

Н.А. МУРОМЦЕВ (orcid id: 0000-0002-2745-2942), **К.Б. АНИСИМОВ** (orcid id: 0000-0002-5042-7104)
Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва

Ю.А. МАЖАЙСКИЙ (orcid id: 0000-0002-0743-8289)
Мещерский филиал ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова, Рязань

Н.А. СЕМЕНОВ (orcid id: 0000-0002-0829-2787)
Всероссийский институт кормов им. В.Р. Вильямса, Лобня

ПОТЕНЦИАЛ ВЛАГИ В УСЛОВИЯХ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ПОЧВЕННОГО РАСТВОРА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ

Установлено новое явление резкого скачкообразного повышения потенциала влаги при переходе положительных значений температуры почв через ноль в область отрицательных величин. Процесс протекает в условиях фазового перехода почвенного раствора при стабильном состоянии всех других параметров среды, за исключением температуры почвы. Понижение потенциала влаги (при постоянной влажности) в условиях повышения температуры объясняется возрастанием подвижности и активности ионов влаги. Понижение температуры обуславливает возрастание потенциала в связи с понижением активности и подвижности ионов воды. Данное явление аналогично снижению содержания влаги в почве. Суточные изменения температуры почвы и потенциала почвенной влаги незначительны и лежат в пределах $0,1 \div 1,9^\circ\text{C}$ и $2 \div 3$ кПа соответственно.

Ключевые слова: атмосферные осадки, суммарное испарение, потенциал влаги, температура почвы, влагообмен, зона аэрации, наименьшая влагоемкость, диффузия влаги

ВВЕДЕНИЕ

Температура является важнейшим термодинамическим параметром, функционально связанным с потенциалом почвенной влаги и, весьма существенно влияющим на него [1, 2]. Изучению воздействия температуры воздуха (T_v) и почвы (T_n) на энергетическое состояние почвенной влаги и интенсивность её потока посвящены работы [1, 3-6]. Воздействие температуры почвы на потенциал влаги (P_k), в области высокого увлажнения почвы (полная влагоемкость - 0,7 наименьшей влагоемкости) и, особенно в интервале низких положительных и отрицательных температур, изучено эпизодически, далеко недостаточно. Целью работы является изучение динамики потенциала почвенной влаги и температуры в годовом цикле и выявление фазового перехода почвенного раствора в условиях положительных значений температуры почвы

в область отрицательных величин в различных слоях дерново-подзолистой суглинистой почвы.

1. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Исследования проведены на дерново-подзолистой суглинистой слабооглеенной почве Зеленоградского стационара Почвенного института им. В.В. Докучаева с использованием датчиков потенциала влаги, температуры почвы и метеостанции «Vantage Pro2» [7]. Принцип действия датчиков температуры почвы основан на их свойстве изменять внутреннее сопротивление под действием изменяющейся температуры, а датчиков потенциала - на сорбции ими влаги из почвы.

Морфогенетические и водно-физические свойства исследуемой почвы достаточно подробно описаны в нашей предыдущей работе [8]. Здесь мы кратко отметим лишь некоторые наиболее важные для данной работы её свойства.

Гранулометрический состав метрового слоя почвы несущественно различается в пределах площади опытного участка. Верхний полуметровый её слой обычно характеризуется как средний суглинок, а нижняя часть (50÷100 см) имеет тяжелосуглинистый состав. Плотность сложения (средние значения) этих толщ почвы находится в пределах 1,50 и 1,64 г/см³ соответственно. Максимальная гигроскопическая (МГ) влажность составляет 8,2 и 13,5%, влажность завядания (ВЗ) - 10,0 и 18,5%, а наименьшая влагоемкость (НВ) - 35,3 и 31,4% соответственно в слоях 0÷50 и 50÷100 см.

Растительность опытного участка «Залежь» - естественно-травянистая, преимущественно злаковая. Суммарный урожай (всех компонентов) растительного покрова составляет около 20,2 ц/га.

Датчики потенциала влаги (длина 70 мм, диаметр 18 мм) и температуры почвы (длина 30 мм, диаметр 5 мм) были установлены на следующих глубинах дерново-подзолистой суглинистой почвы соответственно: 5÷12 и 5÷8 см (№ 1), 30÷37 и 30÷33 см (№ 2), 50÷57 и 50÷53 см (№ 3) и 70÷77 и 70÷73 см (№ 4). Одновременно с потенциалом и температурой почвы проводились измерения температуры и влажности воздуха, скорости ветра, суммарного испарения, осадков, атмосферного давления и радиации. Информация со всех датчиков считывалась и поступала на дисплей автоматической метеостанции каждые 10 минут в течение июля 2014 по июль 2015 гг.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим динамики потенциала влаги и температуры почвы в варианте «Залежь» в пределах почвенного профиля и во времени (рис. 1, 2). Потенциал влаги на конец июля 2014 г. составляет величины 43, 35, 28 и 28 кПа соответственно в слоях почвы 5÷12, 30÷37, 50÷57 и 70÷77 см, что соответствует

содержанию влаги в пределах наименьшей влагоёмкости (НВ). В дальнейшем, в течение лета, потенциал прогрессивно понижается в верхнем, 5÷12 см, слое с 134 до 18 кПа. В слоях 30÷37, 50÷57 и 70÷77 см, наоборот, он возрос соответственно до 81, 58 и 54 кПа. Это явление однозначно свидетельствует о том, что выпадавшие за этот период времени осадки промачивали только верхний слой почвы, мощностью 27÷29 см.

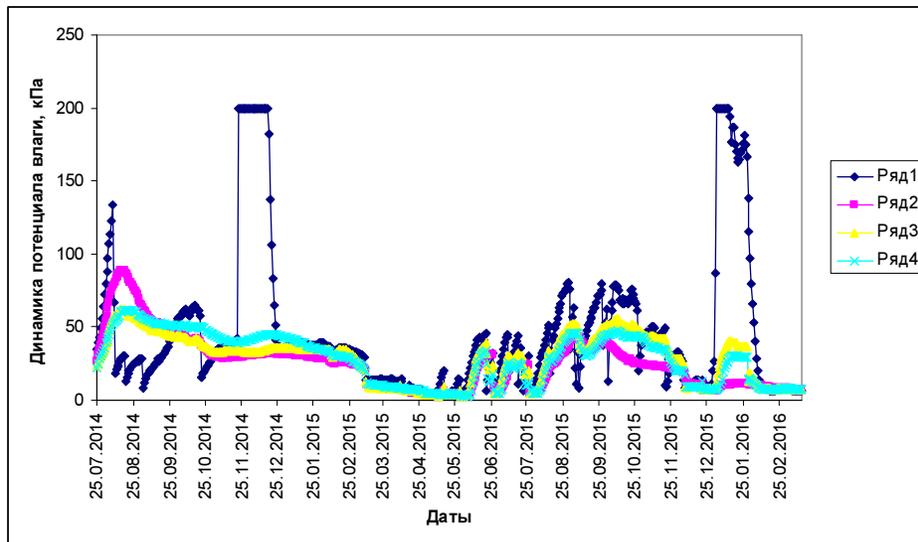


Рис. 1. Динамика потенциала влаги в дерново-подзолистой суглинистой слабооглеенной почве: 1 - в слое 5÷12 см, 2 - 30÷37 см, 3 - 59÷57 см и 4 - в слое 70÷77 см

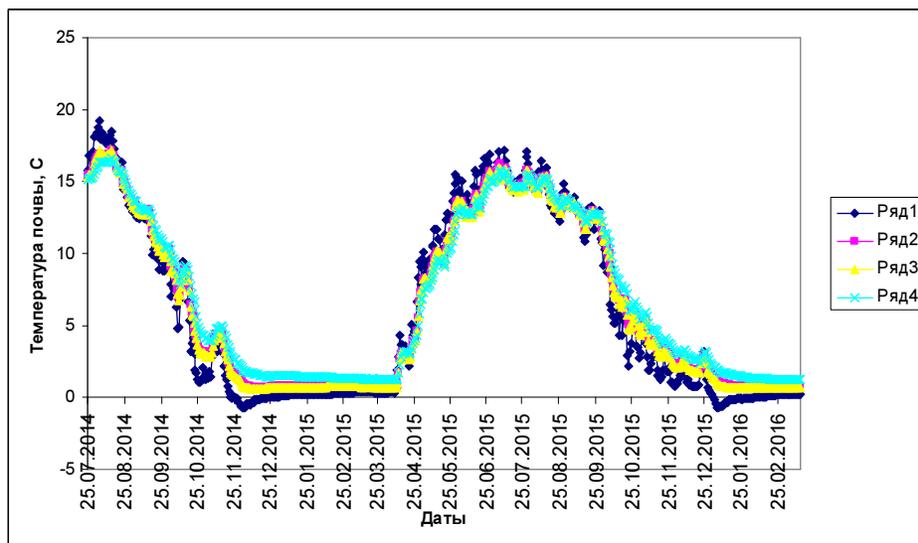


Рис. 2. Динамика температуры в дерново-подзолистой суглинистой слабооглеенной почве: 1 - слой 5÷8 см, 2 - 30÷33 см, 3 - 50÷53 см и 4 - 70÷73 см

Данное обстоятельство, в свою очередь, указывает на то, что верхний слой почвы до глубины 40÷50 см является слоем наиболее активного влагооборота и иссушения. В конце августа содержание влаги в верхнем слое (0÷20 см) продолжает оставаться на достаточно высоком уровне. Об этом свидетельствуют невысокие значения потенциала, наблюдаемые в интервале 16 (19.08) - 28 (31.08) кПа, что можно охарактеризовать как значения, несколько превышающие НВ дерново-подзолистой слабооглеенной почвы [8]. Вместе с тем, его значения в нижних слоях продолжают оставаться высокими (86÷66 кПа), особенно в слое 30÷37 см и, вероятно, несколько более глубоко, но не ниже 50 см. В слое 50÷80 см значения потенциала продолжают составлять значения в пределах 58÷61 кПа. Это обстоятельство свидетельствует о том, что из слоя 0÷50 см происходит более интенсивный расход влаги, чем из слоев, расположенных глубже него.

Такое явление вполне согласуется с общей теорией влагообмена в зоне аэрации [3], и в определённой мере - с динамикой потенциала в полевых вариантах опыта [8, 9].

Температура почвы к первой декаде ноября с уровня в 18÷16°C в июле и августе понизилась до 4÷2°C (в целом по профилю почвы). Далее, к декабрю и в начале него, она в слое 5÷8 см перешла в область невысоких отрицательных значений (-1...-2°C), а в слоях 30÷33, 50÷53 и 70÷73 см - понизилась до невысоких положительных величин (0,7÷1,5°C). Эти значения температуры практически не изменились и в течение всей зимы и ранней весны, вплоть до 5 апреля 2016 г. (рис. 2).

Существенные изменения потенциала почвенной влаги наблюдаются в основном в верхнем (5÷8 см) слое в летний и раннезимний (декабрь) периоды 2014 и 2015 гг. Его летние значения, как отмечали выше, колеблются в пределах 150÷5 кПа. Однако в начале декабря они резко и в течение нескольких часов, что называется, «взмыли» вверх до 200 кПа, и оставались на этом высоком уровне в течение трех недель. И это изменение потенциала полностью согласуется с динамикой температуры почвы: на всех глубинах почвы она приблизилась к оси абсцисс (к нулю), а в самом верхнем (5÷8 см) слое - перешла в область отрицательных значений. Содержание влаги, особенно уменьшение её, могущее повлиять на резкий «всплеск» потенциала, оставалось стабильным, и не могло уменьшиться в замерзшем верхнем слое почвы. Возможный приток диффузионным путём парообразной влаги из нижележащих талых слоёв почвы, наоборот, привел бы к понижению потенциала.

Отсюда следует, что при переходе температуры из области положительных значений в область отрицательных величин, потенциал влаги резко возрастает (в пять - шесть раз), причем только в том слое почвы, где именно наблюдается изменение температуры. При этом важным являются не абсолютные значения изменений температуры, а переход её из области положительных в область отрицательных значений. Подобное явление повторяется (практи-

чески в тех же значениях потенциала) и в декабре 2015 - январе 2016 гг. (рис. 1), что свидетельствует о постоянстве вскрытого нами внутрпочвенного термодинамического процесса, не описанного ранее в отечественной почвоведческой и гидрологической литературе. Этот процесс обусловлен фазовым переходом водного (почвенного) раствора, представляющим собой процесс перехода вещества из одной формы в другую при изменении одного из основных параметров среды - температуры [10].

Резкое возрастание потенциала в условиях фазового перехода объясняется специфическим состоянием почвенной влаги: активность и подвижность ионов воды весьма существенно снижаются, что равносильно уменьшению содержания влаги. Концентрация почвенного раствора возрастает. Оба эти факторы приводят к резкому повышению потенциала влаги, то есть к сильному возрастанию водоудерживающих сил почвы [3, 11]. Последнее приводит к эффекту, как бы аналогичному уменьшению её содержания.

Потенциал в верхнем слое (5÷12 см) понизился к концу декабря 2014 г. до 40÷35 кПа и приблизился к его значениям в толще почвы 30÷77 см. Динамика его в слоях 30÷37, 50÷57 и 70÷77 см в течение всего времени наблюдений стабильна, без заметных изменений в ту или иную сторону. Она наблюдается в течение длительного времени, вплоть до марта 2015 г. Температура почвы в течение всего этого периода практически не претерпела сколько-нибудь заметных изменений, составляя, как и ранее, величины в пределах 0,20÷0,4°C, 0,8÷0,9, 0,7÷0,8 и 1,3÷1,4°C соответственно в слоях 5÷8, 30÷33, 50÷53 и 70÷73 см. В продолжение первых двух месяцев весны 2015 г. потенциал влаги по-прежнему продолжал медленно понижаться на всех уровнях почвы. К концу этого периода он достиг значений в пределах 7÷13 кПа для всей изучаемой почвенной толщи (5÷77 см). Эти значения потенциала свидетельствуют о переувлажнении почвенного профиля до состояния, когда содержания влаги заметно превышает уровень НВ, достигая, примерно, капиллярной влагоёмкости (КВ). Температура почвы за этот период не претерпела сколько-нибудь заметных изменений, и составила соответственно 0,7, 0,8, 0,7 и 1,2°C.

Отмеченные медленные и незначительные понижения значений потенциала на фоне стабильного состояния температуры почвы происходят в связи с увеличением содержания влаги. Возрастание её значений в 0÷77 см толще почвы происходит путем подтягивания из нижележащих слоев. Сначала, в зимний период и в периоды с отрицательными величинами температуры - путем диффузии парообразной влаги, а в талой почве с положительной динамикой температуры, - и в жидком виде.

Однако в течение мая в верхнем слое потенциал медленно (1÷2 кПа в сутки) повышается до 20÷25 кПа. В нижележащих слоях (30÷37, 50÷57 и 70÷77 см) никаких изменений потенциала не происходит, и его значения продолжительное время находятся на уровне 3÷5 кПа, практически не различаясь по глубинам. Температура почвы хотя и увеличилась, но несущественно (на 1÷2°C).

В дальнейшем наблюдается резкое понижение потенциала в верхнем слое с 29 до 14 кПа, а в нижних слоях до $10 \div 12$ кПа при постоянстве температуры почвы. И значения температуры почвы продолжали оставаться на отмеченных уровнях. Каких-либо резких изменений атмосферных показателей не происходит. Температура воздуха находится в пределах $8 \div 10^\circ\text{C}$, влажность воздуха уменьшилась с 74 до 50%, остальные параметры - в пределах обычных значений для этого времени года [8]. Следовательно, понижение потенциала влаги произошло при повышении температуры, воздействующей на влагу в направлении увеличения ее подвижности и активности. А это, в свою очередь, приводит к эффекту, аналогичному повышению её содержания.

В первой декаде июня и летом температура воздуха существенно повысилась, временами до 20°C (температура почвы соответственно до $12 \div 13^\circ\text{C}$ в верхних её слоях). Динамика потенциала влаги представляет собой в этот период пилообразный вид: повышение его значений сменяется (иногда резко) понижением, потом опять - повышением и понижением. Главный действующий фактор здесь - осадки, которые, например, за двое суток в середине мая 2015 г. составили около 39 мм. Причина такой динамики потенциала влаги объясняется высокой температурой воздуха (около 20°C), большим суммарным испарением ($4,0 \div 4,5$ мм) и отсутствием осадков в течение с 5 по 11 мая. А когда 15 и 16 мая выпало много осадков (в сумме за двое суток 38,8 мм), то потенциал влаги понизился 17 мая во всех слоях до $3 \div 4$ кПа.

В течение всего лета динамика потенциала аналогична описанной выше, и представляет собой чередование возрастаний и снижений потенциала влаги, главным образом в верхнем ($5 \div 12$ см) слое, а иногда после сильных осадков - и в некоторых нижележащих слоях почвы, контролируемых датчиками.

Представляет определенный интерес проследить за тем, как изменяются суточные (в течение суток) значения потенциала при различных значениях влажности почвы и атмосферных показателях. Тем более что аналогичные данные в отечественной гидрофизической литературе отсутствуют.

Сутки 5-6 августа 2014 г. характеризуются засушливыми условиями атмосферы, и в соответствии с этим - низкими значениями влажности почвы. Эти сутки венчают длительный бездождный период, начавшийся в начале июля (7 августа впервые за длительный период выпало 32,6 мм). Суточная динамика потенциала влаги приведена в таблице 1. Видно, что суточные изменения потенциала влаги невелики и укладываются в 3 кПа (три нижних слоя) и в 9 кПа - в самом верхнем ($5 \div 12$ см) слое почвы. При этом самые высокие значения потенциала, как и следовало ожидать - в верхнем, $5 \div 12$ см. слое, из которого происходит наибольшая потеря влаги на испарение и десукцию травянистой растительностью. К 20 августа и в течение суток (20-21.08) установилась следующая суточная динамика потенциала в условиях «влажного» периода (с 7 по 17 августа выпало 79,2 мм).

Таблица 1. Динамика потенциала влаги (Рк) дерново-подзолистой почвы в варианте «Залежь» август 2014 г.

Дата и время наблюдений		Динамика Рк, кПа в слоях почвы [см]				Осадки [мм]
		5÷12	30÷37	50÷57	70÷77	
5.08.2014	00.00	112,0	68,0	49,0	46,0	нет
	03.00	115,0	69,0	49,0	46,0	
	06.00	116,0	70,0	50,0	47,0	
	09.00	117,0	70,0	50,0	47,0	
	12.00	116,0	70,0	51,0	47,0	
	15.00	114,0	71,0	51,0	48,0	
	18.00	116,0	71,0	51,0	48,0	
	21.00	119,0	71,0	51,0	48,0	
	24.00	117,0	71,0	51,0	48,0	
3.09.2014	00.00	9,0	62,0	51,0	56,0	0,4
	03.00	10,0	61,0	51,0	56,0	
	06.00	10,0	61,0	51,0	56,0	
	09.00	11,0	61,0	51,0	56,0	
	12.00	12,0	61,0	51,0	56,0	
	15.00	12,0	61,0	51,0	56,0	
	18.00	13,0	61,0	51,0	56,0	
	21.00	13,0	60,0	51,0	56,0	
	24.00	14,0	60,0	51,0	56,0	

Самые низкие значения потенциала - в верхнем слое: интервал суточных изменений составляет 2 кПа (в пределах 17÷19 кПа). Наибольшие значения - в слое 30÷37 см (82÷84 кПа) - слое, из которого происходят потери влаги на суммарное испарение, а осадки до него не дошли, они аккумулировались полностью в верхнем слое. Интервал изменений потенциала составляет 2 кПа, а в нижнем (70÷77 см) слое и того меньше - всего один кПа.

Таким образом, суточные изменения потенциала влаги невелики и находятся в пределах 2÷3 кПа. В нижних слоях почвы (глубже 50 см) при минимальных значениях влагообмена и стабилизации содержания влаги и водоудерживающих сил суточные изменения могут отсутствовать вообще. Суточная динамика температуры почвы представлена в таблице 2. Температура плавно понижается, как в пределах почвенного профиля (сверху вниз), так и во времени, уменьшаясь с понижением температуры воздуха. Максимальные значения температуры наблюдаются в самом верхнем слое почвы (5÷8 см) и составляют в пределах суток (5.08) величины в интервале 17,1÷18,9°C. Несколько меньшие значения (до 2,0°C) - в нижнем слое (70÷73 см). К 3-му сентября пониже-

ние температуры составило $4,0^{\circ}\text{C}$ в верхнем и $4\div 3^{\circ}\text{C}$ в нижних слоях. Суточные изменения температуры составили величины в пределах: в слое $5\div 8$ см - от $1,9$ до $0,6^{\circ}\text{C}$, в слое $30\div 33$ см - от $0,4$ до $0,1^{\circ}\text{C}$, в слое $50\div 53$ см - от $0,3$ до $0,0^{\circ}\text{C}$ и в слое $70\div 73$ см - $0,1^{\circ}\text{C}$.

Таблица 2. Суточная динамика температуры почвы в варианте «Залежь» август 2014 г.

Дата и время наблюдений		Температура почвы, $^{\circ}\text{C}$ в слоях почвы [см]				Осадки [мм]
		5÷8	30÷33	50÷53	70÷73	
5.08.2014	00.00	18,2	17,1	17,2	16,3	нет
	03.00	17,7	17,1	17,2	16,3	
	06.00	17,2	16,9	17,1	16,3	
	09.00	17,1	16,9	16,9	16,3	
	12.00	17,3	16,7	16,8	16,3	
	15.00	18,4	16,7	16,7	16,3	
	18.00	19,1	16,7	16,9	16,3	
	21.00	18,9	16,9	17,1	16,3	
	24.00	18,4	16,9	17,2	16,3	
3.09.2014	00.00	13,8	13,6	13,6	13,6	0,4
	03.00	13,6	13,6	13,6	13,6	
	06.00	13,6	13,6	13,6	13,6	
	09.00	13,5	13,6	13,6	13,6	
	12.00	13,4	13,6	13,6	13,6	
	15.00	13,5	13,6	13,5	13,6	
	18.00	13,6	13,6	13,5	13,6	
	21.00	13,6	13,6	13,6	13,6	
	24.00	13,2	13,6	13,6	13,6	

ВЫВОДЫ

Впервые в нашей стране вскрыто и описано термогидрофизическое явление (термодинамический процесс) резкого (5-6 раз) и быстрого (практически мгновенного) повышения потенциала влаги при переходе температуры почвы через ноль, из области положительных в область отрицательных значений. Энергетический скачок (резкое возрастание потенциала) обусловлен фазовым переходом почвенного раствора при изменении одного из основных термодинамических параметров (температуры).

Возрастание влаги происходит из-за атмосферных осадков и путем подтягивания влаги из нижележащих слоев. В зимний период и в периоды с отрицательными величинами температуры - путем диффузии парообразной влаги, а в талой почве с положительной динамикой температуры, - и в жидком виде. Понижение температуры приводит к возрастанию потенциала в связи с понижением активности и подвижности ионов воды. Данное явление аналогично снижению содержания влаги в почве.

Суточные изменения потенциала влаги невелики и находятся в пределах $2 \div 3$ кПа. Наиболее высокие значения потенциала наблюдаются в верхнем, $5 \div 12$ см, слое, из которого происходит наибольшая потеря влаги на испарение и десукцию травянистой растительностью.

Суточные изменения температуры почвы уменьшаются в течение суток с охлаждением атмосферного воздуха в пределах $1,9^\circ\text{C}$ в верхних и $0,4 \div 0,1^\circ\text{C}$ в нижних слоях почвы, приближаясь к нулю с глубиной и стабилизацией изменений содержания влаги.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Globus A.M., Neizotermicheskiy vnutripochvennyy vlagoperenos, Avtoref. dokt. diss., L.: 1977, 48 s.
- [2] Durner W., Jansen U., Iden S.C., Effective hydraulic properties of layered soils at the lysimeter scale determined by inverse modelling, *European Journal of Soil Science* 2008, 59, 1, 114-124.
- [3] Muromtsev N.A., Kovalenko P.I., Semenov N.A., Mazhayskiy Yu.A., Yatsyk N.V., Shuravilin A.V., Voropay G.V., Anisimov K.B., Kolomiyets S.S., Vnutripochvennyy vlgoobmen, vopotreblyeniye i vodoobespechennost mnogoletnikh kulturnykh travostoyev, Ryazan 2013, 300 s.
- [4] Nerpin S.V., Chudnovskyy A.V., Energomassoobmen v sisteme rasteniye - pochva - prizemnyy vozduch, *Gidrometeoizdat*, L.: 1975, 358 s.
- [5] Durner W., Or D., Soil Water Potential Measurement, *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, Apr. 2006, 1-14.
- [6] Nolza R., Cepude P. et al., Soil water monitoring in a vineyard and assessment of unsaturated hydraulic parameters as thresholds for irrigation management, *Agricultural Water Management* 2016, 164, 2, January 31, 235-242.
- [7] Rukovodstvo po montazhu i ispolzovaniyu avtomaticheskoy meteostancii, Gavard 2009, 64 s.
- [8] Muromtsev N.A., Anisimov K.B., Nekotoryye osobennosti formirovaniya vodnogo rezhima dernovo-podzolistoy pochvy na razlichnykh elementakh geomorfologicheskoy kateny, *Byulleten Pochvennogo instituta* 2015, 77, 78-93.
- [9] Mazhayskiy Yu.A., Obosnovanie rezhimov kompleksnykh melioratsiy v usloviyakh tekhnogennovo zagryazneniya agrolandshafta, *Diss. d-ra s.-h. nauk*, M.: 2002, 456 s.
- [10] Koryakin N.V., *Osnovy khimicheskoy termodinamiki*, Akademiya, M.: 2003, 464 s.
- [11] Muromtsev N.A., Semenov N.A., Mazhayskiy Yu.A., Anisimov K.B., Zakonomernosti nakopleniya, poter i vozvrata vlagi i khimicheskikh veshchestv pri vnutripochvennom vlagoobmene, *Byulleten Pochvennogo instituta* 2014, 76, 111-125.

THE MOISTURE POTENTIAL IN CONDITIONS OF PHASE TRANSITION OF SOIL SOLUTION IN SOD-PODZOLIC SOIL

A new phenomenon of a sharp jump - like increase of the moisture potential is established in the transition of positive soil temperature values through zero to the region of negative values. The process proceeds under conditions of a phase transition of the soil solution with the stable state of all other soil parameters. The decrease of the moisture potential (at constant humidity) under conditions of temperature increase is explained by the increase in mobility and activity of moisture ions. The decrease in temperature causes an increase in the potential due to a decrease in the activity and mobility of water ions. This phenomenon is similar to reducing the moisture content in soil. Daily changes in soil temperature and soil moisture potential are insignificant and is in the range 0.1÷1.9°C and 2÷3 kPa respectively.

Keywords: atmospheric precipitation, total evaporation, moisture potential, soil temperature, moisture exchange, aeration zone, the lowest moisture capacity, diffusion of moisture