

Оригинальная статья
УДК 630.43:581.524 (470.3)
<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-1-120-128>



ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ В ПОЧВЕ ГАРИ ЛЕНТОЧНОГО БОРА СУХОСТЕПНОГО АЛТАЯ

Ю.В. Беховых^{1✉}, Л.А. Беховых²

^{1,2} ФГБОУ ВО Алтайский государственный аграрный университет; Алтайский край, г. Барнаул, Российская Федерация

^{1,1}Phys_asau@rambler.ru; ORCID:0000-0001-5813-8668, РИНЦ ID: 125837

^{2,1}dekan.fpo208@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-4890-5629, РИНЦ ID: 702589

Аннотация. Исследования посвящены анализу влияния пирогенного фактора на распределение тепловой энергии в почвенном профиле под лесными фитоценозами сосновых ленточных боров, произрастающих в сухостепной зоне Алтайского края. Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения постпирогенных изменений процессов функционирования лесных экосистем для последующей разработки эффективных мероприятий по лесовосстановлению.

Цель исследований – установление закономерностей динамики теплоточков в почве гари и их сравнение с соответствующими параметрами контрольного участка нетронутого пожаром леса. В ходе исследований производились измерения теплоточков в дерново-подзолистой почве на различных элементах мезорельефа (склоны северной и южной экспозиций, вершины и низины увалов), на гари и контрольном участке в весенний, летний и осенний периоды. При проведении исследований использовались электронные почвенные термометры со специальными зондами для измерения температуры и последующего расчета теплоточков по стандартной методике. Исследования выявили заметное влияние пирогенного фактора на тепловой режим почвы, что обусловлено изменением ее физических свойств (альбедо, теплопроводности, теплоемкости) и отсутствием растительного покрова, выполняющего теплоизолирующую функцию. Результаты показали, что на гари наблюдалась более высокая амплитуда суточных колебаний тепловых потоков по сравнению с контрольным участком, что свидетельствует о более интенсивном теплообмене. Была обнаружена выраженная зависимость величины теплоточков от экспозиции мезорельефа: низины и вершины увалов характеризовались наибольшим поглощением тепловой энергии. Однако за счет более интенсивного поглощения и выделения тепла среднесуточные значения теплоточка в слое 0-20 см на гари оказались меньше, чем на контроле в конце апреля и в июне. Только в сентябре среднесуточные теплоточки на гари были больше, чем на контроле. Летом было отмечено уменьшение численных значений среднесуточных почвенных теплоточков, которое, вероятнее всего, связано с иссушением почвы и уменьшением ее теплоемкости. Выявленные различия поступления тепла в почву между участками гари и контролем и влияние экспозиции склонов на распределение тепловой энергии могут быть полезными при разработке оптимальных лесовосстановительных стратегий в условиях сухостепного климата.

Ключевые слова: сухостепная зона, пирогенное воздействие на лесные экосистемы, теплоточки в почве гари, температура почвы, лесовосстановление

Для цитирования: Беховых Ю.В., Беховых Л.А. Тепловые потоки в почве гари ленточного бора сухостепного Алтая. Природообустройство. 2026;Т.19(1):120-128. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-1-120-128>

Original article

THERMAL FLOWS IN THE SOIL OF THE BURNT-OUT BELT PINE FOREST OF THE DRY-STEPPE ALTAI

Yu.V. Bekhovich^{1✉}, L.A. Bekhovich²

^{1,2} Altai State Agrarian University; Altai Territory, Barnaul, Russian Federation

¹Phys_asau@rambler.ru; ORCID:0000-0001-5813-8668, РИНЦ ID: 125837

²dekan.fpo208@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-4890-5629, РИНЦ ID: 702589

Abstracts. The research goal was to study the analysis of the influence of the pyrogenic factor on the distribution of thermal energy in the soil profile under the forest phytocenoses of pine forests growing in the dry-steppe zone of the Altai Region. The relevance of the work is due to the need to study post-pyrogenic changes in the functioning of forest ecosystems for the subsequent development of effective reforestation measures. The aim of the work was to establish patterns of heat flux dynamics in the burning

soil and compare them with the corresponding parameters of the control area of the forest untouched by the fire. In the course of the study, heat flows were measured in sod-podzol soil on various elements of the mesorelief (slopes of the northern and southern exposures, peaks and lowlands of hills) at the burning site and at the control site in the spring, summer and autumn periods. During the research, electronic soil thermometers with special probes were used to measure temperature and then calculate heat flows using a standard technique. The study revealed a noticeable effect of the pyrogenic factor on the thermal regime of the soil, due to changes in its physical properties (albedo, thermal conductivity, heat capacity) and the absence of vegetation performing a heat-insulating function. The results showed that there was a higher amplitude of daily fluctuations in heat flows in the burning area compared to the control area, which indicates a more intensive heat exchange. A pronounced dependence of the magnitude of heat flows on the exposure of the mesorelief was found: the lowlands and peaks of the hills were characterized by the greatest absorption of thermal energy. However, due to the more intense heat absorption and release, the average daily values of the heat flux in the 0-20 cm layer on the burning were lower than in the control at the end of April and in June. Only in September, the average daily heat flows in the burning area were higher than in the control area. In summer, a decrease in the numerical values of the average daily soil heat fluxes was noted, which is most likely due to the desiccation of the soil and a decrease in its heat capacity. The revealed differences in heat input to the soil between burning and control sites and the effect of slope exposure on heat energy distribution may be useful in developing optimal reforestation strategies in a dry-steppe climate.

Keywords: dry steppe zone, pyrogenic impact on forest ecosystems, heat flows in the burnt soil, soil temperature, reforestation

For citation: Bekhovykh Yu.V., Bekhovykh L.A. Thermal flows in the soil of the burnt-out belt pine forest of the dry-steppe Altai. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(1):120-128. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-1-120-128>

Введение. Пирогенное воздействие на лесные экосистемы в период глобального потепления климата вносит существенный вклад в функционирование и изменение состояний лесных биоценозов [1]. В результате постоянного, из года в год увеличивающегося числа лесных пожаров происходят значительные негативные изменения экологических условий на горях [2]: в воздух и почву выбрасывается большое количество вредных веществ [3], наблюдается трансформация почвенного покрова с усилением эрозионных процессов и деградации, изменяется состояние лесной флоры и фауны [2, 4]. Возможность естественного или искусственного лесовосстановления пирогенно трансформированных лесных массивов определяется степенью воздействия огненной стихии и постпирогенными условиями на территориях, пройденных огнем: климатическими, почвенными, экологическими [2, 5].

Направленность постпирогенных сукцессий, длительность процесса лесовосстановления и вероятность возвращения к исходному, допирогенному типу лесной экосистемы, зависят от климатической и лесорастительной зон и могут существенно различаться [2, 5].

Постпирогенная трансформация почвы на территории сгоревшего леса происходит по причине изменения соотношения органической и минеральной составляющих в лесной подстилке [6]. Выгорание лесной растительности при пожаре стимулирует протекание эрозионных процессов

в почве, а также ведет к увеличению ее инсоляции и вероятности проникновения осадков. Изменения, связанные с частичной или полной гибелью растительных ярусов леса и лесной подстилки, приводят к трансформации процессов тепло- и влагопереноса в почву после пожара [2, 5, 7, 8]; происходит изменение режима аэрации почвы.

Самые критические постпирогенные условия на территории Алтайского края складываются на лесных горях, находящихся в сухостепной климатической зоне [9]. Южная часть Барнаульской ленты реликтового ленточного леса, произрастающего на отложениях древнего стока, находится в условиях сухого и контрастного по температурам климата данной климатической зоны. Название климатической зоны говорит о том, что даже без пожаров лес находится здесь в нетипичных условиях степного климата, а распространение тепловой энергии в почве и влагосодержание почвенных слоев в этих условиях имеют существенное значение для определения направленности постпирогенных сукцессий, и в конечном счете – всего лесовосстановительного процесса [5, 8, 10].

Оптимизация процесса лесовосстановления и разработка эффективных мелиоративных мероприятий для стимулирования возобновления лесных постпирогенных экосистем требуют предварительного анализа гидротермических режимов в почвенном профиле гарей. Эти режимы в свою очередь всецело зависят от поступления тепловой энергии и влаги в почву и их

последующего распределения по почвенным горизонтам, поэтому изучение особенностей поступления и распределения тепла в почву гарей является актуальной задачей. Ее решение, несомненно, будет способствовать разработке эффективных стратегий восстановления лесных ценозов после пожара.

Цель исследований: установление закономерностей динамики распределения тепловой энергии (теплопотоков) в почве гари и их сравнение с соответствующими параметрами контрольного участка не тронутого пожаром леса.

Материалы и методы исследований. Для проведения полевых исследований в южной части Барнаульской ленты соснового ленточно-бора были заложены две экспериментальные площадки (рис. 1).

Площадки располагались на административной территории Алтайского края. Климатическая зона расположения опытных участков – зона сухой степи. Одна из опытных площадок представляла собой территорию сгоревшего леса, где за полгода до начала исследований произошел сплошной верховой пожар, в результате которого погибли древесный, кустарниковый и травяной покровы, выгорел и минерализовался в зольные остатки слой лесной подстилки и растительного опада. Для контрольных измерений на границе с опытным участком был выбран схожий по рельефу, типу почвы, первоначальным растительным условиям участок не тронутого пожаром леса.

Экспериментальные исследования проводились в период активной вегетации растений, охватывающий временной интервал с апреля по сентябрь включительно.

Элементы мезорельефа на экспериментальных участках: северная и южная экспозиции

склонов, а также вершина и низина увалов – были выбраны по принципу контрастности. Склоны северной и южной экспозиций на участке горелого леса и на контрольном участке подбирались по принципу изоклинальности (с одинаковым углом наклона к горизонту). Общая высота дюн подбиралась также одинаковой для опытного и контрольного участков.

Почвенный профиль на различных вариантах дюнно-увалистого мезорельефа опытных участков был представлен горизонтами дерново-подзолистой почвы, которая и являлась объектом изучения (рис. 2).

В ходе исследований были поставлены и решались следующие задачи:

– определить характерные особенности распределения тепловой энергии при суточных наблюдениях в гумусовом горизонте почвы на гари и под сосновым бором поздней весной, в середине лета и в начале осени;

– выявить особенности распределения тепловой энергии при суточных наблюдениях в гумусовом горизонте почвы по элементам мезорельефа.

При проведении исследований использовались многоканальные электронные термометры, совместимые с фабрично-откалиброванными температурными датчиками типа DS18B20 прямого преобразования температуры в цифровой код фирмы Dallas Semiconductor (DSC). Датчики были вмонтированы в специально изготовленные зонды для измерения почвенной температуры через каждые 5 см и последующего расчета теплопотоков [11]. Количественные характеристики распределения тепловой энергии (теплопотоки) в почвенных слоях гумусового горизонта рассчитывались в соответствии с рекомендациями определения составляющих теплового



Рис. 1. Схема расположения опытных участков (А – гарь; В – контроль) и вид из космоса на местность проведения эксперимента (верх – север; низ – юг)

Fig. 1. Scheme of the location of the experimental plots (A-burnt; B-control) and a view from space of the experiment area (up-north, down-south)



Рис. 2. Схема почвенного профиля и внешний вид горизонтов дерново-подзолистой почвы

Fig. 2. Scheme of the soil profile and appearance of horizons of sod-podzolic soil

баланса в почве [12]. Суть данной методики заключается в том, что определяются температуры в почвенных слоях через каждые 5 см глубины почвы. Затем по разности температур между слоями определяется тепловой поток в каждом 5-сантиметровом слое. Суммируя теплоток в 5-сантиметровых слоях, находят тепловой поток через любой слой почвы, до глубины которого проводились измерения температуры.

Результаты и их обсуждение. Из морфологических признаков исследованной почвы наибольший интерес представлял горизонт A_d на гари – слой сгоревшей лесной подстилки, состоявший из ее черных по цвету зольных остатков. За счет небольшого альбеда данный горизонт препятствовал отражению лучистой энергии и способствовал проникновению внутрь почвенного горизонта значительной части поступающей тепловой энергии. Остальные почвенные горизонты по цвету и структуре были типичными для песчаной дерново-подзолистой почвы, сформировавшейся на отложениях ложбин древнего стока.

Характерной особенностью гранулометрического состава (табл. 1) почвенных слоев на экспериментальных площадках являлось доминирование крупнопесчаных и среднетесчаных фракций. Процент содержания песчаной фракции (более 0,05 мм) преобладал и практически не изменялся в диапазоне глубин. Содержание крупнопесчаных фракций в некоторых слоях достигало 70-90% от общего состава всех присутствующих фракций. Процент содержания глинистой фракции (менее 0,01 мм) и фракций мелкого песка относительно невелик (от 10 до 20% гранулометрического состава в зависимости от экспозиции мезорельефа) и снижается с увеличением глубины. Илистая фракция в гранулометрическом составе исследованной почвы на экспериментальных участках представлена незначительно.

Максимальное содержание гумуса в гумусово-аккумулятивных горизонтах не превышало 2% от общего количества органического вещества.

Профиль почвы на опытных участках отличался достаточно высокими значениями

Таблица 1. Гранулометрический состав почвы в районе исследований (гарь, вершина увала)

Table 1. Granulometric composition of the soil in the study area (burnt area, top of the ridge)

Глубина, м Depth, m	Содержание фракций в%, размер, мм Fraction content in%, size, mm						
	Менее 0,01 Less than 0.01	Менее 0,001 Less than 0.001	0,005-0,001	0,01-0,005	0,05-0,01	0,25-0,05	1-0,25
0,03-0,10	11,5	8,0	2,6	0,9	10,4	75,6	3,8
0,15-0,20	8,9	6,0	2,1	0,8	7,9	77,7	5,1
0,30-0,40	5,5	3,4	1,6	0,5	6,6	81,7	5,9
0,50-0,60	4,6	2,8	1,0	0,8	5,0	84,5	5,6
0,90-1,00	9,7	9,0	0,6	0,1	7,2	80,3	2,3

плотности сложения (табл. 2). Так, в верхнем, наименее уплотненном гумусовом горизонте на гари, плотность изменялась в границах 1,10-1,40 г/см³ в зависимости от элемента мезорельефа. В наиболее уплотненном иллювиальном горизонте значения плотности превышали 1,60 г/см³.

В таблице 2 представлены данные о плотности и почвенно-гидрологических константах (ПВ, ППВ, ВЗ) для различных горизонтов исследованной дерново-подзолистой почвы. Плотность почвы повышается от горизонта А₁ к горизонту В, а затем незначительно снижается в горизонте С. Это обычная тенденция для почвенного профиля, где верхние горизонты более рыхлые ввиду наличия органического вещества и биогенной структуры, а нижележащие горизонты уплотняются за счет процессов педогенеза.

Показатели почвенно-гидрологических констант (табл. 2) невелики для всех горизонтов исследованной почвы. Это может быть обусловлено комбинацией факторов, связанных

с доминированием крупнопесчаных и среднепесчаных фракций в гранулометрическом составе почвы, низким содержанием органического вещества и, возможно, влиянием процессов вымывания мелких фракций [6] из верхних почвенных горизонтов в нижние после пожара горизонты.

В таблице 3 отражена мощность поступления тепловой энергии в слой почвы 0-20 см на различных элементах мезорельефа для гари и контрольного участка в конце апреля. Данные представлены для разных интервалов времени в течение суток и в среднем за сутки. Положительные значения теплопотока указывают на поступление тепла в почву, отрицательные – на его отдачу из почвы.

На всех участках в конце апреля наблюдалась характерная суточная динамика теплопотока: отток тепла из почвы ночью и интенсивное поступление тепла в дневные часы. Максимальное поступление тепла в почву (как на гари, так и на контроле) было отмечено с 13:00 до 16:00 ч.

Таблица 2. Физические и водно-физические свойства почвы на опытном участке (вершина увала, гарь)

Table 2. Physical and water-physical properties of the soil on the experimental plot (top of the ridge, burnt area)

Глубина, м (Горизонт) <i>Depth, m (Horizon)</i>	Плотность, г/см ³ <i>Density, g / cm³</i>	ВЗ, % <i>WM, %</i>	ППВ, % <i>MTH, %</i>	ПВ, % <i>FMW, %</i>
0,0-0,1 (А₁)	1,43±0,04	1,16±0,03	5,83±0,12	34,53±0,69
0,3-0,4 (А₂)	1,60±0,05	1,11±0,02	5,02±0,09	23,24±0,45
0,5-0,6 (В)	1,65±0,05	0,86±0,01	4,37±0,08	24,31±0,49
0,9-1,0 (С)	1,59±0,04	0,86±0,01	4,50±0,09	29,63±0,58

Таблица 3. Суточная динамика теплопотока (Вт/м²) в почвенном слое 0-20 см участка исследований в конце апреля. Числитель – гарь, знаменатель – контроль

Table 3. Daily dynamics of heat flow (W/m²) in the soil layer of 0-20 cm of the study site at the end of April. The numerator is burnt, the denominator is control

Экспозиция\Время суток, ч <i>Exposure\Time of day, h</i>	Низина увала <i>Lowland of the ridge</i>	Южный склон увала <i>Southern slope of the ridge</i>	Вершина увала <i>The top of the ridge</i>	Северный склон увала <i>The northern slope of the ridge</i>
19-1	-66,2 ± 1,9 -84,6 ± 2,5	-69,3 ± 2,0 -49,7 ± 1,4	-64,3 ± 1,9 -42,4 ± 1,2	-43,3 ± 1,3 -22,6 ± 0,7
1-7	-61,5 ± 1,8 -59,1 ± 1,7	-39,2 ± 1,1 -44,9 ± 1,3	-53,9 ± 1,6 -47,4 ± 1,4	-31,4 ± 0,9 -40,0 ± 1,2
7-10	50,3 ± 1,5 2,2 ± 0,1	27,5 ± 0,8 16,3 ± 0,5	35,0 ± 1,0 28,0 ± 0,8	21,9 ± 0,6 9,8 ± 0,3
10-13	97,5 ± 2,8 122,0 ± 3,5	92,2 ± 2,7 68,7 ± 2,0	108,7 ± 3,1 36,1 ± 1,0	51,7 ± 1,5 45,7 ± 1,3
13-16	157,0 ± 4,6 146,2 ± 4,2	92,8 ± 2,7 80,2 ± 2,3	68,2 ± 2,0 104,4 ± 3,0	73,7 ± 2,1 55,1 ± 1,6
16-19ч	-49,4 ± 1,4 17,1 ± 0,5	4,4 ± 0,1 24,0 ± 0,7	24,3 ± 0,7 11,2 ± 0,3	2,0 ± 0,1 14,6 ± 0,4
Среднесуточный Average daily	127,7 ± 3,7 143,7 ± 4,2	108,4 ± 3,1 94,6 ± 2,7	118,1 ± 3,4 89,8 ± 2,6	74,7 ± 2,2 89,8 ± 2,6

На различных элементах мезорельефа была отмечена различная интенсивность мощности тепловой энергии, проходящей через единичную площадку почвы. Низины и вершины песчаных лесных увалов получали наибольшее количество тепла за день. На склонах северной экспозиции увалов меньше тепловой энергии проникало в почву в течение суток (рис. 3). При этом гумусовый горизонт почвы гари характеризовался более интенсивным оттоком тепловой энергии ночью и более интенсивным поступлением тепла в дневные часы, чем на контроле. Такие различия могут иметь несколько причин.

Во-первых, поверхность почвы гари ввиду зольных остатков сгоревшей лесной подстилки имела более низкое альбедо по сравнению с контрольными точками измерений. Следствием более низкой отражательной способности почвы гари являлось более интенсивное поглощение солнечной радиации в дневное время и более интенсивное ночное охлаждение в виде теплового излучения через поверхность. Также за счет отсутствия слоя лесной подстилки на гари отсутствовал и ее теплоизолирующий эффект, уменьшающий разницу между дневными и ночными температурами и препятствующий обмену тепла между почвой и атмосферой. В-третьих, интенсивное испарение с поверхности почвы и активный влагообмен в почвенных слоях горелого бора должны изменять теплопроводность и теплоемкость почвы, и как следствие – существенно влиять на приток тепла днем и отток тепла ночью. Следует учитывать и тот факт, что тепловые потоки представлены только для слоя 0-20 см, но нижележащие слои, особенно после зимнего периода, также могут играть серьезную роль в формировании теплового режима верхних слоев почвы. В итоге среднесуточные значения положительного теплопотока на гари в конце апреля оказались несколько меньше, чем на точках наблюдений контрольного участка (рис. 3).

В таблице 4 показаны теплопотоки в 20-сантиметровом слое почвы на различных элементах мезорельефа для гари и контрольного участка в конце июня. Как и в конце апреля, в середине лета сохранялась естественная закономерность в оттоке тепла ночью и притоке в дневные часы. При этом так же, как и в конце апреля, на гари обычно наблюдались более интенсивный ночной отток и дневной приток тепла по сравнению с контролем. Среднесуточные значения теплопотока (рис. 3) на гари в некоторых случаях оказались меньше, чем на контроле, так же, как и в конце апреля. Влияние экспозиции мезорельефа на значения теплопотоков имело более

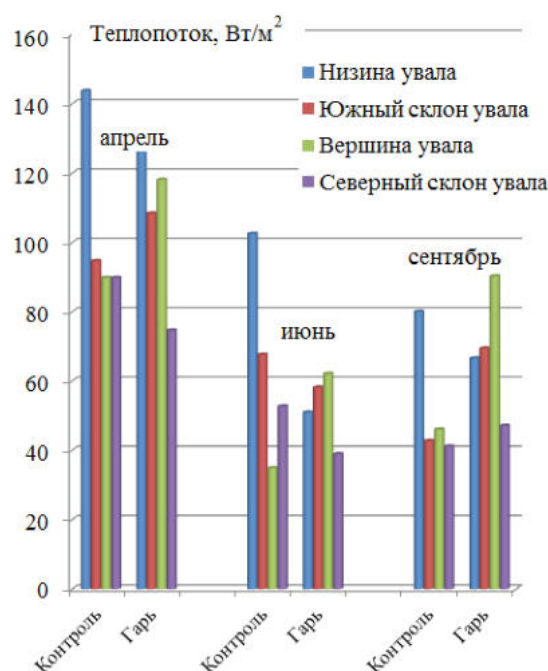


Рис. 3. Вариабельность среднесуточных тепловых потоков в 20-сантиметровом слое дерново-подзолистого почвенного горизонта на участках исследований

Fig. 3. Variability of average daily heat flows in a twenty-centimeter layer of sod-podzolic soil at the study sites

сглаженный характер в июне, с меньшим разбросом значений по элементам рельефа, чем в конце апреля. Абсолютные значения среднесуточных теплопотоков в конце июня оказались заметно ниже, чем в конце апреля, на тех же точках наблюдений.

В июне на большинстве участков наблюдений в течение суток была зафиксирована меньшая разница между минимальными и максимальными значениями по сравнению с апрелем.

Таким образом, амплитуда колебаний тепловых потоков в течение суток была заметно меньше, чем при весенних наблюдениях.

Разница между теплопотоками на гари и контроле в июне оказалась менее выражена, чем в апреле. Выравнивание среднесуточных теплопотоков в конце июня на большинстве исследуемых точек по сравнению с показателями в конце апреля говорит о более равномерном распределении тепла в течение суток. Это связано с тем, что в июне день длиннее, чем в апреле, и поверхность почвы днем дольше нагревается, а ночью нагретая почва дольше отдает тепло. В результате суточная разница между положительными и отрицательными теплопотоками становится меньше. Также иссушение почвенного профиля и, как следствие, уменьшение теплоемкости почвенных слоев могут приводить

Таблица 4. Суточная динамика теплопотока (W/m^2) в почвенном слое 0-20 см участка исследований в конце июня. Числитель – гарь, знаменатель – контрольTable 4. Daily dynamics of heat flux (W/m^2) in the soil layer of 0-20 cm of the study site at the end of June. The numerator is burnt, the denominator is control

Экспозиция. время суток, ч <i>Exposure / Time of day, h</i>	Низина увала <i>Lowland of the ridge</i>	Южный склон увала <i>Southern slope of the ridge</i>	Вершина увала <i>Top of the ridge</i>	Северный склон увала <i>Northern slope of the ridge</i>
19-1	$-124,0 \pm 3,6$ $-122,9 \pm 3,6$	$-91,7 \pm 2,7$ $-50,7 \pm 1,5$	$-80,9 \pm 2,3$ $-45,4 \pm 1,3$	$-61,8 \pm 1,8$ $-41,4 \pm 1,2$
1-7	$-41,2 \pm 1,2$ $-56,7 \pm 1,6$	$-41,3 \pm 1,2$ $-29,8 \pm 0,9$	$-53,2 \pm 1,5$ $-34,6 \pm 1,0$	$-26,5 \pm 0,8$ $-37,3 \pm 1,1$
7-10	$121,8 \pm 3,5$ $95,7 \pm 2,8$	$132,9 \pm 3,9$ $107,0 \pm 3,1$	$68,0 \pm 2,0$ $12,1 \pm 0,4$	$77,6 \pm 2,2$ $112,7 \pm 3,3$
10-13	$166,7 \pm 4,8$ $171,6 \pm 5,0$	$98,9 \pm 2,9$ $104,1 \pm 3,0$	$77,2 \pm 2,2$ $67,9 \pm 2,0$	$99,0 \pm 2,9$ $53,2 \pm 1,5$
13-16	$-17,0 \pm 0,5$ $50,2 \pm 1,5$	$19,1 \pm 0,6$ $-36,1 \pm 1,0$	$58,8 \pm 1,7$ $19,2 \pm 0,6$	$-17,1 \pm 0,5$ $21,9 \pm 0,6$
16-19	$-55,4 \pm 1,6$ $-35,3 \pm 1,0$	$-59,7 \pm 1,7$ $-26,9 \pm 0,8$	$-7,7 \pm 0,2$ $15,7 \pm 0,5$	$-32,2 \pm 0,9$ $-56,4 \pm 1,6$
Среднесуточный <i>Average daily</i>	$50,9 \pm 1,5$ $102,5 \pm 3,0$	$58,2 \pm 1,7$ $67,6 \pm 2,0$	$62,1 \pm 1,8$ $34,9 \pm 1,0$	$38,9 \pm 1,1$ $52,8 \pm 1,5$

к уменьшению абсолютных значений тепловых потоков в летний период несмотря на то, что поверхность почвы в это время нагревается днем до температуры 40-45°C [5, 7], особенно на лишенной растительности черной от зольных остатков почве гари.

В середине лета максимальные отрицательные теплопотоки, указывающие на отток тепла из почвы, фиксировались с 19:00 до 1:00. По мере ночного остывания почвы происходило

выравнивание температуры между ее слоями, и как следствие – уменьшение оттока тепла из почвы к 7:00 утра. Однако, несмотря на выравнивание температур между слоями почвы, отток тепла из нее не прекращался, и суммарный ночной теплопоток был все равно отрицательным, так как почва остывала медленнее, чем приземный воздух.

К середине сентября (табл. 5) сохранялась общая закономерность ночного оттока

Таблица 5. Суточная динамика теплопотока (W/m^2) в почвенном слое 0-20 см участка исследований в середине сентября. Числитель – гарь, знаменатель – контрольTable 5. Daily dynamics of heat flux (W/m^2) in the soil layer of 0-20 cm of the study site in mid-September. The numerator is burnt, the denominator is control

Экспозиция\Время суток, ч <i>Exposure / Time of day, h</i>	Низина увала <i>Lowland of the ridge</i>	Южный склон увала <i>Southern slope of the ridge</i>	Вершина увала <i>Top of the ridge</i>	Северный склон увала <i>Northern slope of the ridge</i>
19-1	$-53,7 \pm 1,6$ $-46,3 \pm 1,3$	$-29,2 \pm 0,8$ $-9,0 \pm 0,3$	$-40,9 \pm 1,2$ $-30,5 \pm 0,9$	$-23,1 \pm 0,7$ $-17,4 \pm 0,5$
1-7	$-33,3 \pm 1,0$ $-40,0 \pm 1,2$	$-34,7 \pm 1,0$ $-21,4 \pm 0,6$	$-45,1 \pm 1,3$ $-23,0 \pm 0,7$	$-23,6 \pm 0,7$ $-20,6 \pm 0,6$
7-10	$137,8 \pm 4,0$ $107,8 \pm 3,1$	$78,4 \pm 2,3$ $38,2 \pm 1,1$	$80,1 \pm 2,3$ $33,6 \pm 1,0$	$85,6 \pm 2,5$ $33,8 \pm 1,0$
10-13	$178,1 \pm 5,2$ $192,3 \pm 5,6$	$112,0 \pm 3,2$ $66,0 \pm 1,9$	$123,4 \pm 3,6$ $73,0 \pm 2,1$	$89,6 \pm 2,6$ $55,7 \pm 1,6$
13-16	$27,4 \pm 0,8$ $132,4 \pm 3,8$	$90,9 \pm 2,6$ $79,2 \pm 2,3$	$149,2 \pm 4,3$ $100,1 \pm 2,9$	$63,5 \pm 1,8$ $84,2 \pm 2,4$
16-19	$-189,8 \pm 5,5$ $-266,2 \pm 7,7$	$-148,0 \pm 4,3$ $-110,3 \pm 3,2$	$-176,5 \pm 5,1$ $-107,0 \pm 3,1$	$-144,7 \pm 4,2$ $-94,6 \pm 2,7$
Среднесуточный <i>Average daily</i>	$66,5 \pm 1,9$ $80,0 \pm 2,3$	$69,4 \pm 2,0$ $42,8 \pm 1,2$	$90,3 \pm 2,6$ $46,1 \pm 1,3$	$47,1 \pm 1,4$ $41,1 \pm 1,2$

и дневного притока тепла. При этом по сравнению с июнем амплитуда колебаний теплопотоков возросла. Различия между теплопотоками на гари и контроле стали более контрастными. Так, на вершине увала гари и контрольного участка численные значения суточных теплопотоков отличались почти вдвое. Среднесуточные значения теплопотока в сентябре по сравнению с данными за июнь возросли (рис. 1). Разница между максимальным и минимальным значениями теплопотоков в начале осени стала больше, чем в июне, за счет увеличения разницы температур между дневным прогревом и ночным охлаждением. Появились отличия влияния элементов мезорельефа на величину теплопотоков от июньских и апрельских значений. Наибольший среднесуточный приток тепла в середине сентября (рис. 3) был зафиксирован не в низине, как в апреле и в июне, а на вершине увала.

Если летом наибольший отток тепла из почвы происходил в начале ночи, то в начале сентября он наблюдался вечером, с 16:00 до 19:00. При этом максимальные за сутки значения теплопотоков по-прежнему приходились на те же дневные часы, что и летом. Данные сентября отражают позднелетний характер распределения тепловых потоков в почве, влияние на которые оказывают более длинные ночи, чем в июне, меньшая интенсивность солнечного излучения по сравнению с серединой лета, и как следствие – более сильное ночное охлаждение почвы. Свой вклад в изменение характера распределения теплопотоков могут вносить также летнее иссушение почвы и изменение по этой причине ее теплопроводности и теплоемкости.

Список использованных источников

1. Романов Е.М. Экология: экологический мониторинг лесных экосистем: Учебное пособие. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2012. 236 с.
2. Куприянов А.Н., Трофимов И.Т., Заблоцкий В.И. и др. Восстановление лесных экосистем после пожаров: Монография. Кемерово: КРЭОО «ИРБИС», 2003. 262 с.: ил. EDN: QKMMOZ
3. Потемкин В.Л., Макунин В.Л. Загрязнение ландшафтов в котловине озера Байкал при лесных пожарах // География и природные ресурсы. 2007. № 4. С. 60-63. EDN: IJAKCF
4. Щеглова Е.Г. Влияние низовых пожаров на лиственные леса Оренбуржья // Вестник Оренбургского государственного университета. 2012. № 10 (146). С. 15-20. EDN: PXFMEZ
5. Заблоцкий В.И. Динамика экологических условий на гарях в сосновых лесах юго-востока западной Сибири: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Барнаул: Изд-во АГАУ, 2006. 30 с.

Выводы

1. Наибольшие значения тепловых потоков наблюдались в низинах на гари и на контрольном участке леса. Это указывает на влияние экспозиции и рельефа на поступление и накопление тепла в почве. Северные склоны демонстрировали заметно более низкие значения тепловых потоков, что связано с меньшим количеством солнечной радиации, достигающей поверхности почвы.

2. Прослеживается суточная динамика тепловых потоков за период весны-осени на всех участках: отток тепла в ночное время и поступление в дневное время. Однако амплитуда этих суточных колебаний выше на участках гари, что может быть связано с меньшим влиянием растительности и более контрастными условиями нагревания и охлаждения оголенной поверхности почвы.

3. Наблюдаются заметные различия в тепловом режиме почвы на участках гари по сравнению с контролем, особенно в отношении суточной динамики и амплитуды колебаний тепловых потоков, свидетельствуя о том, что процессы поглощения и отдачи тепла в почве на гари отличаются от контрольных участков. Это связано с изменением физических свойств почвы (теплопроводности, теплоемкости, альбедо), а также с изменением состояния растительного покрова и содержания влаги в почве под влиянием пирогенного фактора.

Таким образом, проведенные исследования подчеркивают существенное влияние мезорельефа и процессов, связанных с пожаром, на тепловой режим почвы. Учет этих факторов будет полезен при планировании стратегии лесовосстановительных работ после пожара.

References

1. Romanov E.M. Ecology: ecological monitoring of forest ecosystems: textbook. Yoshkar-Ola: MarSTU, 2012. 236 p.
2. Kupriyanov A.N., Trofimov I.T., Zablotsky V.I. and others. Restoration of forest ecosystems after fires. – Kemerovo: IRBIS, 2003. 262 p.: ill. EDN: QKMMOZ
3. Potemkin V.L., Makunin V.L. Pollution of landscapes in the basin of Lake Baikal during forest fires // Geography and natural resources. 2007. No. 4. P. 60-63. EDN: IJAKCF
4. Shcheglova E.G. Influence of grassroots fires on deciduous forests of Orenburg region // Bulletin of Orenburg State University. 2012.No 10 (146). P. 15-20. EDN: PXFMEZ
5. Zablotsky V.I. Dynamics of environmental conditions in burning areas in pine forests of the south-east of Western Siberia: abstract of the dissertation. ... Doctor of Agricultural Sciences / V.I. Zablotsky. Barnaul: ASAU Publishing House, 2006. 30 p.

6. Малюков С.В., Матыцина Е.П. Почвенно-лесорастительная характеристика площадей после лесных пожаров // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-1 (13-1). С. 76-80. EDN: TPGXFL

7. Беховых Ю.В. Влияние лесных пожаров на гидро-термический режим дерново-подзолистых почв сухостепной зоны Алтайского края // Антропогенное воздействие на лесные экосистемы: Тезисы докладов II Международной конференции, г. Барнаул, 18-19 апреля 2002 г. Барнаул: Изд-во Алтайского государственного университета, 2002. С. 139-142. EDN: NHLZSP

8. Макарычев С.В., Малиновских А.А., Болотов А.Г., Беховых Ю.В. Послепожарные изменения почв и особенности флоры гарей равнинных сосновых лесов Алтайского края // Ползуновский вестник. 2011. № 4-2. С. 107-110. EDN: OIJBII

9. Агроклиматический справочник по Алтайскому краю. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 167 с.

10. Макарычев С.В., Беховых Ю.В., Беховых Л.А. Почвенно-физические условия лесовосстановления в горельниках юго-западной части ленточных боров Алтайского края // Восстановление нарушенных ландшафтов: Материалы IV научно-практической конференции. Барнаул, 2004. С. 59-65. EDN: RZVTXZ

11. Болотов А.Г. Измерение температуры почвы с помощью технологии 1-Wire // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2012. № 11 (97). С. 29-30. EDN: PFYVGX

12. Руководство по градиентным наблюдениям и определению составляющих теплового баланса. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 120 с.

Информация об авторах

Юрий Владимирович Беховых, канд., с.-х. наук., доцент кафедры геодезии, физики и инженерных сооружений: ORCID: 0000-0001-5813-8668; РИНЦ ID: 125837; Phys_asau@rambler.ru

Лариса Александровна Беховых, канд., физ.-мат. наук., доцент кафедры геодезии, физики и инженерных сооружений: ORCID: 0000-0003-4890-5629; РИНЦ ID: 702589; dekan.fpo208@yandex.ru

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All the authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

Поступила в редакцию / Received 25.02.2025

Поступила после рецензирования / Received 27.09.2025

Принята к публикации / Accepted 17.10.2025

6. Malyukov S.V., Komarova E.P. Soil and forest characteristics of areas after forest fires // Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2015. Vol. 3.No 2-1(13-1).P. 76-80. EDN: TPGXFL

7. Bekhovykh Yu.V. Influence of forest fires on the hydrothermal regime of sod-podzol soils of the dry steppe zone of the Altai Region //Anthropogenic impact on forest ecosystems: abstracts II International Conference (April 18-19, 2002, Barnaul). Barnaul: Alt. University Publishing House, 2002. P. 139-142.

8. Makarychev S.V. Post-fire soil changes and flora features of harems of lowland pine forests of the Altai Region / S.V. Makarychev, A.A. Malinovskikh, A.G. Bolotov Yu.V. Bekhovykh // Polzunovsky Bulletin. 2011. No. 4-2. P. 107-110. EDN: OIJBII

9. Agro-climatic reference book for the Altai Region. L.: Gidrometizdat, 1957. 167 p.

10. Makarychev S.V., Bekhovykh Yu.V., Bekhovykh L.A. Soil and physical conditions of reforestation in the mountain ranges of the southwestern part of the ribbon forests of the Altai Region // Restoration of disturbed landscapes: proceedings of the IV scientific and practical conference. Barnaul, 2004. P. 59-65. EDN: RZVTXZ

11. Bolotov A.G. Measurement of soil temperature using 1-Wire technology / A.G. Bolotov // Bulletin of the Altai State Agricultural University. 2012. No. 11(97). P. 29-30. EDN: PFYVGX

12. Guidelines for gradient observations and determination of heat balance components. L.: Gidrometeoizdat, 1964. 120 p.

Information about the authors

Yuriy V. Bekhovykh, CSs (Agro), Associate Professor of the Department of Geodesy, Physics and Engineering Structures: ORCID: 0000-0001-5813-8668; RSCI ID: 125837; Phys_asau@rambler.ru tel. 89132125077

Larisa A. Bekhovykh, CSs (Phys. – Math), Associate Professor of the Department of Geodesy, Physics and Engineering Structures: ORCID: 0000-0003-4890-5629; RSCI ID: 702589; dekan.fpo208@yandex.ru