

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
аграрный университет имени И. Т. Трубилина»

А. С. Найденков, В. П. Василько, С. С. Терехова

ПОЧВЕННАЯ ВЛАГА
(ПРИНЦИПЫ И ПУТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ
ВОДНОГО РЕЖИМА ПОЧВЫ)

Учебное пособие

Допущено Министерством сельского хозяйства Российской Федерации
в качестве учебного пособия для обучающихся высших учебных заведений
по направлению подготовки 35.04.04 Агрономия

Краснодар
КубГАУ
2020

УДК 631.423.2 (075.8)

ББК 41.4

Н20

Рецензенты:

В. М. Кильдюшкин – доктор с.-х. наук
(Национальный центр зерна имени П. П. Лукьяненко);

А. М. Кравцов – доктор с.-х. наук, профессор
(Кубанский государственный аграрный университет)

Найденов А. С.

Н20 Почвенная влага (принципы и пути регулирования водного режима почвы) : учеб. пособие / А. С. Найденов, В. П. Василько, С. С. Терехова. – Краснодар : КубГАУ, 2020. – 77 с.

ISBN 978 – 5 – 9073273 – 40 – 2

В учебном пособии рассмотрены вопросы принципов и пути регулирования водного режима почвы в условиях Северного Кавказа. Перечислены источники почвенной влаги, отражена роль атмосферы в процессах конденсации влаги. Приводится строение и свойства воды. Дана характеристика категории (формы) и видов почвенной влаги, классификация ее форм и состояния. Представлен механизм передвижения влаги в почве.

Предназначено для обучающихся по направлению подготовки 35.04.04 Агрономия, направленность «Земледелие», «Агротехнология», может быть полезно аспирантам, агрономам и фермерам, занимающимся сельскохозяйственным производством.

УДК 631.423.2 (075.8)

ББК 41.4

© Найденов А. С.,
Василько В. П.,
Терехова С. С., 2020

© ФГБОУ ВО «Кубанский
государственный аграрный
университет имени
И. Т. Трубилина», 2020

ISBN 978 – 5 – 9073273 – 40 – 2

Посвящается памяти
Найденова Александра Семеновича,
доктора сельскохозяйственных наук,
Героя труда Кубани

ВВЕДЕНИЕ

Количественная характеристика водного режима определяется поступлением влаги и ее расходом, то есть водным балансом.

Источниками поступления влаги служат атмосферные осадки, грунтовые воды, конденсация входящих паров. Эти источники неравноценны как по количеству, так и по характеру поступления воды в почву. На большей части земледельческой территории нашей страны годовая сумма осадков не превышает 500 мм. Однако полезными осадками считаются такие, когда разовое их выпадение составляет не менее 5 мм. Но и эти осадки не полностью поступают в почву: часть влаги остается на листьях растений и испаряется, не достигнув поверхности почвы, другая часть стекает с нее и теряется по другим причинам. Поэтому для определения поступившей в почву воды из атмосферных осадков сумму их умножают на коэффициент поглощения, который неодинаков для различных культур и почвенно-климатических зон, но для большинства их колеблется в пределах 0,5–0,7.

Большое значение имеет распределение осадков в течение года и особенно вегетационного периода. Чем ближе это распределение к потребностям растений, тем продуктивнее они будут использованы.

Общее представление об увлажнении вегетационного периода дают сведения об осадках. На равнинной территории Краснодарского края за период активной вегетации культурных растений выпадает от 225 до 350 мм осадков. Такое количество осадков является недостаточным для успешного возделывания сельскохозяйственных культур и особенно таких влаголюбивых как кукуруза и соя. В предгорьях количество осадков возрастает до 400–500 мм. Условия увлажнения в отдельные годы могут быть лучше или хуже среднемноголетних. Характеризовать условия увлажнения можно и испаряемостью. На территории края испа-

ряемость, за период вегетации сельскохозяйственных культур, варьирует от 450–500 мм в южных горных районах, до 750–800 мм в северо-восточных равнинных.

Наиболее оптимальные условия увлажнения создаются в тех случаях, когда количество выпадающих осадков приближаются к величине испаряемости. На территории Краснодарского края такие условия отмечаются в предгорных районах. В северо-восточных районах разница между испаряемостью и количеством выпадающих осадков составляет 400–500 мм. Это говорит о большом недостатке влаги. В пересчете на м³/га этот недостаток составляет примерно 4000–5000 м³ воды за период вегетации сельскохозяйственных культур.

В течение вегетации запасы влаги в почве под сельскохозяйственными культурами постепенно убывают. Наиболее низкие запасы влаги под озимыми культурами наблюдаются в конце июня – начале июля, т.е. в конце вегетации и составляют порядка 30–40 мм, в метровом слое почвы в северо-восточных районах, постепенно увеличиваются к югу и в предгорных районах достигают 80–100 мм.

Под пропашными культурами минимальные запасы влаги наблюдается во второй – третьей декадах августа и составляют 30–50 мм в северо-восточных районах и 60–70 мм в предгорьях. К осени запасы начинают возрастать постепенно, увеличиваясь к моменту перехода температуры воздуха через 5 °С на 20–40 мм.

Влагообеспеченность основных сельскохозяйственных культур удовлетворяется не полностью. Потребность озимых культур во влаге на большей части территории удовлетворяется на 75–80 %, в предгорных районах на 100 %. Хуже удовлетворяется потребность во влаге у пропашных культур. Так, влагообеспеченность кукурузы составляет 40–60 % оптимальной в равнинных районах и до 85 % в предгорных.

Поэтому регулирование водного режима почвы всегда актуально.

Структура учебного пособия включает шесть глав, в которых подробно рассматриваются такие вопросы как источники почвенной влаги, строение и свойства воды, категории, формы и виды почвенной влаги, классификация форм и состояние почвенной

влаги, передвижение влаги в почве, а также особенности увлажнения различных почв.

Структура данного учебного пособия охватывает широкий спектр вопросов, рекомендуемых при изучении дисциплин магистратуры 35.04.04 Агрономия, направленность «Земледелие» и «Агротехнология» таких как «Состояние почвенного плодородия», Основы адаптивно-ландшафтных систем земледелия», «Оптимизация технологических процессов в земледелии». Учебное пособие может быть использовано не только для магистрантов, но и аспирантов по направлению подготовки 35.06.01 Сельское хозяйство, направленность «Общее земледелие, растениеводство», а также в практической деятельности агрономов и фермеров, занимающихся сельскохозяйственным производством.

1 ИСТОЧНИК ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ

Нашу планету окружает воздушный океан. С давних времен умы исследователей разных специальностей – почвоведов, гидрологов, гидрогеологов, агрономов – тревожит вопрос, не может ли парообразная влага, содержащаяся в атмосфере, служить прямым, непосредственным источником почвенной влаги, не может ли она поступать в почву в форме пара и в дальнейшем конденсироваться там. Такая влага могла бы питать собою как растения, так и грунтовые воды. Наиболее убежденным апологетом гипотезы о том, что главным, если не единственным, источником влаги, содержащейся в грунтовых водах, является водяной пар, поступающий из атмосферы, был О. Фольгер.

Среди единомышленников О. Фольгера были и наши соотечественники. Например, С. К. Кузнецов утверждал: «Я полагаю, что главная роль в пополнении рек и морей принадлежит процессу конденсации в земле, а дожди и снега служат только дополнением к нему. Земля сама, как помпа, выкачивает пары воды из воздуха, потому что они сами тяготеют к ней, сами стремятся в нее по своему химическому сродству с нею и по природе своей, как только освобождаются от действия солнца, заставляющего их лететь к вершинам гор, стремятся в поры почвы, где охлаждение быстро увеличивает вес и заставляет проваливаться в глубину» (4).

Спустя полстолетия В. В. Тугаринов (1965), желая, очевидно, показать, какое огромное количество неиспользуемой влаги находится вокруг нас, писал: «...летом, при средней скорости ветра 5 м/с над Московским районом на территории длиной 100 км за одни сутки в воздухе проносится такое количество влаги, которое могло бы образовать озеро длиной 10 км, шириной 5 км и глубиной больше 60 м» (11). Именно такая форма конденсации в известной мере напоминает тропические ливни. Такие же представления по этой проблеме были изложены в работах других авторов.

«Расчеты» и «законы», подобные тем, которые мы находим в работах Кузнецова и Тугаринова, возбуждают представление о том, что вовлечение атмосферной влаги и почвенный влагооборот сулит огромный успех.

Другая группа ученых изучала участие не атмосферы, а почвы в процессах конденсации влаги поверхностным, сильно пересу-

шенным слоем почвы, влажность которой ниже величины максимальной гигроскопичности (МГ). Позднее Лебедев этому процессу дал название «молекулярной конденсации», в отличие от «термической», происходящей в условиях насыщенности воздуха водяным паром под влиянием разности температур. При изучении направления перемещения в почве парообразной влаги, он анализирует средние месячные температуры почвы в 7, 13 и 19 ч и на основании этого анализа утверждает, что в летний период температура вглубь от поверхности почвы понижается, а зимой, наоборот, возрастает. Поэтому, летом должна происходить нисходящая перегонка водяного пара, а зимой – восходящая.

Отметим, что во второй половине дня, после 13 ч, поверхность почвы начинает охлаждаться. После захода солнца градиент температуры в верхнем слое, мощность которого постепенно нарастает, оказывается направленным вниз, в силу чего поток водяного пара направляется вверх. С течением времени мощность слоя почвы с таким направлением потока водяного пара нарастает и достигает своего максимума перед восходом солнца, в момент наибольшего охлаждения поверхности почвы. Поэтому в вечерние и ночные часы термическая конденсация водяного пара в поверхностном слое может осуществляться не только за счет поступления пара из атмосферы, но и за счет его поступления из всего верхнего слоя почвы, мощность которого к концу ночи может быть и более 20 см.

Минимальная температура ночью при радиационном типе распределения температур наблюдается не в толще поверхностного слоя почвы, а на самой ее поверхности, где влага может конденсироваться, выпадая в форме росы. При наличии же растительного покрова минимум температуры нередко бывает не на поверхности почвы, а на некоторой высоте от нее – на поверхности растительного покрова, где в этом случае и наблюдается образование росы, т. е. конденсация.

При радиационном типе вертикального распределения температур (в ясные ночи) не существует физических условий для перехода водяного пара из атмосферы в поверхностный слой почвы, и конденсации его в том слое независимо от того, имеется ли на поверхности почвы растительность или нет.

Вопрос о возможности поступления влаги в почву за счет сорбции наступает при степенях влажности, соответствующих

полному развитию пленок, т. е. при максимальной адсорбционной влагоемкости происходит перемещение пленочной воды вниз под влиянием потенциальных сил тяжести, вызывающих различия в толщине и выпуклости соседних пленок. При достаточно длительном воздействии атмосферы насыщенного пара к процессу адсорбции присоединяется еще и процесс капиллярной сорбции. В первой фазе этого процесса вода собирается в местах пор вокруг точек соприкосновения двух соседних частиц почвы, далее процесс распределяется и на капилляры.

Наибольший эффект увлажнения почвы следует ожидать в районах с сильным увлажнением воздуха, достигающим величин, близких к 100 %. При этом процесс адсорбции паров по эффекту увлажнения почвы значительно уступает процессу капиллярной конденсации, которая, по мнению автора, может идти до полного исчезновения менисков, т. е. до полного насыщения почвы.

Допускалась возможность почти полного насыщения почвы за счет капиллярной конденсации с сохранением лишь пузырьков заземленного воздуха. Позднее оказалось, что эти представления неверные. Капиллярная сорбция влаги может довести влажность почвы до некоторого предела, лишь немного превышающего максимальную гигроскопичность, после него сорбция прекращается. Эта предельная влажность в почвах суглинистого гранулометрического состава значительно ниже наименьшей влагоемкости (НВ), в силу чего гравитационное стекание влаги невозможно.

Обстоятельное рассмотрение вопроса о конденсации атмосферной влаги в почве было проведено на полях института сельского хозяйства Юго-Востока на обыкновенном черноземе. Был проанализирован температурный режим почв и приземного слоя воздуха и поставлен ряд опытов. В результате был сделан вывод, что резкие температурные градиенты в почвенном профиле в условиях континентального климата играют важную роль в динамике почвенной влаги. Что же касается конденсации в почве влаги из атмосферы, то этот процесс, как дополнительный источник водоснабжения культурных растений, в условиях проведения исследований не имеет существенного значения. Однако отмечается, что при высокой влажности почвы практически круглосуточно происходит испарение влаги, интенсивность которой снижается с

уменьшением влажности. С переходом последней через величину, равную примерно 50 %, испарение сменяется конденсацией.

Обобщая вышеизложенный материал можно констатировать, что в теплый период года во второй половине дня и ночью может происходить обогащение влагой поверхностного слоя почвы за счет конденсации в нем парообразной влаги. Однако толщина этого слоя не превышает 1–2 см (таблица 1) [9].

Из представленных материалов видно, что увеличение запасов в поверхностном слое почвы в подавляющем большинстве случаев долями миллиметра за ночь.

Поверхностный слой почвы в теплое время года при инсоляционном режиме и при отсутствии растительности в первой половине дня может сильно нагреваться и иссушаться за счет прямого поглощения лучистой энергии. Во второй половине дня, после 13 – 14 ч, температура этого слоя начинает понижаться, а его влажность – увеличивается за счет гигроскопического поглощения (адсорбции) водяного пара, содержащегося в воздухе поверхностного слоя почвы. Это поглощение и есть «молекулярная конденсация» Лебедева. Она продолжается до тех пор, пока влажность поверхностного слоя почвы не повысится до такой величины, при которой содержащийся в нем воздух окажется в состоянии насыщения.

Таблица 1 – Результаты наблюдений за конденсацией в почве парообразной влаги атмосферы

Авторы	Объект	Конденсация за ночь, мм
1	2	3
А. Ф. Лебедев	Не указано	0,12–0,62 (в среднем 0,5)
П. Ф. Бараков	Гравий	1 мм
Ван-Хельсинг и Худиг	Песок под гравием Песок	1 мм 0,3
В. Е. Сочеванов	Песок	Более 0,1
М. П. Петров	Песок	0,5–0,15
И. П. Шван-Гурийский и В. М. Авдеев	Песок	Более 0,2
К. В. Кувшинова	Песок	Более 0,2
Кустанайская область	Песок	Более или равно 0,3 иногда до 1,8

Продолжение таблицы 1

1	2	3
Т. Ходжамурадов	Песок	Более или равно 0,1
П. Колисник	Чернозем	0,15
Шапталь	Суглинистая почва	0,065
М. З. Журавлев	Чернозем	0,004–0,012
Горальд и Грейбельбис	Суглинистая почва	0,3–0,5
С. А. Хачатурян	Суглинистая почва	0,01–1,0
Даманье	Суглинистая почва	0,4–0,5
М. И. Рубинштейн	Суглинистая почва	0,1–0,6
А. В. Швобс	Чернозем	0,1–0,3
А. М. Бялый	Чернозем	Более или равно 0,5
Ю. Н. Юрьев	Каштановая супесчаная	0,06–0,1
И. Г. Захарченко и Ю. Г. Бескровный	Чернозем	0,02–0,04
И. Д. Ткаченко и П. И. Колисник	Серая суглинистая	Более или равно 0,1
А. Л. Молчанов и Н. И. Чуркин	Чернозем	0,46

Дальнейшее ночное понижение температуры поверхностного слоя почвы может вызвать ее понижение ниже точки росы по отношению к влажности припочвенного слоя атмосферы. Вследствие этого в поверхностном слое почвы начнется термическая конденсация, или росообразование. В эти часы суток в верхнем слое почвы температурный градиент направлен сверху вниз и поэтому пар передвигается в восходящем направлении. В этот период роль пара, содержащегося в почвенном воздухе, в конденсации будет большей, чем в период молекулярной конденсации

Термическая конденсация, или росообразование, заканчивается после восхода солнца, при смене радиационного режима инсоляционным. При этом сконденсировавшаяся в поверхностном слое почвы влага более или менее быстро испаряется в атмосферу. И поскольку эта влага, частично, накопилась за счет содержания ее в почвенном воздухе, весь этот цикл является следствием производительной потери влаги из почвы.

Растительный покров изменяет описанные явления. Поверхность почвы, затененная растительностью, нагревается значительно слабее, что уменьшает размеры и самую возможность возникно-

вения молекулярной конденсации влаги вследствие менее сильного иссушения поверхностного слоя почвы. В ночное время большему радиационному охлаждению подвергается растительный покров, в котором и происходит выпадение росы. Таким образом, водяной пар атмосферы не является сколь-нибудь значащим источником почвенной влаги.

Атмосферные осадки являются главным источником воды в почве (жидкие и твердые), поступающие в течение временного периода (сутки, декада, месяц, год и т. п.) и формирующиеся за счет погодных и климатических условий конкретной территории. Количество воды, просачивающейся в почву, а также задерживающейся в ней, зависит от механического состава почвы, ее оструктуренности, гумусированности. Чем легче почва, тем больше просачивается в нее воды; чем она структурнее, богаче гумусом и тяжелее по механическому составу, тем больше воды удерживается ею. Большое влияние на поступление воды в почву оказывают рельеф местности и характер растительности на полях.

Парообразная влага. Этот источник имеет большое значение в районах с жарким, сухим климатом.

Грунтовые воды. Если они залегают на небольшой глубине (не глубже 3–5 м от поверхности почвы). Поступление в почву влаги из грунтовых вод зависит от глубины их залегания и водоподъемной способности почв и грунта. Грунтовые воды в глинистых почвах по капиллярам поднимаются на большую высоту (до 4 м), но очень медленно; в почвах легкого механического состава – быстрее, но на меньшую высоту.

Климатом определяется количество влаги, поступающей в почву из атмосферы. Величина испаряемости зависит от количества лучистой энергии солнца, которое достигает поверхности почвы.

Почвенная вода – одно из важнейших условий жизни растений, жизнедеятельности почвенной фауны и микрофлоры. Особенно много воды расходуют растения. Для создания 1 г сухого вещества требуется от 200 до 1500 г воды. Наличие воды в почве обуславливает протекание биохимических, физико-химических и других процессов, передвижение веществ, водно-воздушный, тепловой режимы, физико-механические свойства. Растения нормально развиваются только тогда, когда в почве есть постоянное и достаточ-

ное количество воды. Как недостаток, так и избыток влаги в почве ограничивают продуктивность растений, или вызывают их гибель. Поэтому познание закономерностей поведения почвенной влаги, умение управлять водными свойствами – важная предпосылка получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур.

На поверхности почвы происходит многообразная трансформация влаги атмосферных осадков. Часть из них стекает по поверхности почвы, превращаясь в поверхностные воды. Другая часть, проникая в почву, частично возвращается в форме водяного пара обратно в атмосферу посредством дедукции и транспирации растениями, а также посредством физического испарения. Часть почвенной влаги, поступившей в растения, принимает участие в биологическом синтезе и превращается в органическое вещество.

Таким образом, влага атмосферных осадков, поступившая на поверхность суши, трансформируется в почве в другие природные формы влаги: водяной пар, почвенную влагу, грунтовые воды. Эта трансформация сопровождается обменом влагой в системе атмосфера – почва – грунт – растительный покров. Это позволяет считать, что почвенное звено является важнейшим в круговороте влаги на суше.

Поэтому, от содержания влаги в почве и степени ее доступности для растений зависит влагообеспеченность растений. Каждый миллиметр дождя на одном квадратном метре дает 1 л воды. А на одном гектаре – 10000 л или 10 тонн. Почвенная влага – один из незаменимых факторов почвенной среды. Воде принадлежит важнейшая роль в выветривании горных пород и почвообразовании. Роль воды в почвообразовательном процессе настолько существенна, что Г. Н. Высоцкий сравнивал ее с кровью организма.

В результате перемещения водой органических, органоминеральных и минеральных соединений формируется почвенный профиль. Без достаточного количества влаги невозможно нормальное развитие растений и почвенных микроорганизмов. Исследования многих авторов показали, что для создания 1 т сухого вещества полевые культуры расходуют от 200 до 1000 т воды.

Кроме этого вода, как терморегулирующий фактор, определяет расход тепла из почвы и растений вследствие испарения и транспирации. С влажностью почвы тесно связаны ее физико-механические свойства (твердость, крошение, липкость, агрегат-

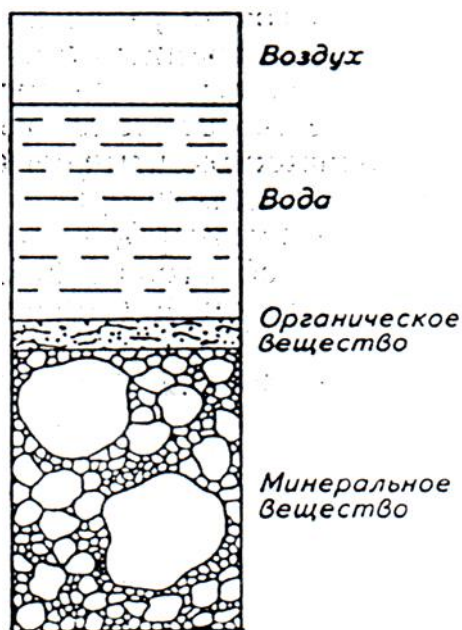


Рисунок 1 – Сравнительные объемы компонентов почвы в пахатном слое

ность, спелость почвы и т. д.). В итоге вода в почве играет важную роль в формировании эффективного плодородия.

По составу почва представляет собой трехфазную гомогенную систему, состоящую из твердой, жидкой и газообразной фаз; минеральная и органическая части (твердая фаза) представляют скелет почвы. В зависимости от типа почвы эти соотношения могут быть различными. Оптимальным условно считается соотношение (2:1:1), когда твердая фаза занимает 50 %, а жидкая и газообразная – по 25 % (рисунок 1). Таким образом, изменяя соотношение

объемов твердой, жидкой и газообразной фаз путем обработки почвы и других приемов, можно создавать необходимые условия для водного, воздушного, пищевого и теплового режимов, тем самым обеспечивая формирование высокой продуктивности посевов сельскохозяйственных культур.

Вопросы для самоконтроля

1. Что является главным источником в пополнении влагой рек и морей?
2. Какова роль атмосферы в процессах конденсации влаги?
3. Чем отличается «молекулярная» конденсация от «термической»?
4. Когда не существует физических условий для перехода водяного пара из атмосферы в поверхностный слой почвы?
5. До какого предела капиллярная сорбция может довести влажность почвы?
6. При какой влажности почвы испарение сменяется конденсацией?
7. В каком слое почвы происходит обогащение влагой за счет конденсации парообразной влаги?
8. Какое количество воды на 1 м^2 образуется при выпадении 1 мм дождя?

2 СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ВОДЫ

Вода, ее химический состав, обозначается формулой H_2O . Ее структура связана особым пространственным расположением двух ядер водорода (H^+) и одного ядра кислорода (O^-) (рисунок 2).

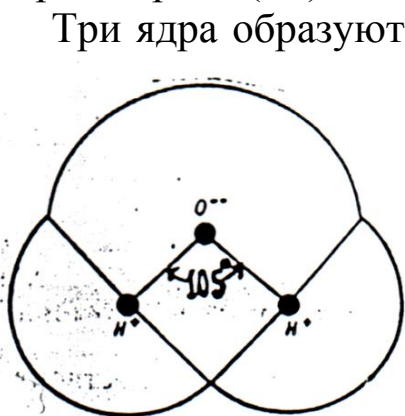


Рисунок 2 – Строение молекулы воды

Три ядра образуют равнобедренный треугольник, у основания которого располагаются два протона водорода (H^+). У молекулы воды в парообразном и жидком состоянии длина боковых сторон треугольника (каждая) равна 1,84 (рад.), а у молекулы в состоянии льда длина боковых сторон равна 1,91 (рад.). Диаметр молекулы воды (H_2O) составляет $2,76 (11 \times 10^{-24} \text{ см}^3)$. Молекула воды обладает положительным и отрицательным полюсами и, несмотря на свою электростатическую нейтральность, в то же время, представляет собой – диполь (\pm). Дипольность молекул воды обуславливает их способность вступать друг с другом в связь, притягиваясь полюсами противоположного знака, обеспечивая рыхлое расположение молекул. В этом случае возникает ионная связь, в основе которой лежит кулоновское притяжение между разноименно заряженными телами (рисунок 3). Но между молекулами воды существует и другая связь – водородная.

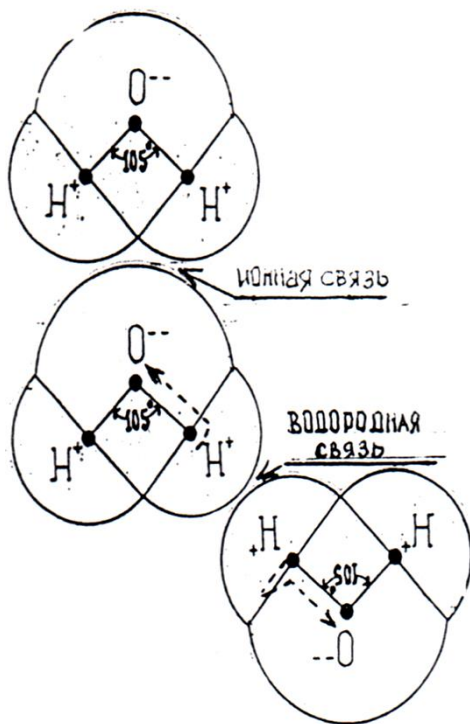


Рисунок 3 – Ионная и водородная связь между молекулами воды

Кислород молекулы воды, по своей природе обладает повышенной способностью притягивать к себе электроны, в том числе и электроны водорода собственной молекулы воды, делая их ненасыщенными. Но когда два ненасыщенных водорода двух разных молекул воды сближаются, то электроны водорода одной молекулы воды объединяются с электронами водорода другой молекулы воды, насыщая каж-

дого из них объединенными электронами. В этом случае возникает водородная связь.

Почва обладает уникальным свойством – поглотительной способностью, в которой важную роль играет вода. Это свойство – различными путями задерживать растворенные в воде или находящиеся в газообразном состоянии вещества. Вопрос о поглотительной способности почвы был основательно разработан русским ученым К. К. Гедройцем. Поглотительную способность почвы, состоящую из массы тонкораздробленных органических, органоминеральных и минеральных частиц почвы Гедройц назвал почвенным поглощающим комплексом.

Он выделил пять видов поглотительной способности почвы – механическую, физическую, физико-химическую или обменную, химическую и биологическую.

Кроме поглощения катионов и анионов почвы обладают способностью поглощать и удерживать определенное количество газообразных соединений – газов и находящихся в воздухе водяных паров. Особенно большой интерес представляет поглощение находящихся в атмосфере и промежутках почвы азота, аммиака, кислорода, водяных паров, углекислоты. При поглощении водяных паров они или сгущаются на поверхности почвы (адсорбция), или превращаются в жидкость, которая задерживается в порах и промежутках почвы (капиллярная конденсация). Азот и углекислый газ подвергаются адсорбции, а аммиак и водяные пары не только поглощаются почвой или адсорбируются, но и подвергаются капиллярной конденсации, т. е. сжимаются. Такое явление одновременной адсорбции и капиллярной конденсации паров обычно называют сорбцией.

Обезвоженная сухая почва способна поглощать водяной пар из воздуха. Это явление называется сорбцией водяного пара. Свойство почвы сорбировать парообразную влагу называется гигроскопичностью, а сорбированная влага – гигроскопической влагой.

Сущность процесса сорбции водяного пара состоит в том, что главным носителем гигроскопической способности в почвах является наиболее тонкая их часть – илистая фракция, так как именно она обладает удельной поверхностью, во много раз превосходящей удельную поверхность более крупных фракций.

Кроме того, илистая часть состоит, главным образом, из частиц глинистых минералов.

Вода имеет большую диэлектрическую постоянную, которая понижает электростатическое взаимодействие между глинистыми частицами. Атомы кислорода, находящиеся на поверхности глинистых частиц, не имеют свободных электровалентных связей, но обладают большой электроотрицательностью, что обеспечивает сорбцию воды за счет возникновения водородных связей.

Уже при самых минимальных значениях относительной упругости водяного пара, измеряемых величинами порядка десятых долей процента, начинается образование мономолекулярного слоя сорбированной воды.

Эти первые слои образуют прочную влагу и обладают рядом особых свойств, отличающих их от свободной воды. Молекулы воды удерживаются у поверхности твердых частиц в результате электростатического притяжения между ионами, составляющими поверхность частиц и диполями воды.

Притяжение поверхностного слоя почвенных частиц действует на расстоянии, равном нескольким диаметрам молекул воды, т.е. на очень близком расстоянии, однако сила этого притяжения очень велика.

Чтобы разорвать ассоциированные молекулы воды потребуется сила в 223 атмосферы при температуре 27 °С. Адсорбированный слой воды не только удерживается у поверхности и теряет свою подвижность, но и сильно уплотняется, достигая несколько десятков тысяч атмосфер. В результате высокой плотности адсорбционно-связанная вода отличается рядом особенностей физических свойств: она не замерзает вплоть до минус 78 °С, не обладает электропроводностью и представляет собой «нерастворяющийся объем» воды, т. е. не содержит растворенных веществ.

С уменьшением частиц почвы и с увеличением гумуса – количество сорбированной влаги увеличивается. Толщина адсорбированной пленки воды для всех глин равна 1,8 диаметра молекул воды.

Образование первых двух слоев адсорбированной прочно связанной влаги далее сменяется многослойной сорбцией, которая начинается за счет сорбции парообразной влаги, а затем усиливается при сорбции жидкой влаги. Многослойная сорбция соверша-

ется за счет присоединения диполей воды к ориентированным диполям, входящим в состав первых слоев.

Рыхло связанная влага по некоторым своим свойствам не отличается от свободной влаги. Однако, она обладает пониженной способностью к растворению электролитов и повышенной вязкостью. Ее внутренние слои при некоторых условиях приобретают свойства упругого твердого тела.

Заканчивая же насыщение почвы влагой при относительной влажности воздуха, весьма близкой к 100% (94%), мы получаем некоторую условную величину влажности, которая носит название максимальной гигроскопичности почвы (МГ).

При гигроскопическом поглощении воды на фракциях песка разной крупности с частицами от 0,01 до 2 мм в поперечнике. Установлено, что слой сорбированной влаги имеет толщину от 36 до 495 диаметров молекул воды. Количество сорбируемой воды уменьшается с увеличением диаметра частиц, в то же время толщина водной оболочки возрастает (таблица 2) [10].

Таблица 2 – Максимальная гигроскопичность и толщина водной пленки в опыте с кварцевым песком (по данным Рыжова С. Н.)

Показатель	Размер частиц, мм							
	0,25– 0,1	0,1– 0,05	0,05– 0,02	0,02– 0,01	0,01– 0,005	0,005– 0,002	0,002– 0,001	0,001– 0,0001
Максимальная гигроскопичность, %	0,0452	0,0998	0,0917	0,1133	0,1474	0,2642	0,4963	0,3872
Толщина пленки сорбированной воды, диаметры водных молекул	137	129	55	30	19	16	13	12

Таким образом, результаты исследований позволили сделать вывод о том, что сорбированная вода недоступна для высших растений. Вывод основан на представлении, что силы связи воды с почвенными частицами (водоудерживающая сила, потенциал) этой величины превышают сосущую силу корней. Максимальная гигроскопичность (МГ) для черноземов равна 4–6 %.

Вопросы для самоконтроля

1. Какой треугольник образует молекула воды?
2. Чему равна длина боковых сторон треугольника молекулы воды в парообразном и жидком состоянии?
3. Чему равна длина боковых сторон треугольника молекулы воды в состоянии льда?
4. Что такое почвенный поглощающий комплекс (ППК) и его состав?
5. Перечислить виды поглотительной способности почвы?
6. Что называется сорбцией?
7. Что такое гигроскопичность?
8. Какая фракция почвы является главным носителем гигроскопической способности в почвах?
9. При какой относительной влажности воздуха заканчивается насыщение почвы влагой?
10. Чему равна максимальная гигроскопичность для черноземов?

3 КАТЕГОРИИ (ФОРМЫ) И ВИДЫ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ

По физическому состоянию различают три формы почвенной воды: твердую, жидкую и парообразную. По характеру связи влаги с твердой фазой почвы и степени подвижности ее, она подразделяется на следующие категории:

Химически связанная вода. Эта вода входит в состав гидратированных веществ, слагающих почвенную массу, например, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, каолинит и многие другие вторичные минералы.

Конституционная вода является составной частью минералов и может быть удалена путем нагревания при очень высокой температуре, значительно превышающей $150\text{--}200^\circ\text{C}$. Второй вид химически связанной воды – это кристаллизационная.

Кристаллизационная вода входит в структуру таких минералов, как гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), мирабилит ($\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) и другие, и выделяется нагреванием при относительно низких температурах.

Химически связанная вода не принимает непосредственного участия в физических процессах, протекающих в почве и растениям абсолютно недоступна. Входит в твердый состав почвы.

Твердая вода. Твердая вода образуется в почве в форме льда в условиях промерзания в зимний период (сезонное промерзание). Твердая вода в почве способна таять и испаряться, представляет собой потенциальный источник жидкой и парообразной воды.

Парообразная влага. Находится в почвенном воздухе в форме водяного пара. Передвигается в почве активно от участков с высокой абсолютной упругостью водяного пара к участкам с более низкой упругостью. Пассивна вместе с токами воздуха. При наличии соответствующих условий может переходить в жидкую форму.

Прочно связанная (сорбированная) вода. Влага, молекулы которой прочно удерживаются адсорбированными силами, присущими почвенным частицам, образует на поверхности последних тонкую пленку, толщина которой измеряется двумя-тремя диаметрами молекул воды. По своим свойствам близка к твердому телу, имеет высокую плотность ($1,5\text{--}1,8 \text{ г/см}^3$) и высокую связность. Эта форма физически связанной, или сорбированной, воды называется *гигроскопической водой* (Г).

Количество гигроскопической влаги в почве находится в прямой зависимости, как от механического состава почвы, так и от состояния температуры и влажности воздуха. Чем богаче почва илистой фракцией и перегнойными веществами, тем больше содержится гигроскопической влаги, а так же чем влажнее воздух, тем больше влаги адсорбируется почвой.

Максимальное количество гигроскопической воды, которое может поглотить и удержать почва, будучи помещенной в атмосферу, насыщенную водяными парами (около 96–98 %), называется **максимальной гигроскопичностью** (МГ).

Гигроскопическая влага удерживается на поверхности почвенных частиц с большей силой, и отделить ее от них можно лишь путем продолжительного нагревания почвы при температуре 105 °С.

Находясь всецело под влиянием сил молекулярного притяжения со стороны отдельных почвенных частичек, гигроскопическая влага не подчинена силе тяжести, а поэтому и не способна к свободному передвижению в почве. Передвижение гигроскопической влаги в почве возможно лишь в случае перехода ее в парообразное состояние под воздействием температуры. Будучи прочно удерживаемой на поверхности почвенных частичек, гигроскопическая влага для растений является практически недоступной.

Полуторная – двойная максимальная гигроскопичность соответствует влажности **устойчивого завядания растений** (ВЗ) или «мертвому запасу» воды в почве, и учитывается при расчете запасов продуктивной влаги и норм полива. Для расчета влажности устойчивого завядания растений по величине МГ применяется коэффициент 1,34.

Рыхлосвязанная (пленочная) вода. Поверх водного слоя, образуемого гигроскопической влагой, в почве способны нарастать и новые тончайшие водные слои, так же удерживаемые силами молекулярного притяжения почвенных частичек. Нарастание новых водных слоев имеет предел длиться до тех пор, пока сказывается действие адсорбированных сил твердых почвенных частичек. Эта почвенная влага, расположенная несколькими молекулярными слоями сверх гигроскопической влаги и удерживаемая силами молекулярного притяжения почвенных частичек, носит название **рыхлосвязанной** или **пленочной** воды.

Основным признаком этой влаги является ориентированное расположение ее молекул, которое может вызываться как воздействием ориентированных молекул прочно связанной воды, так и (в меньшей степени) воздействием обменных катионов (осмотическая вода). Она образует вокруг почвенных частиц пленку, толщина которой может достигать десятков диаметров молекул воды. Плотность не превышает плотности обычной воды.

Пленочная, или рыхлосвязанная, вода слабо подвижна, растениям недоступна. Передвигаться может от частицы к частице под влиянием сорбционных сил. Содержание рыхлосвязанной воды может варьировать от почти равного нулю – в почвах легкого механического состава, а так же в почвах тяжелых, но при высокой концентрации почвенного раствора – до величины, приближающейся к полной влагоемкости в бесструктурных почвах тяжелого механического состава. Кроме этого, содержание рыхло связанной воды может значительно изменяться во времени даже в одной и той же почве в зависимости от изменения влажности, концентрации почвенного раствора и т. д.

Особенности рыхло связанной воды обусловлены тем, что она встречается в том интервале влажности, в верхней части которого силы сорбционные оказываются соизмеримыми с силами капиллярными, в связи, с чем ее поведение определяется совместным участием сил обеих этих категорий. Относительное значение этих сил также сильно варьирует в пространстве, причем в расширенных участках главная роль принадлежит капиллярным силам, а в суженных – сорбированным.

Возможность совместного существования и проявления капиллярных и сорбционных сил обеспечивается наличием у почвы микроструктуры, что, в свою очередь, обеспечивает создание пор такого размера, при котором не весь их внутренний просвет заполняется рыхло связанной водой. При потере почвой микроструктуры, что может произойти в результате оглеения или насыщения ионом натрия или в результате механического воздействия, более крупные поры исчезают, и все паровое пространство целиком заполняется связанной водой.

Капиллярная вода. В капельно-жидком состоянии она находится в капиллярах почвы, доступна растениям. Это наиболее благоприятная для растений форма почвенной влаги. Различают *ка-*

пиллярно-подвешенную и *капиллярно-подпертую* воду. *Капиллярно-подвешенная* вода образуется при увлажнении почвы с поверхности (дождевая вода, талые воды, оросительные), *капиллярно-подпертая* – при поступлении воды снизу, т. е. при подъеме воды по капиллярам от грунтовых вод. Под слоем почвы, увлажненным капиллярно-подвешенной водой, и над слоем почвы, увлажненным капиллярно-подпертой водой, находится слой сухой почвы. Зона (слой) над зеркалом грунтовых вод, насыщенная капиллярно-подпертой водой, называется *капиллярной каймой*.

Подъем грунтовой воды по капиллярам тем выше, чем тоньше капилляры. Менисковые силы, вызывающие подъем воды, начинают проявляться при диаметре пор < 8 мк. Максимальное количество капиллярно-подвешенной воды, которое остается в почве после стекания избыточной свободной воды, называется *наименьшей влагоемкостью* (НВ).

Оптимальная влажность почвы соответствует 70–100 % от НВ. Разность между величиной НВ и фактической влажностью почвы называют *дефицитом влаги в почве* и широко используют в земледелии. Для обширной территории Северного Кавказа преобладают почвы с глубоким залеганием грунтовых вод с капиллярно-подвешенной влагой. Подвешенная капиллярная влага в почвах «в условиях нашего юга, где имеется, так называемый, мертвый горизонт, вода верхних горизонтов почвы... висит в капиллярах, так как не имеет связи с грунтовой водой...» [37].

Формы и соответствующие механизмы удержания подвешенной влаги в разных почвах различны. Они зависят от гранулометрического состава, агрегатного состояния и плотности почвы. Выделяют несколько форм подвешенной влаги в однородных почвах в грунтах.

1. *Влага стыковая капиллярно-подвешенная*. Может возникать в почвах и грунтах крупно (крупнее 1 мм) и среднезернистых (от 1,0 до 0,1 мм).

Во-первых, она и при наибольшем своем содержании всегда содержится в форме разобщенных между собой манжет в точках соприкосновения частиц (рисунок 4). Во-вторых, при наибольшем своем содержании она образует манжеты, соприкасающиеся своими краями (рисунок 5).

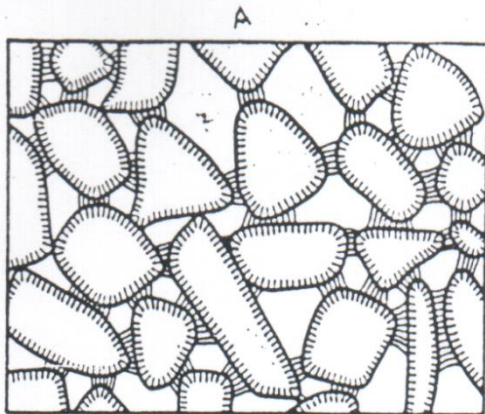


Рисунок 4 – Разобщённые манжеты стыковой влаги

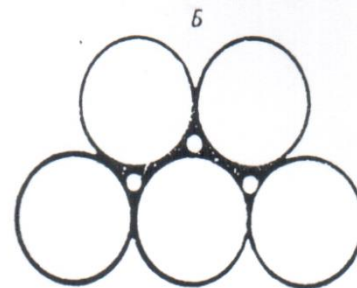


Рисунок 5 – Сомкнутые манжеты стыковой влаги

2. **Влага насыщающая капиллярно-подвешенная.** Возникает в среднезернистых почвах и грунтах при условии их исходной сухости (рис. 6). Мощность слоя этой влаги имеет известный предел, тем больший, чем мельче частицы. При повышении этой мощности большая часть влаги быстро стекает, оставляя после себя лишь стыковую влагу.

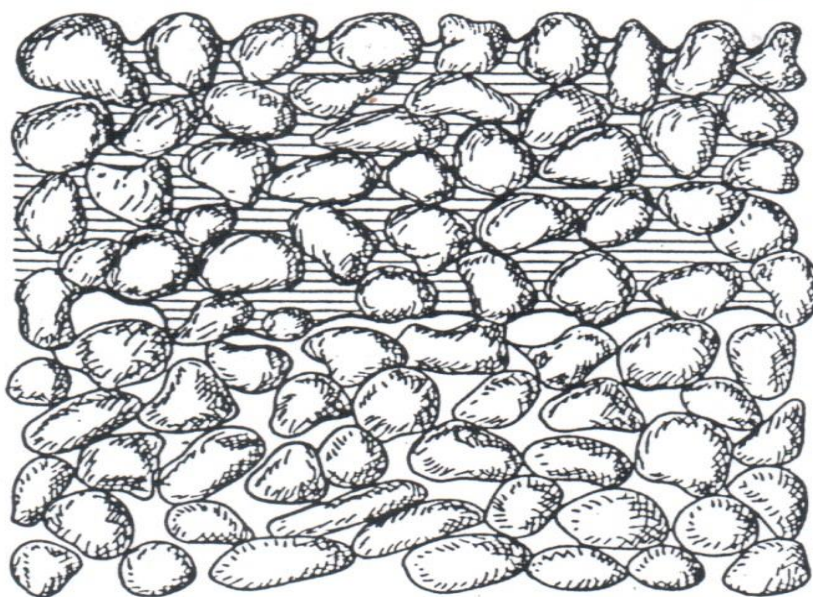


Рисунок 6 – Схематическое изображение удержания в сухом песке влаги насыщающей капиллярно-подвешенной

3. **Влага сорбционно-подвешенная (или пленочно-подвешенная).** Возникает в пылеватых легких, средних и тяжелых

микроструктурных суглинках, занимая при наибольшем содержании, равном НВ, около 2/3 всего порового пространства (рисунок 7).

Удерживается прочно, являясь равновесной при смыкании промоченного слоя с капиллярной каймой и квазиравновесной при наличии внизу сухого слоя. Состоит частично из связанной влаги, частично из микро скоплений сорбционно-замкнутой свободной влаги, изолированных «пленочными пробками».

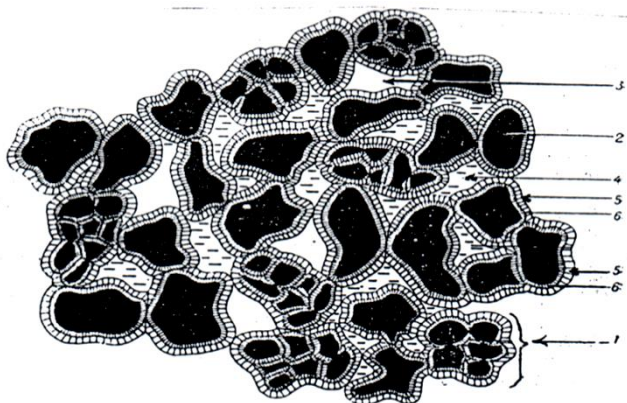


Рисунок 7 – Влага сорбционно-подвешенная:

1 – микроагрегат; 2 – почвенная частица; 3 – пора, занятая воздухом; 4 – влага сорбционно-замкнутая; 5 – влага рыхло связанная; 6 – влага прочно связанная

4. *Влага сорбционно-подвешенная, связанная.*

Наблюдается в тяжелых суглинистых и глинистых почвах, лишенных микроструктуры, и состоит целиком из пленок связанной влаги. Занимает 2/3 порового пространства до полного его заполнения (рисунок 8).

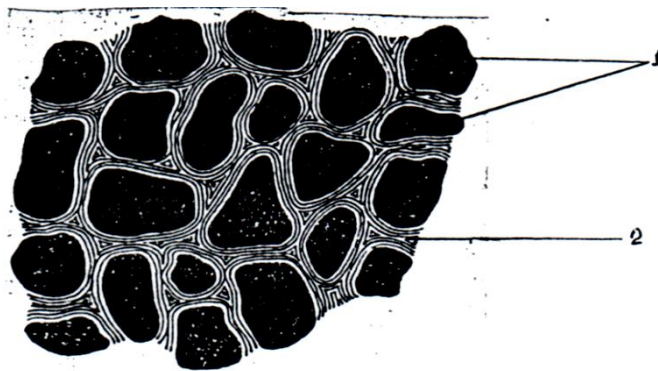


Рисунок 8 – Влага сорбционно-подвешенная связанная:

1 – почвенная частица; 2 – сорбционно-связанная вода

5. Влага внутриагрегатная капиллярно-подвешенная.

Наблюдается в горизонтах почв, имеющих макроструктуру (преимущественно среднего и тяжелого гранулометрического состава). При наибольшем содержании (равном НВ) занимает около 2/3 всего порового пространства (рисунок 9). Состоит частично из пленок связанной влаги, частично из свободной влаги, заполняющей тонкие капилляры, пронизывающие макроагрегаты, в которых она удерживается разностью поверхностных давлений менисков, ограничивающих водные столбики в этих капиллярах.

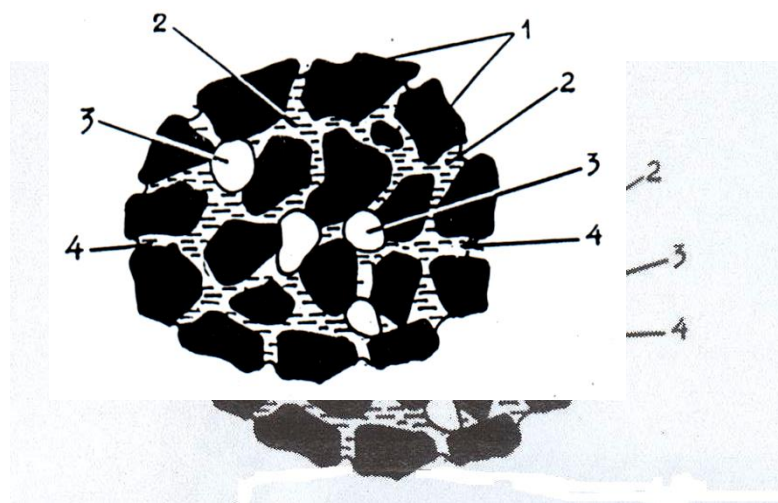


Рисунок 9 – Внутриагрегатная капиллярно-подвешенная влага в микроагрегатах (по Роде):

- 1 – микроагрегаты или механические элементы; 2 – внутриагрегатная капиллярно-подвешенная влага; 3 – поры, заполненные воздухом, 4 – мениски, удерживающие подвешенную влагу

Отметим, одно важное обстоятельство. Если такие категории (формы) почвенной влаги как МАВ (максимально адсорбированная вода), МГ (максимальная гигроскопическая), ВУЗ (влажность устойчивого завядания) зависят от фракции почвы и мало управляемыми агрегатами, то НВ (наименьшая влагоемкость), обусловленная капиллярными силами, зависит от сложения почвы, т. е. ее структуры и плотности. Увеличить НВ, то есть запасы продуктивной влаги можно способами обработки почв и особенно посевами многолетних трав и внесением органических удобрений, как главных структурообразователей почвы.

Установлено значительное влияние плотности почвы на НВ. По данным исследований, авторы подчеркивают тот факт, что

наличие уплотненного подпахотного горизонта заметно понизило НВ в нижележащих слоях вследствие того, что более широкие капилляры верхних слоев не могут отсасывать воду из тонких капилляров уплотненного подпахотного горизонта. Эти явления наблюдаются, когда уплотненный горизонт имеет значение от $1,5 \text{ г/см}^3$ и выше, и не наблюдается при плотности равной $1,4 \text{ г/см}^3$ и ниже.

Гравитационная вода. Свободная вода, которая может содержаться в почве сверх той, которая удерживается капиллярными силами и соответствует наименьшей влагоемкости, называется *гравитационной*.

Гравитационная вода занимает все крупные некапиллярные промежутки между агрегатами в почве, вытесняя воздух. Передвигается свободно под действием силы тяжести (гравитации). Максимальное количество гравитационной воды, которое может вместить почва при заполнении всех пустот, называется *полной влагоемкостью* (ПВ).

При полном заполнении почвы водой, т.е. при значении влажности почвы, соответствующем НВ, в почве содержится максимальное количество воды, включающее гигроскопическую, пленочную, капиллярную и гравитационные формы. Величина ПВ практически равна порозности (скважности) почвы и колеблется от 20–40 до 50–60 %.

Гравитационная вода находится под влиянием силы тяжести и стекает вниз, если ее не задерживает наличие водоупорного слоя. Соответственно этому различают гравитационную воду, просачивающуюся и грунтовую:

а) *Просачивающаяся.* Свободная гравитационная влага, находящаяся в состоянии нисходящего движения под влиянием силы тяжести в слоях с влажностью в интервале НВ-ПВ;

б) *Влага водоносных горизонтов.* Грунтовые, почвенно-грунтовые и почвенные воды, насыщающие почвенную или грунтовую толщу до величины ПВ (с поправкой на защемленный воздух).

Гравитационная влага вполне доступна для растений, но длительное наличие ее в почве приносит им вред, так как растения при этом могут испытывать недостаток воздуха и пищи.

Сопоставляя между собой три последние основные категории влаги (прочно связанную, рыхло связанную и свободную) следует

подчеркнуть, что отчетливую границу, которая может быть установлена не только теоретически, но и определена экспериментально, можно провести лишь между прочно связанной и рыхло связанной водой.

Водные свойства почв черноземного типа приведены в таблице 3. Это данные по профилю почвенного разреза мощного целинного чернозема [9].

Таблица 3 – Водные свойства чернозема мощного тучного целинного, на тяжелом лессовидном суглинке

Горизонт	Глубина взятия образца, см	УВ, г/см ³	ОВ, г/см ³	% от веса почвы				% от объема почвы			
				МГ	ВЗ	НВ	ПВ	МГ	ВЗ	НВ	П(ПВ)
А ₁	0–10	2,50	0,97	10,6	14,2	48,0	63	10,3	13,8	47	61
	10–20	2,5	1,16	9,8	13,1	35,0	47	11,4	15,2	41	55
	20–30	2,56	1,11	9,3	11,6	32,6	51	10,3	12,9	36	57
	30–40	2,27	1,18	9,3	12,2	31,4	46	1,0	14,4	37	54
	40–50	2,57	1,16	9,2	12,3	29,5	47	10,7	14,3	34	55
	50–60	2,63	1,21	8,9	11,7	29,3	45	10,8	14,2	35	54
	60–70	2,62	1,21	7,9	11,1	27,7	45	9,6	13,4	3	54
АВ	70–80	2,62	1,24	8,0	10,7	26,3	43	9,9	13,5	33	53
	80–90	2,61	1,22	7,9	10,2	26,0	43	8,6	12,4	32	53
В _к	90–100	2,65	1,25	7,5	10,4	25,6	42	9,4	13,0	32	53
	100–110	2,69	1,26	7,4	9,5	25,6	42	9,3	12,0	32	53
В _с	120–130	2,70	1,26	8,3	9,9	23,9	42	10,5	12,5	30	53
	140–150	2,70	1,37	8,8	9,6	23,3	36	12,0	13,1	32	49
	160–170	2,70	1,46	9,4	10,7	22,1	31	13,7	15,6	32	46
С	180–190	2,70	1,53	9,1	9,4	22,5	28	13,9	14,4	34	43
	200–210	2,70	1,54	7,7	9,2	20,3	28	1,8	14,2	33	43
С	220–230	2,70	1,56	5,1	6,3	19,9	27	8,0	9,8	31	42
	240–250	2,70	1,67	4,7	5,0	16,1	23	6,7	8,3	27	38

Следует отметить высокую общую пористость почвы, которая в верхней части профиля превышает 60 %. Пористость выше 50% сохраняется до глубины 150 см. До этой же глубины велика и пористость аэрации, колеблющаяся около 20 % объема почвы и лишь

ниже 150 см, падающая до 10 %. Величины МГ и ВЗ изменяются по профилю сравнительно мало, исключая подстилающую породу, где они вследствие более легкого механического состава значительно уменьшаются.

Высокая величина общей пористости и пористости аэрации обязана своим происхождением, несомненно, значительной структурности чернозема. При этом если в пределах гумусового горизонта (до глубины 80 см) хорошо развита макроструктура, то в горизонте В_к (100–150 см), т. е. в горизонте максимального накопления карбонатов, высокая пористость обязана своим происхождением уже микроструктуре. Для наглядности представлен рисунок о водных свойствах чернозема (рисунок 10).

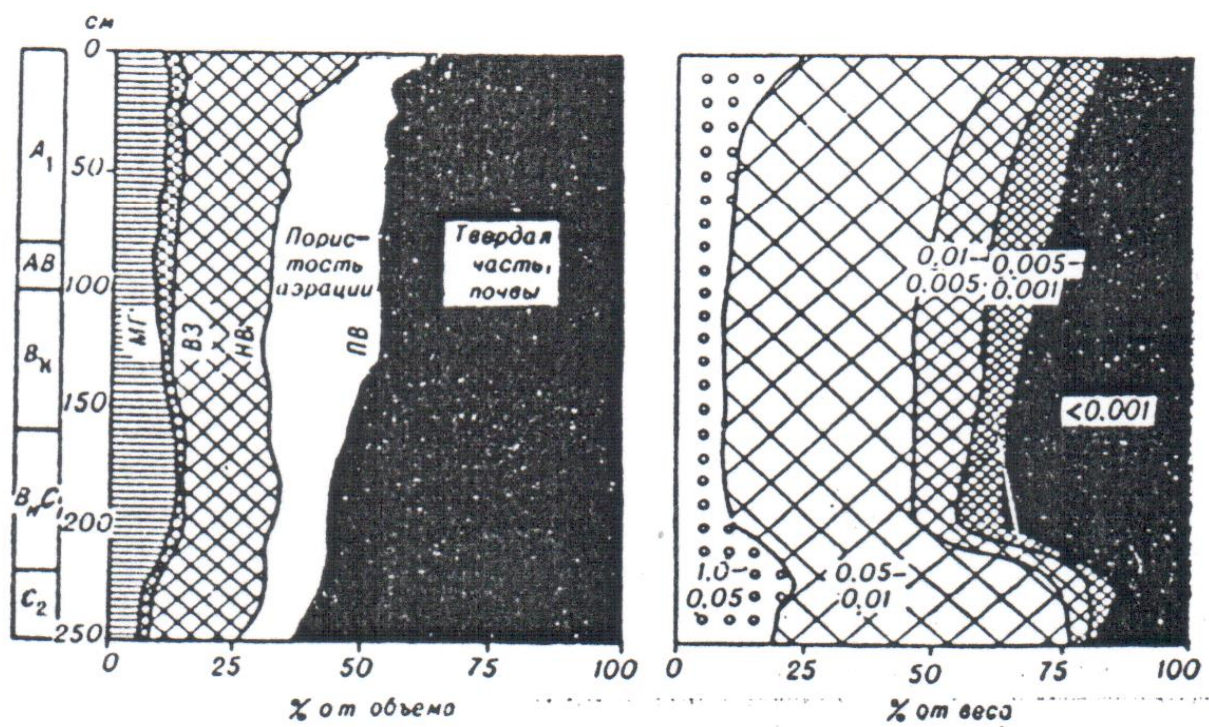


Рисунок 10 – Водные свойства и гранулометрический состав мощного тучного суглинистого чернозема, развитого на тяжелом лессовидном суглинке, составлено автором по данным Афанасьевой и Большакова (по А. А. Роде)

Таким образом, на черноземах, значительное изменение водных свойств почвы связано, прежде всего, с влиянием корневых систем полевых культур, создающих структуру и непосредственно повышающих пористость почвы.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите три формы почвенной влаги.
2. Перечислите категории связи влаги с твердой фазой почвы.
3. Характеристика химически связанной воды (конституционная и кристаллизационная).
4. Характеристика твердой воды.
5. Что такое парообразная влага?
6. Характеристика прочно связанной (сорбированной) воды.
7. Понятие о максимальной гигроскопичности (МГ).
8. Какой коэффициент применяется для расчета влажности устойчивого завядания растений по величине МГ?
9. Характеристика рыхло связанной (пленочной) воды.
10. Характеристика капиллярной воды.
11. Что такое наименьшая влагоемкость (НВ) и ее характеристика?
12. Перечислите формы подвешенной влаги.
13. От каких факторов зависят такие категории (формы) почвенной влаги как МАВ, МГ, ВЗ?
14. От каких факторов зависит НВ?
15. Что такое гравитационная вода и ее характеристика?
16. С чем связано значительное изменение водных свойств почвы на черноземах?

4 КЛАССИФИКАЦИЯ ФОРМ И СОСТОЯНИЙ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ

Многие авторы, А. Ф. Лебедев, С. И. Долгов, А. А. Роде и другие приводят многочисленные варианты классификации форм и передвижений почвенной влаги. В основу классификации положен принцип ее подвижности. Наиболее простой, но достаточно обстоятельной схемой состояния и передвижения почвенной влаги является схема А. А. Роде (рисунок 11).

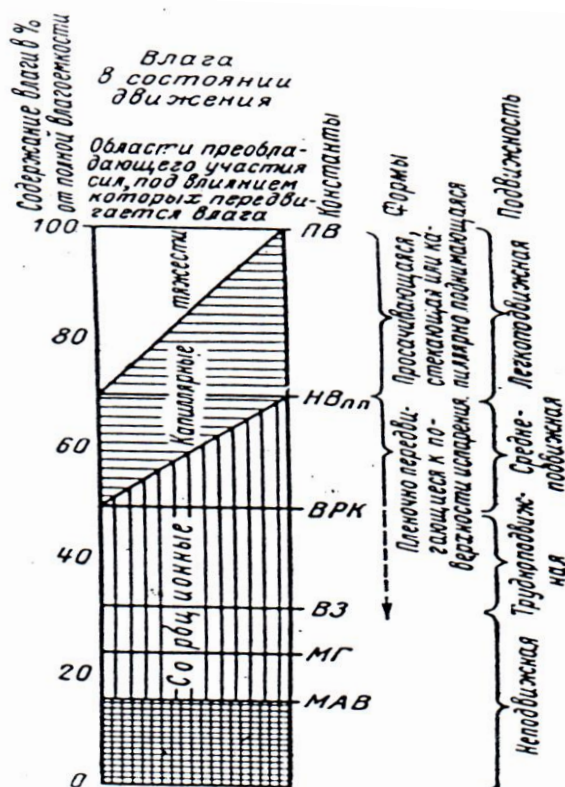


Рисунок 11 – Категории (формы) почвенной влаги и почвенно-гидрологические контакты (по А. А. Роде)

ПВ – полная влагоемкость (наибольшее количество воды, которое может содержаться в почве при условии полного заполнения всех пустот и пор);

НВпп – наименьшая влагоемкость (наибольшее количество пленочно подвешенной воды, которое может удерживаться в почве);

ВРК – влажность разрыва капилляров (влажность, при которой подвешенная вода в процессе испарения теряет сплошность и перестает передвигаться к испаряющей поверхности);

ВЗ – влажность устойчивого завядания (влажность, при которой растения начинают обнаруживать признаки не исчезающие при помещении растения в атмосферу насыщенную водяным паром, иначе – коэффициент завядания);

МГ – максимальная гигроскопичность (наибольшее количество воды, которое почва может поглотить из воздуха, почти насыщенного водяным паром);

МАВ – максимальная адсорбционная влагоемкость (наибольшее количество воды, которое может содержаться в почве, удерживаясь силами адсорбции).

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите почвенно-гидрологические константы.
2. Что такое полная влагоемкость (ПВ) и ее характеристика.
3. Наименьшая влагоемкость (НВ) и ее характеристика.
4. Влажность разрыва капилляров (ВКР) и ее характеристика.
5. Влажность устойчивого завядания (ВУЗ, ВЗ) и ее характеристика.
6. Максимальная гигроскопичность (МГ) и ее характеристика.
7. Максимальная адсорбционная влагоемкость (МАВ) и ее характеристика.

5 ПЕРЕДВИЖЕНИЕ ВЛАГИ В ПОЧВЕ

Наука о физических процессах и явлениях, характеризующих поведение воды в почве – Гидрофизика почв – вплотную примыкает, с одной стороны, к фундаментальным дисциплинам – физике и физической химии поверхностных явлений, с другой – к такой технической дисциплине, как теория тепло- и массообмена в пористых средах. Изучение равновесия и передвижения почвенной влаги усложняется тем, что реальные почвы содержат более или менее концентрированный почвенный раствор, поэтому приходится различать влияние солесодержания на различные виды движения и равновесия влаги. Необходимо также постоянно иметь ввиду, что верхний слой почв, которому свойственен неизотермический влагообмен, большую часть времени находится обычно в не насыщенном водой состоянии, а его профильное сложение влияет на многие физические процессы и явления в почве.

Вода в почве находится в непрерывном движении под влиянием различных причин: поступления в почву осадков и талых вод и потери воды на испарение; возникновения в почве градиентов влажности, температуры, плотности, упругости паров. Скорость движения почвенной влаги может изменяться в весьма широком интервале в зависимости от природы сил, обуславливающих ее движение.

Поглощение влаги почвой. Жидкая влага поступает в почву сверху в форме дождевых, талых или ирригационных вод через поверхность почвы. Этот процесс прохождения через поверхность называется впитыванием влаги в почву, или поглощением влаги почвой (рисунок 12).

Инфильтрация. Под термином «инфильтрация» мы понимаем процесс поступления влаги в почву и дальнейшее передвижение ее в почве.

Различаются три стадии: 1) впитывание, 2) инфильтрацию при непрекращающемся впитывании и 3) перераспределение влаги в почве по окончании впитывания.

Профиль почвы, смоченный инфильтрирующейся влагой может быть поделен на четыре зоны:

Зона насыщения, имеющая мощность около 1 см, где влажность равна полной влагоемкости или даже несколько превышает

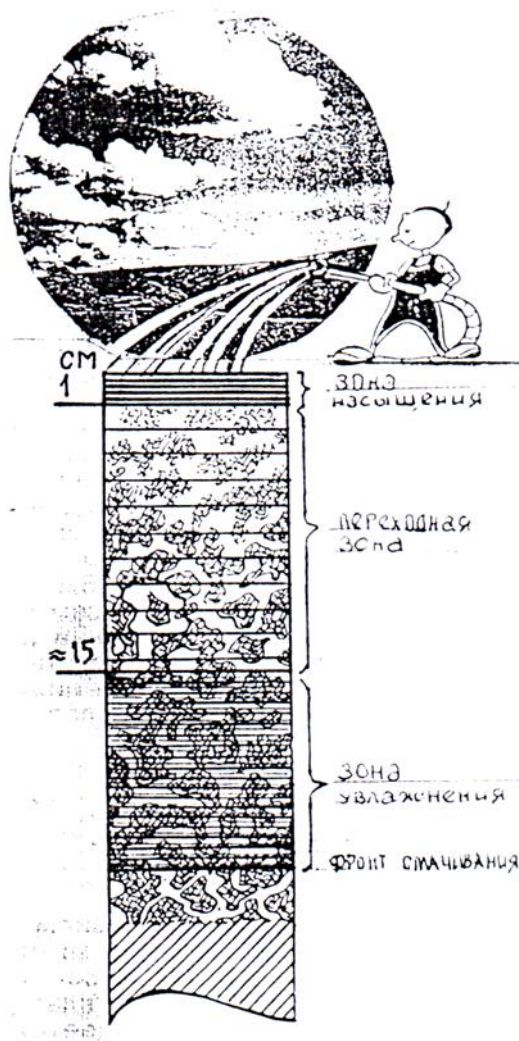


Рисунок 12 – Поглощение
влаги почвой

ее за счет набухания почвы. Гидравлический напор в этой зоне равен нулю.

Переходная зона, мощностью около 15 см, в пределах которой влажность падает от полного насыщения до 70–80 % ПВ, т. е. несколько превышающей величину НВ.

В пределах этой зоны гидравлический напор уменьшается (алгебраически) и достигает – 30≈50 см водного столба.

Зона увлажнения – это зона, в пределах которой влажность почти постоянна, немного уменьшаясь книзу, но возрастает в каждом слое по мере увеличения глубины промачивания. Гидравлический напор равен тому, который наблюдается на нижней границе переходной зоны, слегка уменьшаясь книзу.

Фронт смачивания. Испаряет влагу и создает перед собой

фронт парообразной влаги, которая адсорбируется пористой средой и вызывает повышение температуры за счет теплоты адсорбции. Часть этого тепла потом переходит к жидкой фазе и расходуется на испарение новых порций, причем испарение охлаждает жидкую фазу. Явление это обнаружено на расстоянии порядка нескольких миллиметров от фронта смачивания.

Передвижение фронта смачивания наблюдалось ими при капиллярном подъеме чистой воды и растворов солей. В варианте с растворами солей опыт велся в атмосфере, в которой относительная влажность воздуха соответствовала давлению пара над раствором соли, применявшимся в опыте.

Установлено, что при движении солевых растворов, после того, как связь почвы с водой или солевым раствором прерывалась, фронт смачивания длительно оставался резким, в то время как при движении чистой воды он быстро рассасывался. Авторы делают вывод, что фронт смачивания может двигаться только в том случае, если перед ним происходит полимолекулярная адсорбция влаги на поверхности частиц почвы. Если влажность воздуха недостаточна для обеспечения полимолекулярной адсорбции, то фронт смачивания двигаться не может.

При изучении процесса рассасывания влаги по окончании ее впитывания в почву сделаны следующие выводы:

1. В крупнозернистых почвах и грунтах и влажных среднезернистых перераспределение влаги происходит немедленно, после поступления ее на поверхность, в промоченных слоях остается лишь небольшое количество стыковой влаги, соответствующее НВ.

2. В сухих среднезернистых почвах и грунтах сначала происходит накопление насыщающей капиллярно-подвешенной влаги в поверхностном слое до известного предела. Малейшее превышение этого предела вызывает быстрое стекание основной массы влаги, причем в промоченной толще остается только стыковая влага, заполняющая лишь небольшую долю пор, количество которых соответствует НВ.

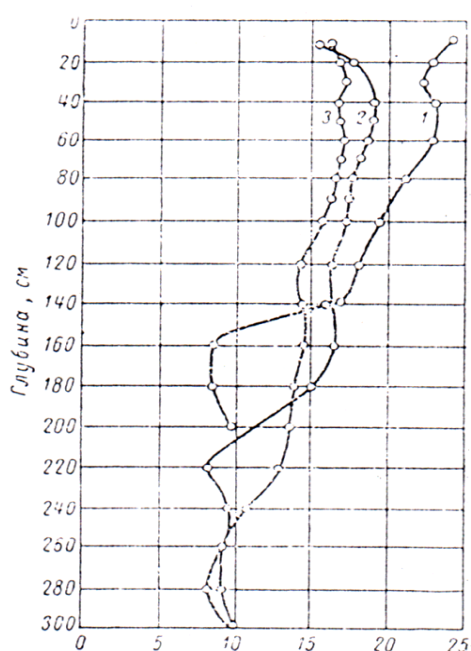
3. В мелкозернистых почвах и грунтах сначала тоже происходит накопление капиллярно-подвешенной насыщающей влаги, которая, однако, сейчас же начинает рассасываться вниз, но очень медленно, также оставляя после себя лишь небольшое количество стыковой влаги, соответствующей НВ.

4. В тонкозернистых почвах и грунтах (это относится к черноземам) большая часть поступавшей на поверхность влаги прочно задерживается в верхних слоях, занимая большую часть порового пространства. По окончании впитывания рассасывается лишь небольшая часть этой влаги, после чего передвижение влаги почти прекращается и влажность приближается к НВ.

5. В очень тяжелых почвах и грунтах без микроструктуры, особенно солонцеватых и оглеенных, вся влага полностью удерживается в верхних слоях, заполняя собой всю пористость и создавая влажность, близкую к ПВ. Рассасывание происходит исключительно медленно.

Черноземы Северного Кавказа преимущественно с глубоким залеганием грунтовых вод (до 30 м) увлажняются за счет атмосферных осадков, ирригационных вод, транспирационного пара в травянистых ценозах и пара атмосферы.

Исследованиями научно-исследовательских учреждений Северного Кавказа определен характер распределения почвенной влаги по профилю почвы в зависимости от степени ее увлажнения. После обильного увлажнения промоченная толща почвы насыщается до предельной полевой влагоемкости (ППВ) и только после этого, по истечении, примерно 20 дн, происходит стекание ее вниз.



Влажность в процентах от веса
Рисунок 13 – Распределение влаги по профилю почвы во времени :

- 1 – на третьи сутки после обильного увлажнения;
- 2 – через 12 суток после увлажнения;
- 3 – через 21 сутки после увлажнения.

переходный по влажности слой. Такая влага на долгое время задерживается до прохождения интенсивных дождей или интенсивных влагозарядковых поливов.

Указанная закономерность подтверждается опытами И. А. Кузнецова на черноземах Кубани: «Установлена и такая особенность тяжелых черноземов когда сухую почву вода насыщает до предельной полевой влагоемкости и только после этого опускается ниже» (5).

На черноземах Ростовской области в период между 12 и 21 сутками после обильного увлажнения наблюдается процесс стекания влаги из верхних горизонтов в более глубокие слои почвы (рис.13).

В годы, когда почва увлажняется на глубину гумусового горизонта, тогда почвенная влага по всем слоям распределяется примерно равномерно. В условиях, когда увлажняется только пахотный слой почвы или несколько глубже, то тогда он удерживается на уровне немного меньшем, чем ППВ, а на границе влажного и сухого слоев образуется до 5 см

В этом случае глубина промокания увеличивается, но характер увлажнения остается прежним (рисунок 14).

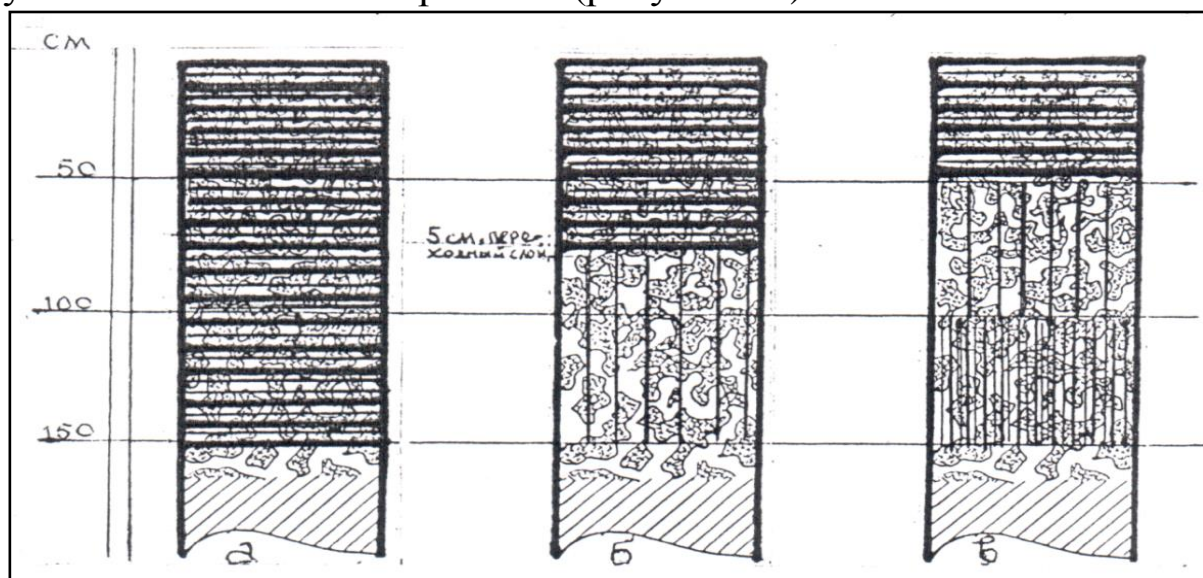


Рисунок 14 – Распределение почвенной влаги по профилю парового поля на черноземах Северного Кавказа

а – в годы достаточного увлажнения почвенная влага по горизонтам 0–50, 50–100, 100–150 см в паровом поле распределяется примерно равномерно;

б – дождь, упавший на сухую почву увлажняет ее на определенную глубину до ППВ, где образуется переходный слой 5 см между верхним насыщенным и нижним сухим слоем. С последующим увеличением осадков глубина промачивания увеличивается, но характер увлажнения остается прежним;

в – в засушливые годы слой почвы 0-50 см более увлажнен, чем нижележащий 50–100 см, а слой 100–150 см несколько влажнее слоя 50-100 см, но суше верхнего 0-50 см.

Если почва просыхает до ВЗ или МГ на глубину пахотного слоя и более, а нижележащие слои имеют невысокую степень увлажнения (ВРК-ВЗ), то в осенне-зимний период верхние слои почвы увлажняются до ППВ-НВ и зависят над менее увлажненным слоем почвы довольно долго (осень и зиму) до периода прохождения интенсивных дождей (рисунок 15).

В засушливой зоне и зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения Северного Кавказа рассмотренные варианты увлажне-

ний бывают, поэтому вопросы увеличения влагоемкости почвы постоянно находятся в центре внимания практического земледелия.

Если в основной зоне возделывания озимых хлебов на территории Северного Кавказа глубина промачивания не превышает 130 см, то естественно всем нам есть над, чем задуматься.



Рисунок 15 – Средняя ГПП на посевах озимых по непаровым предшественникам на начало их весенней вегетации

При оптимальном увлажнении почвы корневая система озимой пшеницы способна глубоко проникать в почву и использовать почвенную влагу на глубине до 2 м и даже глубже. Поэтому увеличение глубины увлажнения почвы приводит к росту урожаев пшеницы.

Увеличение глубины увлажнения с 1 до 1,5 м в Ростовской области сопровождалось повышением урожая на 1,5 ц/га.

Аналогичные данные получены в Ставропольском крае: при увлажнении почвы на глубину 1 м урожай в среднем за 1965–1967 гг. составил 46 ц/га, а при увлажнении на 2,5 м – 52,3 ц/га (таблица 4).

Чтобы увеличить глубину промачивания в условиях производства необходимо разработанными научными учреждениями зональными агротехническими приемами не допускать пересушивания верхних обрабатываемых слоев почвы.

Таблица 4 – Урожайность озимой пшеницы в зависимости от глубины увлажнения почвы, ц/га

Глубина увлажнения, м	Годы				Прибавка урожая	
	1965	1966	1967	в среднем	ц/га	%
1,0	47,1	44,6	45,6	46,0	0	0
1,5	49,0	48,8	46,2	48,0	2,0	4,3
2,0	50,8	50,9	49,0	50,2	4,2	9,1
2,5	53,1	52,2	51,5	52,3	6,3	13,7

Примечание – Почва – чернозем предкавказский тяжелосуглинистый

В этом вопросе принципиально важно мнение по обсуждаемой теме авторитетного кубанского ученого земледеля И. А. Кузнецова: «Физическое иссушение затрагивает только верхние слои почвы от 0 до 30, иногда до 50 см, но не более...». Физическое иссушение почвы бывает более сильным, чем биологическое, и может доходить до величины гигроскопической влажности, которая на Кубани примерно равна 4–6 % от массы абсолютно сухой почвы. После такого сильного физического иссушения остаточные запасы очень малы и дефицит в верхних слоях разных черноземов резко повышается (таблица 5).

Таблица 5 – Водные свойства черноземов Западного Предкавказья

Вариант	Предельные запасы воды в слое, мм		Запасы влаги при гигроскопической влажности в слое 0–20 см, мм	Дефицит влаги в слое 0–20 см, мм
	0–20 см	20–40 см		
Чернозем обыкновенный	75	70	12	63
Чернозем слитой	75	72	12	63

Если допустить, что пахотный слой почвы будет доведен до воздушно-сухого состояния, то в двадцатисантиметровом слое образуется дефицит влаги более чем в 60 мм. Значит, в нашем приме-

ре при выпадении осадков на воздушно-сухую почву требуется 60 мм воды, чтобы насытить только пахотный слой 0–20 см, после чего поступающая в дальнейшем влага будет опускаться в подпахотный слой. Если же и подпахотный слой высохнет до гигроскопической влажности, то для насыщения его до предельной полевой влагоемкости также потребуется от 40 до 50 мм осадков, только после этого вода пойдет в нижележащие слои почвы. Отсюда следует очень важный практический вывод: нельзя допускать сильного физического иссушения верхних слоев почвы, особенно в зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения, так как при этом, как правило, уменьшается глубина промачивания почвы к весне, количество продуктивной воды в этом случае уменьшится.

В этих целях нужна влагосберегающая, влагонакопительная технология обработки почвы, которая будет рассмотрена ниже.

Обсуждая процесс увлажнения почв, не следует забывать, что впитывание влаги во влажную почву происходит медленнее, чем в сухую, но скорость передвижения фронта смачивания больше.

Так, например, в сухую почву пылеватого суглинка за 100 минут впиталось 51 мм воды, а фронт смачивания достиг глубины 11 см. За это же время во влажную почву впиталось 7 мм, а глубина просачивания достигла 34 см. В песчанистом суглинке за 100 мин в сухую почву впиталось 125 мм воды, а фронт промачивания достиг глубины 37 см, тогда как во влажную почву за то же время впиталось 67 мм, но глубина просачивания достигла 61 см.

Итак, сухой слой (3–5 см) способен уловить атмосферные осадки даже малой интенсивности, а нижележащий влажный способен быстро провести их вглубь почвенного профиля и это модель формирования влагосберегающего слоя почвы.

Движение воды в почве насыщенной влагой. Закономерности движения влаги в среде, насыщенной влагой, были установлены впервые Дарси. Уравнение Дарси может быть представлено в следующем виде:

$$Q = K \frac{h}{l} A,$$

где Q – объем воды, просочившейся через почву в единицу времени;

h – падение напора, или разность уровней верхней и нижней стороны почвенной колонки;

l – длина фильтрующей колонны почвы, измеряемая по направлению движения воды;

A – площадь поперечного сечения колонны;

K – некоторая постоянная величина, зависящая от свойств фильтрующей породы и фильтрующей жидкости, называемая коэффициентом фильтрации.

При изучении нисходящего тока гравитационной воды через почву следует различать стадию впитывания, когда идет процесс заполнения влагой свободных пор и стадию фильтрации, когда вода протекает через поры, уже заполненные водой.

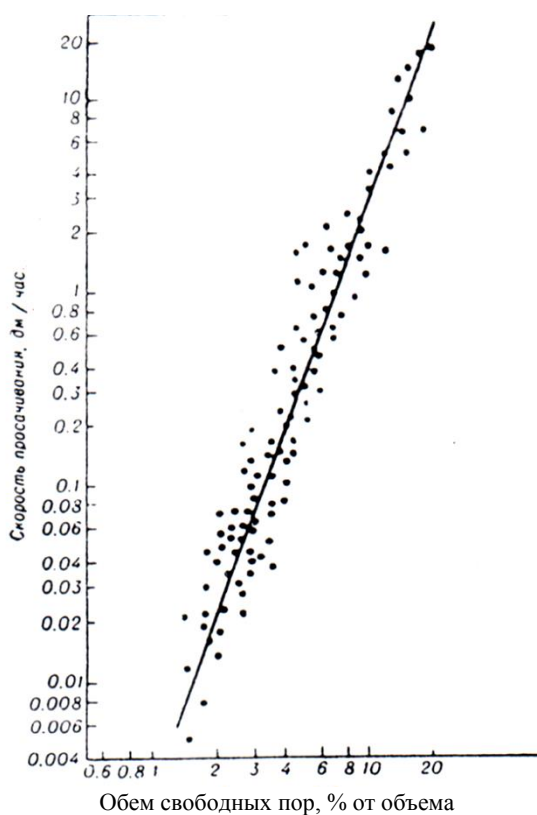


Рисунок 16 – Зависимость логарифма проницаемости (дм/час) от логарифма объема свободных пор (в процентах от объема почвы) (по Бендиксену и Хершбергеру)

водопроницаемости на образцах почв с естественным сложением разного гранулометрического состава и разной степени оструктуренности обнаружена линейная зависимость логарифма водопроницаемости от логарифма объема свободных пор (рис. 16).

Итак, при рассмотрении влажности полевой влагоемкости, нисходящий поток гравитационной влаги идет со скоростью, описанной уравнением Дарси. В общем виде можно считать, что объем протекающей воды в единицу времени через единицу площади равен произведению влагопроводности, или коэффициента фильтрации, на градиент гидравлического напора.

Скорость нисходящего инфильтрационного потока является важнейшей характеристикой данной почвы и ее физического состояния, и прежде всего ее механического состава, структурного состояния и плотности.

Рассмотрим зависимость скорости нисходящего потока почвенной влаги от объема свободных пор почвы (рис. 16). При изучении водопроницаемости на образцах почв с естественным сложением разного гранулометрического состава и разной степени оструктуренности обнаружена линейная зависимость логарифма водопроницаемости от логарифма объема свободных пор (рис. 16).

ницаемости от логарифма объема пор, дренирующихся при всасывающем давлении в 60 см водного столба в течение 1 часа.

Скорость фильтрации зависит от плотности почв (г/см^3) и падение скорости фильтрации почвы значительно более резко выражено на тяжелых почвах, чем на легких.

Это подтверждается опытами ученых Северокавказского региона. Так, на черноземах обыкновенных с лучшей структурой и более рыхлым сложением по всему профилю впитывание проходит быстрее, чем на выщелоченных (таблица 6).

Таблица 6 – Скорость просачивания воды на черноземе обыкновенном и выщелоченном, мм в час (по данным длительных исследований кафедры общего и орошаемого земледелия)

Вариант	Чернозем выщелоченный (Кузнецов)	Чернозем карбонатный (Васильченко)
На старопахотном участке	69	160
После люцерны	300	220

На черноземе выщелоченном были получены следующие данные, в среднем впитывалось в 1 минуту миллиметров воды:

На поле кукурузы по глубокой отвальной вспашке	1,15
По безотвальной	2,47
По лущению	0,47
Многолетние травы после лущения на глубину 8–10 см	5,00

Факты более высокой водопроницаемости наблюдались на полях после подсолнечника, у которого мощная стержневая система и хорошо развита система пор вертикальной ориентации. Хорошо развиты поры вертикальной ориентации и после поверхностной обработки почв (6–10 лет систематической обработки).

Не только тип почвы, но и агроприемы оказывают влияние на скорость впитывания воды. При сравнении двух участков – разрыхленного культиватором и уплотненного катком – оказалось, что

вода в первом случае впитывается в 2 раза быстрее, нежели во втором (соответственно 36 и 18 мм).

Установлена зависимость водопроницаемости от макро- и микроагрегатного состава почв, где по их данным с увеличением макроагрегатов по отношению к микроагрегатам (пыли) водопроницаемость почв резко увеличивается (таблица 7).

Таблица 7 – Водопроницаемость в зависимости от соотношения микроагрегатов и макроагрегатов в почве (по данным И. Б. Ревута)

Соотношение между макроагрегатами и микроагрегатами (пыль) в колонках	Водопроницаемость при Н-20 мм (мм/час)	Соотношение между макроагрегатами и микроагрегатами (пыль) в колонках	Водопроницаемость при Н-20 мм (мм/час)
Агрегаты 0,25–10 мм	162,0	Агрегаты + 30,7 % пыли	6,4
Агрегаты + 3,6 % пыли	96,0	Агрегаты + 50,7 % пыли	0,6
Агрегаты + 9,2 % пыли	60,0	Пыль 110 %	0,084
Агрегаты + 21,1 % пыли	16,6		

Обобщенный материал по сложению пахотного слоя черноземов Северного Кавказа, в котором установлено, что водопроницаемость увеличивается с уменьшением плотности почвы и увеличением скважности.

Таблица 8 – Показатели сложения пахотного слоя чернозема обыкновенного

Показатель	Сложение			
	очень рыхлое	рыхлое	уплотненное	плотное
Плотность (ρ), г/см ³	0,8	0,8–1,0	1,0–1,1	1,1–1,3
Скважность (P), %	65	60–65	55–60	50–55
Содержание агрегатов > 0,25 мм, < 10 мм, %	53–56	53–60	60–63	63–70
Водопроницаемость, мм/час	150–200	100–150	50–100	5

Как влияют способы обработки почв на плотность сложения?
На снижение водопроницаемости в процессе увлажнения действует механизм образования почвенной корки (рисунок 17).

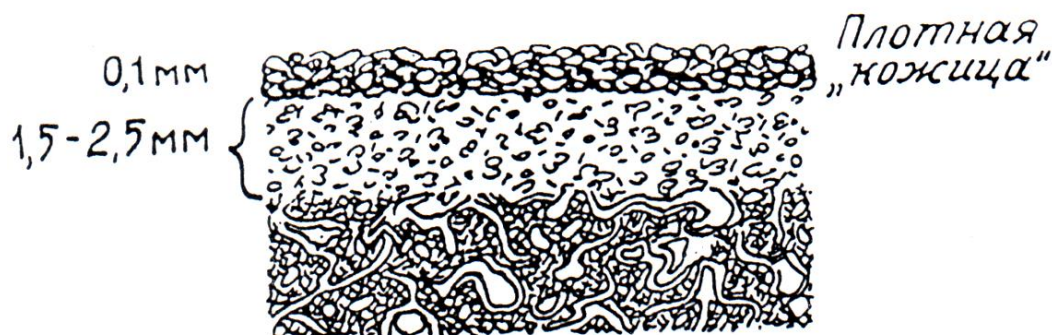


Рисунок 17 – Образование почвенной корки

Такой слой может образоваться за 20–30 минут особенно в летний период. Удаление этого слоя при условии последующей защиты поверхности почвы каким-либо рыхлым материалом позволяет полностью восстановить водопроницаемость. Предварительные данные показывают, что этот поверхностный слой не только имеет больший объемный вес, но и содержит больше крупных частиц и меньше органического вещества вследствие вымывания мелких частей почвы струйками воды, текущими по поверхности. Путем изучения тонких шлифов почвы, сделанных через ее поверхностный слой, было установлено, что корочка состоит из тонкой (0,1 мм) плотной «кожицы» на поверхности и вымытого слоя толщиной 2,5–1,5 мм, в котором пористость значительно уменьшилась. Проницаемость по вариантам соответственно 5×10^{-7} и 5×10^{-6} см/с, на контроле – 5×10^{-3} см/с.

Почвенная корка не только резко понижает водопроницаемость почв, она способствует увеличению физического испарения с ее поверхности. Поэтому разрушение ее ротационными или зубowymi боронами является эффективным агротехническим приемом сбережения почвенной влаги.

А что происходит с водопроницаемостью, если почва подвергается увлажнению длительное время? На старопахотной почве черноземов выщелоченных была установлена следующая скорость впитывания воды:

За первые 10 мин	- 27,0 мм, или 270 т;
За 30 мин	- 48,0 мм, или 480 т;
За 60 мин	- 66,8 мм, или 668 т;
За 120 мин	- 83,7 мм, или 837 т;

Приведенные данные опыта показывают, что кривая впитывания воды падает во времени. На пылеватом суглинке за 200 дней, прошедших с момента увлажнения водопроницаемость снизилась в 850 раз.

Такое снижение водопроницаемости объясняется выделением из почвенного раствора воздуха, который переходит в состояние защемленного, набуханием коллоидов, выпадением солей, уплотнением почвы, дезагрегацией, изменением пористости под влиянием жизнедеятельности микроорганизмов.

Рассмотрены закономерности движения влаги в почве, насыщенной влагой. Эти закономерности относятся к некоторой «средней» воде, которая движется через почвенную толщу с некоторой средней скоростью в прямолинейном направлении. Но если бы можно было проследить за движением отдельных микроскопических порций воды и тем более отдельных молекул воды, то мы увидели бы, что истинные скорости движения очень различны, а направления далеко не прямолинейны. Это зависит от того, что поровое пространство почвы очень сложно и молекулы воды или микроскопические ее количества движутся в нем по очень извилистым путям. Поэтому каждая новая макропорция воды, поступающая в насыщенную почву, отнюдь не действует как поршень, гоня перед собой влагу, содержащуюся в почве ранее. Отдельные микроколичества вновь поступившей воды могут в процессе своего движения обгонять друг друга, оставляя позади себя микроколичества воды, содержащейся ранее. Это явление называется перемешивающим вытеснением (*miscible displacement* – у английских и американских авторов) или гидродинамической дисперсией.

Рассмотрели движение влаги в почве, когда она поступает сверху (дождь, полив), теперь рассмотрим движение влаги в почве от грунтовых вод к дневной поверхности.

Капиллярный подъем влаги в почве. Водоподъемная способность – свойство почвы вызывать капиллярный подъем влаги. Стенки почвенных капилляров хорошо смачиваются водой, поэтому в них создаются вогнутые мениски, на поверхности которых

развивается поверхностное натяжение. Величина его зависит от радиуса капилляров. Водоподъемная способность определяется агрегатностью, механическим составом и сложением почвы, обуславливающих ее пористость. Чем тоньше поры почв, тем выше поднимается в них вода. Это правило нарушается в плотных тяжелых почвах, в которых высота капиллярного подъема уменьшается из-за заполнения поровых пространств связанной водой (рис. 18). Максимальная высота капиллярного подъема для песчаных почв равно 0,5–0,7 м, для суглинистых – 3–6 м, на слитых черноземах Кубани за 5 месяцев вода поднялась всего на высоту 29,6 см.

Высоту капиллярного поднятия воды вычисляют по формуле Жюрена:

$$H = \frac{2a}{rgd},$$

где H – высота капиллярного поднятия (см);
 a – величина поверхностного натяжения воды (74 дины/см);
 r – радиус капилляра, в см;
 g – ускорение силы тяжести (981 см/с);
 d – плотность воды (1 г/см³).

Подставляя в формулу известные значения, получаем обратную зависимость высоты капиллярного поднятия от радиуса капилляра:

$$H = \frac{0,15}{r}.$$

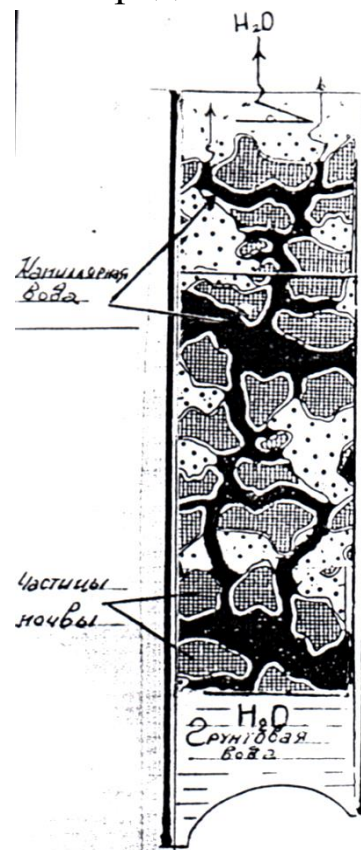


Рисунок 18 – Капиллярный подъем почвенной влаги от грунтовых вод

Гравитационные силы, главным образом, влияют на воду сосредоточенную в крупных порах почвы.

Частицы и микроагрегаты $< 0,25$ мм обладают большей высотой капиллярного поднятия, чем микроагрегаты почвы; агрегаты 1–2 мм показали наименьшую высоту поднятия воды. Это естественно не может не отражаться на скорости притока влаги из слоев со значительным влагосодержанием к зоне иссушения.

Микроагрегатная почва обладает скоростью капиллярного поднятия в 6–8 раз более высокой, чем образец из агрегатов в 3–5 мм [8].

Большое практическое значение, кроме высоты капиллярного поднятия, имеет скорость этого процесса. Она в значительной степени зависит от радиуса капилляров почвы, а также от вязкости воды, обуславливаемой ее температурой. Если высота капиллярного подъема с уменьшением радиуса капилляров возрастает, то скорость подъема уменьшается.

О влиянии агрегированности почвы на количество капиллярно поднимающейся влаги говорят и следующие данные П. А. Летунова, таблица 9 [7].

Таблица 9 – Зависимость капиллярной каймы от агрегатного состава почвы

Размер агрегатов, мм	<1	1–3	3–5
Поднялось воды за 5 суток, $\text{см}^3/\text{см}^2$	35,9	8,4	5,7
Поднялось воды за шестые сутки, $\text{см}^3/\text{см}^2$	2,9	0,5	0,3

Причиной такого влияния структурного состояния почвы на капиллярный подъем влаги (понижение скорости капиллярного подъема с увеличением размера агрегатов) является то, что капиллярное передвижение влаги в структурной почве происходит только через точки соприкосновения почвенных комочков. Скорость капиллярного поднятия в почвах с разным агрегатным состоянием находится в обратной зависимости от радиусов агрегатов.

Степень минерализации грунтовых вод оказывает значительное влияние на скорость капиллярного подъема. Засоленные грунтовые воды в отличие от пресных, характеризуются более высокими скоростями капиллярного поднятия.

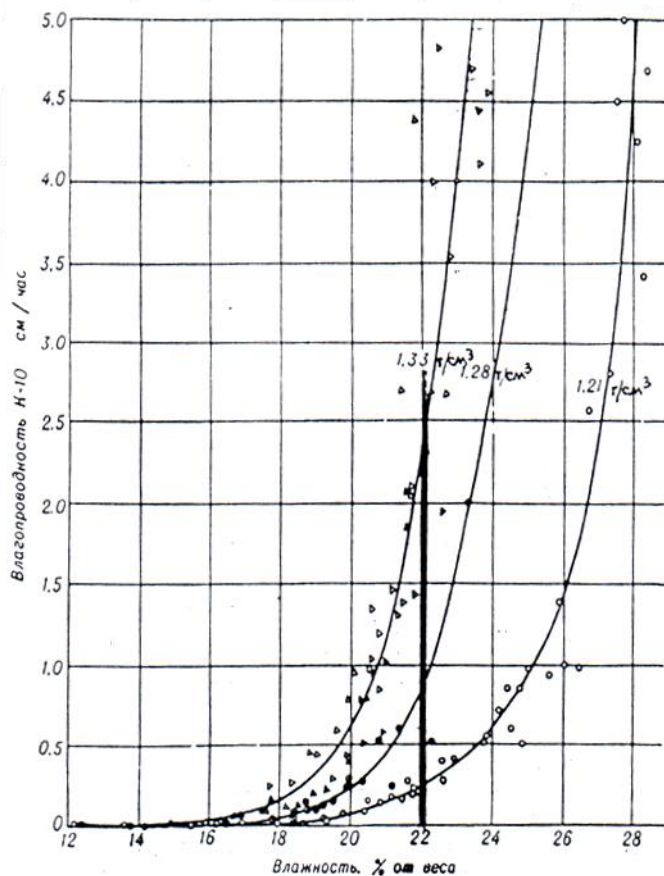


Рисунок 19 – Зависимость влагопроводности от влажности при объемном весе (глинистый суглинок) по Сеплю и Легину

Благодаря капиллярным явлениям и водоподъемной способности почв грунтовые воды оказывают большое влияние на почвообразование и развитие агрономических свойств почв.

Поток влаги в почве ненасыщенной влагой.

Рассматривая закономерности передвижения влаги в почве ненасыщенной ею, следует отметить одну существенную особенность. Первоначально предполагалось, что проводимость прямо пропорциональна содержанию влаги. Но дальнейшие исследования показали, что это не так и что влагопроводность убывает в общем быстрее, чем влажность.

Главной причиной этого является уменьшение площади поперечного сечения, занятого водой, так как влага двигается только через ту долю порового пространства, которая занята водой. Кроме того, с уменьшением влажности в первую очередь дренируются более крупные поры, т. е. с наименьшим сопротивлением движущейся воде, вследствие чего влагопроводность уменьшается пропорционально квадрату диаметра пор. И, наконец, с уменьшением влажности, увеличивается количество скоплений воды, изолированных от общей водной массы, не принимающих участия в фильтрации. Теперь становится очевидным, что высокая влагопроводность наблюдается лишь при высокой влажности. С уменьшением последней влагопроводность очень быстро падает, и при влажности около 14–16 % (в тяжелом суглинке) становится равной нулю, что соответствует влажности завядания (ВЗ).

Рассмотрим еще одну важную зависимость – это влияние плотности почвы на ее влагопроводность (рисунок 19).

Рисунок демонстрирует влияние плотности почвы на влагопроводность. Чем плотность больше, тем влагопроводность выше при той же влажности. Например, при влажности 22 % и при плотности равной $1,21 \text{ г/см}^3$ влагопроводность равна $0,2 \text{ см/час}$, а при плотности $1,33 \text{ г/см}^3$ и той же влажности – $2,8 \text{ см/ч}$.

Это еще одно положительное свойство сложения почвы, которое дает научное обоснование необходимости формирования профиля влагосберегающего слоя.

На данном этапе рассмотрения вопроса о передвижении влаги в почве нам уже известно, что верхний рыхлый и сухой слой почвы 3–5 см лучше влажного улавливает влагу атмосферных осадков, но влажный слой почвы лучше рыхлого и сухого проводит их вглубь почвенной толщи. Кроме этого исследованиями установлено, что уплотненный до $1,33 \text{ г/см}^3$ и более влажный слой почвы увеличивает скорость влагопроводности почвы по сравнению с влажным, но менее уплотненным $1,1–1,2 \text{ г/см}^3$.

Передвижение капиллярно-подвешенной влаги при физическом иссушении почвы. Поступающая в почву влага подвержена воздействию сил различной природы, под действием которых она может либо передвигаться в различных направлениях, либо задерживаться. Такими силами являются ионные, осмотические, менисковые и гравитационные.

При глубоком залегании грунтовых вод на 4 и более метров влага атмосферных осадков, впитываясь в почву, не смыкается с зеркалом грунтовых вод и находится как бы в подвешенном состоянии в силу чего и называется капиллярно-подвешенной. Именно в этой форме и происходит накопление влаги в степной зоне, где капиллярно-подвешенная влага представляет собой основной источник водного питания растений.

До середины девятнадцатого столетия среди ученых не было единого понимания о механизме физического иссушения почвы. Оставался нерешенным вопрос: будет ли капиллярно-подвешенная влага при испарении расходоваться из всего промоченного профиля почвы или иссушение почвы будет идти лишь с поверхности?

Многие исследователи высказывали разные точки зрения. На основании пятнадцатилетних наблюдений над влажностью черно-

земных почв в Украине передвижение воды кверху происходит лишь в почвах, насыщенных водой, а в почвах, ненасыщенных водой, только путем испарения в почвенный воздух.

А. Ф. Лебедев утверждал, что если бы капиллярное поднятие воды в жидком виде существовало в природе, то тогда наиболее влажными всегда были бы верхние слои, а иссушение нарастало бы снизу. На самом деле иссушение всегда нарастает сверху, поэтому перемещение капиллярно-подвешенной воды происходит только в парообразном состоянии (б).

На бесструктурных почвах, где капилляры связаны между собой и представляют практически одно целое. Вода из капельно-жидкой превращается в волосную и передвигается независимо от силы тяжести или давления, всегда от мест более влажным к местам менее влажным. Поэтому при испарении воды с увлажненного слоя такой почвы, как только на поверхности почвы появляется более сухой слой – вся масса воды почвы устремится к ее поверхности».

Установлено восходящее передвижение капиллярно-подвешенной воды вследствие испарения. Основные закономерности, управляющие передвижением капиллярно-подвешенной влаги.

1. Капиллярно-подвешенная влага способна к восходящему передвижению в жидкой форме из всей толщи почвы по достижению ее влажности разрыва капилляров;

2. После достижения почвой влажности разрыва капилляров в верхних слоях почвы продолжается циркуляция влаги, причем в нисходящем направлении она движется в форме пара, а в восходящем – в жидкой форме.

Циркуляция парообразной влаги происходит под действием суточных колебаний температуры почва в дневное время с поверхности нагревается, и в почвенном воздухе образуется высокая упругость водяного пара. С глубиной температура и упругость пара уменьшаются, по этой причине имеет место нисходящая перегонка водяного пара – от теплого к холодному, т. е. от большей упругости к меньшей. В нижележащих, более холодных слоях водяные пары конденсируются, вследствие чего капиллярная связь восстанавливается.

В полевых условиях, благодаря циркуляции жидкой и парообразной влаги, черноземная почва в течение 40 и более дней на глу-

бине 20–80 см сохраняет влажность почвы, близкую к исходной (рисунок 20).

Благодаря тому, что эта циркуляция не представляет собой замкнутого процесса, одновременно продолжается иссушение поверхностного слоя почвы.

В процессе испарения до 50 % парообразной влаги диффузно теряется в атмосфере, оставшаяся часть влаги участвует в непрерывной циркуляции в нисходящем направлении. Не менее сложным оказалось объяснение, какие же силы участвуют в процессе испарения?

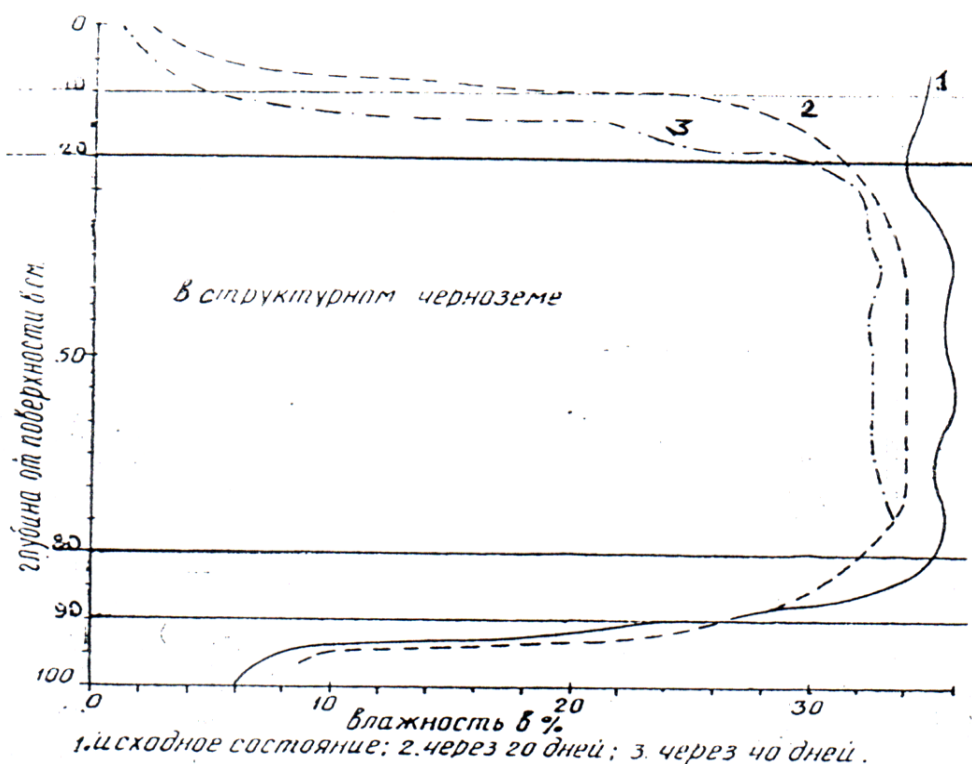


Рисунок 20 – Испарение воды почвой в условиях Северного Кавказа (по данным Абрамовой)

Чтобы ответить на поставленный вопрос, необходимо определить формы почвенной влаги, которые содержатся в микроструктурной и макроструктурной почве в границах наименьшей влагоемкости и влажности разрыва капилляров, где происходит циркуляция жидкой и парообразной почвенной влаги. Чтобы понять процессы иссушения почвы, необходимо, прежде всего, рассмотреть вопрос состояния почвенной влаги и действующие силы в микро- и макроструктурных почвах.

В момент впитывания почвой атмосферных осадков или ирригационных вод происходит насыщение почвы до полной влагоемкости. После окончания впитывания часть гравитационной влаги стекает вниз и почва, в зависимости от механического и гранулометрического состава, максимально насыщается до влажности называемой – наименьшей влагоемкостью (НВ).

В тонкозернистых (микроагрегатных) почвах и грунтах решающую роль в удержании подвешенной влаги играют сорбционные силы (рисунок 21).

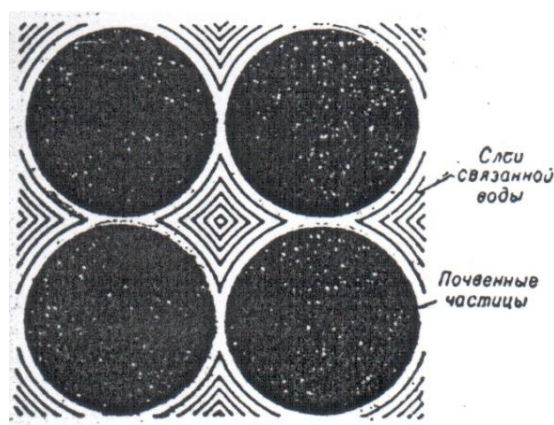


Рисунок 21 – Схематическое изображение слоёв связанной влаги сорбционными силами

Доля воды, удерживаемая этими силами непосредственно, зависит от механического состава почвы и степени ее агрегированности. Чем тяжелее первый и чем хуже выражена микроструктура, тем большая доля воды удерживается сорбционными силами

Влагу, удерживаемую указанным выше путем, можно назвать в целом влагой пленочно (или сорбционно-подвешенной).

Рассмотрим теперь механизм удержания влаги в тонкозернистых почвах или грунтах при наличии в них макроструктуры. Все те явления, которые только что рассматривались, в микроструктурной почве также имеют место в удержании влаги при влажности в макроструктурной почве. Однако в этом случае в удержании влаги должны принимать участие и капиллярные силы.

Отдельные агрегаты почвы пронизаны, как крупными, так и мелкими порами. Если в мелких порах вода удерживается сорбционными силами, то в порах более крупных влага удерживается капиллярным путем, то есть таким образом, что крупные поры могут

быть заполнены водой, которая удерживается от стекания разностью поверхностных давлений нижних и верхних менисков.

Таким образом, по современным представлениям, в тонкозернистых почвах, обладающих хорошо выраженной макроструктурой, кроме влаги связанной и пленочно-подвешенной, может содержаться некоторое количество и влаги свободной капиллярно-подвешенной, находящейся в форме изолированных скоплений в отдельных агрегатах.

Этим объясняется отсутствие капиллярного рассасывания подвешенной влаги на ее нижней границе, несмотря на наличие на этой границе значительного градиента влажности.

Стыковая влага и вся оставшаяся находится под действием сорбционных сил, то есть является в той или иной мере связанной. Можно утверждать, что величина ВРК соответствует наибольшему содержанию рыхло связанной влаги (рисунок 22).

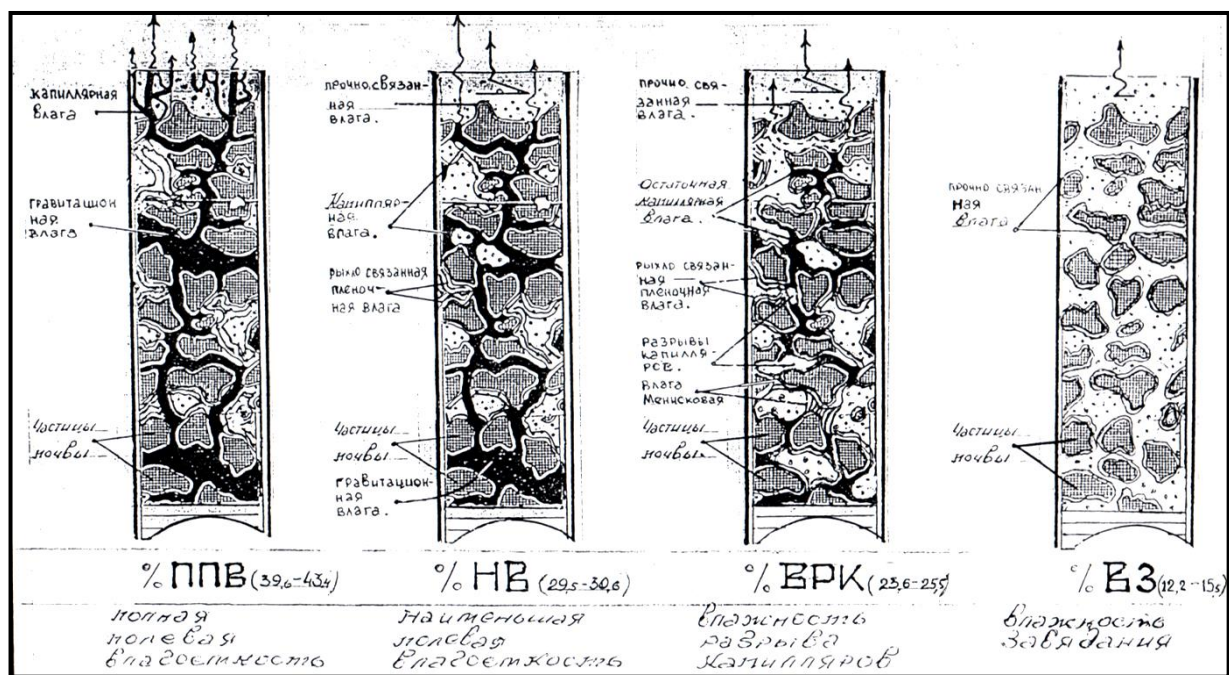


Рисунок 22 – Схема состояния почвенной влаги в процессе иссушения (испарения)

Теперь, обладая необходимым объемом знаний, мы можем вскрыть механизм испарения воды почвой, изучить вертикальную гетерогенность испаряющего процесса с подвижностью отдельных категорий почвенной влаги, участвующих в испарении. Рассмотрим состояние почвенной влаги на момент испарения и действующую

щие силы, которые обеспечивают этот процесс при ППВ, НВ, ВРК, ВЗ.

Процесс иссушения при полной полевой влагоемкости. Черноземы Северного Кавказа в зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения насыщаются до полной полевой влагоемкости за осенне-зимне-ранневесенний период до 1 м. В период выпадения интенсивных дождей, в летний период, до 20–25 см. Содержание влаги при полной полевой влагоемкости составляет 39,6–43,4 %. Влага обладает свойством непрерывности (сплошности) и движется с указанной глубины к испаряющей дневной поверхности по капиллярам и почвенным порам со скоростью от 10 до 20 см в час. Общие потери влаги при испарении превышают 100 и более тонн в сутки. Испаряющая поверхность совпадает с горизонтом дневной поверхности почвы. Влага при ППВ представлена гравитационной в крупных почвенных порах и капиллярной. Движение жидкой капиллярной гравитационной влаги обусловлено капиллярными силами.

Процесс иссушения почвы при наименьшей влагоемкости. Как любой процесс, так и иссушение почвы при наименьшей влагоемкости имеет свое начало (окончание увлажнения ППВ) и свой конец (влажность разрыва капилляров ВРК). За этот период обозначаются скрытые виды влаги, действующие силы и градиенты передвижения воды. В литературе наименьшая влагоемкость обозначается как предельная полевая влагоемкость (ППВ) или как полевая влагоемкость (ПВ). Содержание влаги при наименьшей влагоемкости на черноземах Северокавказского региона составляет 29,5–30,6 %.

Отметим отличительную особенность капиллярного движения воды на легких, на тяжелых глинистых бесструктурных и тяжелых глинистых оструктуренных почвах. Так, И. А. Кузнецов отмечает, что «на легких почвах потери воды идут очень быстро, и капиллярное движение также быстро прекращается. На тяжелых глинистых бесструктурных почвах разрыв капилляров наступает очень медленно, поэтому вода к поверхности поступает долгое время. Иное положение создается на тяжелой глинистой, но оструктуренной почве. Вначале влага быстро теряется с поверхности, и тогда часть ее из нижних слоев поступает к верхним по капиллярам. Однако этот процесс быстро прекращается, так как в структурной

почве очень разнообразна величина капилляров. Поэтому вода из крупных капилляров уходит очень быстро и наступает момент ее разрыва в них. Скорость подачи воды из нижних слоев к верхним резко падает, и потери влаги капиллярным механизмом значительно сокращаются» [5].

Этим объясняется положение, что физическое испарение затрагивает только верхние слои почвы до 30, иногда до 50 см. В начале процесса испарения при наименьшей влагоемкости почвы скорость подъема влаги по капиллярам достигает 10–20 см в час, потери влаги составляют – 50–100 т в сутки. Это продолжается в течение 3–5 сут. После разрыва влаги в крупных капиллярах, еще некоторое время капиллярное движение происходит за счет мелких капилляров, но со значительно меньшей скоростью. В почве начинает работать механизм циркуляции жидкой влаги в восходящем и парообразной в нисходящем направлении.

К середине процесса испарения отмечается просыхание верхнего слоя почвы до 5 см и горизонт испарения с дневной поверхности постепенно переносится в глубину просыхающего слоя.

В процессе освобождения от влаги крупных и мелких пор, которые заполняются воздухом, имеются условия сохранения у агрегатов твердой части почвы рыхлосвязанной пленочной влаги. В просыхающем верхнем слое почвы сохраняется прочносвязанная пленочная влага, а внизу толщи почвы очаги гравитационной влаги. С обозначением различных видов влаги начинают действовать соответствующие им силы и градиенты движения влаги.

В природных условиях влияние отдельных сил на почвенную влагу очень трудно разграничить. Для характеристики совокупности сил различной природы введено понятие термодинамического потенциала почвенной влаги. Полный термодинамический потенциал почвенной влаги является суммой четырех частных потенциалов: осмотического, гравитационного, капиллярно-сорбционного и пневматического, или потенциала внешнего газового давления.

Почва, полностью насыщенная влагой имеет осмотический потенциал почвенной влаги, близкий к нулю. По мере иссушения потенциал почвенной влаги возрастает, и почва приобретает способность при соприкосновении с чистой водой поглощать ее, всасывать в себя. Такая способность получила название сосущей силы почвы.

Сосущая сила почвы измеряется в сантиметрах водяного столба или в атмосферах. Для сухой почвы сосущая сила достигает огромной величины – 10^7 см водяного столба, или 10^4 атмосферы.

Зарубежные исследователи считают, что в период от всходов до колошения озимой пшеницы оптимальное всасывающее давление почвы (ВД) должно быть 8 атмосфер, после колошения 5–6 атмосфер и к уборке 8–16 атмосфер (рисунок 23).

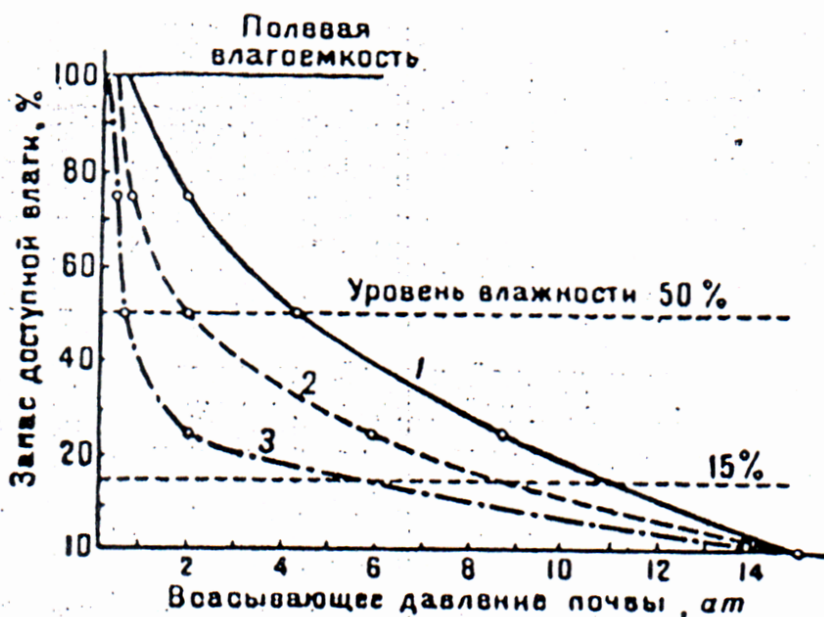


Рисунок 23 – Доступный запас влаги и всасывающее давление почвы:
1 – глина, 2 – суглинок, 3 – песок

В процессе иссушения почвы при наименьшей влагоемкости основными силами передвижения влаги являются капиллярные.

Мысленно представим себе, что макроагрегаты, у которых многочисленные микро- и макропоры заполнены водой, что эти макроагрегаты располагаются на дневной верхней поверхности почвы и под действием энергии солнечного света нагреваясь, вступают в процесс иссушения.

В капиллярах происходит сложный характер передвижения жидкой влаги к горизонту испаряющей поверхности (рисунок 24). Во-первых, под влиянием термоосмотического скольжения вдоль стенки капилляра происходит перемещение влаги в сторону горячего конца. Движение возникает в тончайшем слое на границе с твердой стенкой, оно увлекает за собой всю жидкость в капилляре, и профиль скорости в объеме воды имеет вид, показанный на ри-

сунке. Этот способ движения назван термоосмотическим. Термоосмотический поток пропорционален суммарной площади сечения пор и градиенту температуры.

В суммарном потоке влаги из заполненных капилляров участвуют, кроме диффузии парообразной воды, испарившейся непосредственно с мениска, еще два потока – жидкостный поток по пленке, покрывающей стенки капилляра и диффузионный поток пара, связанный с испарением из этой пленки. Количественные показатели указанных потоков, исчисляемые по сложным математическим формулам для чистой воды и почвенного раствора, будут различными.

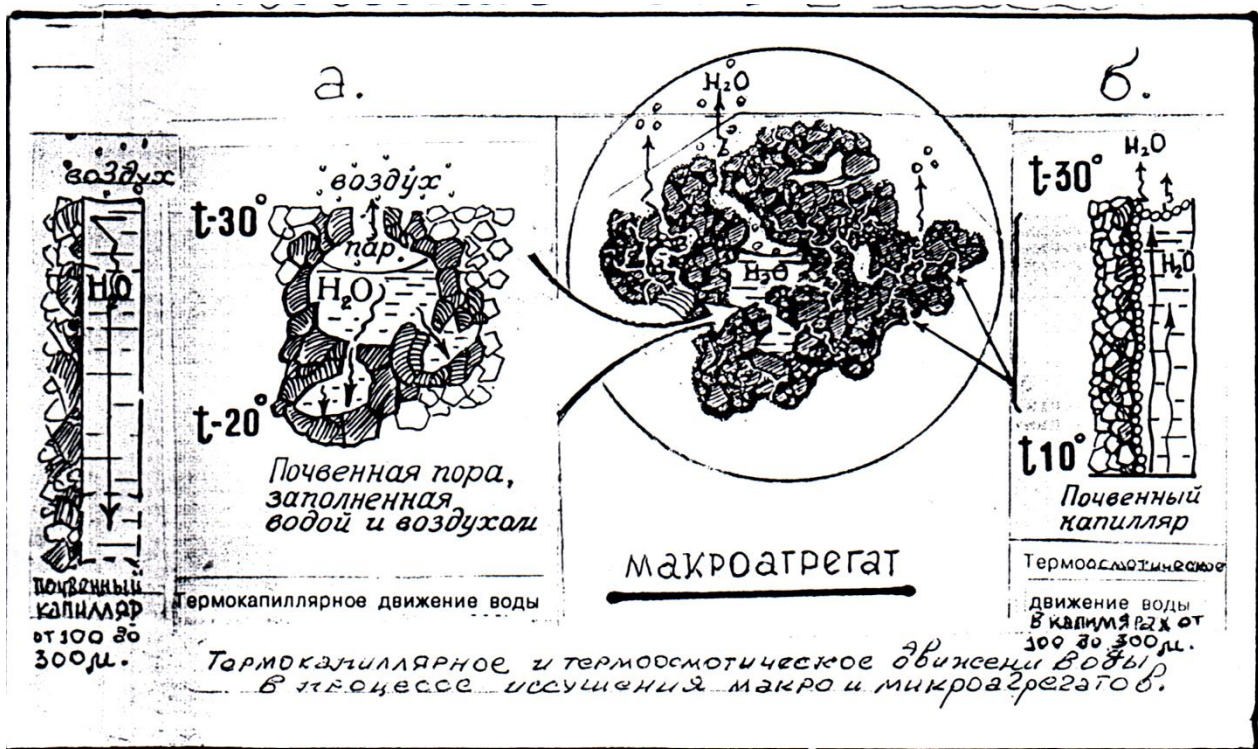


Рисунок 24 – Термоосмотическое движение воды

Одно из наиболее тривиальных объяснений жидкостного термомпереноса влаги основано на капиллярной теории и представлениях о почве, как о системе капиллярных трубок, заполненных водой, образующей мениски. Различие температуры менисков вызывает различие поверхностного натяжения и капиллярного давления, нарушающее равновесие и вызывающее капиллярный поток. Во всех случаях, когда в порах имелась поверхность раздела вода-воздух, передвижение воды происходило в холодную сторону.

Вследствие разности поверхностного натяжения на «горячем» и «холодном» менисках в капиллярах происходит перемещение воды, направленное к холодному концу капилляра.

При наличии температурного градиента в менисках возникает градиент поверхностного натяжения. Чем выше температура, тем меньше поверхностное натяжение. Движение влаги идет в сторону больших поверхностных натяжений, то есть в направлении более низких температур. Движение такого рода называют термокапиллярным.

В процессе иссушения почвы при влажности в интервале от наименьшей влагоемкости до влажности разрыва капилляров существует три вида почвенной влаги: капиллярная, рыхлосвязанная пленочная, прочносвязанная пленочная. В процессе испарения главные силы передвижения жидкой почвенной влаги являются капиллярные.

Под действием градиента температур действуют два способа переноса жидкой влаги: термоосмотический и термокапиллярный. Горизонт испарения переносится с дневной поверхности почвы, вначале процесса испарения, в сырой верхний слой, к окончанию его.

Какие же характеристики нужно придать обрабатываемому верхнему слою почвы, чтобы уменьшить потери влаги.

Прежде всего, пашня должна быть выровнена – так как в таком состоянии она уменьшает испаряющую поверхность и снижает ее иссушение в жаркие периоды года.

В период влагонакопления с ноября по март месяц, когда уровень увлажнения в пахотном слое равен или близок к наименьшей влагоемкости, выровненное состояние поверхности пашни – одно из средств увеличения запасов воды».

Очередным агроприемом уменьшения потерь воды является создание на поверхности пашни рыхлого слоя, снижающего капиллярный поток влаги и действующего, как мульча. Этого можно добиться боронованием зубowymi и ротационными боронами.

Исследованиями, проведенными А. Г. Дояренко, установлено, что отдельными агротехническими приемами можно снизить испарение воды из почвы на 20–80 % (таблица 9) [3].

По мнению автора при поверхностном рыхлении почвы испарение уменьшается – устраняется потребление воды сорными рас-

тениями и уменьшается испарение воды почвой. Поверхностное рыхление почвы – действенное средство сохранения почвенной влаги.

Таблица 9 – Влияние ранневесенней обработки на испарение воды почвой (в мм с 1 м² в 1 сек.)

Вариант	Время определения		
	через день после боронования	после дождя	после боронования
Небороновалось (к)	149	173	186
Бороновано	128	214	146
Разница (в %)	85	–	78

При заплывании разрыхленного слоя и образовании корки резко повышается испаряемость почвы. В таких случаях необходимо рыхление поверхностного слоя.

«Сам рыхлый слой может подсохнуть до очень низкой влажности, даже меньшей влажности завядания. Однако он уменьшит нагрев почвы, прервет восходящее волосное движение влаги к горизонту испарения, который вначале иссушения весной находится близко от поверхности почвы. Кроме того, упругость паров в рыхлом слое будет значительно больше, чем у ее поверхности, что уменьшит потери влаги в форме пара из толщи почвы в атмосферу».

В условиях Северного Кавказа в период иссушения мощность рыхлого мульчирующего слоя почвы не должна быть меньше 5 см. Меньшая глубина мульчирующего слоя слабо влияет на сохранение влаги.

Одной из центральных проблем физики почв и агрофизики в целом является структура почвы. Многие физические свойства почвы являются производными функциями ее структуры. Макроструктурные почвы меньше испаряют влаги, если преобладают агрегаты от 0,5–3,0 мм.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод: в почве с хорошо выраженной макроструктурой лишь небольшая доля подвижной влаги способна к передвижению в жидкой форме в процессе испарения. Подавляющая ее часть (свыше 90% от общего содержания и более 85 % от запаса доступной влаги) к передвиже-

нию в жидкой форме к поверхности испарения не способна. Что касается полевых данных, то и здесь обнаруживается критическая влажность около 24 %, ниже которой движение влаги в зоне испарения прекращается.

По мнению кубанских ученых оптимальное количество агрономически ценных агрегатов (0,25–3,0 мм), при которых создается благоприятный водно-воздушный режим на черноземах, является их содержание от объема общей массы 70-80% (таблица 10).

Данные полученные в опыте показывают, что почва в составе которой 65–100 % агрономически ценных агрегатов размером (0,25–3,0 мм) в 1,5–2 раза испаряют влаги меньше, чем глыбистая и почва «естественного» сложения.

Влажность разрыва капиллярной связи является критической в условиях Северного Кавказа, так как при этом в почве заканчивается использование растениями легкодоступной влаги.

Таблица 10 – Структурный состав и потери влаги почвой

Вариант	Потери влаги в мм
Глыбистая > 10 мм	105,0
Крупно-комковатая от 3 до 10 мм	78,7
Средне-комковатая > 10 мм – 5 %; 3–10 мм – 25 %; 3–0,25 мм – 65 %	62,5
Мелкокомковатая 3–0,25 мм	51,2
«Естественная» > 10 мм – 16 %; 10–3 мм – 24 %; 3–0,25 – 50 %; < 0,25 – 10 %	92,5

Значение ВРК для черноземов Предкавказья равна 23,6–25,5 %. В начале процесса иссушения пленочно-менисковая влага передвигается со скоростью 0,6–0,7 см в сутки и этот процесс протекает до 40 дн. К концу процесса испарения скорость падает до 0,2 см в сутки, и процесс физического иссушения происходит преимущественно за счет передвижения парообразной влаги. Потери влаги происходят при так называемом диффузном механизме испарения.

Малоподвижная капиллярная и пленочная вода превращается в пар, который уносится в атмосферу. Следовательно, после наступления влажности разрыва капилляров глубокое рыхление будет способствовать более быстрой потере воды почвой, особенно когда

воздух сухой, т. е., имеет низкую относительную влажность. Сухость воздуха наблюдается с апреля и до ноября. Чем выше температура и чем сильнее восточные ветры, тем суше воздух и тем больше потерь воды диффузным путем и, следовательно, тем опаснее глубокие обработки. Очень рыхлая и особенно глыбистая или гребнистая почва намного быстрее теряет воду при испарении, которое, как уже было сказано, иссушает почву до гигроскопической влажности, после чего требуется значительное количество осадков, чтобы насытить хотя бы пахотный и подпахотный слои почвы.

Начало процесса иссушения почвы при влажности разрыва капилляров (ВРК) характеризуется наличием всех видов влаги, кроме гравитационной. В соответствии с этим – наличие сил и градиентов, обеспечивающих передвижение капиллярной, стыковой (менисковой), рыхлосвязанной и парообразной влаги. В процессе иссушения увеличивается поровое пространство по профилю почвы и к началу влажности устойчивого завядания (ВЗ) в почве остается в основном прочносвязанная вода, где господствуют силы и градиенты, присущие передвижению парообразной влаги.

Сохранившаяся после разрыва капилляров капиллярная влага, межагрегатная и микроагрегатная, отсасывается мелкой сетью капилляров, которые по истечении времени в процессе иссушения уступают место почвенному воздуху.

После того, как капиллярная влага полностью исчезает в процессе иссушения, в почве остается менисковая (стыковая, рыхлосвязанная пленочная и прочно связанная) влага. Поверхности почвенных частиц покрыты многими слоями молекул воды (пленочная влага). Соприкасаясь друг с другом, они через точки соприкосновения объединяют пленочную влагу по всему профилю почвы, придавая ее свойство сплошности (неразрывности). Верхние частицы в процессе сушки теряют слой за слоем молекулы воды, но соприкасаясь с нижележащими, более обводненными, создают условия к возникновению сорбционных сил, которые вызывают движение от толстой водной оболочки (нижележащей) к тонкой (вышележащей) – и так по всей глубине, где пленочная влага движется к испаряющей поверхности (рисунок 25).

В процессе испарения до 50 % влаги уходит в атмосферу, а вторая половина переносится в глубину почвы и конденсируется на

сохранившихся и заполненных водой менисках капилляров или менисках стыковой влаги (капиллярная конденсация).

Осмотический поток. Проникновение воды через полупроницаемую перепонку в растворе называется осмосом. Давление, развивающееся в сосуде с полупроницаемой стенкой, называется осмотическим. Оно вызывается взаимным притяжением между частицами растворенного вещества и растворителя и наблюдается в двух случаях: 1) когда взаимодействуют вода и обменные катионы; 2) когда почвенный раствор имеет неодинаковую концентрацию в различных участках почвенного профиля.

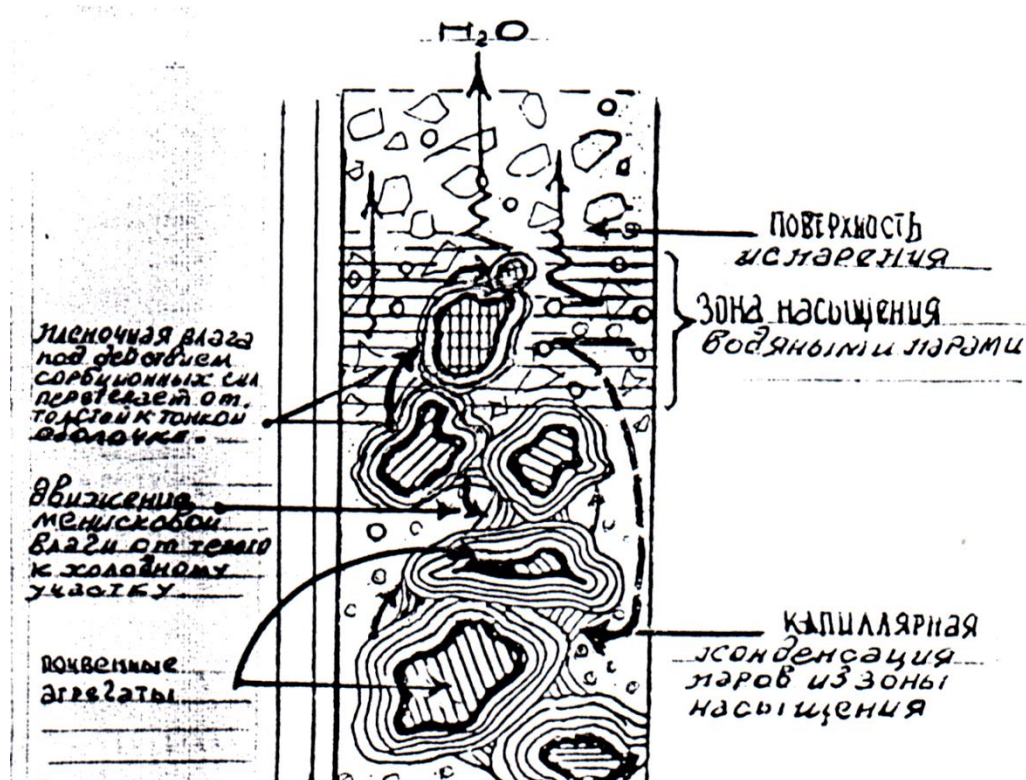


Рисунок 25 – Схема движения пленочной влаги по всему профилю почвы

Обменные катионы, находящиеся на поверхности коллоидных частиц, притягивают из почвенного раствора молекулы воды, которые создают вокруг катионов водную оболочку, способную отжать их и от поверхности почвенных частиц. Отжимающее усилие и рассматривается как проявление осмотического давления (рисунок 26).

В почвенной толще вода передвигается от участков с низкой концентрацией раствора к участку с более высокой концентрацией.

В границах почвенного раствора соли движутся от большей концентрации к меньшей, а вода движется к слоям большей концентрации.

Влага может передвигаться от слоев с низкой или нормальной концентрацией минеральных солей к области повышенной концентрации растворенных солей.

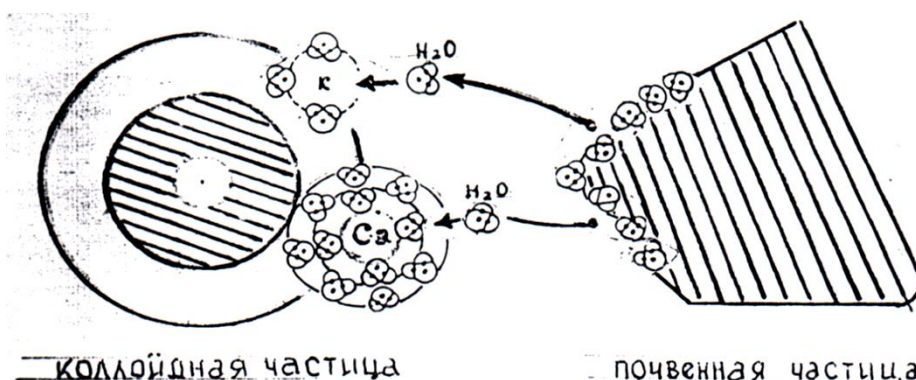


Рисунок 26 – Расклинивающее действие воды

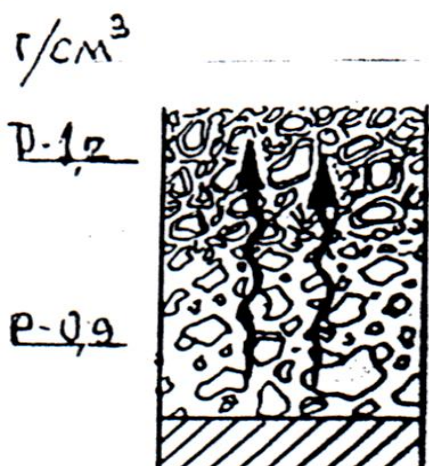


Рисунок 27 – Передвижение влаги под влиянием градиента плотности почвы

Передвижение почвенной влаги под влиянием градиента плотности почвы. При этом влага из рыхлого слоя с более крупными порами передвигается в уплотненную почву, где мениски обладают меньшими радиусами кривизны. Это явление можно наблюдать в природе довольно часто достаточно, например, хорошо уплотнить поверхность пашни, как сразу же начнется увлажнение уплотненного слоя, что обнаруживается по потемнению почвы. На этом явлении основан широко применяемый агротехнический прием прикатывания

посевов, обуславливающий не только улучшение контакта между семенем и почвой, но и известный приток влаги из рыхлого нижнего слоя к уплотненному катком верхнему слою.

Передвижение воды в почве под влиянием градиентов влажности. Важное значение для почвенных процессов и для жизнедеятельности растений имеют явления передвижения влаги в почве под влиянием градиента влажности.

Иссушение почвы в результате сосущей силы корней, испарения влаги, оттока воды из данного слоя в соседний и притока ее из соседнего слоя приводит не только к изменению абсолютного содержания ее в почве, но и к возникновению градиентов влажности между данным и соседним участком или слоем почвы. Процесс передвижения влаги из слоев с большим влагосодержанием в слои иссушенные можно наблюдать в полевых условиях.

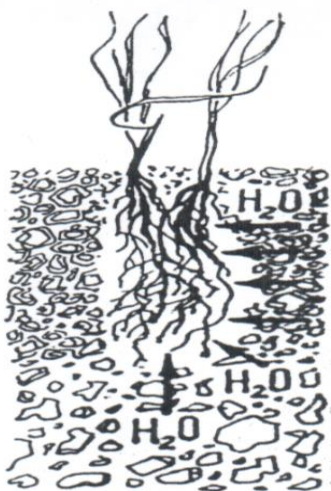


Рисунок 28 – Схематическое изображение передвижения пленочной влаги от одной частицы к другой

Наряду с движением корней в сторону влажной почвы (гидротропизм) почвенная влага передвигается к корням, потому что под влиянием их сосущей силы происходит заметное иссушение участков почвы, непосредственно или очень близко прилегающих к зоне корней.

По данным американских авторов, расстояние, на которое вода может двигаться к корню практически равно 20–30 см.

Сущность процесса и силы, обусловли-

вающие передвижение влаги, можно понять при рассмотрении характера распределения влаги в сухой и влажной почве. Все почвенные частицы имеют на своей поверхности пленки воды, толщина которых является функцией влажности почвы. Чем больше влаги в почве, тем большей толщины пленки окружают частицы. Основную роль при передвижении пленочной влаги играют молекулярные силы. Вода перетекает из более толстых пленок к менее тонким вследствие того, что у последних выше сорбционные силы.

Передвижение парообразной влаги в почве.

Парообразна влага атмосферного воздуха и почвенного имеют одинаковые обозначения и способы выражения.

Влажностью воздуха называют содержание водяного пара в атмосфере и в почве. Как и всякий газ, пар обладает упругостью.

Поэтому упругость водяного пара, т. е. его парциальное давление, выражают в тех же единицах, что и все атмосферное давление, в миллиметрах ртутного столба (таблица 11).

Упругость пара e – парциальное давление водяного пара, находящегося в воздухе. Выражается в миллиметрах ртутного столба или в миллибарах.

Упругость насыщения E – наибольшее значение упругости пара, возможное при данной температуре. Выражается в тех же единицах. Чем выше температура воздуха, тем больше упругость насыщения.

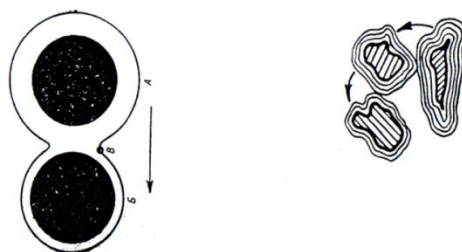


Рисунок 29 – Пленочная влага из более толстых оболочек перетекает к более тонким, у которых выше сорбционные силы

Таблица 11 – Количественные характеристики насыщенного пара в зависимости от температуры

Температура (°C)	Максимально возможное количество пара в 1 м ³ воздуха (г)	Насыщенная упругость пара над водой	
		мм рт.ст.	мбары
- 30	0,46	0,38	0,81
- 20	1,08	0,94	1,25
- 10	2,38	2,14	2,86
0	4,89	4,58	6,11
+ 10	9,46	9,20	12,27
+ 20	17,42	17,53	23,37
+ 30	30,60	31,82	42,43

Над поверхностью льда упругость насыщения меньше, чем над поверхностью переохлажденной воды при той же температуре. Поэтому, насыщение пара над поверхностью воды наступает при большей упругости пара, чем над поверхностью льда.

Относительная влажность f – отношение упругости пара e к упругости насыщения E при данной температуре, выраженное в процентах:

$$f = \frac{e}{E} \cdot 100 \%$$

Относительная влажность является важнейшей характеристикой, применяемой для оценки благоприятности условий произрастания сельскохозяйственных культур. При одной и той же упругости пара относительная влажность воздуха может быть весьма различной. Например, при упругости пара 12,0 мбар и температуре 10°С относительная влажность составляет 98 %, а при той же упругости пара, но температуре 30°С – лишь 28 %. Следовательно, при неизменной упругости пара с понижением температуры относительная влажность увеличивается, а с повышением температуры – уменьшается.

Дефицит, упругости водяного пара d , или недостаток упругости насыщения при данной температуре и фактической упругостью пара:

$$d = E - e.$$

Дефицит упругости, как и саму упругость, выражают в миллибарах или миллиметрах ртутного столба. При увеличении относительной влажности дефицит упругости уменьшается и при $f = 100\%$ становится равным нулю.

Точка росы t_d – температура, при которой водяной пар, содержащийся в воздухе при данном давлении, достигает состояния насыщения относительно химически чистой плоской, поверхности воды. При $f = 100 \%$ фактическая температура воздуха совпадает с точкой росы.

В почвенном воздухе наиболее динамичны кислород и углекислый газ, им принадлежит очень важная роль в жизни почвы и населяющих ее организмов (таблица 12).

Содержание O_2 и CO_2 в почвенном воздухе может сильно колебаться. В верхних, хорошо аэрируемых горизонтах почвы кислорода лишь не намного меньше, чем в атмосферном воздухе. В почвах с затрудненным газообменом количество O_2 может снижаться до десятых и сотых долей процента. Концентрация углекислого га-

за в почвах с плохим газообменом может превышать в сотни раз содержание его в атмосфере.

Таблица 12 – Состав атмосферного и почвенного воздуха, %

Газ	Атмосферный воздух	Почвенный воздух
Азот (N ₂)	78,08	78,08–80,24 (Азот + аргон)
Кислород (O ₂)	20,95	20,90–0,0
Аргон (Ar)	0,93	
Углекислый газ (CO ₂)	0,03	0,03–20,0
Все остальные (Ne, He, CH ₄ , Kr, N ₂ O, O ₃ , Xe, j, Ra и др.	0,04	

Различная концентрация кислорода и углекислого газа в почвенном воздухе определяется двумя группами противоположно направленных процессов; с одной стороны, интенсивностью потребления кислорода и продуцирования углекислого газа, с другой – скоростью газообмена между почвенным и атмосферным воздухом.

Передвижение парообразной влаги в почве при влажности завядания.

Черноземы Предкавказья при ВЗ содержат 12,2–15,5 % влаги. Это полуторная – двойная максимальная и гигроскопичность. Находясь под влиянием сил молекулярного притяжения со стороны отдельных почвенных частиц она не способна к свойственному передвижению в почве. И только когда в процессе иссушения молекулы воды отделяются от почвенных частиц в виде пара, уходя в атмосферу, такой механизм движения парообразной воды получил название диффузный.

Передвижение влаги в парообразной форме отмечено при разной величине влажности почвы (НВ, ВРК, ВЗ), но нижним пределом является влажность завядания. Подчеркнем, что речь идет о подвижной парообразной влаге.

Обычно ВЗ характеризуют таким образом, что влага, остающаяся по мере иссушения почвы в самых тонких ее порах, куда корневые волоски диаметром < 0,01 мм не могут проникнуть. Эта вла-

га обладает пониженной подвижностью и не перемещается к корневым волоскам.

Изучение влияния температурного градиента на передвижение водяного пара в почве позволило установить, что передвижение влаги в парообразном состоянии под влиянием градиента, абсолютной упругости пара идет от слоев почвы, где температура, а следовательно, и упругость пара выше, к слоям, где температура и упругость пара ниже.

Необходимо учитывать наличие суточного цикла температуры почвы. Каждую ночь какое-то количество парообразной влаги поднимается к поверхностному остывающему слою (и частично может теряться диффузно в атмосферу), а утром передвигается в обратном направлении. При этом, дневные амплитуды температур больше, чем ночные, поэтому ночью пары воды возвращаются к поверхности в меньшем количестве, чем днем. Это обстоятельство определяет суммарное сезонное передвижение пара летом вниз, к глубоким слоям почвы.

Передвижения в почве парообразной влаги может быть двояким: активным и пассивным. При активном способе парообразная влага передвигается независимо от движения почвенного воздуха, в котором она содержится. Такое передвижение является диффузным и имеет своей причиной градиент абсолютных упругостей. Различия в упругости водяного пара в различных точках почвенной толщи могут вызываться двумя причинами.

Если влажность всего рассматриваемого объема почвенной толщи превышает величину ВЗ, тогда воздух, содержащийся в почве, будет близок к состоянию насыщенности водяным паром, то есть его относительная упругость будет близка к 100 %. В этом случае абсолютная упругость пара в любой точке почвенной толщи будет всецело зависеть от температуры почвы в этой точке, а градиент упругости водяного пара будет совпадать по своему направлению с градиентом температуры, то есть водяной пар будет двигаться от теплового участка (поры или почвенной толще) к холодному (рисунок 30).

В тех случаях, когда влажность почвы меньше величины ВЗ, упругость водяного пара в почвенном воздухе будет зависеть не только от температуры, но и от влажности почвы, и ее градиент

может в одних случаях совпадать, а в других не совпадать с градиентом температуры.



Рисунок 30 – Движение и направление движения пара внутри почвенной поры от теплого участка поры к холодному при относительной влажности всего порового пространства ~ 100 %

Пассивное передвижение парообразной влаги в почвенной толще наблюдается в тех случаях, когда имеет место передвижение самого почвенного воздуха, независимо от того, какой причиной это передвижение вызывается. Почвенный воздух может передвигаться в результате изменения температуры почвы и своего сжатия или расширения вследствие механического воздействия.

В условиях, когда происходит перепад атмосферного давления, потоки воздуха проникают в почву или выносятся из нее. Если поверхность почвы глыбистая, то ветер в приземной части встречает со стороны крупных почвенных глыб препятствие, перед которым создается повышенное давление воздуха, и он затекает в почву. Однако за почвенными глыбами одновременно возникает и пониженное давление воздуха, и оно как «насос» выкачивает воздух с парами воды в атмосферу.

Поток воздушных масс над поверхностью почвы вызывает также его турбулентное движение. Турбулентный обмен уменьшается по мере просыхания верхнего слоя почвы и на глубине 10 см имеет незначительную величину.

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислить причины, под влиянием которых вода в почве находится в непрерывном движении.

2. Дать характеристику процесса прохождения влаги через поверхность почвы с впитыванием влаги в почву.
3. Назвать три стадии инфильтрации.
4. перечислить основные зоны почвенного профиля, смоченные инфильтрующейся влагой.
5. Характеристика зоны насыщения.
6. Характеристика переходной зоны.
7. Характеристика зоны увлажнения.
8. Характеристика фронта смачивания.
9. Как происходит рассасывание влаги по окончании ее впитывания в различных типах почв?
10. Как распределяется почвенная влага по профилю на черноземах Северного Кавказа?
11. Какие слои почвы затрагивает физическое иссушение?
12. Как влияет сильное физическое иссушение верхних слоев почвы на глубину промачивания почвы к весне?
13. Модель формирования влагосберегающего слоя почвы.
14. Влияние агроприемов на скорость впитывания воды.
15. Как зависит водопроницаемость от плотности почвы?
16. Что такое водоподъемная способность почвы?
17. Какие микроагрегаты обладают большей высотой капиллярного поднятия $< 0,25$ мм или 1–2 мм?
18. При какой влажности большая водопроводность?
19. Как влияет плотность на влагопроводность?
20. До какой влажности капиллярно подвешенная влага способна к восходящему передвижению?
21. Какие характеристики нужно придать обрабатываемому верхнему слою почвы, чтобы уменьшить потери влаги?
22. Во сколько раз почва, в составе которой 65–100% агрономически ценных агрегатов (0,25–3,0 мм) испаряет влаги меньше, чем глыбистая.

6 ОСОБЕННОСТИ УВЛАЖНЕНИЯ ЧЕРНОЗЕМОВ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

Краснодарский край отличается большим разнообразием природных условий. расположен он на границе умеренного и субтропического поясов. Климат, на значительной части территории, умеренно-континентальный. На черноморском побережье – полусухой, средиземноморский, в горах – влажный субтропический.

В течение года типичны резкие изменения погоды – длительные месячные, сезонные и многолетние колебания количества осадков и температуры воздуха. Характерной особенностью климата Кубани является обилие солнечного света и тепла, что обеспечивает жаркое лето и мягкую зиму. Годовое количество осадков колеблется от 400 до 900 и более мм. Распределение их по территории крайне неравномерно. В северной зоне края количество выпадающих осадков по годам колеблется от 425 до 530 мм, в центральной зоне от 515 до 613 мм, Анапо-Таманской от 436 до 459 мм, южно-предгорной от 630 до 911 мм.

Одной из основных задач земледелия является создание в почве режима, благоприятного для культурных растений, что достигается накоплением, сохранением и рациональным расходом почвенной влаги, а в необходимых случаях орошением или осушением земель. От содержания воды в почве зависят технологические процессы при обработке почвы, снабжение растений водой, физико-химические и микробиологические процессы, обуславливающие превращение питательных веществ в почве и поступление их с водой в растение.

На водный режим почв оказывают влияние свойства самой почвы, условия климата и погоды, а также характер природных растительных формаций. На обрабатываемых почвах он зависит от особенностей выращиваемых культурных растений и технологии их возделывания. В создании благоприятного водного режима большую роль играет поддержание в почве прочной мелкокомковатой структуры.

Регулирование водного режима почв преследует цель – поддерживать в корнеобитаемом слое в течение всего вегетационного периода достаточное количество продуктивной влаги. При этом важно, чтобы часть почвенных пор оставалась занятой воздухом, необходимым для жизни растений и нормальной деятельности микроорганизмов. Достигается это системой агротехнических и агрометеорологических мероприятий. В условиях недостаточного увлажнения применяют различные мероприятия, направленные на накопление, сохранение и рациональное использование влаги в почве – это задержание снега и талых вод; лесные полосы, кулисные растения, стерня, рыхление пашни весной и т. д. Технологии возделывания культур должны быть направлены на наполнение и сохранение влаги в активном корнеобитаемом слое.

Быстрый рост корней в глубину в начале развития растений – очень важное условие высокого и гарантированного урожая в условиях недостаточного увлажнения. Чем глубже идут корни в почву к моменту наступления критического периода, тем лучше сможет противостоять растение неблагоприятным условиям, используя влагу из более глубоких слоев.

Потери влаги в условиях Кубани довольно значительны. Они имеют тенденцию возрастать от южных районов к северным.

В степной части края величина испаряемости (потери влаги с водной поверхности) за год достигает 800 мм при сумме осадков 450–550 мм. В Прикубанье, где количество осадков около 600–650 мм, испаряемость колеблется от 700 до 730 мм. Дальше на юг, в предгорных и горных районах с количеством осадков равным 800–1100 мм, она уменьшается до 650 мм. На Черноморском побережье величина испаряемости снижается до 600 мм за год. Испаряемость – наибольшее количество влаги в мм, которое может испариться с открытой водной поверхности или с поверхности постоянно переувлажненной почвы в данных климатических условиях. Отношение годовой суммы осадков к годовой испаряемости именуют коэффициентом увлажнения (КУ).

Вопросы для самоконтроля

1. На границе каких климатических поясов расположен Краснодарский край?
2. Какой климат на территории Краснодарского края?
3. Назовите особенности климата Кубани.
4. В каких пределах варьирует годовое количество осадков?
5. От каких факторов зависит содержание в почве?
6. Какое влияние оказывает мелкокомковатая структура на водный режим?
7. Какую цель преследует регулирование водного режима?
8. Что такое испаряемость?
9. Перечислите величины испаряемости по зонам Краснодарского края.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Влажность почвы – это один из важнейших факторов, от которого зависит состояние и продуктивность сельскохозяйственных культур.

При изменении влажности почвы имеются некоторые узловые точки, в которых поведение, свойства воды и доступность ее для растений резко меняется. При этом вследствие почвенных различий (по механическому составу, структуре, порозности и др.), в разных почвах узловые точки могут соответствовать разным количествам содержащейся в них влаги. Эти узловые точки, в которых резко меняется поведение и свойства почвенной воды, носят название агрогидрологических констант почв. Определение этих констант позволяет из общего количества содержащейся в почвах влаги выделить ту ее часть, которая имеет ценность для формирования урожая.

В условиях Краснодарского края годовой максимум запасов продуктивной влаги в корнеобитаемом слое почвы наблюдается ранней весной, годовой минимум запасов влаги – осенью в период осенней вегетации озимых и в период формирования зерна яровых культур. Достаточное водоснабжение в течение всего периода вегетации зерновых культур имеет место лишь в отдельные годы. Сухость нижних слоев почвы в зоне слабого весеннего промачивания ограничивает проникновение корней растений в глубокие слои почвы и тем самым снижает возможность использования имеющихся в них питательных веществ.

Все мероприятия по восстановлению запасов влаги, израсходованной предшествующей культурой, и по сбережению влаги в теплую часть года в этой зоне достигает максимальной эффективности. Эти мероприятия не только увеличивают запасы влаги, но и благодаря более глубокому промачиванию почв обеспечивают проникновение корней в глубокие слои – делают посевы более засухоустойчивыми. Особой эффективностью достигают комплексы мероприятий, направленных на накопление, сбережение и использование влаги. Но обеспечить получение из года

в год устойчиво высоких урожаев сельскохозяйственных культур здесь может только орошение.

Одной из важнейших задач агротехники является сокращение непроизводительного испарения почвы. Для этого применяют такие агротехнические приемы, как ранняя зяблевая пахота, большой эффект дает осенняя безотвальная обработка почвы, ранневесеннее боронование зяби (закрытие влаги), рыхление междурядий пропашных культур и другие. Уменьшение испарения при использовании этих приемов объясняется разрушением почвенных капилляров, по которым вода поступает к поверхности почвы и испаряется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамова М. М. Опыты по изучению передвижения капиллярно-подвешенной влаги при испарении / М. М. Абрамова. – Почвоведение, 1948. – № 1.
2. Долгов С. И. Гидросорбционный гистерезис почвы / С. И. Долгов, А. А. Житкова, Г. Б. Виноградова // Материалы VIII Междун. конгр. почвов. – М. : Наука, 1964.
3. Дояренко А. Г. Факторы жизни растений / А. Г. Дояренко. – Изд-во «Колос». – М., 1966. – 277 с.
4. Кузнецов С. К. О конденсации водяных паров в почве / С. К. Кузнецов / Труды Почв. Комиссии Вольного экономического общества, 1903. – № 1–2.
5. Кузнецов И. А. Обработка почвы / И. А. Кузнецов. – 2-е доп. изд. – Краснодар : Краснодарское книжное изд-во, 1968. – 205 с.
6. Лебедев А. Ф. Почвенные и грунтовые воды / А. Ф. Лебедев. – 4-е изд. – М. : Изд. АН СССР, 1936.
7. Летунов П. А. Передвижение солей с капиллярно-подвешенной водой: сб. авторефератов Всесоюзного ин-та удобрений, агропочвоведения и агротехники за 1932–1934 гг. / П. А. Летунов, И. Музычук, А. Лапшина // Сельхозгиз. – М., 1936.
8. Ревут И. Б. Физика почв (второе издание, дополненное и переработанное) / И. Б. Ревут. – Ленинград : – Колос, 1972. – 366 с.
9. Роде А. А. Вопросы водного режима почв / А. А. Роде. – Ленинград, 1978. – 213 с.
10. Рыжов С. Н. Зависимость адсорбции от величины зерна адсорбента / С. Н. Рыжов // Тр. Всесоюзного ин-та удобрений, агропочвоведения и агротехники. – 1937. – Вып. 18.
11. Тугаринов В. В. Некоторые результаты изучения процессов конденсации водяных паров из воздуха // Вопросы изучения подземных вод и инж.-геол. процессов / В. В. Тугаринов. – М. : Изд-во., АН СССР, 1965.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 ИСТОЧНИК ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ.....	6
2 СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ВОДЫ	14
3 КАТЕГОРИИ (ФОРМЫ) И ВИДЫ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ.....	19
4 КЛАССИФИКАЦИЯ ФОРМ И СОСТОЯНИЕ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ	30
5 ПЕРЕДВИЖЕНИЕ ВЛАГИ В ПОЧВЕ	32
6 ОСОБЕННОСТИ УВЛАЖНЕНИЯ ЧЕРНОЗЕМОВ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА	70
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	73
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	75

Учебное издание

Найденов Александр Семенович

Василько Валентина Павловна

Терехова Светлана Серафимовна

**ПОЧВЕННАЯ ВЛАГА
(ПРИНЦИПЫ И ПУТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ
ВОДНОГО РЕЖИМА ПОЧВЫ)**

Учебное пособие

В авторской редакции

Макет обложки – Н. П. Лиханская

Подписано в печать 05.10.2020. Формат 60 × 84 ¹/₁₆.

Усл. печ. л. – 4,4. Уч.-изд. л. – 3,5.

Тираж 500 экз. Заказ № 302 – 75 экз.

Типография Кубанского государственного аграрного университета.
350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13