзания, выраженных к максимальной глубине промерзания.

3. Подъем уровня воды в каналах, занесенных снегом, происходит за счет аккумуляирования собственного стока и пополнения поверхностным стоком близлежащих сточных микропонижений.

4. Подъем уровня грунтовых вод на мелиоративных системах в период паводка происходит как за счет инфильтрующихся талых вод, так и за счет подпитки из каналов.

5. Величина инфильтрации талых вод зависит по степени тесноты связи от влажности почвы, температуры воздуха, уровня грунтовых вод, плотности почвы, глубины промерзания почвы за зиму, наличия таликов.

6. Абсолютная величина интенсивности инфильтрации талых вод до даты схода снега составляет 2,5–4 мм/сут, после схода снега растет с повышением температуры воздуха и на конечной стадии составляет 40–50 мм/сут.

7. Предложена эмпирическая зависимость интенсивности инфильтрации талых вод на осушенных торфяниках, от определяющих ее факторов, полученная на основе статистической обработки рядов наблюдений.

8. Разработана математическая модель распределения энергии прямого солнечного излучения по поверхности борозды. Это позволило установить, что ускоренному оттаиванию почвы способствуют такая ориентация западин, борозд, когда они образуют равновеликие углы с направлением восход-заход солнца на дату весеннего половодья. Максимальная ширина борозды, способствующая ускоренному оттаиванию почвы, на основе математического моделирования составляет 1,0 м.

9. Разработана методика по определению расчетного расхода сопрягающих сооружений, обеспечивающих регулирование поверхностного стока на мелиоративных системах.

### 3.6. Современное техническое состояние мелиоративных систем Белорусского Полесья

Мелиорация земель Белорусского Полесья имеет давнюю историю. Рост населения, развитие социально-экономических и производственных отношений в XVI веке потребовали включения в сельскохозяйственный оборот новых земель и их улучшения. Мелиорации при этом стала отводиться ведущая роль. По распоряжению польской королевы Боны с целью освоения принадлежащих ей земель в районе Кобрина было проложено несколько мелиоративных каналов (1549–1557 гг.). Самый крупный канал сохранился до наших дней и продолжает действовать. В честь королевы он назван «Канал Бона», его длина 29 км, а площадь водосбора 261 км<sup>2</sup> (рис. 3.64).



Рисунок 3.64 – Канал Бона в районе Кобрина

Продолжили начатые королевой Боней работы по мелиорации земель голландские поселенцы, обосновавшиеся в районе Бреста (XVII век). Они осушали болота в собственных сельскохозяйственных целях. В конце XVIII века по распоряжению польского правительства, при короле Станиславе Августе Понятовском начались работы по сооружению судоходного канала между бассейнами рек Днепра и Буга. Канал, названный Королевским, соединял реки Пину и Мухавец. Участок канала в районе Кобрина сохранился под прежним названием. Первоначально Королевский канал использовался в основном для сплава леса с Востока на Запад. Но для обеспечения судоходства, в середине XIX века были построены три водоподводящих канала: Белоозерский, Ореховский и Турский, а на самом Королевском канале – семь разборных деревянных плотин. Современное название канала – «Днепровско-Бугский» (рис. 3.65–3.68).

В годы после войны 1941–1945 гг. канал реконструирован, в настоящее время используется в судоходстве, рыболовстве, рекреации и как водоприемник мелиоративных систем. Общая длина Днепровско-Бугской водной системы составляет 196 км, из них на канал приходится 105 км пути. Канал имеет 12 гидроузлов с судоходными шлюзами, 28 водопропускных плотин, 14 водоспусков, 5 земля-