

Оценка пампинг-эффекта в мерзлотных почвах типичной тундры Европейского северо-востока России

Л.Э. Лапина¹⁾, Д.А. Каверин²⁾, А.В. Пастухов²⁾*

¹⁾ Институт водных проблем РАН,
Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3

²⁾ Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
Россия, 167000, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28

Адрес для переписки: * *l.e.lapina@yandex.ru*

Реферат. Цель работы – оценить нелинейную волновую диффузию тепла (пампинг-эффект) в мерзлотных почвах типичной тундры Европейского северо-востока России на основе измерений температуры почвы. На участке исследований были заложены 5 профилей, поперечно пересекающих колею зимней дороги, под различными группировками тундровой растительности. В пределах каждого профиля проводились исследования морфологического строения и температуры почв в двух точках: в контуре колеи зимней дороги (антропоген) и на прилегающем целинном (фоновом) участке. Были описаны 10 почвенных разрезов и установлено 140 температурных логгеров компании «I-button» в 10 скважинах на глубинах 0, 2, 5, 10, 15, 20 и 40 см.

Для решения задачи использовали нелинейное уравнение теплопроводности с периодическим граничным условием на поверхности почвы и условием, что температура почвы стремится к некоторой константе при достаточно большой глубине. Известно, что решение поставленной задачи имеет инвариант, который может быть или больше среднегодовой температуры поверхности почвы, или меньше. Разница между этим инвариантом и среднегодовым значением температуры поверхности почвы определяет величину пампинг-эффекта в почве, для расчета которого важно знать зависимость коэффициента температуропроводности от температуры почвы. В работе использована ранее полученная на основе этих данных функциональная зависимость, вид которой обусловлен экспериментальными измерениями, опубликованными в литературе. Изучение данного эффекта полезно для выявления особенностей теплофизических характеристик различных точек наблюдения с разными видами подстилающей поверхности и типами почв, для определения влияния той или иной деятельности на температурный режим почв. Также на основе экспериментальных данных была проведена оценка коэффициентов температуропроводности как функции от температуры. Установлено, что грунтовая дорога приводит к уменьшению амплитуды колебаний температуры на поверхности почвы и увеличению ее среднегодовой температуры. Кроме того, для всех точек измерений были проведены расчеты для нескольких гипотетических значений амплитуды колебаний при той же среднегодовой температуре почвы. На большинстве участков показано, что чем больше амплитуда

колебаний температуры на поверхности, тем сильнее наблюдается охлаждение почвы.

Ключевые слова. Пампинг-эффект, коэффициент температуропроводности, нелинейная диффузия.

Estimation of the pumping effect in permafrost soils of the typical tundra of the European north-east Russia

L.E. Lapina¹⁾, D.A. Kaverin²⁾, A.V. Pastukhov²⁾

¹⁾ Institute of water problems of the Russian Academy of Sciences,
3 Gubkina str., Moscow, 119333, Russian Federation;

²⁾ Institute of biology Komi SC UrB of the Russian Academy of Sciences,
28 Kommunisticheskaya str., Syktyvkar, 167000, Russian Federation

Correspondence address: *l.e.lapina@yandex.ru*

Abstract. The aim of the research is to evaluate the nonlinear heat wave diffusion into the soil (pumping effect) based on soil temperature measurements. The study objects are 5 profiles, crossing the track of a winter road, which located under various groups of tundra vegetation. Within each profile, studies of the morphological structure and soil temperature were carried out at two points: in the contour of the winter road track (anthropogenic) and on the adjacent virgin (background) site. 10 soil profiles were performed and 140 I-button temperature loggers were installed in 10 shallow boreholes at depths of 0, 2, 5, 10, 15, 20 and 40 cm.

To solve the problem, a nonlinear heat conduction equation is used with a periodic boundary condition on the soil surface and the condition that the soil temperature tends to a certain constant at deep depth. It is known that the solution of this problem has an invariant, which can be either greater than the mean annual temperature of the soil surface, or less. The difference between this invariant and the mean annual value of the soil surface temperature determines the magnitude of the pumping effect in the soil, for the calculation of which it is important to know the dependence of the thermal conductivity coefficient on the soil temperature. In this paper, the functional dependence previously obtained on the basis of these data is used, the type of which is due to experimental measurements published in the literature. The study of this effect is useful for identifying the features of thermophysical characteristics at different observation points with different types of soil surface and soils, to determine the influence of a particular activity on the soil temperature regime. It is found that a soil road affects a decrease in the vibrations amplitude on the surface and an increase in mean annual soil temperature. In addition, for all measurement points, calculations were performed for several hypothetical values of the oscillation amplitude at the same mean annual soil temperature. In most points, it was shown that the greater the amplitude of temperature fluctuations on the surface, the stronger the cooling of the soil is observed.

Keywords. Pumping effect, thermal diffusivity, nonlinear diffusion.

Введение

Нелинейная волновая диффузия (пампинг-эффект) возникает в краевых задачах для нелинейного параболического уравнения типа теплопроводности с периодическими граничными условиями (Zuqanov, Khublaryan, 2006; Зырянов, 2013). Этот эффект заключается в том, что чисто гармоническое колебание изучаемой характеристики среды на границе области приводит к увеличению или уменьшению ее значения внутри области относительно ее среднего значения на границе. Пампинг-эффект проявляется в самых различных процессах, например, при росте льда (Зырянов, Круглихин, 2016).

В работе (Зырянов, 2007, с. 666) утверждается, что «при увеличении амплитуды многолетних колебаний температуры поверхности Мирового океана тепло, в силу отрицательности пампинг-эффекта для океана, будет «откачиваться» из глубинных слоев в атмосферу, а при уменьшении амплитуды, наоборот, тепло будет «закачиваться» в глубинные слои». Возникает вопрос: возможен ли такой эффект для других сред, например почвы? Ответ пока не очевиден. Кроме того, в работе (Зырянов, 2013, с. 237) утверждается, что «пампинг-эффект для колебательных процессов во льду (включая ледники, многолетнюю мерзлоту) является отрицательным. Это означает, что тепло будет откачиваться из нижних слоев ледового массива при увеличении амплитуды колебания температуры на его верхней границе. К примеру, амплитуда годовых колебаний температуры воздуха для Якутска достигает 40°C , в таком случае понижение температуры в нижних слоях мерзлоты составит величину 1.9°C ». Эта оценка была получена с использованием функции теплопроводности льда. Возникает второй вопрос: подтверждается ли натурными измерениями этот эффект «откачки тепла» в мерзлотных почвах? Поиску ответов на два поставленных вопроса и посвящена данная статья.

Пампинг-эффект изучался в ледяном покрове (Зырянов, Круглихин, 2016), в задачах, возникающих в океанологии (Зырянов, 2013). Наряду с диффузией тепла, этот механизм может влиять и на сток газов. Так, в работе (Углерод..., 2014) отмечено, что в начале апреля на болоте Медла-Пев-Нюр наблюдался сток углерода при отрицательных температурах. Анализ данных с этого болота показал, что температура почвы является одним из важнейших показателей, описывающих болотные экосистемы на временных отрезках порядка суток (Лапина и др., 2015).

Алгоритм расчета оценки нелинейной волновой диффузии

Рассматривается одномерное уравнение:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(F(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где $F(T)$ – функция теплопроводности почвы, зависящая только от температуры, ось z направлена вертикально вниз, $z = 0$ – поверхность почвы. Глубина z измеряется в см. Заметим, что температура почвы есть функция

глубины и времени, поэтому $F(T)$ неявным образом зависит и от глубины, и от времени.

Исследуется периодическая задача на полупрямой $z > 0$ с граничными условиями

$$T(z = 0) = f(t), \quad T(z \rightarrow \infty) = C < \infty, \quad (2)$$

– периодическая функция с периодом τ . Обычно имеет вид:

$$f(t) = T_0 + T_1 \cos(\omega t), \quad (3)$$

где в уравнении (1) $T(z, t)$ – температура почвы на глубине z в момент времени t ($^{\circ}\text{C}$), в формулах (2) и (3) t – время (сутки), ω – частота годовых колебаний (рад сут^{-1}), T_0 – среднегодовая температура поверхности почвы ($^{\circ}\text{C}$), T_1 – амплитуда годовых колебаний. В данной работе исследуются годовые колебания, хотя нелинейная волновая диффузия тепла в почву будет и для суточных колебаний, особенно заметных в летний период, когда амплитуды достаточно большие. При отсутствии колебаний исследуемого эффекта нет.

Как доказано в работе (Zugyanov, Khublaryan, 2006), периодическое решение этой задачи стремится при $z \rightarrow \infty$ к константе T^{∞} , которая является решением уравнения:

$$\Psi(T^{\infty}) = \langle \Psi(f(t)) \rangle, \quad (4)$$

где $\Psi(T) = \int F(T) dT$, $\langle u \rangle = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} u dt$ – среднее значение функции u за период колебаний.

Разность $T^{\infty} - T_0$ является количественной оценкой пампинг-эффекта. Знак этой разности определяет направление действия нелинейной волновой диффузии тепла. При выводе формулы (4) использовано предположение, что решение уравнения (1) с граничными условиями (2) может содержать только кратные ω частоты. Для температуры почвы естественен годовой ход температуры и суточные колебания, которые кратны частоте ω . Рассмотрение более сложных ситуаций требует развития этой теории и уточнения формулы (4). Именно формула (4) используется для расчета T^{∞} в данной работе.

Объекты исследований и методы анализа данных

Полевые работы проводились сотрудниками Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН в августе 2014 и 2015 гг. на ключевом участке, расположенном в Ненецком автономном округе в районе Северо-Хоседаюсского нефтяного месторождения, в 55 км к северо-востоку от метеостанции Хорей-Вер. Ключевой участок исследований был заложен в пределах урочища Изъямыльк в заболоченной долине р. Изъямылькшор (левый приток р. Колва). Территория исследований относится к южной части типичной тундры. Среднегодовая температура по данным метеостанции в 2014 г. составила -4.5°C , среднегодовое количество осадков 361 мм. На ключевом участке исследова-

ний зимняя дорога пересекает ландшафты с кустарничковой и кустарниковой растительностью на суглинистых почвах и крупнобугристо-мочажинный болотный комплекс на торфяных мерзлотных почвах с кустарничково-лишайниковой растительностью. Дорога была введена в эксплуатацию в 2007 г. и активно использовалась до 2010 г. в период строительства объектов инфраструктуры нефтяного месторождения. В последующие годы дорога периодически эксплуатировалась в зимнее время для транспортировки грузов на территорию месторождения. На участке исследований было заложено 5 профилей, поперечно пересекающих колею зимней дороги, под различными группировками тундровой растительности. Исследования морфологического строения и температуры почв проводились в пределах каждого профиля в двух точках: в контуре колеи зимней дороги и на прилегающем целинном (ненарушенном) участке. Всего было заложено 10 почвенных разрезов и установлено 140 температурных логгеров компании «I-button» в 10 поверхностных скважинах на глубинах 0, 2, 5, 10, 15, 20 и 40 см.

Краткое описание рассматриваемых профилей приведено в табл. 1, более подробное описание участка исследований опубликовано в работе (Каверин и др., 2019). Непрерывные температурные измерения проводились в период с 15 августа 2014 по 15 июля 2015 гг.

Все данные аппроксимировались на всех глубинах измерений каждые сутки функцией вида: $T(z,t) = T_0(z) + A(z)\sin(\omega t + \varphi)$, где $T(z,t)$ – температура почвы в момент времени t на глубине z (°C), $T_0(z)$ – среднесуточная температура почвы (°C), $A(z)$ – амплитуда суточных колебаний (°C), ω – частота суточных колебаний (рад час⁻¹), t – время (час), φ – фаза (рад). Затем амплитуды суточных колебаний аппроксимировались функцией вида:

$$A = A_0 \exp(-\beta z).$$

Коэффициент температуропроводности (см² час⁻¹) рассчитывался по формуле (Микайылов, Шеин, 2010):

$$k_T(z_1) = \frac{\pi (z_2 - z_1)^2}{24 \ln^2 \left(\frac{A(z_2)}{A(z_1)} \right)}, \quad (5)$$

где z_1, z_2 – соседние точки по вертикали ($z_2 > z_1$), $A(z)$ – амплитуда колебаний в точке z . В работе использовались только значения на глубинах 0 и 2 см.

Таким образом, получали значения коэффициентов температуропроводности каждые сутки. Некоторые результаты расчетов приведены в работе (Лапина и др., 2017). К сожалению, для первого профиля антропогенно нарушенного не удалось найти параметры аппроксимации для отрицательных температур. Поэтому там оценки получить не удалось, в отличие от фонового. Данные измерений были использованы в работе (Лапина и др., 2017), где было показано, что наибольшие суточные колебания температуры наблюдались на плоскобугристом торфянике.

Таблица 1. Описание профилей

Table 1. Description of profiles

Профиль	Описание
1, фон*	Почвы аллювиально-слоистые на слоистых аллювиальных песках, глубина СТС*** 110 см. Лишайниково-кустарничковая растительность: ерник, шикша, морошка, брусника, травы, лишайники, политриховые мхи.
1, антр**	Почвы аллювиальные слоистые, антропогенно-нарушенные на слоистых аллювиальных песках. Осоково-пушицево-моховая растительность, разнотравье и карликовая березка.
2, фон	Почвы аллювиальные глееватые на слоистых аллювиальных песках, глубина СТС 120-130 см. Ивняково-ерниковая травянисто-моховая растительность: брусника, мхи, осока.
2, антр	Почвы аллювиальные глееватые антропогенно-нарушенные на слоистых аллювиальных песках. Многолетняя мерзлота до глубины 150 см не обнаружена. Преобладают травы, зеленые мхи, пушица.
3, фон	Плоскобугристый торфяник. Почвы торфяные олиготрофные мерзлотные, глубина СТС 45 см. Кустарничково-лишайниковая растительность: голубика, брусника, багульник, морошка, шикша, лишайники, редко травы и политриховые мхи.
3, антр	Почвы торфяные олиготрофные мерзлотные антропогенно-нарушенные. Многолетняя мерзлота на глубине 45 см. Нарушенная поверхность плоскобугристого торфяника с оголенным торфом в колее, растительность отсутствует. На поверхности оголенного торфа морозобойные трещины.
4, фон	Глеезем криометаморфический на пылеватых суглинках, глубина СТС больше 150 см. Кустарничково-лишайниковая тундра, отдельные кусты высотой 20-40 см.
4, антр	Торфяно-глеезем криометаморфический на пылеватых суглинках. Многолетняя мерзлота в пределах 1.5 метра отсутствует. Растительность отсутствует, на оголенной суглинистой поверхности много поврежденных корней карликовой ивы.
5, фон	Ивняково-моховая тундра, высота ивнякового яруса 1.5-2 м. Торфяно-глеезем криометаморфический на пылеватых суглинках, глубина СТС больше 150 см. В растительном покрове хвощ, мхи, травы, кустарники карликовой березки высотой до 1 м.
5, антр	Торфяно-глеезем криометаморфический антропогенно-нарушенный на пылеватых суглинках. Многолетняя мерзлота в пределах 1.5 м отсутствует. Колея зарастает осоками и пушицей.

* – профиль на целинных (вне дороги) участках;

** – профиль в колее зимней дороги;

*** – СТС – сезонноталый слой.

Результаты и их обсуждение

Заметим, что большинство исследователей рассматривает коэффициент температуропроводности как функцию от влажности почвы, например, (Калужный, Лавров, 2019). Но для оценки пампинг-эффекта в почвах, исходя из уравнения (1), необходимо знать функцию температуропроводности, как функцию от температуры. Из работы (Гаврильев, Кузьмин, 2009) следует, что вид зависимости коэффициента температуропроводности связан с температу-

рой, а параметры этой зависимости зависят от типа почвы и влажности. Поэтому зависимость искали в виде:

$$k_T = \alpha T^2 + \beta T + c + \gamma T^{-2/3}, \quad (6)$$

где k_T – коэффициент температуропроводности ($\text{см}^2 \text{ час}^{-1}$), T – температура почвы ($^{\circ}\text{C}$), α , β , c , γ – эмпирические параметры, которые находятся методом наименьших квадратов и размерность которых такова, чтобы размерность соответствующего слагаемого была равна размерности коэффициента температуропроводности. Для того, чтобы при интегрировании формулы (6) не возникало неопределенности в точке $T=0$, взята дробная степень показателя, а не степени, равная минус 1.

Значения аппроксимации, полученные по этим параметрам, опубликованы в работе (Лапина, 2019). Рассчитанные коэффициенты отдельно делились на две группы: при отрицательных температурах и при положительных. Заметим, что формула (5) не всегда корректна. Например, она неверна на большой глубине, где амплитуды колебаний практически малы и может возникнуть ситуация деления на очень маленькое число, близкое к нулю (анализ бесконечно малых показывает, что при $z \rightarrow \infty$, $k_T \rightarrow \infty$, что очевидно нереально). Кроме того, когда амплитуды колебаний температуры в двух соседних точках близки, аргумент логарифма близок к 1 (а логарифм 1 равен нулю), соответственно также может возникнуть ситуация некорректности формулы. Поэтому полученные результаты проходили проверку на корректность. В итоге получили функциональную зависимость от температуры среды (Лапина, 2019). В некоторых случаях не удалось получить ее ввиду большого числа некорректных данных. Поэтому расчет коэффициента температуропроводности представляет собой отдельную задачу. Как понятно из алгоритма расчета, определение функции температуропроводности является ключевой для оценки направленности результирующего (за период колебаний) потока тепла.

Результаты расчетов представлены в табл. 2. Первое значение амплитуды колебаний температуры для каждого участка соответствует результатам расчетов по измерениям, остальные брали для оценки зависимости пампинг-эффекта от амплитуды колебаний. При этом среднегодовая температура была такой же, что и по измерениям. Расчеты показали, что чем больше амплитуда годовых колебаний, тем сильнее охлаждающий эффект, или иными словами, тем больше «откачивается» тепла из нижних слоев грунта. Заметим, что на плоскобугристом торфянике наблюдались наибольшие амплитуды колебаний температуры и там же зафиксировано самое высокое расположение многолетней мерзлоты (см. табл.1). Возможно, именно ввиду больших годовых колебаний мерзлоты там лучше сохранилась по сравнению с соседними участками. Таким образом, натурные измерения подтверждают наличие влияния амплитуды годовых колебаний на температурный режим почвы, а также тот факт, что на мерзлотных почвах с увеличением амплитуды колебаний усиливается «откачка» тепла. Поскольку в настоящей работе использованы данные измерений на очень небольшой площади мерзлоты, имеет смысл проверить и

на других объектах этот эффект. Скорее всего, значение T^{∞} зависит от типа почвы, растительности и влажности. Но пока малое число изученных температурных профилей не позволяет сделать однозначный вывод, но позволяет выдвинуть такое предположение.

Таблица 2. Оценка пампинг-эффекта в мерзлотных почвах типичной тундры на фоновых и антропогенно нарушенных участках

Table 2. Assessment of the pumping effect in permafrost soils of a typical tundra in background and anthropogenically disturbed areas

Профиль	Тип	Среднегодовая температура	Амплитуда колебаний температуры	Оценка пампинг-эффекта
1	антр	0.88	5.95	Не удастся оценить ввиду незнания функции теплопроводности при отрицательных температурах
			4.45	
			4.95	
	фон	-0.36	7.53	-2.15
			6.03	-1.71
			6.53	-1.86
2	антр	1.74	4.68	0.63
			3.18	0.61
			5.68	0.35
	фон	2.23	4.30	1.55
			2.8	0.58
			3.3	0.82
			5.30	2.36
3	антр	-0.75	12.34	-3.25
			10.84	-2.55
			11.34	-2.75
			13.34	-3.65
	фон	-1.69	13.17	-3.02
			11.67	-2.61
			12.17	-2.74
4	антр	1.02	7.02	-1.85
			5.52	-1.68
			6.02	-1.79
			8.02	-1.99
	фон	-0.56	11.54	-3.8
			10.04	-3
			10.54	-3.2
			12.54	-4.3
5	антр	1.74	5.16	-3.5
			3.66	-2.5
			4.16	-3
			6.16	-4.2
	фон	2.69	Не удалось получить оценку ввиду малости корректных оценок коэффициента теплопроводности	

Теория пампинг-эффекта разработана только для чисто гармонического колебания на поверхности почвы, что в реальности наблюдается редко. Так как в реальности колебания температуры имеют более сложный вид, требуется развитие данной теории.

Выводы

1. Оценка коэффициента температуропроводности и поиск ее зависимости от температуры почвы является ключевой в определении нелинейной волновой диффузии тепла в почву и представляет собой отдельную задачу.

2. Предварительные оценки по плоскобугристому торфянику позволяют подтвердить вывод, полученный в работе (Зырянов, 2007) о том, что чем больше амплитуда колебаний температуры на поверхности почвы, тем ниже температура внутри почвы на достаточно больших глубинах. Дополнительные расчеты по фоновому участку подтверждают это.

3. Пампинг-эффект в почвах возможен, при этом охлаждающее влияние этого эффекта на температурный режим многолетнемерзлых грунтов, подтверждается, по крайней мере некоторыми натурными измерениями.

4. Исходя из проведенных натурных измерений, можно предположить, что значение T^∞ зависит от типа почвы, растительности и влажности. Однако малое число изученных температурных профилей не позволяет пока сделать однозначный вывод относительно предлагаемой гипотезы.

5. Исследование пампинг-эффекта для различных типов почв позволяет оценить коэффициенты температуропроводности как функции от температуры, определить направление потоков тепла за определенный период времени, равный периоду колебаний (отток тепла или приток), а также дает возможность сравнивать разные точки наблюдений между собой по теплофизическим характеристикам и по амплитудам колебаний температуры.

Работа выполнена в рамках темы № 0147-2019-0001 Государственного задания ИВП РАН.

Список литературы

Гаврильев, Р.И., Кузьмин, Г.П. (2009) Определение теплофизических характеристик мерзлых грунтов расчетным методом, Наука и образование, № 4, с. 51-54.

Зырянов, В.Н. (2007) Антипотепление глубинных слоев Мирового океана, Океанология, № 5, с. 666-673.

Зырянов, В.Н. (2013) Нелинейный пампинг-эффект в колебательных процессах в геофизике, Водные ресурсы, № 3, с. 227-239, doi: 10.7868/S0321059613030097.

Зырянов, В.Н., Круглихин, С.А. (2016) Нелинейная задача Стефана о росте льда при колебаниях температуры воздуха, Процессы в геосредах, № 4(9), с. 318-326.

Каверин, Д.А., Лапина, Л.Э., Пастухов, А.В., Новаковский, А.Б. (2019) Влияние трансформации растительного и почвенного покровов на температуру почв при эксплуатации зимней дороги в Большеземельской тундре, Крисосфера Земли, № 1, с. 17-27, doi: 10.21782/kz1560-7496-2019-1(17-27).

Калюжный, И.Л., Лавров, С.А. (2019) Теплофизические характеристики осушенных болот Кольского полуострова, Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И.Войекова, № 594, с. 63-81.

Лапина, Л.Э., Михалов, О.А., Успенский, И.М. (2015) Факторный анализ микрометеорологических данных по мезоолиготрофному болоту в Республике Коми, Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. XXVI, № 2, с. 59-79.

Лапина, Л.Э., Успенский, И.М., Каверин, Д.А., Пастухов, А.В. (2017) Динамика температурных волн в почвах типичной тундр Европейского северо-востока России, Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения, сб. науч. трудов Всерос. науч. конф., г. Сочи, 02-07 октября 2017, Новочеркасск, Лик, с. 222-226.

Лапина, Л.Э. (2019). Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры среды, Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные приложения и перспективы, сб. трудов междунар. науч. конф., М., КДУ «Добросвет», с. 748-751, электронный ресурс, URL: <https://doi.org/10.31453/kdu.ru.91304.0065>, URL: <https://bookonline.ru/node/4660>.

Микайылов, Ф.Д., Шеин, Е.В. (2010) Теоретические основы экспериментальных методов определения теплопроводности почвы, Почвоведение, № 5, с. 594-605.

Углерод в лесных и болотных экосистемах особо охраняемых природных территорий Республики Коми (2014) Сыктывкар, 204 с.

Zyryanov, V.N., Khublaryan, M.G. 2006. Pumping effect in the theory of nonlinear processes of the thermal conductivity equation type and its application in geophysics, *Dokl. Earth Sc.*, no. 408, pp. 674-677, available at: <https://doi.org/10.1134/S1028334X06040374>.

References

Gavril'ev, R.I., Kuz'min, G.P. (2009) Opredelenie teplofizicheskikh harakteristik merzlyh gruntov raschetnym metodom [Determination of thermophysical characteristics of frozen soils by calculation method], *Nauka i obrazovanie*, no. 4, pp. 51-54.

Zyryanov, V.N. (2007) Antipoteplenie glubinnyh sloev Mirovogo okeana [Anti-warming of the deep layers of the world ocean], *okeanologiya*, no. 5, pp. 666-673.

Zyryanov, V.N. (2013) Nelinejnyj pamping-effekt v kolebatel'nyh processah v geofizike [Nonlinear pumping effect in oscillatory processes in Geophysics], *Vodnye resursy*, no. 3, pp. 227-239, doi: 10.7868/S0321059613030097.

Zyryanov, V.N., Kruglihin, S.A. (2016) Nelinejnaya zadacha Stefana o roste l'da pri kolebaniyah temperatury vozduha [Non-linear Stefan problem on ice growth under air temperature fluctuations], *Processy v geosredah*, no. 4(9), pp. 318-326.

Kaverin, D.A., Lapina, L.E., Pastuhov, A.V., Novakovskij, A.B. (2019) Vliyanie transformacii rastitel'nogo i pochvennogo pokrovov na temperaturu pochv pri ekspluatácii zimnej dorogi v Bol'shchezemel'skoj tundra [Influence of vegetation and soil cover transformation on soil temperature during winter road operation in Bolshezemelskaya tundra], *Kriosfera Zemli*, no. 1, pp. 17-27, doi: 10.21782/kz1560-7496-2019-1(17-27).

Kalyuzhnyj, I.L., Lavrov, S.A. (2019) Teplofizicheskie karakteristiki osushennyh bolot Kol'skogo poluostrova [The thermophysical characteristics of the drained mires of the Kola Peninsula], *Trudy Glavnoj geofizicheskoj observatorii im. A.I. Vojekova*, no. 594, pp. 63–81.

Lapina, L.E., Mihalov, O.A., Uspenskij, I.M. (2015) Faktornyj analiz mikrometeorologicheskikh dannyh po mezoooligotrofnomu bolotu v Respublike Komi [Factor analysis of micrometeorological data on meso-oligotrophic swamp in the Komi Republic], *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, vol. XXVI, no. 2, pp. 59-79.

Lapina, L.E., Uspenskij, I.M., Kaverin, D.A., Pastuhov, A.V. (2017) Dinamika temperaturnyh voln v pochvah tipichnoj tundr Evropejskogo severo-vostoka Rossii [Dynamics of temperature waves in soils of typical tundra of the European North-East of Russia], *Vodnye resursy: novye vyzovy i puti resheniya* [Water resources: new challenges and solutions], Lik, Novocherkassk, Russia, pp. 222-226.

Lapina, L.E. (2019) Zavisimost' koefficienta temperaturoprovodnosti ot temperatury sredy [Dependence of the coefficient of thermal diffusivity on the temperature of the medium], *Fundamental'nye koncepcii fiziki pochv: razvitie, sovremenne prilozheniya i perspektivy* [Fundamental concepts of soil physics: development, modern applications and prospects], KDU «Dobrosvet», Moscow, Russia, pp. 748-751, available at: <https://doi.org/10.31453/kdu.ru.91304.0065>, <https://bookonlime.ru/node/4660>.

Mikajlov, F.D., Shein, E.V. (2010) Teoreticheskie osnovy eksperimental'nyh metodov opredeleniya temperaturoprovodnosti pochvy [Theoretical foundations of experimental methods for determining soil thermal diffusivity], *Pochvovedenie*, no. 5, pp. 594-605.

Uglerod v lesnyh i bolotnyh ekosistemah osobo ohranyaemyh prirodnyh territorij Respubliki Komi [Carbon in forest and bog ecosystems of specially protected natural areas of the Komi Republic] (2014) Syktyvkar, Russia, 204 p.

Zyryanov, V.N., Khublaryan, M.G. 2006. Pumping effect in the theory of nonlinear processes of the thermal conductivity equation type and its application in geophysics, *Dokl. Earth Sc.*, no. 408, pp. 674-677, available at: <https://doi.org/10.1134/S1028334X06040374>.

Статья поступила в редакцию (Received): 01.11.2020.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 06.09.2021;

Принята к публикации (Accepted): 11.10.2021.

Для цитирования / For citation:

Лапина, Л.Э., Каверин, Д.А., Пастухов А.В. (2021) Оценка пампинг-эффекта в мерзлотных почвах типичной тундры Европейского северо-востока России, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXII, № 3-4, с. 100-111, doi: 10.21513/0207-2564-2021-3-4-100-111.

Lapina, L.E., Kaverin, D.A., Pastukhov, A.V. (2021) Estimation of the pumping effect in permafrost soils of the typical tundra of the European north-east Russia, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXII, no. 3-4, pp. 100-111, doi: 10.21513/0207-2564-2021-3-4-100-111.