

ВЛИЯНИЕ ВНУТРИГРУНТОВОЙ КОНДЕНСАЦИИ НА ТЕРМОВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

А. Ф. Жирков, научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова
СО РАН, zhirkov_af@mail.ru,

П. П. Пермьяков, доктор физ.-мат. наук,
ведущий научный сотрудник Института
мерзлотоведения им. П. И. Мельникова
СО РАН, ведущий научный сотрудник
Института физико-технических проблем
Севера им. В. П. Ларионова СО РАН,
permyakov2005@mail.ru,

М. Н. Железняк, доктор геол.-минерал. наук,
профессор, директор Института
мерзлотоведения им. П. И. Мельникова
СО РАН, fe1956@mail.ru, г. Якутск, Россия

Мерзлые породы теснейшим образом связаны с поверхностными условиями Земли, ибо ей они обязаны своим возникновением и существованием. В суровых климатических условиях, даже при среднегодовой температуре воздуха -8°C существуют отдельные районы, где температуры пород имеют значения около нуля градусов. Для объяснения явлений такого характера изучен процесс внутрипочвенной конденсации, являющейся внутренним источником тепла и влаги. Разработана математическая модель тепло-влажностного переноса с учетом процесса внутригрунтовой конденсации как внутреннего источника тепла и влаги. Для условий Центральной Якутии выявлено два временных периода, когда процесс внутригрунтовой конденсации оказывает разнонаправленное влияние (охлаждающее и нагревающее) при формировании термовлажностного режима грунтов деятельного слоя.

Frozen soils are closely connected with the surface conditions of the Earth, for they owe it to their origin and existence. However, in severe climatic conditions, even at the average annual air temperature of -8°C , there are separate regions where rock temperatures have values around zero degrees. To explain the phenomena of this nature, the process of subsoil condensation, which is an internal source of heat and moisture, has been studied. A mathematical model of heat and moisture transfer is developed taking into account the process of subsoil condensation as an internal source of heat and moisture. For the conditions of Central Yakutia, two periods are revealed when the process of subsoil condensation has a multidirectional effect (cooling and heating) during the formation of the heat and moisture regime of the soils of the active layer.

Ключевые слова: криолитозона, деятельный слой, термовлажностный режим грунтов, внутригрунтовая конденсация.

Keywords: permafrost, active layer, thermal and moisture regime of soils, subsoil condensation.

1. Введение

Формирование температурного и влажностного режима мерзлых грунтов происходит под воздействием внешних и внутренних факторов и источников тепла. Одним из слабоизученных вопросов в оценке роли факторов в формировании термовлажностного режима горных пород является влияние конденсации воздуха в деятельном слое.

Конденсационная гипотеза формирования подземных вод была сформулирована в 1877 г. О. Фольгером. Однако она была подвергнута серьезной критике (Hann, 1880) и после недолгой дискуссии отвергнута. Ее возрождению способствовали слабо известные за границей работы А. Ф. Лебедева, опубликованные в 1908—1926 гг. Согласно предложенной А. Ф. Лебедевым парадигме (Лебедев, 1936), для конденсации не обязательна «прокачка» через поры и трещины горных пород большого количества воздуха. Водяной пар самостоятельно может перемещаться от областей с большим парциальным давлением и температурой воздуха к областям с меньшим. Эта парадигма более 70 лет лежала в основе большинства проводимых исследований (http://www.rgo-speleo.ru/biblio/dubl_kondens.htm).

Процесс конденсации водяных паров воздуха чрезвычайно широко распространен в природе. Он происходит в атмосфере, на открытых поверхностях и в верхних слоях литосферы. Конденсацией водяных паров в грунтах, ее ролью в водном и тепловом балансе занимались многие исследователи: П. И. Колосков (1938); М. И. Сумгин и др. (1940); В. В. Тугаринов (1955); И. Т. Рейнюк (1959); Н. А. Огильви (1963); В. В. Климошкин (1975); А. Ф. Чудновский (1976); С. Н. Буллович (1978, 1982); В. В. Шепелев (1980, 2011); Т. В. Банцеева и В. М. Михайлов (2004, 2009) и др. Одни считают, что процесс конденсации водяных паров воздуха протекает довольно интенсивно, другие наоборот, что этот процесс происходит не так значительно, как предполагают остальные.

Для условий Центральной Якутии средняя величина конденсационных вод с учетом гранулометрического состава рыхлых супесчано-суглинистых отложений по утверждению В. В. Климошкина (1975) может быть принято приблизительно

но в 60 см^3 в сутки в 1 м^3 , что соответствует в период конденсации модулю подземного стока около $0,9 \text{ л/с}$ с 1 км^2 (слой воды равный 50 мм).

Позднее для условий этого же региона исследования по количественной оценке процессов конденсации в питании подземных вод проводил В. В. Шепелев. В результате оцененный слой конденсационной влаги за теплый период года составил 27 и 80 мм для условий с наличием растительного покрова и без него, соответственно (Шепелев, 1980).

Конденсация порового воздуха в породах зоны аэрации является экзотермическим фазовым процессом, т. е. сопровождается выделением значительного количества тепловой энергии ($2,5 \text{ МДж/кг}$). При интенсивном протекании данного процесса это должно вызывать более глубокое сезонное протаивание мерзлых пород и формирование в определенных условиях субэриальных таликов, и примеры тому имеются (Шепелев, 2011).

Накопленный к настоящему времени фактический материал свидетельствует о важности и неоднозначности этого природного процесса, необходимости дальнейшего, более детального изучения роли процессов внутригрунтовой конденсации в формировании теплового и водного режима грунтов.

Учитывая вышесказанное авторами настоящей статьи была, поставлена цель — получить количественную оценку влияния внутрипочвенной конденсации на термовлажностный режим грунтов в условиях Центральной Якутии.

2. Экспериментальное исследование выпадения количества внутригрунтовой конденсации в условиях Центральной Якутии

С целью оценки количества конденсата, выпадающего за теплый период года в условиях Центральной Якутии, нами была сконструирована конденсационная установка на научно-экспериментальном полигоне «Туймаада» Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН. Конденсационная установка была аналогична установкам КУ-1 и КУ-2 (Климочкин, 1975; Шепелев, 1980, 2011), исключением было то, что конденсаторы были углублены под почвенно-растительным слоем (ПРС).

Было сконструирована установка с двумя конденсаторами, один заполнен грунтами естественного залегания по разрезу, а второй был заполнен мелко- и среднезернистыми песками (рис. 1).

Установка была окончена 10 июля 2014 г., и с 15 июля начались режимные наблюдения за выпадением конденсата. Режимные наблюдения

проводились раз в два дня. Продолжались эти наблюдения до конца сентября.

С помощью конденсационной установки нами были проведены наблюдения за четыре сезона теплых периодов 2014—2017 гг. Показания теплового периода 2014 г. можно пренебречь, так как установка была только сконструирована и не дала корректных данных. В таблице 1 представлены результаты наблюдений за количеством выпадения внутрипочвенной конденсации.

Из приведенной таблицы результатов наблюдений за количеством выпадения внутрипочвенной конденсации видим, что конденсация водяных паров воздуха в породах деятельного слоя является существенным, даже в условиях Центральной Якутии. Полученные данные согласуются с ранее полученными данными В. В. Климочкина (1975) и В. В. Шепелева (1980, 2011). Наш эксперимент был с разными условиями тока воздуха по конденсатору (закрытое и открытое). В первые два года конденсатор был покрыт почвенно-растительным слоем, снизу стоковая труба была плотно закреплена резиновой трубкой с измерительной пипеткой. Тем самым ток воздуха был минимален и поэтому значения слоя конденсата тоже минимальны. В 2017 г. с целью сравнения с установками КУ-1 и КУ-2 почвенно-растительный слой был удален и резиновые трубки тоже были сняты. А вместо измерительной пипетки был использован измерительный сосуд с определенным количеством влаги, на поверхности которой был налит тонким слоем жидкий силикон для того, чтобы избежать испарения влаги. В результате этих действий ток воздуха по конденсатору увеличился, и получились большие значения слоя конденсата, чем в первые два года наблюдений.

Следовательно, интенсивность выпадения конденсата зависит не только от влажности воздуха и температуры грунтов, но и от тока воздуха в них. Влияние наличия почвенно-растительного слоя

Таблица 1
Результаты наблюдений за количеством выпадения внутрипочвенной конденсации

Грунты	2015 г. (закр.)	2016 г. (закр.)	2017 г. (открыт.)
	Слой конденсата, в мм		
Среднезернистый песок	19,8	22,1	47
Естественное залегание (до $0,7 \text{ м}$ — супесь, ниже мелко- и среднезернистые пески)	10,7	12,5	24,3



Рис. 1. Строительство конденсационной установки.

По левой трубке (феолетовая) выпадал конденсат в грунтах с естественным залеганием, по правой (красная) выпадал конденсат с конденсатомера с песчаным заполнителем

указывал еще В. В. Шепелев (1980), однако влияние тока воздуха на интенсивность выпадения конденсата не было установлено ранее.

В результате наших исследований получены предельные значения выпадения конденсата для типичных грунтов Центральной Якутии. Так, величина слоя конденсации в среднезернистых песках составляет от 19,8 до 47 мм, в супесях — от 10,7 до 24,3 мм в зависимости от наличия или отсутствия почвенно-растительного слоя.

3. Численное моделирование процесса внутригрунтовой конденсации и ее влияние на формирование термовлажностного режима грунтов

3.1. Учет внутригрунтовой конденсации водяного пара в термовлажностной модели

Под внутривлажностной конденсацией в научной литературе понимается процесс переноса пара внутри почвы, совершаемый благодаря наличию в ней температурного перепада, в частности, градиента упругости пара внутри вещества. Ос-

новным методом измерения конденсации является метод измерения изменений влагосодержания внутри данного объема почвы. Однако запас влаги изменяется в последнем одновременно по целому ряду причин и в различной форме (как в капельно-жидком, так и в парообразном виде) (Чудновский, 1976). Экспериментально измеряя суммарное изменение влаги, очень сложно отделить ту ее часть, которая связана с конденсацией паров. Предлагается множество методов для измерения количества выпадения конденсата. Еще более сложной задачей является теоретическое описание этого процесса.

В научной литературе практически не существует математического описания теории образования конденсата. В теории теплообмена приводится описание теплообмена только при пленочной конденсации на поверхности, а теория теплообмена при капельной конденсации отсутствует (Кутателадзе, 1979; G. Desrayaud & Lauriat, 2001; Lindblom & Nordell, 2007; H. Sun et al., 2011). Исходя из несовершенства теоретических разработок теплообмена при капельной конден-

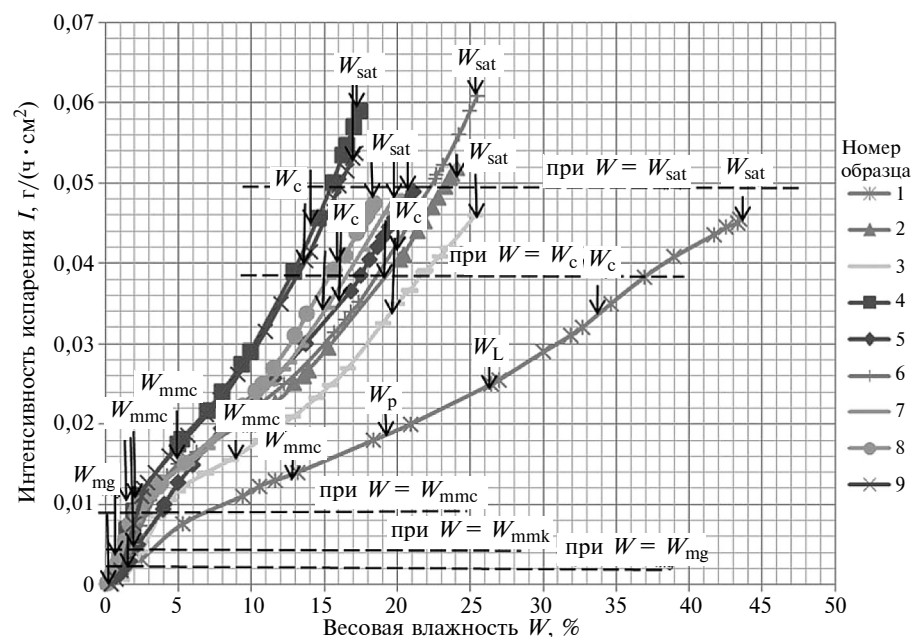


Рис. 2. Зависимость интенсивности испарения от влажности по Королеву и Блудушкиной (2015): 1 — лёсс; 2, 3 — пески пылеватые; 4, 5 пески мелкие; 6–9 — пески средней крупности

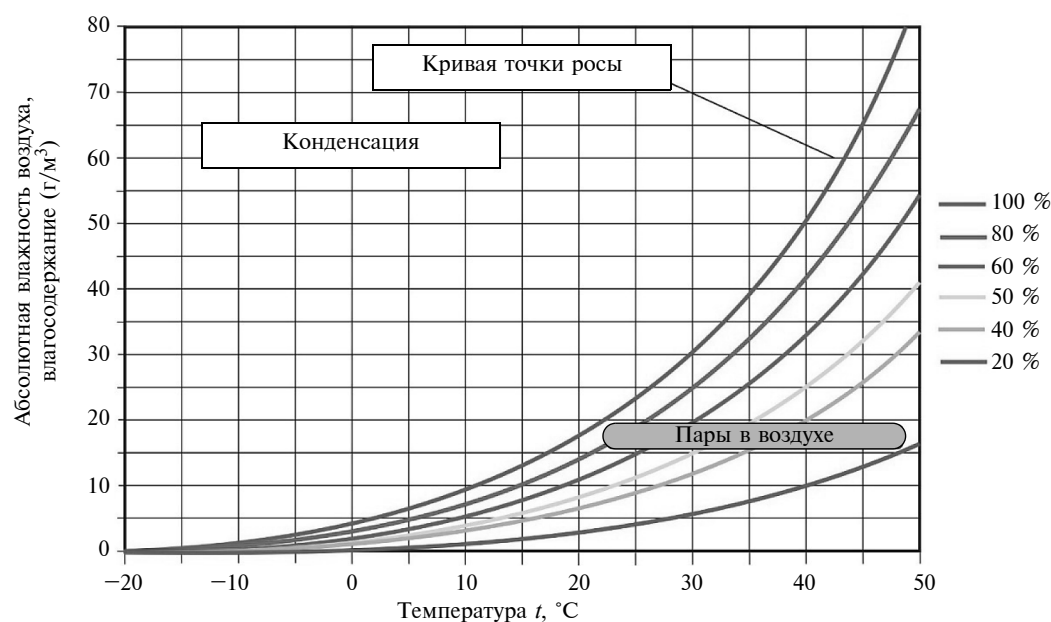


Рис. 3. Зависимость образования конденсата от влажности и температуры

сации и отсутствия существования математического описания образования конденсата в пористых средах, мы предлагаем иной подход.

Зная, что процесс конденсации — обратный процесс испарения и что тепло, расходуемое на эти процессы одинаково, мы предполагаем, что в равновесном состоянии для сохранения баланса интенсивность испарения эквивалентна интенсивности выпадения конденсата.

Из последних работ по исследованию характера и механизма испарения влаги из грунтов мож-

но отметить работу В. А. Королева и Л. Б. Блудушкиной (2015), в которой экспериментально выявлена зависимость интенсивности испарения от среднего влагосодержания в различных грунтах (рис. 2).

В реальных условиях процесс конденсации помимо влагосодержания также зависит от температуры и потенциала влаги. Зависимость конденсации водяных паров от температуры и давления в грунтах достаточно хорошо изучена (Нащокин, 1975; Кудинов и др., 2000) (рис. 3).

С учетом вышесказанного, количество влаги W_k , образующееся за счет выпадения конденсата в грунтах, зависит от влажности грунтов (в том числе связанной воды), относительной влажности воздуха и температуры грунтов, которая описывается выражением:

$$W_k = W_k(T, W_b) = \begin{cases} (W_b - W_c) W_{RH}(T/T_{\max}) & T > 0 \\ 0 & T \leq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где W_c — связанная вода; W_{RH} — эмпирический параметр; $T_{\max}$ — максимальная температура грунта.

Эмпирический параметр W_{RH} представляет собой угол наклона прямой, осредненной по данным (Нашокин, 1975; Кудинов и др., 2000; Королев, Блудушкина, 2015), представленных на рис. 1 и 2, и варьирует от 20° до 50° в зависимости от супесчаных и песчаных грунтов. Например, для песков средней крупности этот угол равен 40° и эмпирический параметр $W_{RH} = 0,4$, соответственно, при условии, что температура грунтов $t_{гр}$ варьируется от 10÷20 °С, а влажность воздуха равна 50÷60 %.

3.2. Математическая постановка задачи

В численном моделировании процессов тепло-влажноперевода в мерзлых грунтах широкое практическое применение получили модели в спектре температур (Harlan, 1973; Taylor, Luthin, 1978; Пермяков, Аммосов, 2003). В дисперсных средах с ростом степени засоленности содержание незамерзшей воды увеличивается. В таких средах свободная вода замерзает при температуре $T_f = 273$ К, а остальная вода (связная) кристаллизуется по мере понижения температуры среды (Цытович, 1945; Нерсесова, 1950; Ершов, 1979; Ефимов, 1986).

Уравнение энергии в спектре температур имеет вид (Пермяков, Аммосов, 2003):

$$c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - c_b V \frac{\partial T}{\partial x} + L \frac{\partial W_l}{\partial \tau} + D I_k. \quad (2)$$

Миграцию грунтовой влаги, используя миграционную модель, можно записать в виде:

$$\frac{\partial W_b}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial W_b}{\partial x} \right) - \frac{\partial W_l}{\partial \tau} + I_k \quad (3)$$

или, используя уравнения Richards (1931) и Van Genuchten (1980), в насыщенных-ненасыщенных грунтах:

$$\frac{\partial \theta_b}{\partial \tau} = \frac{1}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{\partial \theta_l}{\partial \tau} + I_k. \quad (4)$$

Система уравнений (2)—(4) замыкается равновесной функцией количества незамерзшей воды:

$$W_b = W_b(T) = W_{nb}(T), \quad (5)$$

где c , c_b — объемная теплоемкость грунта и воды, Дж/(м³·К); T — температура, К; τ — время, с; x — пространственная координата, м; λ — теплопроводность грунта, Вт/(м·К); L — объемная теплота фазового перехода, Дж/м³; V — скорость фильтрации, м/с; k — коэффициент диффузии, м²/с; $\theta = \theta_l + \theta_b$ — суммарная объемная влажность (безразмерная величина), содержание объемного льда θ_l и воды θ_b ; k_f — коэффициент фильтрации, м/с; $h = P - z$ — напор, м; P — всасывающее давление влаги, м;

Уравнение (3) описывает диффузионный процесс переноса поровой влаги в ненасыщенных грунтах, а уравнение Richards (4) — фильтрационный процесс влаги в насыщенных — ненасыщенных грунтах. Система уравнений (2)—(4) нелинейная и численная реализация осуществляется неявной разностной схемой с использованием итераций (Пермяков, Аммосов, 2003).

3.3. Численный эксперимент

Численный эксперимент реализован применительно к природно-климатическим условиям Центральной Якутии на участке с разнотравной луговой растительностью. В эксперименте учитывались процессы тепло-влажноперевода атмосферными осадками, испарение с поверхности и внутрипочвенная конденсация.

Среднемесячное количество осадков, испарение, температура воздуха и эффективный коэффициент теплоотдачи взяты из метеосайтов, использующих официальные данные Росгидромета (<http://meteo.ru/>, <https://rp5.ru/>) и справочников по климату (Справочник по климату СССР, 1968), а также с натурных данных (Жирков и др., 2015; Жирков и др., 2016). Следует отметить, что в Центральной Якутии в среднегодовом балансе испарение преобладает над осадками (Мячкова, 1983).

Литологический разрез ключевого участка представлен на рис. 4. Теплофизические и массообменные характеристики, с учетом функциональной зависимости от температуры, суммарной влажности и льдистости для различных типов грунтов, заданы по данным, полученным авторами на научно-экспериментальном полигоне «Туймаада» Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН.

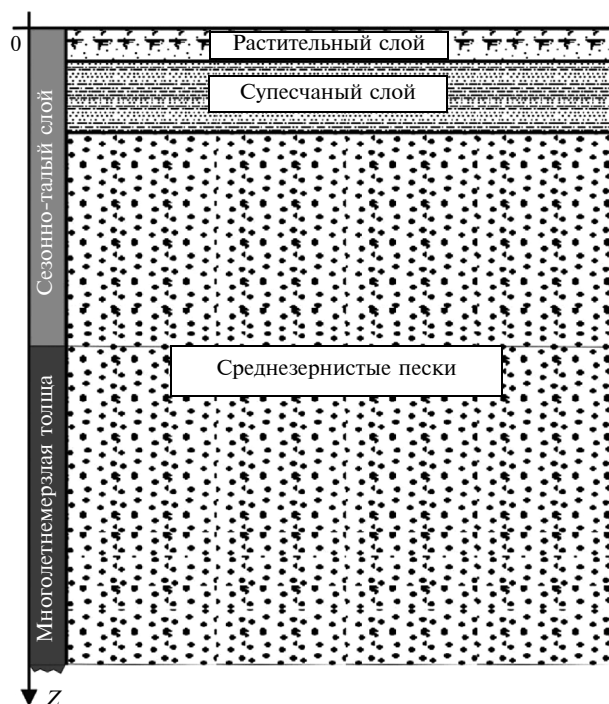


Рис. 4. Схема расчетной области

На поверхности грунта учитываем влияние внешней температуры и атмосферных осадков исходя из выражения:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_{\text{эф}}(T - T_c(\tau)), \quad (6)$$

$$k \frac{\partial W_B}{\partial z} = \theta_B(\tau). \quad (7)$$

На нижней границе (при $z = H$) выполняются условия теплоизоляции для температуры и непроницаемости для влажности:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad (8)$$

$$k \frac{\partial W_B}{\partial z} = 0. \quad (9)$$

Начальные распределения температуры и суммарной влажности задаются как:

$$T(z, 0) = T_0(z), \quad W(z, 0) = W_0(z), \\ z \in [0, H], \quad \tau > 0, \quad (10)$$

где $I_k = \partial W_k / \partial \tau$ — источник влажности от конденсации; D — объемная теплота фазового перехода пара в воду, Дж/м³.

3.4. Проверка адекватности численной модели

В области распространения многолетнемерзлых пород одним из важных результирующих па-

раметров состояния среды и ее динамики является глубина сезонного протаивания. Для проверки адекватности разработанной модели нами выполнен расчет хода сезонного протаивания. Сравнительный анализ динамики глубины протаивания по модели с учетом внутригрунтовой конденсации и без нее в сравнении с натурными замерами приведен на рис. 5.

Характер хода сезонного протаивания по модели с учетом конденсации и без ее учета существенно отличаются (см. рис. 5). Тепловлажностная модель без учета процесса внутрипочвенной конденсации довольно ясно отображает ход протаивания до максимума (конец сентября). Однако обратный процесс промерзания сезонноталого слоя она описывает довольно грубо. На месяц раньше, по сравнению с натурными данными, происходит смыкание деятельного слоя. Напротив, модель с учетом процесса внутрипочвенной конденсации более адекватно отражает процесс промерзания зоны «запирания» и практически совпадает с натурными данными, весьма реально описывая процесс протаивания и промерзания деятельного слоя. Усовершенствованная модель позволяет с высокой точностью рассчитать глубину и описать ход сезонного протаивания в течение года.

4. Результаты численного эксперимента и их обсуждение

4.1. Распределения температуры и суммарной влажности в зависимости от эмпирического параметра W_{RH}

Эмпирический параметр W_{RH} является решающим показателем интенсивности протекания процесса внутригрунтовой конденсации в различных типах грунта. Рассмотрим, как влияет

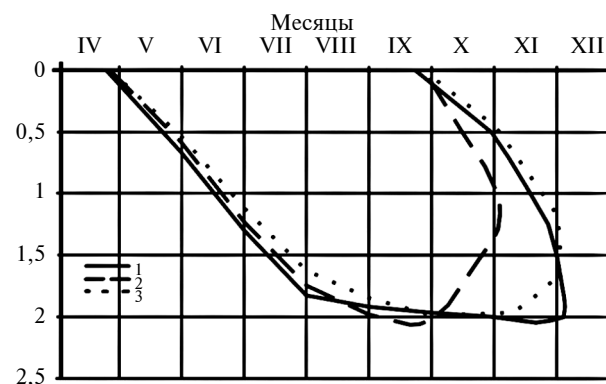


Рис. 5. Ход сезонного протаивания грунтов по:

1 — натурным данным; 2 — тепловлажностной модели без учета процесса внутрипочвенной конденсации; 3 — тепловлажностной модели с учетом процесса внутрипочвенной конденсации

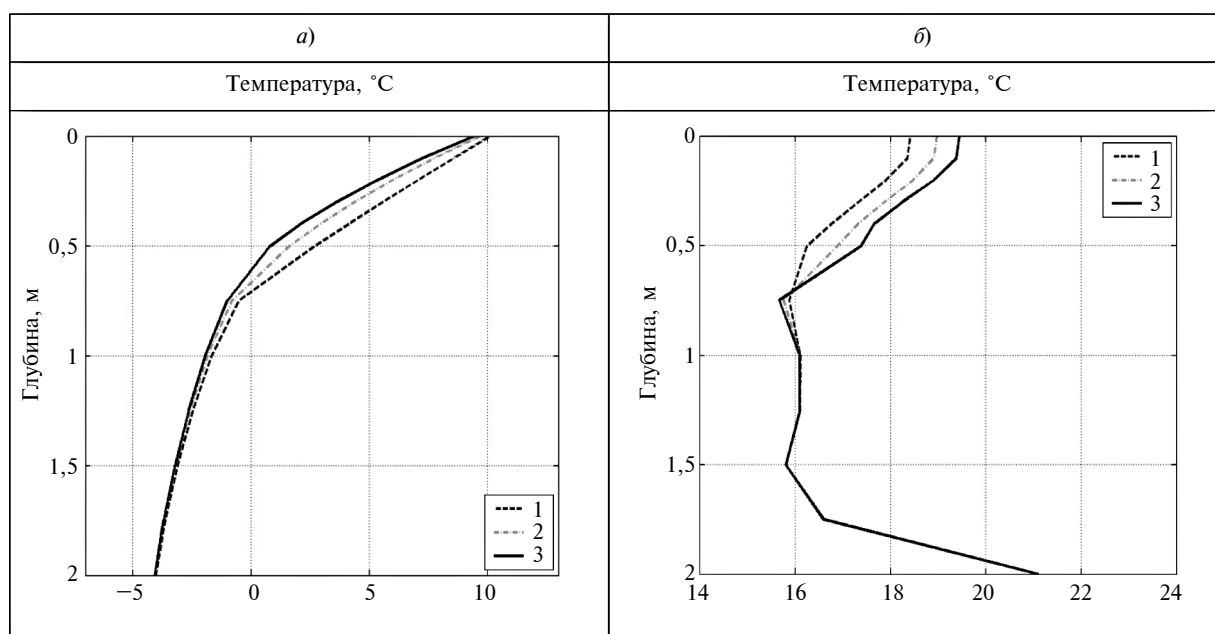


Рис. 6. Распределения температуры (а) и суммарной влажности (б) по глубине при различных значениях эмпирического параметра W_{RH} (конец мая):

1 — 0,0; 2 — 0,2; 3 — 0,4

этот параметр на распределение температуры и суммарной влажности массива грунта (рис. 6).

Как видно из рисунка 6, образование конденсата напрямую зависит от значения эмпирического параметра W_{RH} и при условии большего значения W_{RH} влажностное поле грунтов увеличивается. То есть при условии большего значения W_{RH} создаются условия для благоприятного развития процесса внутригрунтовой конденсации и интенсивность протекания его увеличивается. С другой стороны, распределение температуры по глубине показывает охлаждение при учете процесса внутрипочвенной конденсации. Это может объясняться увеличением влажности и, как следствие, увеличением испарения с грунтов. В первой половине летнего периода процесс испарения преобладает над конденсацией и приводит к поглощению тепла, не давая грунтам прогреться.

4.2. Динамика температурного и влажностного режимов грунтов с учетом и без учета внутрипочвенной конденсации за теплый период года

Для оценки влияния внутрипочвенной конденсации на термовлажностный режим грунтов сравним результаты расчетов динамики температурного и влажностного режимов грунтов по времени за один сезон (конец мая, июня, июля, августа, сентября и октября) с учетом и без учета внутрипочвенной конденсации (рис. 7).

Характер распределения температуры с глубиной, полученные без учета и с учетом конденсации, довольно сильно отличаются (см. рис. 7). В первой половине теплого периода года наличие внутрипочвенной конденсации оказывает охлаждающее влияние на грунты до 2 °С. Во второй половине лета отмечается тепляющее влияние до 2,5 °С (по сравнению с расчетом без учета конденсации). Это может быть объяснено увеличением интенсивности испарения с грунтов за счет увеличения их влажности в весенне-летний период и как следствие их охлаждение. Как показывают исследования В. А. Королева и Л. Б. Блудушкиной (2015), испарение происходит в грунтах до глубины 0,5 м. Соответственно, в первой половине теплого периода, когда слой образования конденсата находится до глубины 0,5 м, большая часть тепла затрачивается на испарение, охлаждая грунты. Во второй половине этот слой опускается глубже 0,5 м и интенсивность испарения уменьшается, как следствие в грунты поступает дополнительное количество тепла за счет процесса конденсации. Другими факторами тепляющего влияния на грунты во второй половине лета могут являться ослабление поступления лучистой энергии солнца и процессы, связанные с изменением жизнедеятельности растений в конце вегетационного периода.

Распределение влажности грунтов по глубине изменяется в широком диапазоне от 0,4 до 2,2 %. В интервале фазовых переходов (в случае с уче-

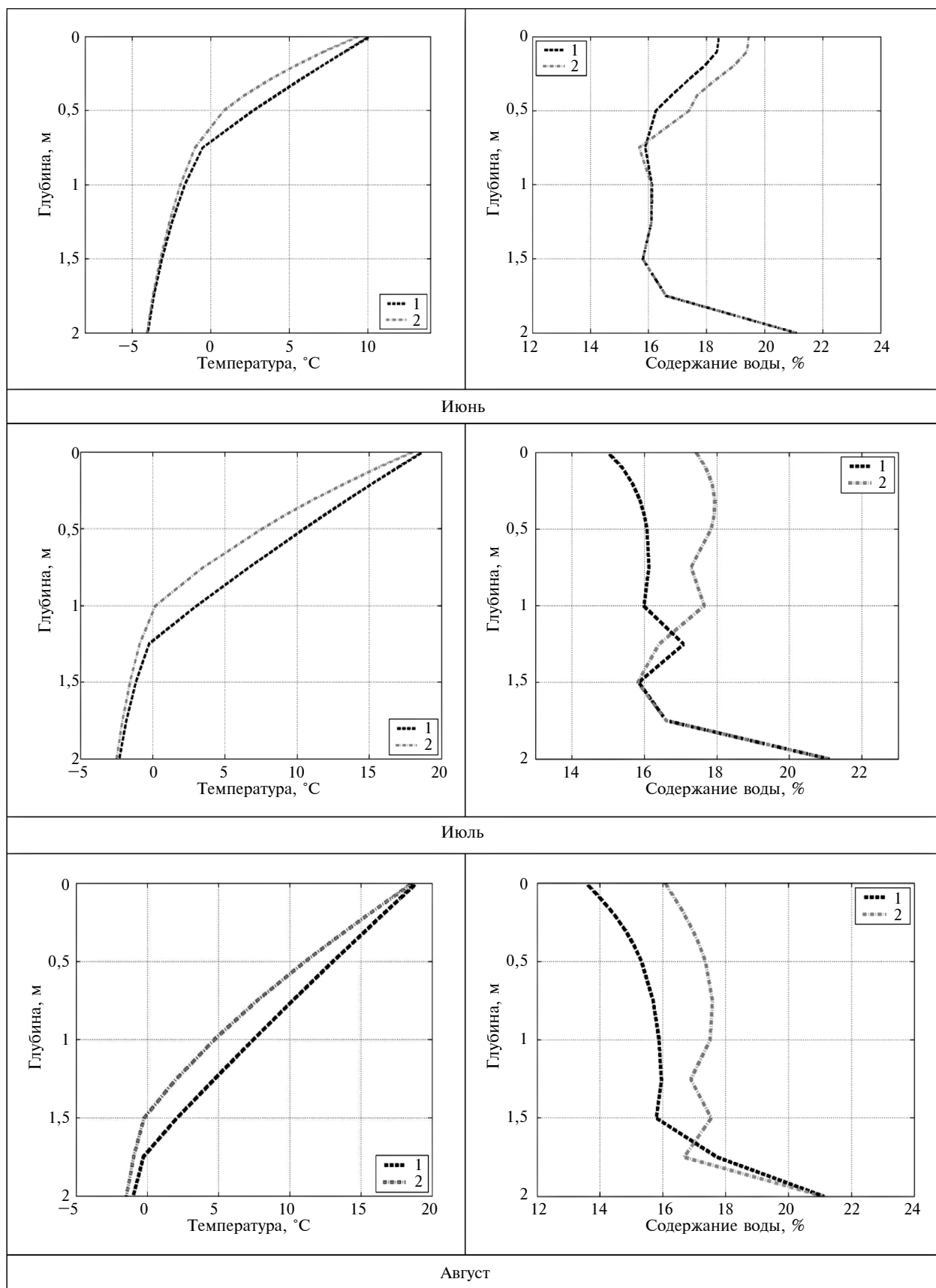


Рис. 7. Динамика температуры (а) и влажности грунтов (б) по глубине, за теплый период года по модели влажностной форме: 1 (красный) — без учета конденсации; 2 (зеленый) — с учетом конденсации

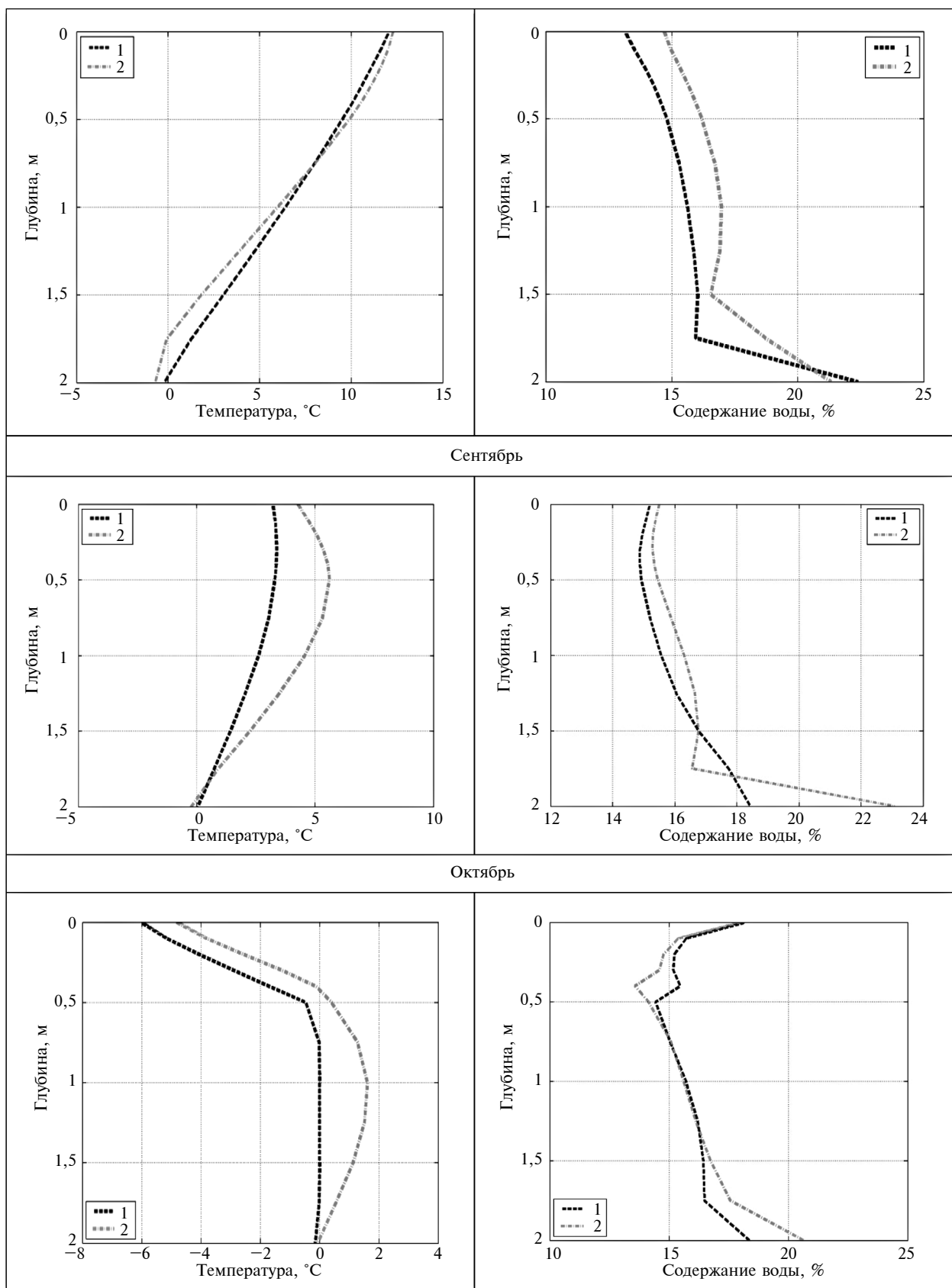


Рис. 7. (Окончание)

том внутригрунтовой конденсации) в распределении влажности наблюдается зона резкого иссушения, отклоняющаяся от нормали от 1 до 2,5 % в разные периоды. Это связано с разностью скоростей протекания процессов теплообмена и массообмена. Процесс массообмена запаздывает по сравнению с теплообменом, поэтому во влажностном поле, по нашему мнению, близь границы фазовых переходов наблюдается неравномерное распределение.

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, процесс конденсации водяных паров в горных породах в разной степени влияет на термовлажностный режим грунтов. Это определяется климатическими и микроклиматическими условиями, а также наличием растительности и составом пород.

Предполагалось, что процесс внутригрунтовой конденсации будет способствовать повышению температуры грунтов как внутренний источник тепла в течение всего теплого периода. Однако, как показали результаты, влияние конденсации водяных паров является более сложным процессом. В годовом цикле теплооборотов в грунтах выделяется два этапа: охлаждение — в первой и отопление — во второй половине лета. Это объясняется тем, что в первой половине теплого периода (при небольшой глубине сезонного протаивания) значительная часть тепла, поступающего в грунты с атмосферы, тратится на процессы протаивания и испарения. Тепло, выделяемое при конденсации, в этот период незначительно. Во второй половине лета темп протаивания грунтов уменьшается (относительно первого периода), глубина протаивания опускается ниже, а в порах пород появляется влагонасыщенная воздушная среда, благоприятно сказывающаяся на возможности образования процесса конденсации. В этот период доля конденсации в формировании теплового режима становится значительной.

Условием для интенсивного протекания процесса конденсации водяных паров в грунтах являются большой градиент температуры (теплообороты на границе атмосфера — грунты), наличие влажного воздуха и пористость пород. Наиболее благоприятные условия для протекания этого процесса возможны в областях с резко континентальным климатом и большим количеством атмосферных осадков, выпадающих в короткопериодном режиме. Такими территориями в зоне распространения криолитозоны являются горные и предгорные области. В их пределах за счет формирования микроклиматических условий выделяются орографические области (долины, различные по экспозиции склоны), где интенсив-

ность процесса конденсации может значительно варьировать.

В Центральной Якутии, учитывая климатические особенности, к таким областям относятся районы, сложенные с поверхности средне- и крупнозернистыми песками с отсутствием или высокой разреженностью растительности.

5. Выводы

В результате натурных исследований установлено, что интенсивность выпадения конденсата зависит от тока воздуха в грунтах. Получены предельные значения выпадения конденсата для типичных грунтов Центральной Якутии в зависимости от наличия или отсутствия почвенно-растительного слоя.

В процессе выполнения настоящих исследований разработана математическая модель тепло-влажноперевода с учетом процесса внутригрунтовой конденсации как внутреннего источника тепла и влаги. В конце летнего сезона (конец сентября — начало октября) происходит «запирание» влажного талого слоя. Математическая модель с учетом процесса внутрисочвенной конденсации более адекватно отражает процесс промерзания зоны «запирания».

В результате численного эксперимента в условиях Центральной Якутии установлено, что при учете процессов испарения и конденсации внутригрунтовой влаги суммарное влагосодержание грунтов в годовом цикле повышается. В весенне-летний период идет интенсивный процесс испарения внутрисочвенной влаги, за счет чего происходит понижение температуры. В летне-осенний период рост конденсации водяного пара сопровождается повышением теплосодержания грунта.

Влияние внутригрунтовой конденсации в формировании термовлажностного режима грунтов не вызывает сомнения, и этот факт доказывает необходимость его учета при балансовых расчетах практически в любых природных и техногенных условиях.

Принимая во внимание вышесказанное, становится понятным особо важное значение конденсации водяных паров в районах развития прерывистой криолитозоны, где незначительные нарушения теплового баланса вызывают резкое изменение мерзлотных условий.

Благодарности

Работа выполнена в рамках бюджетного проекта РАН IX.135.2.3, при поддержке РФФИ (грант № 18-55-53041) при поддержке гранта «Научно-образовательный фонд поддержки молодых ученых Республики Саха (Якутия)» (грант № 201604010191).

Библиографический список

1. Банцкина Т. В., Михайлов В. М. Некоторые особенности теплопереноса в крупнообломочных склоновых отложениях // Криосфера Земли. 2004. Т. VIII, № 4. С. 34–40.
2. Банцкина Т. В., Михайлов В. М. К оценке роли внутригрунтовой конденсации водяных паров в формировании теплового и водного режимов крупнообломочных склоновых отложений // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 1, с. 40–45.
3. Булдович С. Н., Афанасенко В. Е., Мелентьев В. С. Некоторые данные о конденсации водяных паров в грубообломочных грунтах Южной Якутии // Мерзлотные исследования, вып. XVII / Под. ред. В. А. Кудрявцева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. С. 169–175.
4. Булдович С. Н. Особенности тепло- и влагообмена в породах в зоне развития прерывистой мерзлоты и их влияние на формирование мерзлотно-геологических условий (на примере Чульманской впадины): Автореф. дис. канд. геол.-минер. наук. — М., 1982. — 25 с.
5. Ершов Э. Д. Влагоперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах. — М.: Изд-во МГУ, 1979. — 2014 с.
6. Ефимов С. С. Влага гигроскопических материалов. — Новосибирск: Наука, 1986. — 160 с.
7. Жирков А. Ф., Железняк М. Н. Влияние инфильтрации летних атмосферных осадков на температурный режим песчаных грунтов // Сборник трудов Международной конференции «Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы». — Тюмень, Изд-во Тюм. ГНУ, 2015. — С. 135–137.
8. Жирков А. Ф., Варламов С. П., Железняк М. Н. Результаты годичного цикла наблюдений температурного режима грунтов в естественных условиях и при нарушении покровов // Материалы Пятой конференции геокриологов России. Т. 2. Ч. 5. — М.: Изд-во МГУ, 2016. — С. 52–58.
9. Климович В. В. К вопросу о роли конденсации в формировании ресурсов грунтовых вод // Вопросы гидрогеологии криолитозоны. — Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1975. — С. 157–164.
10. Колосков П. И. О внутрисочечной конденсации и сорбции атмосферных паров. — Метеорология и гидрология. М., 1938. № 1. С. 73–76.
11. Королев В. А., Блудушкина Л. Б. Взаимосвязь потенциала влаги в грунтах с параметрами испарения из них воды // Инженерная геология. 2015. № 3. С. 22–33.
12. Кудинов В. А., Карташов Э. М. Техническая термодинамика. — М.: Высшая школа, 2000. — 261 с.
13. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. — М.: Атомиздат, 1979. — 416 с.
14. Лебедев А. Ф. Почвенные и грунтовые воды. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1936.
15. Мячкова Н. А. Климат СССР. — М.: Изд-во МГУ, 1983. — 192 с.
16. Нашокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача. — М.: Высшая школа. — 496 с.
17. Нерсесова З. А. Изменение льдистости грунтов в зависимости от температуры // Докл. АН СССР. — 1950. — Т. 75, № 6. — С. 845–846.
18. Огильви Н. А. Внутригрунтовая конденсация и испарение в пустынях и их гидрогеологическое значение. — Бюллетень Московского об-ва испытателей природы, серия геологич. 1963, т. XXXVIII, вып. 2.
19. Пермяков П. П., Аммосов А. П. Математическое моделирование техногенного загрязнения в криолитозоне. — Новосибирск: Наука, 2003. — 224 с.
20. Рейнюк И. Т. Конденсация в деятельном слое вечной мерзлоты // Тр. ВНИИ 1. Том XIII, вып. 15 «Мерзлотоведение». — Магадан, 1959. — С. 287–310.
21. Справочник по климату СССР. — Л.: Гидрометеоиздат, 1968. — Вып. 24, Ч. IV. — 400 с.
22. Сумгин М. И. Общее мерзлотоведение. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1940. — 195 с.
23. Тугаринов В. В. Некоторые результаты изучения процессов конденсации водяных паров из воздуха // Вопросы изучения подземных вод и инженерно-геологических процессов. — М.: Изд-во АН СССР, 1955.
24. Цытович Н. А. К теории равновесного состояния воды в мерзлых грунтах // Изд. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. — 1945. — Т. 9, № 5–6. — С. 493–502.
25. Чудновский А. Ф. Теплофизика почв. — М.: Наука, 1976. — 352 с.
26. Шепелев В. В. Роль процессов конденсации в питании подземных вод мерзлой зоны // Взаимосвязь поверхностных и подземных вод мерзлой зоны. — Якутск, 1980. — С. 43–56.
27. Шепелев В. В. Надмерзлотные воды криолитозоны. — Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2011. — 169 с.
28. Desrayaud G., Lauriat G. Heat and mass transfer analogy for condensation of humid air in a vertical channel. Heat and Mass Transfer, Elsevier, 2001, Volume 37, Issue 1, pp. 67–76.
29. Hann J. Ubereine neue Quellentheorie auf meteorologischer Basis // Z. Osterreichischen Gez. fur Meteorol. 1880. Vol. 15.
30. Harlan R. L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil // Water Resource Res. — 1973. — Vol. 9, N 5. — P. 1314–1323.
31. H. Sun, Guy Lauriat, Xavier Nicolas. Natural convection and wall condensation or evaporation in humid air filled cavities subjected to wall temperature variations. International Journal of Thermal Sciences, Elsevier, 2011, 50 (5), pp. 663–679.
32. Jenny Lindblom, Bo Nordell Underground condensation of humid air for drinking water production and subsurface irrigation. Desalination, Volume 203, Issues 1–3, 5 February 2007, Pages 417–434.
33. Richards L. A. Capillary condition of liquids through porous media // Physics. — 1931. — Vol. 1. N. 2. — P. 318–333.
34. Taylor G. S., Luthin J. H. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing // Canad. Geotechnical J. — 1978. — Vol. 15. — P. 548–555.
35. Van Genuchten M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil. Sci. Soc. Am. J. — 1980. — Vol. 44 (5). — P. 892–898.
36. http://www.rgo-speleo.ru/biblio/dubl_kondens.htm
37. <http://meteo.ru/>
38. <https://rp5.ru/>

THE INFLUENCE OF THE SUBSOIL CONDENSATION ON THE THERMAL AND MOISTURE REGIME OF THE FROZEN SOILS

A. F. Zhirkov, Researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, zhirkov_af@mail.ru;

P. P. Permyakov, Ph. D. (Physics and Mathematics), Dr. Habil., Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, SB RAS, Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, permyakov2005@mail.ru,

M. N. Zheleznyak, Ph. D. (Geology and Mineralogy), Dr. Habil., Melnikov Permafrost Institute SB RAS, fe1956@mail.ru. Yakutsk, Russia

References

1. Bantsekin T. V., Mikhailov V. M. Some peculiarities of heat-mass transfer in the coarse clastic slope deposits. *Cryosphere of the Earth*, 2004, Vol. VIII, No. 4, P. 34–40. [Bantsekin T. V., Mikhailov V. M. Nekotorye osobennosti teplomassopere-nosa v krupnooblomochnykh sklonovykh otlozheniyakh. *Kriosfera Zemli*, 2004, T. VIII, No. 4, S. 34–40] [in Russian]
2. Bantsekin T. V., Mikhailov V. M. For the assessment of the role of subsoil condensation of the water vapor in forming the heat and water regimes of coarse clastic slope deposits. *Cryosphere of the Earth*, 2009, Vol. XIII, No. 1, P. 40–45 [Bantsekin T. V., Mikhailov V. M. K otsenke roli vnutrigruntovoi kondensatsii vodyanikh parov v formirovani teplovogo i vodnogo rezhimov krupnooblomochnykh sklonovykh otlozheniy. *Kriosfera Zemli*, 2009, T. XIII, No. 1, S. 40–45] [in Russian]
3. Buldovich S. N., Afanasenko V. E., Melentiev V. S. Some data about the water vapor condensation in rudaceous soils of Southern Yakutia. *Cryosolic research*, Vol. XVII. Edited by V. A. Kudryavtsev. Moscow, Publishing house of Moscow State University, 1978. P. 169–175 [Buldovich S. N., Afanasenko V. E., Melentiev V. S. Nekotorye dannye o kondensatsii vodyanykh parov v grubooblomochnykh gruntakh Yuzhnoi Yakutii. *Merzlotnye issledovaniya*, vyp. XVII. Pod. red. V. A. Kudryavtseva. M., Izd-vo Mosk. Un-ta, 1978. S. 169–175] [in Russian]
4. Buldovich S. N. Peculiarities of heat exchange and moisture exchange in the rocks in the discontinuous frozen subsoil development area and their impact on forming the cryosolic-hydrogeological conditions (a case study of Chulmanskaya depression): *The thesis abstract for a Candidate Degree in Geological-Mineralogical Sciences*. Moscow, 1982. 25 p. [Buldovich S. N. Osobennosti teplo- i vlagoobmena v porodakh v zone razvitiya preryvистой merzloty i ikh vlianie na formirovaniye merzlotno-gydrogeologicheskikh usloviy (na primere Chulmanskoj vpadiny): Avtoref. dis. kand. geol.-min. nauk. — M., 1982. — 25 s.] [in Russian]
5. Ershov E. D. Moisture transfer and cryogenic textures in the dispersive rocks. Moscow, Publishing house of Moscow State University, 1979. 204 p. [Ershov E. D. Vlagopereenos i kriogennyye tekstury v dispersnykh porodakh. — M.: Izd-vo MGU, 1979. — 204 s.] [in Russian]
6. Ephimov S. S. Moisture of hygroscopic materials. Novosibirsk, Nauka. 1986. 160 p. [Ephimov S. S. Vлага гигроскопических материалов. — Novosibirsk: Nauka, 1986. — 160 s.] [in Russian]
7. Zhirkov A. F., Zheleznyak M. N. Influence of infiltration of the summer precipitation upon the temperature regime of sand soils. In: *the Collected papers of the International conference “the Arctic, the Subarctic zone: patchiness, contrast, variability of the cryosphere”*. Tumen, Publishing house of Tumen State Oil and Gas University, 2015. P. 135–137 [Zhirkov A. F., Zheleznyak M. N. Vlianie infiltratsii letnikh atmosferynykh osadkov na temperaturny rezhim peschanykh gruntov // v Sbornike trudov Mezhdunarodnoi konferentsii “Arktika, Subarktika: mozaichnost, kontrastnost, variativnost kriosfery”. Tumen, Izd-vo Tum. GUNU, 2015. S. 135–137] [in Russian]
8. Zhirkov A. F., Varlamov S. P., Zheleznyak M. N. Results of an annual cycle of observations of the soil temperature regime in natural conditions and with the cover breach. *The Proc. of the Fifth conference of frost scientists of Russia*, Volume 2., Part 5. Moscow, Publishing house of Moscow State University, 2016. p. 52–58 [Zhirkov A. F., Varlamov S. P., Zheleznyak M. N. Rezultaty godichnogo tsikla nabludeniy temperaturnogo rezhima gruntov v estestvennykh usloviakh i pri narushenii pokrovov. *Materialy Pyatoi konferentsii geokriologov Rossii*, T. 2., ch. 5. — M., Izd-vo MGU, 2016. S. 52–58] [in Russian]
9. Klimochkin V. V. On the role of condensation in forming the subsoil water resources. *Issues of geohydrology of the cryolithic zone*. Yakutsk, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 1975. P. 157–164. [Klimochkin V. V. K voprosu o roli kondensatsii v formirovani resursov gruntovykh vod. *Voprosy gidrogeologii kriolitozony*. Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, 1975. S. 157–164] [in Russian]
10. Koloskov P. I. On subsoil condensation and sorption of atmospheric water vapors. *Meteorology and hydrology*. Moscow, 1938, No. 1, p. 73–76. [Koloskov P. I. O vnutripochvennoi kondensatsii i sorptsii atmosferynykh parov. *Meteorologia i gidrologia*. Moscow, 1938, No. 1. S. 73–76] [in Russian]
11. Korolyov V. A., Bludushkina L. B. Interconnection of the moisture potential in soils with parameters of water evaporation from them. *Engineering geology*, 2015, No. 3. P. 22–33 [Korolev V. A., Bludushkina L. B. Vzaimisvyaz potentsiala vlagi v gruntakh s parametrami isparenia iz nikh vody. *Inzhenernaya geologiya*, 2015, No. 3. S. 22–33] [in Russian]
12. Kudinov V. A., Kartashov E. M. Engineering thermodynamics. Moscow, Vysshaya shkola. 2000. 261 p. [Kudinov V. A., Kartashov E. M. *Tekhnicheskaya termodinamika*. — M.: Vysshaya shkola, 2000. — 261 s.] [in Russian]
13. Kutateladze S. S. Fundamentals of the heat exchange theory. Moscow, Atomizdat, 1979. 416 p. [Kutateladze S. S. *Osnovy teorii teplotobmena*. — Moskva: Atomizdat, 1979. — 416 s.] [in Russian]
14. Lebedev A. F. Soil and ground water. Moscow, Leningrad, Izd-vo AN SSSR. 1936. [Lebedev A. F. *Pochvennyye i gruntivnye vody*. M.; L.: Izd-vo AN SSSR. 1936] [in Russian]
15. Myachkova N. A. The USSR Climate. Moscow, Izd-vo MGU. 1983. 192 p. [Myachkova N. A. *Klimat SSSR*. — M.: Izd-vo MGU, 1983. — 192 s.] [in Russian]
16. Naschokin V. B. Engineering thermodynamics and heat transmission. Moscow, Vysshaya shkola. 496 p. [Naschokin V. B. *Tekhnicheskaya termodinamika i teploperedacha*. — M.: Vysshaya shkola. — 496 s.] [in Russian]

17. Nersesova Z. A. Change of soil iciness depending on the temperature. *The Report of the Academy of Sciences of the USSR*. 1950. Vol. 75, No. 6. P. 845–846 [Nersesova Z. A. Izmenenie ldistosti gruntiv v zavisimosti ot temperatury. Dokl. AN SSSR. — 1950. — T. 75, No. 6. — S. 845–846] [in Russian]
18. Ogilvi N. A. Subsoil condensation and evaporation in deserts and their hydrogeological meaning. “*Newsletter of the Moscow society of the nature investigators, Geological Series*.” 1963. Vol. XXXVIII, Issue 2. [Ogilvi N. A. Vnutrigruntovaya kondensatsia i isparenje v pustynnykh i ikh gidrogeologicheskoe znachenie. “*Bulleten Moskovskogo ob-va ispytatelei prorody, seria geologich.*” 1963, t. XXXVIII, vyp. 2] [in Russian]
19. Permyakov P. P., Ammosov A. P. Mathematic simulation of technology-based pollution in the cryolithic zone. Novosibirsk, Nauka. 2003. 224 p. [Permyakov P. P., Ammosov A. P. Matematicheskoe modelirovanie tekhnogennoho zagryaznenia v kriolitozone. — Novosibirsk: Nauka, 2003. — 224 s.] [in Russian]
20. Reinuk I. T. Condensation in the active layer of the permafrost. *Proc. of the VNII I*, Vol. XIII, Issue 15 “*Frost science*”. Magadan, 1959, p. 287–310. [Reinuk I. T. Kondensatsia v deyatelnom sloe vechnoi merzloty // Tr. VNII I, Tom XIII, vyp. 15 “*Merzlotovedenie*”. Magadan, 1959, s. 287–310] [in Russian]
21. The USSR climate manual. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1968. Issue. 24, part IV. 400 p. [Spravochnik po klimatu SSSR. — L.: Gidrometeoizdat, 1968. — Vyp. 24, ch. IV. — 400 s.] [in Russian]
22. Sumgin M. I. General frost science. Moscow, Leningrad, Izd-vo AN SSSR. 1940. 195 p. [Sumgin M. I. Obschee merzlotovedenie. Izd-vo AN SSSR, M.-L., 1940. — 195 s.] [in Russian]
23. Tugarinov V. V. Some results of study of processes of the water vapor condensation from the air. In: *the collected papers “Issues of study of the underground water and engineering-geological processes”*. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1955. [Tugarinov V. V. Nekotorye rezultaty izucheniya protsessov kondensatsii vodyanykh parov iz vozdukha. V sb.: “*Voprosy izucheniya podzemnykh vod i inzhenerno-geologicheskikh protsessov*”. M., Izd-vo An SSSR, 1955] [in Russian]
24. Tsytoich N. A. Theory of balanced condition in the frozen soils. Geographical and geophysical series. Moscow, Izd-vo AN SSSR. 1945. Vol. 9, No. 5–6. P. 493–502. [Tsytoich N. A. K teorii ravnovesnogo sostoyaniya vody v merzlukh gruntakh // Izd. AN SSSR. Ser. geogr. i geophiz. — 1945. — T. 9, No. 5–6. — S. 493–502] [in Russian]
25. Chudnovsky A. F. Thermophysics of soils. Moscow, Nauka, 1976. 352 p. [Chudnovsky A. F. Teplofizika pochv. — Moskva: Nauka, 1976. — 352 s.] [in Russian]
26. Shepelev V. V. Role of condensation processes in underground water recharge of the frozen zone. *Interconnection of surface and underground water of the frozen zone*. Yakutsk, 1980, P. 43–56. [Shepelev V. V. Rol protsessov kondensatsii v pitanii podzemnykh vod merzloi zony // Vzaimisvaz poverkhnostnykh i podzemnykh vod merzloi zony. Yakutsk, 1980, s. 43–56] [in Russian]
27. Shepelev V. V. Supermafrost water of cryolithic zone. Novosibirsk: Academic publishing house “Geo”, 2011. 169 p. [Shepelev V. V. Nadmerzlotty vody kriolitozony. — Novosibirsk: Akademicheskoye izdatelstvo “Geo”, 2011. — 169 s.] [in Russian]
28. Desrayaud G., Lauriat G. Heat and mass transfer analogy for condensation of humid air in a vertical channel. *Heat and Mass Transfer*, Elsevier, 2001. Vol. 37, Issue 1. P. 67–76.
29. Hann J. Ueber eine neue Quellentheorie auf meteorologischer Basis. *Z. Osterreichischen Ges. fur Meteorol.* 1880. Vol. 15.
30. Harlan N. L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil. *Water Resource Res.* 1973. Vol. 9, No. 5. P. 1314–1323.
31. H. Sun, Guy Lauriat, Xavier Nicolas. Natural convection and wall condensation or evaporation in humid air filled cavities subjected to wall temperature variations. *International Journal of Thermal Sciences*, Elsevier, 2011, 50 (5), pp. 663–679.
32. Jenny Lindblom, Bo Nordell Underground condensation of humid air for drinking water production and subsurface irrigation. *Desalination*, Vol. 203, Issues 1–3, 5 February 2007, P. 417–434.
33. Richards L. A. Capillary condition of liquids through porous media // *Physics*. — 1931. — Vol. 1. No. 2. — P. 318–333.
34. Taylor G. S., Luthin J. H. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing. *Canad. Geotechnical J.* 1978. Vol. 15. P. 548–555.
35. Van Genuchten M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* — 1980. Vol. 44 (5). P. 892–898.
36. [Electronic resource] Available at: http://www.rgo-speleo.ru/biblio/dubl_kondens.htm
37. [Electronic resource] Available at: <http://meteo.ru/>
38. [Electronic resource] Available at: <https://rp5.ru/>