

2. Kupriyanov A.N., Trofimov I.T., Zablotskiy V.I. i dr. Vosstanovlenie lesnykh ekosistem posle pozharov. – Kemerovo: KREOO «IRBIS», 2003. – 262 s.: il.
3. Potemkin V.L., Makunin V.L. Zagryaznenie landshaftov v kotlovine ozera Baykal pri lesnykh pozharakh // Geografiya i prirodnye resursy. – 2007. – No. 4. – S. 60-63.
4. Shcheglova E.G. Vliyanie nizovykh pozharov na listvennye lesa Orenburzhya // Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2012. – No. 10 (146). – S. 15-20.
5. Zablotskiy V.I. Dinamika ekologicheskikh usloviy na garyakh v sosnovykh lesakh yugo-vostoka zapadnoy Sibiri: avtoref. dis. ... dokt. s.-kh. nauk / V.I. Zablotskiy. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2006. – 30 s.
6. Malyukov S.V., Komarova E.P. Pochvenno-lesorastitelnaya kharakteristika ploshchadey posle lesnykh pozharov // Aktualnye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika. – 2015. – T. 3. – No. 2-1 (13-1). – S. 76-80.
7. Bekhovyykh Yu.V. Vliyanie lesnykh pozharov na gidrotermicheskiy rezhim dernovo-podzolistykh pochv sukhostepnoy zony Altayskogo kraya // Antropogennoe vozdeystvie na lesnye ekosistemy: tez. dokl. II mezhdunar. konf. (18-19 aprelya 2002 g., Barnaul). – Barnaul: Izd-vo Alt. un-ta, 2002. – S. 139-142.
8. Makarychev S.V. Poslepozharnye izmeneniya pochv i osobennosti flory garey ravninnykh sosnovykh lesov Altayskogo kraya / S.V. Makarychev, A.A. Malinovskikh, A.G. Bolotov, Yu.V. Bekhovyykh // Polzunovskiy vestnik. – 2011. – No. 4-2. – S. 107-110.
9. Agroklimaticheskiy spravochnik po Altayskomu kraju. – Leningrad: Gidrometizdat, 1957. – 167 s.
10. Makarychev S.V., Bekhovyykh Yu.V., Bekhovyykh L.A. Pochvenno-fizicheskie usloviya lesovosstanovleniya v gorelnikakh yugo-zapadnoy chasti lentochnykh borov Altayskogo kraya // Vosstanovlenie narushennykh landshaftov: materialy IV nauchno-prakticheskoy konferentsii. – Barnaul, 2004. – S. 59-65.
11. Rukovodstvo po gradientnym nablyudeniyam i opredeleniyu sostavlyayushchikh teplovogo balansa. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1964. – 120 s.
12. Bekhovyykh Yu.V. Osobennosti teploakkumulyatsii i teploobmena v dernovo-podzolistykh pochvakh na garyakh sukhostepnoy zony Altayskogo kraya / Yu.V. Bekhovyykh, S.V. Makarychev, I.T. Trofimov, A.G. Bolotov // Antropogennoe vozdeystvie na lesnye ekosistemy: tez. dokl. II mezhdunar. konf. (18-19 aprelya 2002 g., Barnaul). – Barnaul: Izd-vo Alt. un-ta, 2002. – S. 142-145.



УДК 631.436

С.В. Макарычев
S.V. Makarychev

ОСОБЕННОСТИ КОМБИНИРОВАННОГО МЕХАНИЗМА ТЕПЛОВЛАГООБМЕНА В ПОЧВЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГИДРОМЕЛИОРАЦИЙ

THE FEATURES OF COMBINED MECHANISM OF HEAT AND MOISTURE EXCHANGE IN THE SOIL WHEN APPLYING HYDROTECHNICAL AMELIORATION MEASURES

Ключевые слова: почва, чернозем, тепловлагообмен, кондуктивная и пародиффузионная теплопередача, дисперсность, порозность, плотность, теплопроводность, температуропроводность.

Keywords: soil, chernozem, heat and moisture transfer, conductive and vapor diffusion heat transfer, dispersion, porosity, density, thermal conductivity, thermal diffusivity.

Повышение плодородия пахотных земель и продуктивности возделываемых культур требует целенаправленного регулирования не только пищевого, но и тесно связанного с ним гидротермического режима. В то же время познание теплофизических свойств почв разного генезиса во взаимосвязи с характером и степенью естественного или искусственного увлажнения (орошения) необходимо для расчета, оценки и прогноза тепло- и гидромелиоративных эффектов. Целью работы было исследование механизмов влагопереноса в почвах при использовании искусственного увлажнения (орошения). В ней показано, что кондуктивная теплопроводность почв при орошении уменьшается, в то время как пародиффузионная имеет параболическую зависимость и характеризуется экстремальным значением, приуроченным к влажности разрыва капиллярных связей в суглинистых почвах, а в песчаных – к капиллярной влагоемкости. В гумусированных горизонтах орошаемых почв разного генезиса пародиффузионная компонента комбинированного механизма теплопередачи имеет меньшее значение по сравнению с нижележащими минерализованными почвенными слоями. Это свидетельствует о высокой подвижности молекул пара в системах со слабой энергией связи жидкой и твердой фаз. Коэффициент теплопроводности, обусловленный термодиффузией в десятки раз меньше кондуктивного. Значит, молекулы пара, резко ускоряя процессы теплообмена в почвенных минеральных горизонтах, слабо способствуют теплоаккумуляции, перенося незначительное количество тепловой энергии. Скорость изменения теплопроводности чернозема в зависимости от влагосодержания имеет максимум в вершине параболы. Увеличение температуры приводит к повышению этой характеристики. Скорость изменения теплопроводности при увлажнении стремится к «насыщению» при полной влагоемкости, которая достигается посредством гидромелиорации почвы.

Improving the fertility of arable lands and the productivity of grown crops requires targeted control of both nutritional and hydrothermal regimes which are closely associated. At the same time, the knowledge of the thermophysical properties of soils of different genesis in reference to the nature and degree of natural or artificial moistening (irrigation) is necessary for calculating, evaluating and predicting heat and irrigation, and hydrotechnical amelioration effects. The research goal was to study the mechanisms of moisture and heat transfer in soils under artificial moistening (irrigation). It is shown that the conductive thermal diffusivity of soils decreases under irrigation, while vapor diffusive thermal diffusivity has a parabolic dependence and is characterized by an extreme value associated with the discontinuous capillary moisture in loamy soils, and with capillary moisture capacity in sandy soils. In the humus horizons of irrigated soils of different genesis, the vapor diffusive component of the combined heat transfer mechanism is less important than in the underlying mineralized soil layers. This indicates a high mobility of vapor molecules in the systems with a weak binding energy of the liquid and solid phases. The thermal conductivity coefficient determined by thermal diffusion is by dozens of times less than the conductive one. This means that vapor molecules while accelerating dramatically the heat transfer processes in soil mineral horizons poorly contribute to thermal storage transferring an insignificant amount of thermal energy. The rate of change of thermal diffusivity of chernozem depending on moisture content has the maximum at the parabola vertex. An increase of temperature leads to an increase in this characteristic. The rate of change of thermal conductivity during moistening tends to the "saturation" at full moisture capacity which is achieved through soil hydrotechnical amelioration measures.

Макарычев Сергей Владимирович, д.б.н., проф., каф. геодезии, физики и инженерных сооружений, Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: phys_asau@rambler.ru.

Makarychev Sergey Vladimirovich, Dr. Bio. Sci., Prof., Chair of Geodesy, Physics and Engineering Structures, Altai State Agricultural University. E-mail: phys_asau@rambler.ru.

Введение

Повышение плодородия пахотных земель и продуктивности возделываемых культур требует целенаправленного регулирования не только пищевого, но и тесно связанного с ним гидротермического режима [1, 2]. Закономерности формирования теплофизического состояния, следовательно, и обуславливающие его процессы теплоаккумуляции и теплопередачи в почвенном профиле определяются, прежде всего, теплофизическими свойствами почвы, такими как объемная и удельная теплоемкости, тепло- и теплопроводность [3, 4]. Они, в свою очередь, являются функ-

циями почвенно-физических факторов: дисперсности, влажности, влагопроводности, плотности, температуры, воздухоемкости, содержанием гумуса и т. д. [5, 6].

Поэтому познание теплофизических свойств почв разного генезиса во взаимосвязи с характером и степенью естественного или искусственного увлажнения (орошения) необходимо для расчета, оценки и прогноза тепло- и гидромелиоративных эффектов, направленных на оптимизацию гидротермических режимов почв, охрану и повышение почвенного плодородия.

Существующая модель комбинированного механизма влаго- и теплообмена позволила согласовать экспериментальные данные о таких явлениях, как наличие максимума при пародиффузионном переносе «скрытой» теплоты, а также влияние жидкой почвенной фазы на суммарный тепловой поток.

Объекты и методы

Объектами исследований явились почвы разного генезиса, сформированные на территории Алтайского края. **Цель** – исследование механизмов влаготеплопереноса в почвах при использовании искусственного увлажнения (орошения). При этом использовались общепринятые в почвоведении методы [7, 8], а для определения комплекса теплофизических характеристик (ТФХ) применялся импульсный метод плоского источника тепла [9, 10].

Результаты исследований

Наши исследования показали, что перенос тепла в почвенном профиле при наличии жидкой влаги осуществляется с помощью нескольких механизмов: кондуктивной теплопроводности, пародиффузионной и жидкостной теплопередачи. При этом количество тепла, переносимого за счет каждой из этих компонент, относится как 100:105:3%. Кондуктивная теплопередача осуществляется контактным способом между твердыми почвенными частицами или между твердой и жидкой фазами. Используя импульсный метод плоского нагревателя, мы определили кондуктивную и пародиффузионную составляющую без учета переноса тепла жидкой фазой.

Нахождение пародиффузионных составляющих сводится к определению температур поверхности нагревателя и исследуемой точки в почве и не требует расчета коэффициентов усиления, что важно для практических задач почвенной теплофизики. Этот способ апробирован нами при изучении коэффициентов кондуктивной теплопередачи и термопаропроводности черноземов Приобского плато и, для аналога, кварцевого песка.

Гранулометрический состав выщелоченного чернозема легкосуглинистый, а иллювиальный обогащен песчаной фракцией. Плотность сложения гумусово-аккумулятивного горизонта 1160 кг/м³, в иллювиальном возрастает до 1330 кг/м³. Гидрологические константы и содержание гумуса снижаются с глубиной (табл. 1). Кварцевый песок с преобладанием фракций 0,2 мм имеет плотность 1580 кг/м³ и общую порозность 40,3%. Вследствие его малой наименьшей влагоемкости (6% от массы) порозность аэрации составляет 33% от объема порового пространства.

В таблице 2 представлены некоторые результаты теплофизических измерений, откуда следует, что кондуктивная теплопроводность дисперсных сред при орошении имеет тенденцию к снижению. Это особенно заметно в иллювиальном горизонте и в кварцевом песке. Такое явление обусловлено вытеснением хорошо проводящего температуру воздуха поступающей в почву водой, теплопроводность которой в сотни раз меньше жидкой фазы.

В гумусированных горизонтах под действием адсорбции влага всасывается внутрь органических частиц, заполняя микропоры и снижая количество тепловых контактов, что способствует повышению молекулярной теплопередачи.

Теплопроводность чернозема, обусловленная переносом пара через поровое пространство, имеет максимум, приуроченный к влажности разрыва капиллярных связей (ВРК), а в песке к капиллярной влагоемкости (КВ). Именно при этой степени увлажнения складываются наилучшие условия для термопарообмена, когда концентрация молекул пара велика и есть возможность их свободного движения в поровом пространстве. В то же время водные манжеты или пленки не являются препятствием для теплопередачи, поскольку испаряясь на теплой стороне манжеты, молекулы воды конденсируются на более холодной стороне манжеты, ускоряя процесс переноса тепла.

Таблица 1

Дисперсность и водно-физические свойства выщелоченного чернозема

Горизонт	Порозность, %		Фракции, %		Гидроконстанты, %		
	общая	аэрации	глина	песок	ВЗ	ВРК	НВ
Ап	52,2	15,6	29,0	34,9	6,9	23,1	30,3
АВ	54,0	22,5	26,5	29,6	6,9	20,6	27,2
В	48,4	20,7	25,2	52,3	7,0	17,0	20,8

Таблица 2

Кондуктивная (числитель) и пародиффузионная (знаменатель) температуропроводность чернозема (α , 10^{-6} м²/с)

Горизонт	Абс. сухая	ВЗ	НВ	НВ	ПВ
Ап	0,36	0,35/0,13	0,33/0,16	0,30/0,13	0,23/0,11
АВ	0,40	0,33/0,19	0,32/0,29	0,32/0,24	0,25/0,22
В	0,36	0,16/0,33	0,17/0,39	0,16/0,36	0,14/0,31
Кварцевый песок	Влажность, %				
	0,0	2,5	7,5	15,0	20,0
	Температуропроводность				
	0,24/0,86	0,22/1,03	0,20/0,98	0,16/0,81	0,12/0,67

В гумусированных горизонтах пародиффузионная составляющая имеет меньшее значение по сравнению с кондуктивной или молекулярной компонентой. Это свидетельствует о высокой подвижности молекул пара в средах, в которых энергия связи твердой и жидкой фаз невелика. В черноземе при ВРК пародиффузионная температуропроводность в два раза превышает кондуктивную. В кварцевом песке эта разница составляет четыре раза и более.

Коэффициент теплопроводности, обусловленный паропереносом, оказывается в десятки раз ниже кондуктивного, который при орошении чернозема до полной влагоемкости увеличивается в шесть раз. Таким образом, молекулы пара, резко ускоряя процессы передачи тепла в минерализованных горизонтах, переносят незначительное количество энергии, что не способствует теплоаккумуляции.

Механизм теплообмена при гидромелиорации дополнительно раскрывается из анализа произ-

водных тепло- и температуропроводности по температуре. Производные $d\lambda/dT$ (У) и da/dT (У) определяют скорость изменения коэффициентов теплопередачи при нагревании или охлаждении. Искусственное увлажнение неоднозначно влияет на характер зависимости производных от влажности. Так, при температуре 20⁰С скорость изменения температуропроводности суглинистых черноземов при влажности 5% от массы почвы равна $0,27 \times 10^{-8}$ м²/К с), при 15%-ном увлажнении $0,34 \times 10^{-8}$ и при полной влагоемкости (ПВ) – $0,12 \times 10^{-8}$ м²/К с), т. е. имеет ярко выраженный экстремум. Аналогичные изменения имеют место и в кварцевом песке, хотя степень изменения здесь гораздо сильнее. С повышением температуры скорость da/dT еще динамичнее и ее максимальные значения более значительны.

С другой стороны, скорость изменения теплопроводности $d\lambda/dT$ увеличивается постепенно и стремится к пределу, называемому «насыщением» при создании в почве полной влагоемкости.

Такая зависимость скорости изменения « λ » от влажности определяется, прежде всего, различной отзывчивостью почвенных фаз на температуру. Теплопроводность жидкой фазы при нагревании наиболее динамична и равна 0,56 Вт/(м К) при 0°C и 0,67 Вт/(м К) при 80°C. Она определяет в целом температурную зависимость трехфазной почвенной среды, поскольку теплопроводность воздуха очень мала и равна 0,016 Вт/(м К).

Таким образом, гидромелиорации вызывают возрастание теплопроводности и скорости ее температурного изменения $d\lambda/dT$. Прекращение роста теплопроводности при полной влагоемкости характерно для почв любого генезиса. Предел ее увеличения в менее дисперсных средах выше. Например, в песчаной почве он составляет 0,022 Вт/(м К²), а в глинистой – 0,004 Вт/(м К²).

В результате повышение температуры влажных сред вызывает рост всех теплофизических коэффициентов как кондуктивных, так и пародиффузионных. При этом пародиффузионная теплопроводность увеличивается и превосходит в легких по гранулометрическому составу почвах кондуктивную составляющую в 2 раза и более на различных стадиях почвенного увлажнения. В то же время коэффициент теплопаро-проводности (λ) всегда остается на порядок ниже кондуктивной теплопроводности.

Выводы

1. Способ определения теплопроводности и температуропроводности орошаемых почв, обусловленных теплопаро-переносом при наличии в почвенном профиле градиентов температуры, основан на использовании импульсного метода и решении «обратной задачи».

2. Кондуктивная температуропроводность почв при орошении уменьшается, в то время как пародиффузионная имеет параболическую зависимость и характеризуется экстремальным значением, приуроченным к влажности разрыва капиллярных связей в суглинистых почвах, а в песчаных – к капиллярной влагоемкости.

3. В гумусированных горизонтах влажных почв разного генезиса пародиффузионная компонента

комбинированного механизма теплопередачи имеет меньшее значение по сравнению с ниже-лежащими минерализованными почвенными слоями. Это свидетельствует о высокой подвижности молекул пара в системах со слабой энергией связи жидкой и твердой фаз.

4. Коэффициент теплопроводности, обусловленный термодиффузией, в десятки раз меньше кондуктивного. Значит молекулы пара, резко ускоряя процессы теплообмена в почвенных минеральных горизонтах, слабо способствуют теплоаккумуляции, перенося незначительное количество тепловой энергии.

5. Скорость изменения температуропроводности чернозема в зависимости от влагосодержания имеет максимум в вершине параболы. Повышение температуры приводит к повышению этой характеристики. Скорость изменения теплопроводности при увлажнении стремится к «насыщению» при полной влагоемкости, которая достигается посредством гидромелиорации почвы.

Библиографический список

1. Макарычев, С. В. Агрофизическая характеристика лесовых черноземов Юго-восточной части Западной Сибири в связи с возможными гидромелиорациями / С. В. Макарычев. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2019. – № 8 (178). – С. 87-93.
2. Болотов, А. Г. Вододерживающая способность почв Алтайского края / А. Г. Болотов, Е. В. Шеин, С. В. Макарычев. – Текст: непосредственный // Почвоведение. – 2019. – № 2, вып. 52. – С. 187-192.
3. Макарычев, С. В. Послепожарные изменения почв и особенности флоры гарей равнинных сосновых лесов Алтайского края / С. В. Макарычев, А. А. Малиновских, А. Г. Болотов, Ю. В. Беховых. – Текст: непосредственный // Ползуновский вестник. – 2011. – № 4-2. – С. 107-110.
4. Болотов, А. Г. Основные гидрофизические характеристики каштановых почв сухой степи Алтайского края / А. Г. Болотов, Е. В. Шеин, Е. Ю. Милановский [и др.]. – Текст: непосредственный

ственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 9 (119). – С. 36-41.

5. Беховых, Ю. В. Теплофизические характеристики серых лесных почв северо-запад Бие-Чумышской возвышенности при естественном увлажнении / Ю. В. Беховых, Е. Г. Сизов. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. – № 4 (150). – С. 34-39.

6. Гефке, И. В. Распределение продуктивных запасов влаги в почве и их вероятностей за вегетационный период в условиях плодового сада / И. В. Гефке, А. Г. Болотов. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 6 (164). – С. 79-86.

7. Шеин, Е. В. Моделирование теплового режима почвы по амплитуде температуры приземного воздуха / Е. В. Шеин, А. Г. Болотов, М. А. Мазиров, А. И. Мартынов. – Текст: непосредственный // Земледелие. – 2017. – № 7. – С. 26-28.

8. Шеин, Е. В. Определение профильного распределения температуры почвы на основании температуры ее поверхности / Е. В. Шеин, А. Г. Болотов, М. А. Мазиров, А. И. Мартынов. – Текст: электронный // Земледелие. – 2018. – № 7. – С. 26-29. – DOI: 10.24411/0044-3913-2018-10707.

9. Болотов, А. Г. Метод определения теплопроводности почвы А. Г. Болотов. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 7 (129). – С. 74-79.

10. Вадюнина, А. Ф. Методы определения физических свойств почв и грунтов / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. – Москва: Высшая школа, 1961. – 345 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Makarychev S.V. Agrofizicheskaya kharakteristika lessovykh chernozemov Yugo-vostochnoy chasti Zapadnoy Sibiri v svyazi s vozmozhnymi gidromelioratsiyami // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2019. – No. 8 (178). – S. 87-93.

2. Bolotov A.G. Vodouderzhivayushchaya sposobnost pochv Altayskogo kraya / A.G. Bolotov, E.V. Shein, S.V. Makarychev // Pochvovedenie. – 2019. – Вып. 52. – No. 2. – S. 187-192.

3. Makarychev S.V. Poslepozharnye izmeneniya pochv i osobennosti flory garey ravninnykh sosnovykh lesov Altayskogo kraya / S.V. Makarychev, A.A. Malinovskikh, A.G. Bolotov, Yu.V. Bekhovykh // Polzunovskiy vestnik. – 2011. – No. 4-2. – S. 107-110.

4. Bolotov A.G. Osnovnye gidrofizicheskie kharakteristiki kashtanovykh pochv sukhoy stepi Altayskogo kraya / A.G. Bolotov, E.V. Shein, E.Yu. Milanovskiy, Z.N. Tyugay, T.N. Pochatkova // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – No. 9 (119). – S. 36-41.

5. Bekhovykh Yu.V. Teplofizicheskie kharakteristiki serykh lesnykh pochv severo-zapad Bie-Chumyshskoy vozvyshennosti pri estestvennom uvlazhnenii / Yu.V. Bekhovykh, E.G. Sizov // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2017. – No. 4 (150). – S. 34-39

6. Gefke I.V. Raspredelenie produktivnykh zapasov vlagi v pochve i ikh veroyatnostey za vegetatsionnyy period v usloviyakh plodovogo sada / I.V. Gefke, A.G. Bolotov // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – No. 6 (164). – S. 79-86.

7. Shein E.V., Bolotov A.G., Mazirov M.A., Martynov A.I. Modelirovanie teplovogo rezhima pochvy po amplitude temperatury prizemnogo vozdukhа // Zemledelie. – 2017. – No. 7. – S. 26-28.

8. Shein E.V., Bolotov A.G., Mazirov M.A., Martynov A.I. Opredelenie profilnogo raspredeleniya temperatury pochvy na osnovanii temperatury ee poverkhnosti // Zemledelie. – 2018. – No. 7. – S. 26-29. DOI: 10.24411/0044-3913-2018-10707.

9. Bolotov A.G. Metod opredeleniya temperaturoprovodnosti pochvy // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2015. – No. 7 (129). – S. 74-79.

10. Vadyunina A.F. Metody opredeleniya fizicheskikh svoystv pochv i gruntov / A.F. Vadyunina, Z.A. Korchagina. – Moskva: Vysshaya shkola, 1961. – 345 s.