

ФИЗИКА ПОЧВ

УДК 631.432

А. М. ГЛОБУС, С. К. РОЗЕНШТОК, И. Б. ЦИПРИС

**НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ВНУТРЕННИЙ ВЛАГООБМЕН В ПОЧВАХ
С НЕРАВНОМЕРНЫМ ИСХОДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ
ВЛАЖНОСТИ**

Показано, что неизотермичность существенно изменяет характер влагообмена между слоями почвы, имевшими вначале различную влажность. Поток влаги из влажной и теплой в сухую и холодную почву, вызванный градиентом температуры, может преодолевать крутой энергетический барьер и составляет значительную часть общего влагообмена.

Подавляющее большинство исследований термопереноса влаги выполнено с почвами, имевшими равномерное исходное распределение влажности θ . В природных условиях слой почвы, охваченный суточным ритмом температуры T , с которым связаны наибольшие температурные градиенты, нередко характеризуется резко выраженной неравномерностью распределения влажности. На поверхности часто имеется мульчеслой, который весьма резко переходит в более увлажненную почву. При поливах, наоборот, возникает сильно увлажненный поверхностный слой, подстилаемый сухой почвой. Располагая адекватной математической моделью неизотермического влагообмена и ее физическим обеспечением, т. е. набором функций, включающим основную гидрофизическую характеристику, зависимости изотермической влагопроводности и термовлагопроводности от влажности и температурные коэффициенты этих функций, можно было бы проанализировать неизотермический влагообмен при произвольном распределении θ , но недостаток такой информации и такие малоисследованные явления, как гистерезис и эффект Аллэра [1], пока что препятствуют этому.

Определенные представления о неизотермическом влагообмене в неравномерно увлажненных почвах можно получить экспериментальным путем. При этом следует иметь в виду, что в природных условиях как градиенты T , так и устойчивые градиенты потенциала влажности μ_w не могут иметь произвольно большую величину, в частности в незасоленных почвах градиент μ_w не может превосходить величину, возникающую вскоре после контакта воздушно-сухой почвы с полностью водонасыщенным слоем. В то же время, поскольку μ_w в воздушно-сухой почве эквивалентен давлению в сотни и тысячи атмосфер, перепад μ_w , возникающий на контакте воздушно-сухой почвы с почвой, влажность которой лежит в области между влажностью завядания и полным насыщением, несущественно отличается от предельно возможного. На контакте двух зон, у которых влажность больше максимальной гигроскопической, перепад μ_w не превышает десятков атмосфер эквивалентного давления, и

более существенное влияние на процесс влагообмена оказывает влагопроводность контакта.

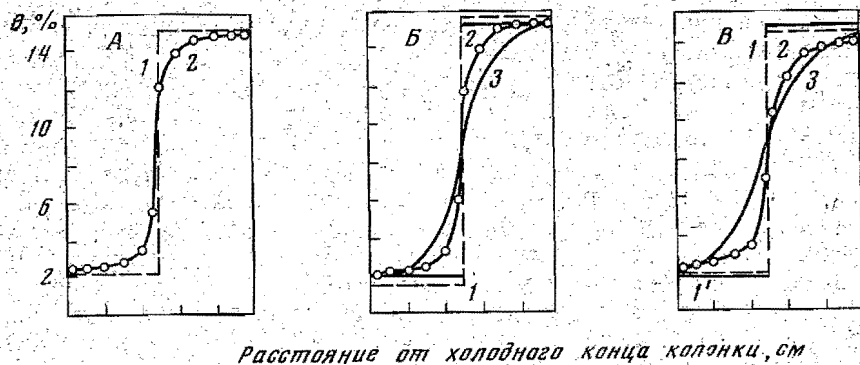
Считая величины $dT/dx \approx 1$ град/см (x — координата) достаточно большими, видим, что сопоставление изотермического переноса влаги в системах, часть которых вначале находится в воздушно-сухом состоянии, с неизотермическим влагообменом в них же при $dT/dx \approx 1$ град/см дает представление о сравнительной эффективности обоих процессов для экстремальных условий, возникающих в природе. Исследование неизотермического влагообмена в почвах со ступенчатым исходным распределением влажности имеет и методическое значение, поскольку позволяет как бы открыть закрытую систему, например влагоизолированную колонку, устраняя мешающий оценке скорости термопереноса влаги градиент μ_w , который возникает в равномерно увлажненных системах и создает встречный «изотермический» поток. Сопоставляя перенос влаги в колонках со ступенчатым исходным распределением θ при наличии градиента T с потоком влаги в аналогичных изотермических колонках, можно измерить скорость термопереноса влаги для гораздо больших влажностей, чем в равномерно увлажненных закрытых системах. Опыты такого рода описаны в данной работе.

Они сложнее по постановке, чем опыты с равномерно увлажненной почвой. Некоторый влагообмен между половинами колонок происходит уже при их подготовке. При одинаковом уплотняющем усилии сухая и влажная почвы уплотняются до несколько различающихся величин объемного веса γ (хотя в наших опытах эти различия не превышали $0,07 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$). Координату раздела сухой и влажной почв не удается установить с точностью более $0,5 \text{ мм}$, особенно при разборке колонки, что вносит погрешности в определении γ , а потому и в расчеты потока влаги. Тем не менее, как мы увидим, полученные данные позволяют сделать вполне определенные выводы.

Опыты на тяжелосуглинистой дерново-подзолистой почве (гор. Алак) проводили при двух сочетаниях исходных влажностей: 1) воздушно-сухая почва в контакте с почвой, для которой $\theta \approx \theta_k$ (θ_k — критическая влажность, при которой наиболее эффективен результирующий термоперенос влаги); этот вариант наиболее близок к условиям существования мульч-слоя; 2) почва, для которой $MГ < \theta < \theta_k$ в контакте с почвой, для которой $\theta > \theta_k$. Исходный перепад эквивалентных давлений влаги в этом случае составил около 20 атм . В каждом варианте перенос влаги, вызываемый одновременно и градиентом T , и градиентом μ_w , сопоставляли с переносом, вызываемым только градиентом μ_w . Кроме того, были проведены опыты, в которых градиент T и градиент μ_w были направлены взаимно противоположно. Изменения влажности прослеживали в динамике, колонки разбирали через 10, 24 и 48 час после сборки. Данные опытов представлены на рис. 1, А—Е и рис. 2, А—В.

На рис. 1 видно, что в системе, где направления градиентов T и μ_w совпадают, температурное воздействие с самого начала изменяет обычную для изотермического процесса картину влагообмена (рис. 1, А—В). Вода в сухую и холодную почву поступает не только из примыкающей влажной почвы, но и из удаленной, наиболее теплой зоны системы, преодолевая крутой потенциальный барьер. Этот процесс, как показывает рис. 3, происходит с более или менее постоянной скоростью в течение всего времени температурного воздействия, несмотря на понижение влажности в горячей зоне, где возникает градиент потенциала, противодействующий термопереносу влаги.

Устойчивое и продолжающееся во времени понижение θ в «теплой» зоне, несмотря на значительный противодействующий градиент μ_w и на то, что скорость «изотермического» потока влаги через плоскость контакта по крайней мере в первые 10 час опыта значительно выше, чем скорость термопереноса влаги (рис. 3), означает, по нашему мнению, то,



Расстояние от холодного конца колонки, см

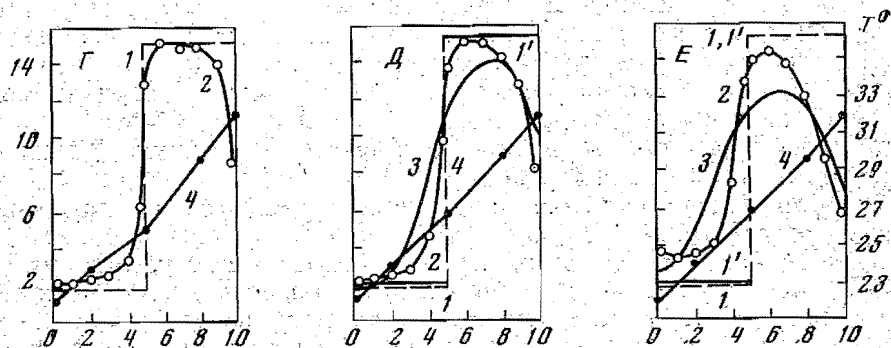


Рис. 1. Влагообмен в тяжелосуглинистой дерново-подзолистой почве при ступенчатом исходном распределении влажности θ (% от объема)

А — В — изотермический влагообмен при $T=27^\circ$, Г — Е — неизотермический влагообмен. Длительность опыта: А, Г — 10 час, Б, Д — 24 час, В, Е — 48 час. 1 и 1' — исходное распределение соответственно при физических и машинных экспериментах, 2 — профиль влажности после опыта, 3 — расчетный профиль θ в машинном эксперименте, 4 — температура. Исходное сочетание влажностей: воздушно-сухая + критическая

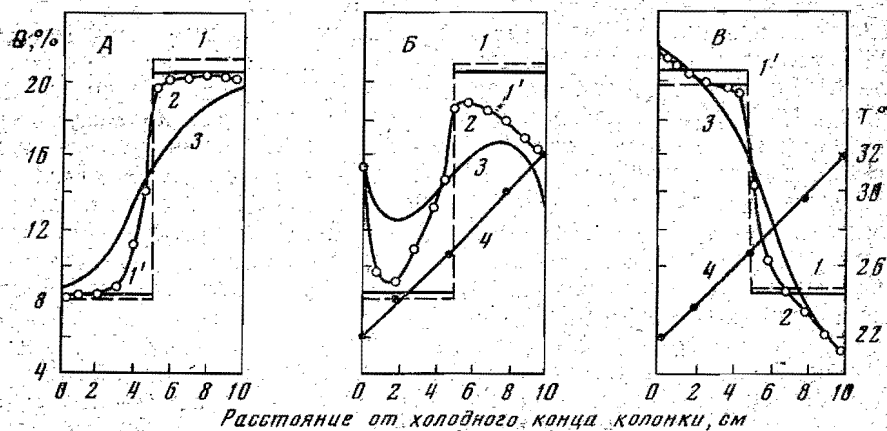


Рис. 2. То же, что на рис. 1, при сочетании исходных влажностей: докритическая влажность + закритическая влажность. Длительность опыта 48 час

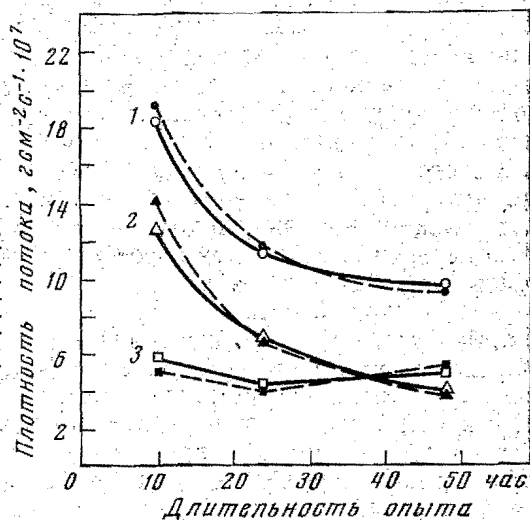
А — изотермический режим при $T=27^\circ$, Б, В — неизотермический влагообмен при различном сочетании исходных направлений градиентов влажности и температуры. Обозначения кривых — см. рис. 1

что последний процесс происходит независимо от «изотермического» потока в том смысле, что его механизм использует такие элементы газового и жидкостного порового пространства, которые в своем единстве недоступны классической термической диффузии пара и «потенциальному» жидкостному потоку. Иначе говоря, динамику θ в рассматриваемых системах можно считать аргументом в пользу доминирования комбиниро-

ванного паро-жидкостного механизма теплопереноса влаги. Однако детальный анализ влагообмена в таких системах весьма сложен, поскольку теплоперенос влаги может обеспечить как непосредственный транспорт воды в холодную половину колонки, так и поддержание вблизи плоскости контакта на «холодной» его стороне более высокой влажности, чем в изотермических условиях, как это следует из сопоставления графиков $A-B$ и $\Gamma-E$ рис. 1. Это в свою очередь приводит к усилению «изотермических» механизмов переноса влаги. В целом же при наличии градиента температуры перенос влаги в колонках, показанных на рис. 1, $\Gamma-E$, составил в среднем $0,17 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, тогда как в изотермических условиях за то же время через плоскость контакта переместилось $0,07 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, т. е. благодаря градиенту T перенос влаги увеличился более чем вдвое.

Рис. 3. Динамика изменений средней плотности потока влаги через плоскость контакта при ступенчатом исходном распределении влажности

1 — теплоперенос, налагающийся на поток, вызванный градиентом потенциала влажности, 2 — изотермический влагообмен, 3 — теплоперенос влаги. Сплошная линия — сочетание воздушно-сухой влажности и критической влажности, пунктирная — сочетание докритической влажности и закритической влажности. Средние для параллельных опытов сочетания объемных влажностей в первом случае $1,82 \div 15,10\%$, во втором — $8,26 \div 21,18\%$



На рис. 2 представлены результаты 48-часовых опытов для другого сочетания θ , при котором в изотермических условиях перенос пара через плоскость контакта должен быть пренебрежимо мал, поскольку исходная влажность обеих частей колонки значительно выше МГ и упругость водяного пара по всей колонке практически не зависит от влажности. Кроме того, при таком сочетании θ теплоперенос влаги может происходить непосредственно и в более сухой половине системы.

Как и в предыдущем опыте, изотермический влагообмен сосредоточен в области контакта. Однако во влажной части колонки уменьшение θ происходит более равномерно вследствие того, что более высокая влажностепроводность обеспечивает выравнивание профиля θ во всей влажной зоне, за исключением узкого участка вблизи плоскости контакта, где велик начальный перепад μ_w . На другой особенности профиля θ , показанного на рис. 2, A , мы остановимся позже. По той же причине теплоперенос влаги вызывает меньший градиент θ в горячей зоне тех колонок, в которых направление исходного перепада θ и градиента T совпадает. Максимум θ на холодной границе системы может быть вызван как конденсацией влаги, поступившей из влажной и теплой зоны, так и за счет теплопереноса внутри самой более сухой половины колонки.

В колонке, где перепад θ и градиент T в начале опыта направлены взаимно противоположно (рис. 2, B), результирующий поток влаги через плоскость контакта практически равен нулю, однако внутри влажной и более сухой частей влага перераспределялась под влиянием градиента температуры. Учитывая, что при $\theta = 20\%$ эффективный теплоперенос влаги в равномерно увлажненной колонке наших прежних опытов практически отсутствует, можно заключить, что накопление влаги у холод-

ной границы системы связано с теплопереносом из более сухой почвы теплой половины колонки. В этом опыте средняя за первые 10 час опыта скорость переноса влаги через плоскость контакта в изотермических условиях составила $1,4 \cdot 10^{-6}$ см·с⁻¹, а при совпадении направления градиентов T и θ — $1,9 \cdot 10^{-6}$ см·с⁻¹, что позволяет оценить скорость теплопереноса влаги через плоскость контакта величиной $5 \cdot 10^{-7}$ см·с⁻¹. Суммарный перенос влаги за 48 час составил для тех же условий соответственно $0,067$ г·см⁻² и $0,164$ г·см⁻². Различное соотношение между скоростями изотермического и неизотермического переноса влаги для разных этапов опыта, как и в предыдущем случае, отражает быстрое уменьшение скорости «изотермического» потока при уменьшении градиентов θ и μ_w .

Таким образом, мы экспериментально показали, что даже при больших, препятствующих теплопереносу влаги перепадах влажности между смежными слоями почвы теплоперенос влаги составляет существенную долю суммарного потока влаги, возрастающую по мере выравнивания полей потенциала влажности и влагосодержания. В этих опытах отчетливо видно, что теплоперенос влаги происходит и в тех случаях, когда для этого необходимо преодолевать значительный энергетический барьер. Интересно отметить, что, несмотря на различную комбинацию исходных влажностей и перепадов μ_w , в этих двух опытах величины суммарного переноса и скоростей «изотермического» и «неизотермического» потоков очень близки между собой.

Разработав математическую модель неизотермического влагообмена, которая успешно воспроизводила все основные черты этого процесса в той же почве при равномерном исходном распределении влажности [2], мы попытались с ее помощью выяснить роль гистерезиса влажности и эффекта Аллэра в тех условиях, которым посвящена данная работа. С этой целью были проведены машинные эксперименты по изотермическому и неизотермическому влагообмену для тех же начальных распределений влажности и температурных условий, которые показаны на рис. 1 и 2. Вычисленные профили влажности обозначены на этих рисунках кривыми 3.

Здесь важно отметить следующее обстоятельство. При ступенчатом исходном распределении θ особенно важную роль должен играть, если он имеет место, гистерезис влажности. Немедленно при соприкосновении частей колонки, имеющих разные θ , одна из них начинает увлажняться, а другая — обезвоживаться по отношению к исходному состоянию. Поскольку математическая модель при заданном физическом обеспечении хорошо воспроизводила поведение равномерно увлажненных вначале систем и поскольку в программе не учитывается гистерезис и эффект Аллэра, сопоставление физических и машинных опытов позволяет в известной мере выяснить степень влияния обоих явлений на поведение системы. Как видно из рис. 1 и 2, это влияние зависит от сочетания исходных влажностей. При сочетании воздушно-сухой почвы и почвы, имеющей критическую влажность, модель, не учитывающая гистерезис и эффект Аллэра, в качественном и количественном отношении хорошо воспроизводит поведение как изотермической, так и неизотермической почвы. Сопоставляя кривые 2 и 3 рис. 1, следует иметь в виду, что в машинном эксперименте невозможно строго задать ступенчатое начальное условие по влажности (бесконечно большой градиент влажности или потенциала), так как нельзя одновременно приписать одной точке (середине колонки) два значения влажности. Учитывая это, согласие между опытом и расчетом можно считать весьма удовлетворительным. За 48 час опыта различия между θ в соответственных точках не превышают 3% θ , равняясь в среднем по всем точкам 1,30% (опыт 1Е) и 0,64% (опыт 1В).

Следовательно, при таком сочетании θ оба явления несут существенны. Физически это объясняется тем, что любая мыслимая разность μ_w , свя-

занная с гистерезисом, мала по сравнению с громадным начальным перепадом μ_w , тогда как влагопроводность контакта, сильно влияющая на поток, определяется главным образом θ и мало зависит от гистерезиса μ_w . При малых влажностях жидкостный поток осуществляется главным образом по пленочным элементам водного тела, что минимизирует эффект Аллэра [1].

При сочетании докритической и закритической влажностей степень соответствия опытных и расчетных данных зависит от типа системы. Для изотермических условий (рис. 2, А) наблюдаются качественные расхождения, состоящие в том, что влажность во влажной половине колонки понижается почти безградиентно. Такое поведение, вероятно, имеет отношение к эффекту Аллэра, и чисто диффузионная математическая модель его, естественно, не воспроизводит. Если это так, то интересно отметить, что аллэровское поведение системы отнюдь не обязательно обеспечивает ускоренный по сравнению с диффузионным влагообмен.

При совпадении направления потоков, вызванных градиентами T и θ , модель качественно правильно воспроизводит динамику поля θ , включая такие тонкие его детали, как наличие двух максимумов и двух минимумов (рис. 2, Б), однако расчетный перенос обгоняет наблюдавшийся в опыте. Не исключено, что это связано с гистерезисом, который при этих более высоких влажностях должен играть относительно более существенную роль. Известным подтверждением этого является соответствие между расчетом и опытом для той системы, в которой оба потока противодействуют (рис. 2, В). В этом случае за счет «изотермического» потока, вызванного перепадом влажности, холодная зона системы обезвоживается, а горячая увлажняется, тогда как под действием термопереноса влаги происходят противоположные изменения, так что, хотя исходное поле θ изменяется, среднее влагосодержание обеих частей системы не меняется по сравнению с исходным. Это противодействие двух потоков, по-видимому, нейтрализует влияние гистерезиса и эффекта Аллэра, вследствие чего улучшается согласие между опытом и прогнозом диффузионной модели. Эта модель, таким образом, позволяет уточнять те условия, при которых гистерезис и эффект Аллэра влияют (или не влияют) на динамику поля влажности почвы.

Выводы

1. Неизотермичность существенно изменяет характер влагообмена между слоями почвы, имевшими вначале различную влажность. Поток влаги из влажной и теплой в сухую и холодную почву, вызванный градиентом температуры, может преодолевать крутой энергетический барьер и составляет значительную часть общего влагообмена. При малых и умеренных влажностях гистерезис влажности и эффект Аллэра практически не влияют на изотермический влагообмен, который хорошо описывается предложенной диффузионной математической моделью. При более высоких влажностях расхождения между прогнозом и опытом увеличиваются, за исключением случая противоположно направленных потоков, вызываемых градиентом влажности и температуры.

2. Предполагается, что противодействие этих потоков приводит к уменьшению влияния гистерезиса и эффекта Аллэра на динамику поля влажности.

Литература

1. Аллэр М. Эффективный потенциал воды при высыхании почвы. Термодинамика почвенной влаги. Л., Гидрометиздат, 1966.
2. Глобус А. М., Циприс И. Б. Математическое моделирование неизотермического внутрипочвенного влагообмена. Докл. ВАСХНИЛ, № 1, 1977.