

Тепловое состояние нарушенных почв в криолитозоне Сибири на основе дистанционных данных и численного моделирования

Т. В. Пономарева^{1,2,*}, Е. И. Пономарев^{1,2}, К. Ю. Литвинцев³,
К. А. Финников², Н. Д. Якимов^{2,4}

¹Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 660036, Красноярск, Россия

²Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск, Россия

³Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Красноярский филиал, 660036, Красноярск, Россия

⁴Федеральный исследовательский центр “Красноярский научный центр СО РАН”, 660036, Красноярск, Россия

*Контактный автор: Пономарева Татьяна Валерьевна, e-mail: bashkova_t@mail.ru

Поступила 17 февраля 2022 г., доработана 06 апреля 2022 г., принята в печать 12 апреля 2022 г.

Обсуждаются результаты мониторинга и моделирования состояния почв в нарушенных экосистемах мерзлотной зоны Сибири под влиянием естественных и техногенных факторов. Исследования выполнены на основе анализа многолетних спутниковых данных и численного моделирования процессов теплопереноса и фазовых переходов в почвенном профиле с привязкой к наземным обследованиям. Приводятся оценки изменения состояния сезонно-талого слоя в нарушенных почвах при изменении теплозащитных свойств поверхности. Выявлены пределы вариации, а также тренды многолетней динамики тепловых аномалий поверхности для территорий после воздействия различных деструктивных факторов. Получены прогностические оценки характерного времени восстановления теплового режима почв в результате восстановительной сукцессии с учетом характера деструктивного воздействия.

Ключевые слова: нарушенные почвы, теплообмен, численное моделирование, тепловая съемка, дистанционные данные, сезонно-талый слой.

Цитирование: Пономарева Т.В., Пономарев Е.И., Литвинцев К.Ю., Финников К.А., Якимов Н.Д. Тепловое состояние нарушенных почв в криолитозоне Сибири на основе дистанционных данных и численного моделирования. Вычислительные технологии. 2022; 27(3):16–35. DOI:10.25743/ICT.2022.27.3.003.

Введение

Почвенный покров, как одна из основ стабильности экосистем, в современных условиях требует многофакторного комплексного мониторинга, поскольку испытывает существенно возросшее влияние природных и антропогенных факторов. Это характерно для всего мира [1], в частности для криолитозоны Сибири. Все больше территорий Сибири и Русского Севера активно подвергаются техно- и антропогенному воздействию [2].

Увеличивается общая площадь земель, занятых промышленными объектами. В Красноярском крае она, например, в 2020 г. составила 126.9 тыс. га [3]. Увеличение доли нарушенных почв является результатом интенсивного промышленного освоения территорий [4], механического воздействия на почву [5, 6], пожаров [2, 7–9]. Однако следует особо отметить, что при этом время восстановления криогенных почв занимает десятки и сотни лет [10].

Нарушение напочвенного покрова и верхних органогенных горизонтов почв приводит к изменению их гидротермических свойств [11], вызывая избыточный нагрев поверхности в летний период, что фиксируется и в сезонно-талом (СТС) корнеобитаемом слое почвы и в нижележащих мерзлотных слоях. Анализ и моделирование распределения температур в почвах криолитозоны, в том числе сезонно-талых слоях, — актуальная и широко обсуждаемая задача [12–18].

Степень нарушений, долговременные проявления последствий и динамика восстановительных процессов определяются особенностями деструктивных факторов воздействия, как естественных (например, пожаров) [19], так и техногенных [1]. В техногенно-нарушенных экосистемах почвенный покров претерпевает более значительную трансформацию относительно фоновых территорий, поскольку при промышленном освоении, как правило, происходит ландшафтная перестройка. На таких участках естественные почвы либо полностью отсутствуют, либо сильно преобразуются, например, приобретая или утрачивая генетические горизонты профиля. В результате техногенной трансформации экосистем возникают природно-технические системы, которые по своим морфологическим и функциональным характеристикам отличаются от естественных [20].

Масштабные изменения на больших площадях могут быть зафиксированы с помощью спутниковых средств на основе анализа снимков поверхности в тепловом ИК-диапазоне [2, 21]. Важное значение имеют натурные обследования, проводимые в регионе [7, 8, 22–24]. Для прогноза теплового состояния нарушенных почв, определения уровня залегания границы мерзлоты в почвенном профиле применяется метод численного моделирования. В условиях многообразия свойств почв актуальна задача построения численных моделей, основанных на материалах наземных и дистанционных обследований [2, 25–34].

В настоящей работе представлены результаты по оценке теплового состояния почв техногенных и постпирогенных участков криолитозоны Сибири. Рассмотрены следующие аспекты: 1) особенности состояния и динамики восстановительных процессов в почвах после воздействия деструктивных факторов; 2) динамика спектральных признаков нарушенных участков на основе данных многоспектральной спутниковой съемки; 3) численное моделирование теплопереноса в профиле пирогенно-трансформированных почв.

1. Район и объекты исследования

Работы выполнены с привязкой к свойствам почв, характерных для Среднесибирского плоскогорно-таежного лесного района Средней Сибири ($59\text{--}66^\circ$ с. ш., $90\text{--}107^\circ$ в. д.). В древостоях региона доминируют (более 50 % от общей площади лесов) лиственничники и лиственничные редколесья [9, 35, 36]. Напочвенный растительный покров представлен травяно-кустарничковым ярусом, мхами и лишайниками [12].

В техногенных ландшафтах почвенный покров чаще всего представлен инициальными почвами или поверхностными техногенными образованиями (ТПО), в которых техногенный субстрат только начинает дифференцироваться под действием биоты. В про-

филе идет медленный процесс аккумуляции органического вещества на поверхности, перераспределяются гранулометрические фракции субстрата, изменяется плотность, увеличивается влагоудерживающая способность.

Важным деструктивным фактором в лесных экосистемах, влияющим на свойства почв, являются пожары. Они приводят к изменениям морфологических и физико-химических свойств почв, состава органического вещества и их механических характеристик [8, 37]. Происходит уменьшение мощности органогенного горизонта почвы за счет выгорания органического вещества в поверхностных слоях профиля, а также уплотняются верхние горизонты за счет поступления недогоревших фрагментов и золы [38]. Эти изменения приводят к частичной потере теплоизолирующей способности верхнего горизонта почв и последующему увеличению сезонно-талого слоя.

2. Методы исследования

Изучение теплового состояния нарушенных почв в криолитозоне Сибири проводилось на основе данных натурных измерений, спутникового мониторинга и результатов численного моделирования.

В рамках полевых исследований проведена серия контактных измерений температуры верхних слоев почвы (на глубинах 0–5 и 5–10 см) с помощью дата-логгеров EClerk, Термохрон-Рэлсиб и радиометра в ИК-диапазоне ($\lambda = 7.5\text{--}13.0$ мкм).

В результате обработки спутниковых данных среднего пространственного разрешения Landsat-5/7/8 за 1975–2020 гг. (база данных USGS геологической службы США) выявлены аномалии теплового режима нарушенных участков поверхности. Пространственное разрешение съемки 30 м. Температуру поверхности восстанавливали по откалиброванным данным канала В6 ($\lambda = 10.4\text{--}12.5$ мкм, Landsat-5/TM), В6 канала/1 (Landsat-7/ETM), канала В10 ($\lambda = 10.6\text{--}11.9$ мкм, Landsat-8/OLI). Расчет радиояростной температуры подстилающей поверхности производился после радиометрической коррекции с использованием калибровочных констант [39, 40].

Дополнительно анализировались данные низкого пространственного разрешения (250–1000 м) Terra/MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) за 2002–2020 гг. Информация об альбедо поверхности калибровалась в диапазонах $\lambda_1 = 0.620\text{--}0.670$ мкм и $\lambda_2 = 0.841\text{--}0.876$ мкм по материалам стандартного продукта MOD09GQ. Данные о температуре поверхности в диапазоне $\lambda_{31} = 10.780\text{--}11.280$ мкм вычислялись из стандартного продукта MOD11A1.

Динамика спектральных признаков нарушенных участков рассматривалась на хронорядах спутниковых данных для двух вариантов территорий: послепожарных участков (ППУ) за 1996–2020 гг. и техногенных территорий за 1975–2020 гг. Хроноряды построены для оценки состояния нарушенных участков в различные сроки восстановительных сукцессий. Обработка выполнена для 30 участков после пожаров на территории Сибири (зафиксированных в 1996, 2006, 2017 гг.).

Для определения относительных аномалий температуры поверхности нарушенных участков к фону ($\Delta T_{\text{отн}}$, °C/°C) сравнивались усреднения по десяти измерениям за каждый из рассмотренных промежутков времени:

$$\Delta T_{\text{отн}} = \frac{T_{\text{пов}} - T_{\text{ф}}}{T_{\text{ф}}} 100 \%,$$

где $T_{\text{пов}}$ и $T_{\text{ф}}$ — температура поверхности поврежденного и фонового участков соответственно, °C.

На основе хронорядов анализ динамики характеристик выполнялся для сроков 1, 5, 10 (или 12) и 20 лет после воздействия пожара. Анализ температур поверхности техногенно-нарушенных участков проводился для сроков 1, 10, 20, 40 и более лет после пожара.

Для исследования процессов переноса тепла в почве с учетом фазового превращения воды в лед построена математическая модель. Так как подобных моделей много [41], построение конкретной модели зависит от специфики решаемой задачи. При постановке задачи теплообмена в нарушенных почвах криолитозоны учитывались следующие факторы. Наличие ограниченных поврежденных участков придает свойствам почвы и полю температуры неоднородность в горизонтальном направлении, что, наряду с наличием вертикального почвенного профиля и вертикального переноса тепла, делает постановку задачи многомерной. Области замерзшей и оттаявшей почвы разделены переходной зоной, в которой фазовое состояние воды является смешанным, близким к дисперсному, и требующим описания в терминах усредненного содержания жидкой и твердой фазы воды.

В математической модели теплообмена в почве в уравнении переноса энергии в качестве искомого поля рассматривалось поле температуры. Это значительно облегчает процесс композиции теплофизических свойств грунта по сравнению с подходом, основанным на расчете поля энтальпии:

$$c_p(\mathbf{x}, T)\rho(\mathbf{x})\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda(\mathbf{x}, T)\frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = S. \quad (1)$$

Здесь T — температура, К; $c_p(\mathbf{x}, T)$ — теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ — плотность, кг/м³; $\lambda(\mathbf{x}, T)$ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); S — источник тепла при фазовом переходе, Вт/м³.

При описании источника тепла S , связанного с фазовым переходом лед — вода, жидкая и твердая фазы рассматриваются как отдельные компоненты среды, источники масс которых противоположны и пропорциональны температуре по шкале Цельсия [42]. Таким образом моделируется наличие фрагментов жидкой фазы внутри твердой и наоборот. В этом случае разность температуры среды и температуры фазового перехода связана с теплопередачей к фрагментам жидкой или твердой фазы. В предлагаемой модели характерная ширина области фазового перехода не зависит от плотности потока тепла, поглощаемого или выделяемого в результате фазового перехода, и определяется только свойствами среды. В соответствии с выбранным подходом для источника тепла S в уравнении (1) запишем выражение

$$S = -y_w(\mathbf{x}, T)\rho_w L \frac{\partial \alpha_l}{\partial t},$$

где y_w — объемная доля воды в почве (в любом агрегатном состоянии); α_l — доля воды, находящейся в жидком состоянии; L — удельное тепло фазового перехода, Дж/кг.

В такой формулировке необходимо тем или иным образом описывать изменение α_l от 0 до 1 при таянии льда и в обратном направлении — при замерзании. Для устойчивости вычислительного алгоритма целесообразно переход представить как процесс диссипации исчезающей фазы, скорость которого пропорциональна количеству исчезающей фазы:

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} = k (\max(T - T_0, 0)(1 - \alpha_l) + \min(T - T_0, 0)\alpha_l).$$

Здесь k — обратное характерное время исчезновения фрагментов жидкой фазы воды при замерзании и твердой фазы при оттаивании, которое оценивается исходя из характерного размера фрагментов и величины коэффициента теплопроводности ($T_0 = 273.16$ К).

Данная модель позволяет описать переход между водой и льдом в протяженной пространственной области, содержащей одновременно как воду, так и лед. Следует считать, что этот процесс протекает в каждой точке переходной области, что типично для таяния и замерзания почв и грунтов [42].

Уравнение (1) рассматривалось в двумерной постановке, в которой координата x имеет две компоненты — вертикальную и горизонтальную (для учета эффектов переходной области между нарушенными и ненарушенными участками почвы). Для решения уравнения (1) использовался метод контрольного объема [43, 44]. Крупномасштабная переменность структуры почвы и ее влагосодержания, а также изменяющаяся глубина снежного покрова учитываются в соотношениях для коэффициентов уравнения (1).

Для описания зависимости коэффициентов теплопроводности от влагосодержания и доли жидкой воды в различных почвенных горизонтах применялись модели, представленные в работах [12, 15, 16, 45, 46]. Используемые эмпирические модели [45, 46] обобщают большое количество данных натурных измерений в виде зависимостей коэффициента теплопроводности от плотности сухого грунта и объемной доли воды/льда. Модели [12, 15, 16] используют приближение линейной зависимости коэффициента теплопроводности дисперсной среды в почве от коэффициентов теплопроводности сухой и насыщенной водой/льдом почвы [47].

В рамках предложенной модели теплообмена теплофизические свойства снега принимались постоянными, но изменялась глубина снежного покрова согласно данным метеонаблюдений.

Граничные условия, определяющие теплообмен поверхности, описывают наличие солнечного (коротковолнового) и атмосферного (длинноволнового) излучения и конвективного переноса тепла воздухом [48, 49]:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_{conv} + (1 - \alpha_s)q_{SRad} + q_{LRad}.$$

Здесь q_{conv} — конвективный теплообмен с атмосферой, Вт/м²; q_{SRad} и q_{LRad} — потоки коротко- и длинноволнового излучения на поверхности, Вт/м²; α_s — альbedo поверхности.

Теплообмен поверхности земли с атмосферой за счет конвекции воздуха описывается следующим образом:

$$q_{conv} = \alpha_{conv} \Delta T.$$

Коэффициент теплопередачи определяется как [45]

$$\alpha_{conv} = u_1^{0.5} (6 + 3.1 \Delta T / u_1^2) \quad [\text{Вт}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)],$$

где u_1 — скорость ветра на высоте 1 м от поверхности земли, м/с; ΔT — разница температур между поверхностью и атмосферой, К.

Поток падающего на поверхность почвы солнечного излучения можно разделить на прямое и рассеянное. Для горизонтальной поверхности прямое солнечное излучение можно описать как [49]

$$q_{SRad}^{Dir} = q_{SRad0}^{Dir} \cos Z \Pi_i \tau_i, \quad (2)$$

где Z — приведенный угол падения солнечных лучей на поверхность; τ_i — пропускная способность отдельных компонентов атмосферы (аэрозоль, пары воды, озон и другие газы); q_{SRad0} — поток солнечного излучения, достигающего поверхности Земли, величина которого зависит от положения Земли относительно Солнца, Вт/м² [50]. Для расчета τ_i в уравнении (2) использована модель из работы [49].

Лучистый (длинноволновый) теплообмен с поверхностью описывается следующим образом:

$$q_{LRad} = \varepsilon_s (\varepsilon_{atm} \sigma T_{atm}^4 - \sigma T_s^4).$$

Здесь ε_s — степень черноты поверхности, ε_{atm} — излучательная способность атмосферы. Для поверхности поврежденной и неповрежденной почвы значения интегрального альбеда принимались равными 0.13 и 0.18 (снижение на 40 % для случая существенного изменения состояния напочвенного покрова и верхнего органогенного горизонта), степень черноты — 0.90 и 0.98 соответственно [7]. Излучательная способность атмосферы ε_{atm} принималась зависящей от влажности и облачности [51, 52]. В качестве основных допущений математической модели принято отсутствие влагопереноса и задание основных теплофизических свойств, кроме теплопроводности, для различных почвенных горизонтов в виде набора постоянных величин, различающихся только для зимнего и летнего времени года.

В математической модели дискретизация расчетной области строилась на основе ортогональной структурированной сетки. Вертикальный шаг сетки составлял 0.01 м, горизонтальный — от 0.25 м, шаг по времени — 15 мин. Вычисления выполнялись для временного интервала (до трех лет), необходимого для установления квазипериодического решения.

3. Результаты

3.1. Натурные измерения

В ходе наземных обследований почв на послепожарных и фоновых участках (ФУ) в среднетаежной зоне (Эвенкийский, Северо-Енисейский районы Красноярского края) установлены, прежде всего, отличия в структурной организации их профилей. Так, почвы на фоновом участке представлены криоземами с характерным строением профиля: органогенный горизонт О_{ао}, подстилаемый криотурбированным минеральным суглинистым горизонтом, залегание мерзлоты на глубине 0.5–0.6 м. Мощность О_{ао} составляет 10–12 см, мощность горизонта ферментации и гумификации О(Ф+Н) 5–7 см, плотность соответственно составляет 0.06 и 0.07 г/см³. На послепожарном (ПП) участке в результате выгорания подстилки органогенный горизонт О_{ао} практически отсутствует, мощность горизонта О(Ф+Н) сокращается до 4–5 см, плотность возрастает до 0.15 г/см³, мощность талого слоя увеличивается до 1.0 м.

На обследованных техногенных участках отвалов (Северо-Енисейский район) почвы еще не сформированы. Исходный техногенный субстрат из смеси крупных и мелких фракций пустых пород находится в начальной стадии дифференциации. Так, на техногенных отвалах (ТО) за 20-летний период на поверхности почвы появилось единичное возобновление сосны обыкновенной, березы пушистой. Общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса составляет 10–20 %. В почвенном профиле выделяется фрагментарный маломощный (1–2 см) органо-аккумулятивный слой.

Структура профиля и температура почвы по натурным данным для фоновых участков, послепожарных почв и техногенных отвалов в августе 2018 г.
Profile structure and soil temperature according to field measurements for background, post-fire and man-made dumps in august 2018

Горизонт		Глубина, см	T, °C		$\Delta T_{\text{отн}}, \%$
ПП	ФУ		ПП	ФУ	
O(F+H)pir	Oao	5	18	14	22.2
CRpir	O(F+H)	10	14	12	14.3
CR	CR	20	12	11	8.3
ТО	ФУ	ТО	ТО	ФУ	$\Delta T_{\text{отн}}, \%$
Техногенный	Oao	5	38	16	57.8
То же	O(F+H)	10	15	7	53.3
»	CR	20	6	2	66.6

В результате натурных обследований установлены характерные изменения температурного фона почвенного профиля после деструкции верхнего слоя (см. таблицу). Показано, что значимое изменение температуры наблюдается в корнеобитаемом слое на глубине 5–20 см. При этом в условиях послепожарных нарушений относительное изменение температуры составляет до 22 % на поверхности и до 8 % в горизонте CR (на глубине около 20 см), на посттехногенных объектах наблюдается изменение температурного режима на всей глубине корнеобитаемого слоя в пределах 53–67 % по сравнению с фоновыми участками.

3.2. Динамика признаков нарушенных территорий по данным дистанционного зондирования Земли

Хроноряды спутниковых данных демонстрируют состояние исследуемых объектов в различные сроки восстановления. Показано, что на послепожарных участках в средне-таежных лесах в результате долговременных вторичных сукцессий спектральные характеристики нарушенных участков меняются, что ведет к снижению температурных аномалий поверхности [53]. В результате восстановления напочвенного покрова и накопления органического вещества (подстилки) в верхних горизонтах почвы вегетационные спектральные признаки (NDVI) и температуры достигают фоновых значений за характерный период до 20 лет после воздействия пожара (рис. 1, б, з).

Обследованные техногенные территории (отвалы пустых пород, дражные отвалы) долговременно находятся в состоянии нерекультивируемых полигонов. Растительный и почвенный покров формируется с нулевой стадии. Как и на послепожарных участках, наблюдаются изменение спектральных характеристик и уменьшение температурных аномалий, но за более длительный срок — от 20 до 40 лет (рис. 1, а, б). Это свидетельствует об успешном процессе формирования напочвенного покрова и изменении теплофизических свойств почв за счет биогенной трансформации начального субстрата.

При анализе данных по техногенно-нарушенным участкам выявлено, что высокие значения тепловых аномалий (на уровне 67–90 % в начальный период) снижаются до уровня 18–20 % только после 40-летнего периода формирования посттехногенных экосистем. Период стабилизации параметров наблюдается только к 60-му году, при этом уровень относительной аномалии составляет не ниже 15–20 % по отношению к фоновым

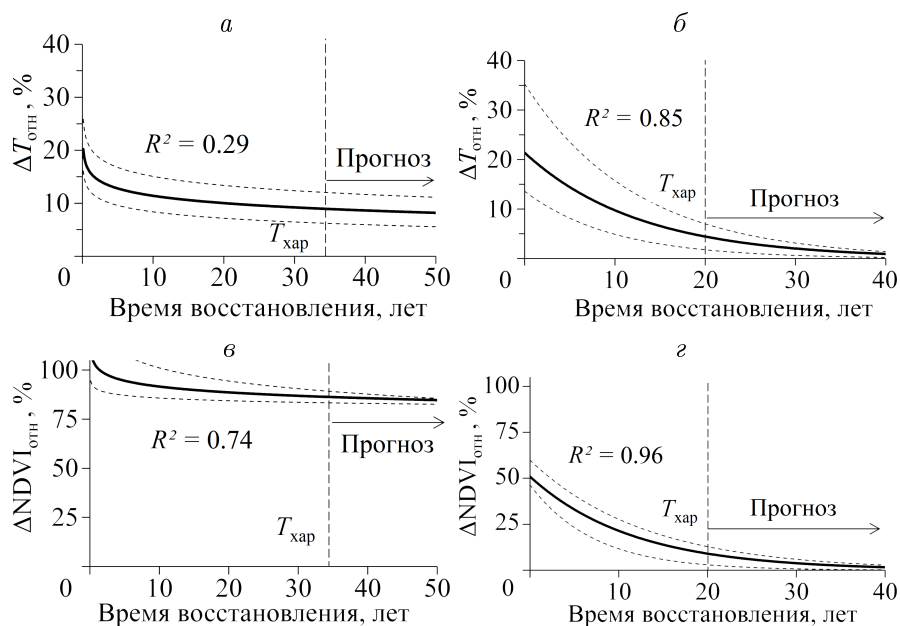


Рис. 1. Изменение спектральных характеристик нарушенных участков в процентах по отношению к фоновым значениям для техногенных участков на ТО (а, в) и ПП (б, г). Приведены средние показатели для летнего периода (июль)

Fig. 1. Spectral characteristics (avaraged for summer (July)) of disturbed plots in percents to the background values for technogenic dumps (а, в) and post-fire sites (б, г)

значениям. Установлено, что уровень относительной аномалии температуры значимо выше на посттехногенных участках и сохраняется вдвое дольше, чем на послепожарных, что согласуется с результатами натуральных экспериментов [23, 54].

3.3. Результаты численного моделирования

Для моделирования рассматривался послепожарный участок почвы, расположенный в криолитозоне Средней Сибири (Эвенкийский район). Данные по глубине снежного покрова, температуре воздуха, скорости ветра и облачности взяты из годового ряда метеонаблюдений для метеостанции пос. Тура за 2018 г.

При численном моделировании теплообмена задачу можно считать периодически установившейся начиная со второго года. Все дальнейшие результаты представлены для третьего расчетного года. Для качественной и количественной верификации результатов расчетов используются данные натуральных наблюдений в районе исследований (рис. 2).

Сравнение результатов моделирования и натуральных наблюдений (рис. 2) показывает близкий характер динамики температур на глубине 0.1 м для почв нарушенных и фоновых участков. Наиболее существенные различия отмечены в летний период (в целом максимумы выше примерно на 5 °С), что может определяться разными метеоусловиями или допущениями модельных характеристик почв, отличающихся от натуральных. Так, в представленных результатах для минерального горизонта глинистого гранулометрического состава использовалась модель из работы [45], так как модель из работ [12, 15] приводила к существенному завышению глубины протаивания грунта [34], что означает необходимость уточнения коэффициентов модели в соответствии с характеристиками натуральных почв.

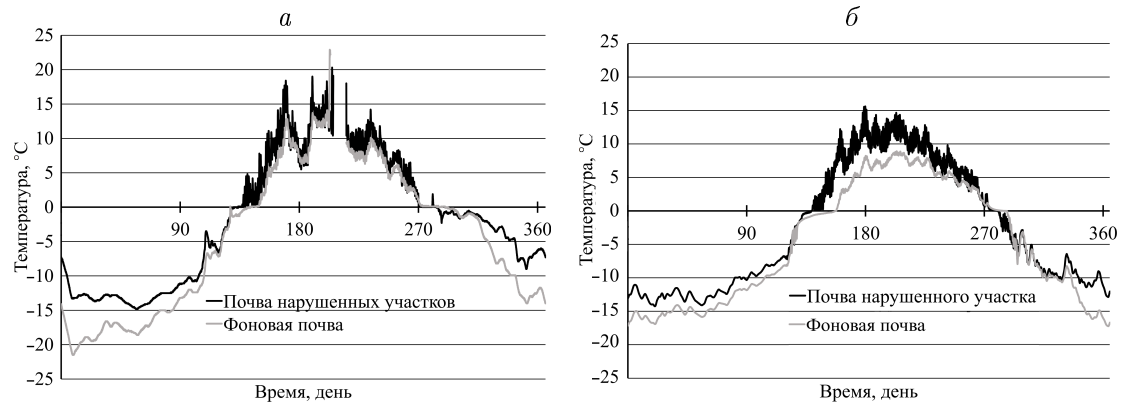


Рис. 2. Годовая динамика температуры на глубине 0.1 м от поверхности для почв нарушенных и фоновых участков в районе исследований: *a* — данные натуральных наблюдений (обобщено по экспериментальным материалам [36]), *б* — результаты расчетов

Fig. 2. Annual temperature dynamics at a depth of 0.1 m: data of field observations in the area of interest (summarized from experimental data [36]) (*a*), simulation results (*b*)

Удалось численно воспроизвести эффект тепловой инверсии в значениях температуры почвы при сравнении нарушенных и ненарушенных участков (рис. 2), обнаруженный при анализе данных натуральных измерений. Результаты численного моделирования позволяют говорить, что условием такого эффекта является большее содержание льда в почвенных слоях фоновых участков в сравнении с вариантами нарушенных территорий. За счет более высокого содержания льда, несмотря на наличие верхнего теплоизолирующего почвенного горизонта, температура в почве ненарушенных участков снижается быстрее. В летний период реализуется обратная ситуация. По результатам численного моделирования (рис. 3) установлено, что больший прогрев почв на нарушенных участках в сравнении с фоновыми территориями обуславливает увеличение глубины протаивания на 29 % за счет как отсутствия дополнительного теплоизолирующего горизонта, так и вследствие меньших значений альбедо и степени черноты. Рассчитанный рост глубины протаивания для нарушенной почвы согласуется с данными наблюдений, которые показывают относительное увеличение глубины протаивания в пределах 25–40 % [34]. Для неповрежденной почвы помимо разных температур и глубины протаивания наблюдается двухнедельное запаздывание начала и конца процесса фазового перехода воды. Кроме того, можно отметить, что максимальная глубина протаивания наблюдается в конце сентября примерно с 2.5-месячным смещением относительно сроков летнего максимума температуры воздуха.

Численными методами зафиксировано относительное превышение температуры $\Delta T_{\text{отн}}$ поверхности на поврежденных участках в летние месяцы на 15–25 %, что коррелирует с данными спутниковых и натуральных наблюдений (см. таблицу) для послепожарных участков. Такие значения $\Delta T_{\text{отн}}$ реализуются в случае одновременного существенного снижения влагосодержания и изменения оптических характеристик нарушенных участков. Результаты моделирования позволяют говорить о том, что при исключении влияния фактора влагосодержания (одинаковое влагосодержание в верхних почвенных горизонтах) разница в величине лучистого потока за счет разных альбедо дает величину $\Delta T_{\text{отн}}$ не более 5 %, что примерно в 4–5 раз ниже в сравнении с данными спутниковых наблюдений. Для того чтобы наблюдаемое значение $\Delta T_{\text{отн}}$ определялось только разницей величин поглощенного солнечного излучения, альбедо для нарушенного участка должно быть в несколько раз меньше, чем для фоновых территорий.

Задача моделирования теплообмена имеет двумерный характер из-за граничных эффектов на периферии нарушенных участков. Наиболее явно это наблюдается в осенний период, когда в начале периода отрицательных температур формируется водная полость, окруженная льдом в надмерзлотной толще (рис. 4), ее дальнейшее уменьшение происходит как с верхней, так и с нижней границы. Время существования водной полости зависит от свойств почвы и внешних метеоусловий, она может сохраняться в течение нескольких недель. На фоновом участке время существования водной полости примерно в 1.5 раза меньше по сравнению с нарушенным участком для рассматриваемого типа почвы. Во время существования водной полости горизонтальное распространение тепловых возмущений от участка с поврежденным почвенным покровом на неповрежденный участок максимально и достигает порядка 5.5 м на глубине до 0.5 м (в пределах корнеобитаемого слоя).

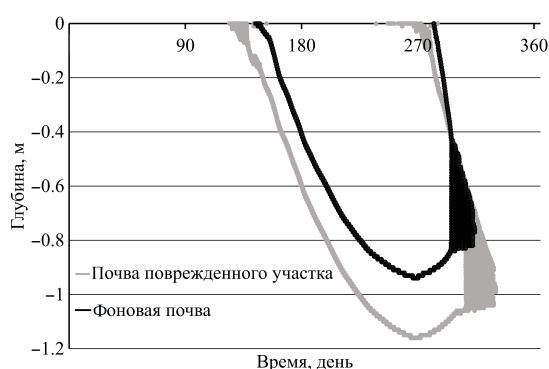


Рис. 3. Расчетная глубина границы фазового перехода вода — лед. Глубина отсчитывается от поверхности участка с нарушенным верхним горизонтом

Fig. 3. Calculated depth of the water/ice phase transition boundary. Depth is measured from the surface of the disturbed soil area

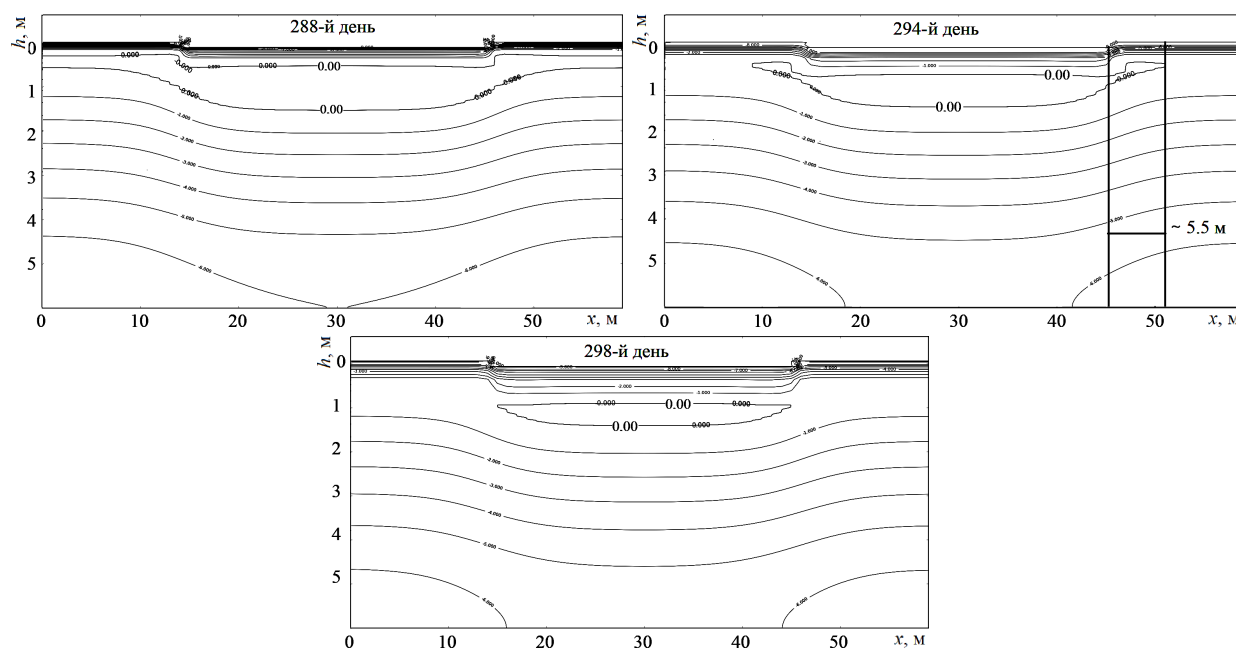


Рис. 4. Результаты численного моделирования двумерного поля температур в начале второй половины осени, °С

Fig. 4. Results of numerical modelling of a two-dimensional temperature field for mid-autumn period

Заключение

Нарушения почвенного покрова при действии естественных факторов (пожаров) чаще всего не приводят к смене типа почвы и тем более к смене ландшафта. Однако при техногенных нарушениях происходит глубокая трансформация ландшафта, что вызывает изменение структуры и функционирования почвенного покрова, смену основных типов почв, которые в значительной степени отличаются от исходных, фоновых почв. Вследствие нарушения напочвенного покрова и верхних органомогенных горизонтов, выполняющих теплоизолирующую функцию, в почвах происходит изменение теплового режима, что фиксируется как точечными натурными измерениями, так и дистанционными методами в виде тепловых аномалий поверхности. Период восстановления теплового режима для послепожарных участков составляет не менее 20 лет, для техногенно-нарушенных территорий тепловые аномалии сохраняются значительно дольше — 60–80 лет. В отдельных случаях, когда в экосистемах наблюдается смена ландшафта, разница между температурами поверхности на нарушенных и фоновых участках стабилизируется и далее не сокращается.

Данные натурных наблюдений и результаты численного моделирования показали, что разрушение верхнего слоя почвы может приводить не только к повышенным температурам летом, но и вызывать тепловую инверсию зимой, когда термическое сопротивление в верхнем органическом слое нарушенной почвы становится меньше, чем в верхних органических горизонтах фоновой почвы.

На основании результатов численного моделирования продемонстрировано формирование водных полостей, характерных для почв криолитозоны. Длительность существования подобных полостей для рассматриваемых нарушенных почв вследствие тепловой инверсии выше, чем для фоновых. Численное моделирование показало, что по периферии участков с нарушенными напочвенным покровом и почвами в результате горизонтального переноса тепла формируются переходные области. Характерный размер такой зоны при возникновении водной полости для рассматриваемых почв может достигать 5.5 м. По всей вероятности, вдоль границ нарушенных участков могут формироваться зоны быстрых восстановительных сукцессий, что актуализирует дальнейшее изучение их свойств.

В целом можно говорить, что удовлетворительно в качественном и количественном отношении согласуются результаты численного моделирования и данные натурных (наземных и дистанционных) наблюдений. Для дальнейшего улучшения прогностических возможностей математической модели в рассмотрение необходимо добавить учет процессов влагопереноса.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках государственного задания ИЛ СО РАН № 0287-2021-0008 (НИОКТР № 121031500339-0), № 0287-2021-0010 (НИОКТР № 121030900181-4) и при поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности (грант № 20-44-242002 “Инструментальный мониторинг физических свойств и численное моделирование состояния техногенно-нарушенных почв Сибири”). Исследование теплообмена в почве выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (НИОКТР № 121031800229-1).

Список литературы

- [1] **Dror I., Yaron B.** The human impact on all soil-forming factors during the anthropocene. *ACS Environmental Science & Technology*. 2022; (2):11–19. DOI:10.1021/acsenvironau.1c00010. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsenvironau.1c00010>.
- [2] **Пономарев Е.И., Пономарева Т.В.** Влияние послепожарных температурных аномалий на сезонное протаивание почв мерзлотной зоны Средней Сибири по дистанционным данным. *Сибирский экологический журнал*. 2018; 4:477–486. DOI:10.15372/SEJ20180408. Адрес доступа: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S1995425518040066.pdf>.
- [3] Государственный доклад “О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2020 году”. Министерство экологии и рационального природопользования Красноярского края; 2021. Адрес доступа: http://www.mpr.krskstate.ru/dat/bin/art_attach/17690_gosdoklad_2020.pdf (дата обращения 01.02.2022).
- [4] **Herrick J.E., Brown J.R., Bestelmeyer B.T., Andrews S.S., Baldi G., Davies J., Duniway M., Havstad K.M., Karl J.W., Karlen D.L., Peters D.P.C., Quinton J.N., Riginos C., Shaver P.L., Steinaker D., Twomlow S.** Revolutionary land use change in the 21st Century: is (Rangeland) science relevant. *Rangeland Ecology and Management*. 2012; 65(6):590–598. DOI:10.2111/REM-D-11-00186.1. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1550742412500977?via%3Dihub>
- [5] **Краснощеков К.В., Дергунов А.В., Пономарев Е.И.** Оценка тепловых карт подстилающей поверхности на участках вырубок по данным Landsat. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019; 16:87–97. DOI:10.21046/2070-7401-2019-16-2-87-97. Адрес доступа: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2019t2/87-97.pdf.
- [6] **Uzarowicz L., Charzynski P., Greinert A., Hulisz P., Kabala C., Kusza G., Kwasowski W., Pedziwiatr A.** Studies of technogenic soils in Poland: past, present, and future perspectives. *Soil Science Annual*. 2020; 71(4):281–299. DOI:10.37501/soilsa/131615. Available at: <http://www.soilsa.com/pdf-131615-68517?filename=Studies%20of%20technogenic.pdf> (accessed 01.02.2022).
- [7] **Безкоровайная И.Н., Иванова Г.А., Тарасов П.А., Сорокин Н.Д., Богородская А.В., Иванов В.А., Конрад С.Г., Макрае Д.Дж.** Пирогенная трансформация почв сосняков средней тайги Красноярского края. *Сибирский экологический журнал*. 2005; (1):143–152. Адрес доступа: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/7c4/7c4281787687934140bca80ff145ece4.pdf> (дата обращения 01.02.2022).
- [8] **Дымов А.А., Дубровский Ю.А., Габов Д.Н.** Пирогенные изменения подзолов иллювиально-железистых (средняя тайга, Республика Коми). *Почвоведение*. 2014; (2):144–154. DOI:10.7868/S0032180X14020051. Адрес доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21092633_44918343.pdf (дата обращения 01.02.2022).
- [9] **Харук В.И., Пономарев Е.И.** Пространственно-временная горимость лиственничников Центральной Сибири. *Экология*. 2017; (6):413–419. DOI:10.7868/S0367059717060026.
- [10] **Ставрова Н.И., Калимова И.Б., Горшков В.В., Дроздова И.В., Алексева-Попова Н.В., Баккал И.Ю.** Долговременные послепожарные изменения характеристик почв в темнохвойных лесах Европейского севера. *Почвоведение*. 2019; (2):246–256. DOI:10.1134/S0032180X19020138. Адрес доступа: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=pochved&year=2019&vol=2019&iss=2&file=Pochved1902013Stavrova.pdf>.

- [11] **Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Рыжова И.М., Москаленко Н.Г., Пономарева О.Е., Огнева О.А.** Взаимосвязь геокриологических условий и гидротермических параметров почв плоскобугристых торфяников севера Западной Сибири (стационар Надым). Криосфера Земли. 2015; 19(4):31–38. Адрес доступа: <https://istina.msu.ru/download/73747053/1njdAK:zI1DGp0o8peMas2P43a1HS5XJHE>.
- [12] **Tarnawski V.R., Leong W.H., Bristow K.L.** Developing a temperature-dependent Kersten function for soil thermal conductivity. International Journal of Energy Research. 2000; 24(15):1335–1335. DOI:10.1002/1099-114X(200012)24:15<1335::AID-ER652>3.0.CO;2-X.
- [13] **Park H., Launiainen S., Konstantinov P.Y., Iijima Y., Fedorov A.N.** Modeling the effect of moss cover on soil temperature and carbon fluxes at a Tundra site in northeastern Siberia. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2018; (123):3028–3044. DOI:10.1029/2018JG004491. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2018JG004491>.
- [14] **Десяткин Р.В., Десяткин А.Р., Федоров П.П.** Температурный режим мерзлотно-таежных по Центральной Якутии. Криосфера Земли. 2012; 16(2):70–78. Адрес доступа: http://earthcryosphere.ru/archive/2012_2/10.Desyatkin_2_2012.pdf
- [15] **Ekici A., Beer C., Hagemann S., Boike J., Langer M., Hauck C.** Simulating highlatitude permafrost regions by the JSBACH terrestrial ecosystem model. Geoscientific Model Development. 2014; 7(2):631–647. DOI:10.5194/gmd-7-631-2014. Available at: <https://gmd.copernicus.org/articles/7/631/2014/gmd-7-631-2014.pdf>.
- [16] **Porada P., Ekici A., Beer C.** Effects of bryophyte and lichen cover on permafrost soil temperature at large scale. The Cryosphere. 2016; 10(5):2291–2315. DOI:10.5194/tc-10-2291-2016. Available at: <https://tc.copernicus.org/articles/10/2291/2016/tc-10-2291-2016.pdf>
- [17] **Павлов А.В.** Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: Гео; 2008: 229.
- [18] **Orgogozo L., Prokushkin A.S., Pokrovsky O.S., Grenier C., Quintard M., Viers J., Audry S.** Water and energy transfer modeling in a permafrost dominated, forested catchment of Central Siberia: the key role of rooting depth. Permafrost and Periglacial Process. 2019; (30):75–89. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ppp.1995>.
- [19] **Perevoznikova V.D., Ivanova G.A., Kovaleva N.M., Ivanov V.A.** Transformation of ground vegetation under the effect of fires in pine forests of Middle Siberia. Russian Journal of Ecology. 2007; 38(6):444–448. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S1067413607060124.pdf>.
- [20] **Sokolov D.A., Androkhanov V.A., Abakumov E.V.** Soil formation in technogenic landscapes: trends, results, and representation in the current classifications (review). Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya. 2021; (56):6–32. DOI:10.17223/19988591/56/1.
- [21] **Корниенко С.Г.** Изучение трансформаций тундрового напочвенного покрова на участках пирогенного поражения по данным спутников LANDSAT. Криосфера Земли. 2017; 21(1):93–104. Адрес доступа: http://earthcryosphere.ru//archive/2017_1/10.%20Kornienko,%20Earth's%20Cryosphere%201-2017%20pp.93-104_opt.pdf.
- [22] **Masyagina O.V., Evgrafova S.Y., Titov S.V., Prokushkin A.S.** Dynamics of soil respiration at different stages of pyrogenic restoration succession with different-aged burns in Evenkia as an example. Russian Journal of Ecology. 2015; 46(1):25–35. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S1067413615010117.pdf>.
- [23] **Пономарева Т.В.** Оценка структурной организации почв техногенных ландшафтов на основе радиометрической съемки в тепловом диапазоне. Почвы в биосфере. Материалы

- Всероссийской конференции. Новосибирск; 2018: 440–413. Адрес доступа: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000633357>.
- [24] **Masyagina O.V., Evgrafova S.Y., Titov S.V., Prokushkin A.S.** A comparative study of soil processes in depletion and accumulation zones of permafrost landslides in Siberia. *Landslides*. 2020; (17):2577–2587. DOI:10.1007/s10346-020-01550-z. Available at: <https://ibook.pub/ql/a-comparative-study-of-soil-processes-in-depletion-and-accumulation-zones-of-permafrost-landslides-in-siberia>.
- [25] **Romanov A.N.** Influence of water content and temperature on the dielectric and radio emitting properties of the salt crust of puffy solonchak. *Eurasian Soil Science*. 2019; 52(2):171–179. DOI:10.1134/S1064229319020121. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S1064229319020121.pdf>.
- [26] **Mironov V.L., Muzalevskiy K.V., Savin I.V.** Retrieving temperature gradient in frozen active layer of Arctic Tundra soils from radiothermal observations in L-band — theoretical modeling. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2013; (6):1781–1785. Available at: <http://irbiscorp.spsl.nsc.ru/fulltext/iph/2013/10.1109~JSTARS.2013.2262108.pdf>.
- [27] **Im S.T., Kharuk V.I.** Dynamics of water mass in the Central Siberia permafrost zone based on gravity survey from the grace satellites. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015; (51):806–818. DOI:10.1134/S0001433815080046. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S0001433815080046.pdf>.
- [28] **Родионова Н.В.** Корреляция радарных данных SENTINEL 1 с наземными измерениями температуры и влажности почвы. *Исследование Земли из космоса*. 2018; (4):32–42. DOI:10.31857/S020596140002354-0. Адрес доступа: <http://ras.jes.su/izk/s207987840001552-6-1> (дата обращения 01.02.2022).
- [29] **Jin V.L., Haney R.L., Fay P.A., Polley H.W.** Soil type and moisture regime control microbial C and N mineralization in grassland soils more than atmospheric CO₂-induced changes in litter quality. *Soil Biology and Biochemistry*. 2013; (58):172–180. DOI:10.1016/j.soilbio.2012.11.024. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071712004683>.
- [30] **Виноградов Ю.Б., Семенова О.М., Виноградова Т.А.** Гидрологическое моделирование метода расчета динамики тепловой энергии в почвенном профиле. *Криосфера Земли*. 2015; 1:11–21. Адрес доступа: http://earthcryosphere.ru/archive/2015_1/02.Vinogradov_1_2015.pdf.
- [31] **Скрябин П.Н., Варламов С.П.** Термический режим грунтов нарушенных ландшафтов Центральной Якутии. *Криосфера Земли*. 2013; 17(3):44–49. Адрес доступа: http://earthcryosphere.ru/archive/2013_3/05.Skryabin_3_2013.pdf.
- [32] **Brown D.R.N., Jorgenson M.T., Kielland K., Verbyla D.L., Prakash A., Koch J.C.** Landscape effects of wildfire on permafrost distribution in Interior Alaska derived from remote sensing. *Remote Sensing*. 2016; 8(8):654. DOI:10.3390/rs8080654. Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/8/654/htm>.
- [33] **Zwieback S., Westermann S., Langer M., Boike J., Marsh P., Berg A.** Improving permafrost modeling by assimilating remotely sensed soil moisture. *Water Resources Research*. 2019; (55):1814–1832. DOI:10.1029/2018WR023247. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2018WR023247>.
- [34] **Ponomarev E., Masyagina O., Litvintsev K., Ponomareva T., Shvetsov E., Finnikov K.** The effect of post-fire disturbances on a seasonally thawed layer in the permafrost

- larch forests of Central Siberia. *Forests*. 2020; 11(790). DOI:10.3390/f11080790. Available at: <https://www.mdpi.com/1999-4907/11/8/790/htm>.
- [35] **Абаимов А.П., Бондарев А.И., Зырянова О.А., Шитов С.А.** Леса Красноярского Заполярья. Новосибирск: Наука; 1997: 208.
- [36] **Osawa A., Zyryanova O.A., Matsuura Y., Kajimoto T., Wein R.W.** Permafrost ecosystems. *Siberian Larch Forests*. Springer; 2010: 528. DOI:10.1007/978-1-4020-9693-8.
- [37] **Kawahigashi M., Prokushkin A., Sumida H.** Effect of fire on solute release from organic horizons under larch forest in Central Siberian permafrost terrain. *Geoderma*. 2011; 166(1):171–180. DOI:10.1016/j.geoderma.2011.07.027.
- [38] **Dymov A.A., Abakumov E.V., Bezkorovaynaya I.N., Prokushkin A.S., Kuzyakov Y.V., Milanovsky E.Y.** Impact of forest fire on soil properties. *Theoretical and Applied Ecology*. 2018; (4):13–23. DOI:10.25750/1995-4301-2018-4-013-023. Available at: <http://envjournal.ru/ari/v2018/v4/18402.pdf>.
- [39] **Mishra N., MdHaque O., Leigh L., Aaron D., Helder D., Markham B.** Radiometric cross calibration of Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). *Remote Sensing*. 2014; (6):12619–12638. Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/6/12/12619/htm>.
- [40] **Zanter K.** Landsat 8 (L8) data users handbook. U.S. Geological Survey. 2018. Available at: https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook.pdf (accessed 01.02.2022).
- [41] **Van Huissteden J.** Thawing permafrost. Permafrost carbon in a warming arctic. Springer Nature Switzerland AG; 2018: 508. DOI:10.1007/978-3-030-31379-1.
- [42] **Zhang Y., Carey S.K., Quinton W.L.** Evaluation of the algorithms and parameterizations for ground thawing and freezing simulation in permafrost regions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2008; (113):D17116. DOI:10.1029/2007JD009343. Available at: https://scholars.wlu.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1021&context=geog_faculty.
- [43] **Patankar S.V.** Numerical heat transfer and fluid flow. N.Y.: Hemisphere Publishing Corporation; 1980: 197. DOI:10.1201/9781482234213.
- [44] **Ferziger J.H., Koseff J.R., Monismith S.G.** Numerical simulation of geophysical turbulence. *Computers and Fluids*. 2002; 31(4):557–568. Available at: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.486.2251&rep=rep1&type=pdf>.
- [45] **Павлов А.В.** Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука; 1979: 285.
- [46] **Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Лавров С.А., Малкова Г.В., Мяч Л.Т., Павлов А.В., Романовский В.А., Стрелецкий Д.А., Холодов А.Л., Шикломанов Н.И.** Глава 8. Континентальная многолетняя мерзлота. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. Под ред. С.М. Семенова. М.: Планета; 2012: 301–359. Адрес доступа: http://downloads.igce.ru/publications/metodi_ocenki/08.pdf (дата обращения 01.02.2022).
- [47] **Johansen O.** Thermal conductivity of soils. Hanover: CRREL Draft Translation; 1977: 637.
- [48] **Oke T.R.** Boundary layer climates. Routledge: Taylor & Francis Group; 1987: 435.
- [49] **Psiloglou B.E., Santamouris M., Asimakopoulos D.N.** Atmospheric broadband model for computation of solar radiation at the Earth's surface. Application to mediterranean climate. *Pure and Applied Geophysics*. 2000; (157):829–860. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/PL00001120.pdf>.

- [50] **Paltridge G.W., Platt C.M.R.** Radiative processes in meteorology and climatology. Amsterdam, N.Y.: Elsevier Scientific Publ. Co.; 1976: 318.
- [51] **Prata A.J.** A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 1996; (122):1127–1151. DOI:10.1002/qj.49712253306.
- [52] **Herrero J., Polo M.J.** Parameterization of atmospheric longwave emissivity in a mountainous site for all sky conditions. Hydrology and Earth System Sciences. 2012; (16):3139–3147. DOI:10.5194/hess-16-3139-2012. Available at: <https://hess.copernicus.org/articles/16/3139/2012/hess-16-3139-2012.pdf>.
- [53] **Yakimov N.D., Ponomarev E.I.** Dynamics of post-fire effects in larch forests of Central Siberia based on satellite data. E3S Web of Conferences. Regional Problems of Earth Remote Sensing. 2020; 149(03008):6. DOI:10.1051/e3sconf/202014903008. Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/09/e3sconf_rpers2020_03008.pdf.
- [54] **Безкорвайная И.Н., Борисова И.В., Климченко А.В., Шабалина О.М., Захарченко Л.П., Ильин А.А., Бескровный А.К.** Влияние пирогенного фактора на биологическую активность почв в условиях многолетней мерзлоты (Центральная Эвенкия). Вестник КрасГАУ. 2017; (9):181–189.

Вычислительные технологии, 2022, том 27, № 3, с. 16–35. © ФИЦ ИВТ, 2022
Computational Technologies, 2022, vol. 27, no. 3, pp. 16–35. © FRC ICT, 2022

ISSN 1560-7534
eISSN 2313-691X

MATHEMATICAL MODELLING

DOI:10.25743/ICT.2022.27.3.003

Thermal state of disturbed soils in the permafrost zone of Siberia according the remote data and numerical simulation

PONOMAREVA TATIANA V.^{1,2,*}, PONOMAREV EVGENII I.^{1,2}, LITVINTSEV KIRILL YU.³,
FINNIKOV KONSTANTIN A.², YAKIMOV NIKITA D.^{2,4}

¹V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, 660036, Krasnoyarsk, Russia

²Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russia

³Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Krasnoyarsk Branch, 660036, Krasnoyarsk, Russia

⁴Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center”, 660036, Krasnoyarsk, Russia

*Corresponding author: Ponomareva Tatiana V., e-mail: bashkova_t@mail.ru

Received February 17, 2022, revised April 06, 2022, accepted April 12, 2022.

Abstract

The article discusses the results of monitoring and modelling the thermal state of soils in Siberian permafrost ecosystems disturbed by natural or technogenic factors. In the study, we used long-term satellite data and numerical simulation techniques for evaluating heat transfer and a variety of water/ice phase boundaries in the soil profile with reference to ground-based measurements. We simulated the state of the seasonally thawed layer of disturbed soils when thermal insulation properties of the surface decreases. Also, we estimated the limits of variation and the trends in the dynamics of surface thermal anomalies in disturbed plots depending on impact factors. According to remote sensing, the thermal insulation properties of the vegetation cover restore within 20 years after fire impact. During that time, the relative temperature anomaly reaches the level of background values. In post-technogenic plots, conditions are more “contrast” compared to the background which lead to significantly longer period to restoration of the thermal regime (up to 60–80 years).

The data from field observations and numerical simulation revealed positive temperature anomaly within soil profile in the disturbed areas that lasts for the whole year. Its presence in winter is caused by the decrease of thermal insulation properties of the organogenic soil layers. The presence of transition regions due to horizontal heat transfer in soils (with a characteristic size of ~ 5.5 m) was observed. In our opinion, areas of rapid recovery successions can form along the boundaries of disturbed areas. This actualizes further study of their properties.

Keywords: disturbed soils, heat transfer, numerical simulation, thermal imaging, remote sensing data, seasonally thawed layer.

Citation: Ponomareva T.V., Ponomarev E.I., Litvintsev K.Yu., Finnikov K.A., Yakimov N.D. Thermal state of disturbed soils in the permafrost zone of Siberia according the remote data and numerical simulation. Computational Technologies. 2022; 27(3):16–35. DOI:10.25743/ICT.2022.27.3.003. (In Russ.)

Acknowledgements. This study was performed within IF SB RAS project No. 0287-2021-0008 (NIOKTR No. 121031500339-0) and FRC KSC SB RAS project No. 0287-2021-0010 (NIOKTR No. 121030900181-4). This research was partly funded by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), Government of the Krasnoyarsk Region, and Krasnoyarsk Regional Foundation for Research and Development Support (grant No. 20-44-242002 “Instrumental monitoring of physical properties and numerical modelling of the state of technogenically disturbed soils in Siberia”). The study of heat transfer in the soil was carried out as part of the state assignment for the IT SB RAS (121031800229-1).

References

1. **Dror I., Yaron B.** The human impact on all soil-forming factors during the anthropocene. ACS Environmental Science & Technology. 2022; (2):11–19. DOI:10.1021/acsenvironau.1c00010. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsenvironau.1c00010>.
2. **Ponomarev E.I., Ponomareva T.V.** The effect of postfire temperature anomalies on seasonal soil thawing in the permafrost zone of central Siberia evaluated using remote data. Contemporary Problems of Ecology. 2018; (4):477–486. DOI:10.1134/S1995425518040066. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S1995425518040066.pdf>. (In Russ.)
3. Gosudarstvennyy doklad “O sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy v Krasnoyarskom krae v 2020 godu”. Ministerstvo Ekologii i Ratsional’nogo Prirodopol’zovaniya Krasnoyarskogo Kraya; 2021 [State report “On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory in 2020”. Ministry of Ecology and Rational Nature Management of the Krasnoyarsk Territory; 2021]. Available at: http://www.mpr.krskstate.ru/dat/bin/art_attach/17690_gosdoklad_2020.pdf (accessed 01.02.2022).
4. **Herrick J.E., Brown J.R., Bestelmeyer B.T., Andrews S.S., Baldi G., Davies J., Duniway M., Havstad K.M., Karl J.W., Karlen D.L., Peters D.P.C., Quinton J.N., Riginos C., Shaver P.L., Steinaker D., Twomlow S.** Revolutionary land use change in the 21st Century: is (Rangeland) science relevant. Rangeland Ecology and Management. 2012; 65(6):590–598. DOI:10.2111/REM-D-11-00186.1. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1550742412500977?via%3Dihub>.
5. **Krasnoshchekov K.V., Dergunov A.V., Ponomarev E.I.** Evaluation of underlying surface temperature maps on logging sites using Landsat data. Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. 2019; (16):87–97. DOI:10.21046/2070-7401-2019-16-2-87-97. Available at: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2019t2/87-97.pdf. (In Russ.)
6. **Uzarowicz L., Charzynski P., Greinert A., Hulisz P., Kabala C., Kusza G., Kwasowski W., Pedziwiatr A.** Studies of technogenic soils in Poland: past, present, and future perspectives. Soil Science Annual. 2020; 71(4):281–299. DOI:10.37501/soilsa/131615. Available at: <http://www.soilsa.com/pdf-131615-68517?filename=Studies%20of%20technogenic.pdf> (accessed 01.02.2022).
7. **Bezkorovaynaya I.N., Ivanova G.A., Tarasov P.A., Sorokin N.D., Bogorodskaya A.V., Ivanov V.A., McRae D.J.** Pyrogenic transformation of soils in pine forests in the middle taiga of the Krasnoyarsk Territory. Contemporary Problems of Ecology. 2005; (1):143–152. Available at: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/7c4/7c4281787687934140bca80ff145ece4.pdf> (accessed 01.02.2022). (In Russ.)

8. **Dymov A.A., Dubrovsky Yu.A., Gabov D.N.** Pyrogenic changes in iron-illuvial podzols in the middle taiga of the Komi Republic. *Eurasian Soil Science*. 2014; (2):144–154. DOI:10.7868/S0032180X14020051. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21092633_44918343.pdf (accessed 01.02.2022). (In Russ.)
9. **Kharuk V.I., Ponomarev E.I.** Spatiotemporal characteristics of wildfire frequency and relative area burned in larch-dominated forests of Central Siberia. *Russian Journal of Ecology*. 2017; (6):413–419. DOI:10.7868/S0367059717060026. (In Russ.)
10. **Stavrova N.I., Kalimova I.B., Gorshkov V.V., Drozdova I.V., Alekseeva-Popova N.V., Bakkal I.Yu.** Long-term post-fire changes in soil characteristics in dark coniferous forests of the European North. *Eurasian Soil Science*. 2019; 52(2):218–227. DOI:10.1134/S1064229319020133. Available at: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=pochved&year=2019&vo1=2019&iss=2&file=Pochved1902013Stavrova.pdf>. (In Russ.)
11. **Bobrik A.A., Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Ryzhova I.M., Moskalenko N.G., Ponomareva O.E., Ogneva O.A.** Correlation of active layer thickness and landscape parameters of peatland in Northern West Siberia (Nadym station). *Earth's Cryosphere*. 2015; 19(4):31–38. Available at: <https://istina.msu.ru/download/73747053/1njdAK:zI1DGp0o8peMas2P43a1HS5XJHE>. (In Russ.)
12. **Tarnawski V.R., Leong W.H., Bristow K.L.** Developing a temperature-dependent Kersten function for soil thermal conductivity. *International Journal of Energy Research*. 2000; 24(15):1335–1335. DOI:10.1002/1099-114X(200012)24:15<1335::AID-ER652>3.0.CO;2-X.
13. **Park H., Launiainen S., Konstantinov P.Y., Iijima Y., Fedorov A.N.** Modeling the effect of moss cover on soil temperature and carbon fluxes at a tundra site in northeastern Siberia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2018; (123):3028–3044. DOI:10.1029/2018JG004491. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2018JG004491>.
14. **Desyatkin R.V., Desyatkin A.R., Fedorov P.P.** Temperature regime of the forest soils, Central Yakutia. *Earth's Cryosphere*. 2012; 16(2):70–78. Available at: http://earthcryosphere.ru/archive/2012_2/10.Desyatkin_2_2012.pdf. (In Russ.)
15. **Ekici A., Beer C., Hagemann S., Boike J., Langer M., Hauck C.** Simulating highlatitude permafrost regions by the JSBACH terrestrial ecosystem model. *Geoscientific Model Development*. 2014; 7(2):631–647. DOI:10.5194/gmd-7-631-2014. Available at: <https://gmd.copernicus.org/articles/7/631/2014/gmd-7-631-2014.pdf>.
16. **Porada P., Ekici A., Beer C.** Effects of bryophyte and lichen cover on permafrost soil temperature at large scale. *The Cryosphere*. 2016; 10(5):2291–2315. DOI:10.5194/tc-10-2291-2016. Available at: <https://tc.copernicus.org/articles/10/2291/2016/tc-10-2291-2016.pdf>.
17. **Pavlov A.V.** Monitoring kriolitozony [Cryolithozone monitoring]. Novosibirsk: Geo; 2008: 229. (In Russ.)
18. **Orgogozo L., Prokushkin A.S., Pokrovsky O.S., Grenier C., Quintard M., Viers J., Audry S.** Water and energy transfer modeling in a permafrost dominated, forested catchment of Central Siberia: the key role of rooting depth. *Permafrost and Periglacial Process*. 2019; (30):75–89. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ppp.1995>.
19. **Perevoznikova V.D., Ivanova G.A., Kovaleva N.M., Ivanov V.A.** Transformation of ground vegetation under the effect of fires in pine forests of Middle Siberia. *Russian Journal of Ecology*. 2007; 38(6):444–448. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S1067413607060124.pdf>.
20. **Sokolov D.A., Androkhonov V.A., Abakumov E.V.** Soil formation in technogenic landscapes: trends, results, and representation in the current classifications (review). *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya*. 2021; (56):6–32. DOI:10.17223/19988591/56/1.
21. **Kornienko S.G.** Transformation of tundra land cover at the sites of pyrogenic disturbance: studies based on Landsat satellite data. *Earth's Cryosphere*. 2017; 21(1):93–104. Available at: http://earthcryosphere.ru/archive/2017_1/10.%20Kornienko,%20Earth's%20Cryosphere%201-2017%20pp.93-104_opt.pdf. (In Russ.)
22. **Masyagina O.V., Evgrafova S.Y., Titov S.V., Prokushkin A.S.** Dynamics of soil respiration at different stages of pyrogenic restoration succession with different-aged burns in Evenkia as an example. *Russian Journal of Ecology*. 2015; 46(1):25–35. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S1067413615010117.pdf>.

23. **Ponomareva T.V.** Assessment of the structural organization of soils of technogenic landscapes on the basis of radiometric survey in the thermal range. *Soils in the Biosphere, Proceedings of the All-Russian Conference*. Novosibirsk; 2018: 440–413. Available at: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000633357>. (In Russ.)
24. **Masyagina O.V., Evgrafova S.Y., Titov S.V., Prokushkin A.S.** A comparative study of soil processes in depletion and accumulation zones of permafrost landslides in Siberia. *Landslides*. 2020; (17):2577–2587. DOI:10.1007/s10346-020-01550-z. Available at: <https://ibook.pub/ql/a-comparative-study-of-soil-processes-in-depletion-and-accumulation-zones-of-permafrost-landslides-in-siberia>.
25. **Romanov A.N.** Influence of water content and temperature on the dielectric and radio emitting properties of the salt crust of puffy solonchak. *Eurasian Soil Science*. 2019; 52(2):171–179. DOI:10.1134/S1064229319020121. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S1064229319020121.pdf>.
26. **Mironov V.L., Muzalevskiy K.V., Savin I.V.** Retrieving temperature gradient in frozen active layer of Arctic Tundra soils from radiothermal observations in L-band — theoretical modeling. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2013; (6):1781–1785. Available at: <http://irbiscorp.spsl.nsc.ru/fulltext/iph/2013/10.1109~JSTARS.2013.2262108.pdf>.
27. **Im S.T., Kharuk V.I.** Dynamics of water mass in the Central Siberia permafrost zone based on gravity survey from the grace satellites. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015; (51):806–818. DOI:10.1134/S0001433815080046. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S0001433815080046.pdf>.
28. **Rodionova N.V.** Sentinel 1 radar data correlation with ground measurements of soil moisture and temperature. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2018; (4):32–42. Available at: <http://ras.jes.su/izk/s207987840001552-6-1>. (In Russ.)
29. **Jin V.L., Haney R.L., Fay P.A., Polley H.W.** Soil type and moisture regime control microbial C and N mineralization in grassland soils more than atmospheric CO₂-induced changes in litter quality. *Soil Biology and Biochemistry*. 2013; (58):172–180. DOI:10.1016/j.soilbio.2012.11.024. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071712004683>.
30. **Vinogradov Yu.B., Semenova O.M., Vinogradova T.A.** Hydrological modeling: the approach to simulation of heat dynamics in soil profile (Part 1). *Earth's Cryosphere*. 2015; 19(1):11–21. Available at: http://earthcryosphere.ru/archive/2015_1/02.Vinogradov_1_2015.pdf. (In Russ.)
31. **Skryabin P.N., Varlamov S.P.** Ground thermal regime in disturbed landscapes of Central Yakutia. *Earth's Cryosphere*. 2013; 17(3):44–49. Available at: http://earthcryosphere.ru/archive/2013_3/05.Skryabin_3_2013.pdf. (In Russ.)
32. **Brown D.R.N., Jorgenson M.T., Kielland K., Verbyla D.L., Prakash A., Koch J.C.** Landscape effects of wildfire on permafrost distribution in Interior Alaska derived from remote sensing. *Remote Sensing*. 2016; 8(8):654. DOI:10.3390/rs8080654. Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/8/654/htm>.
33. **Zwieback S., Westermann S., Langer M., Boike J., Marsh P., Berg A.** Improving permafrost modeling by assimilating remotely sensed soil moisture. *Water Resources Research*. 2019; (55):1814–1832. DOI:10.1029/2018WR023247. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2018WR023247>.
34. **Ponomarev E., Masyagina O., Litvintsev K., Ponomareva T., Shvetsov E., Finnikov K.** The effect of post-fire disturbances on a seasonally thawed layer in the permafrost larch forests of Central Siberia. *Forests*. 2020; 11(790). DOI:10.3390/f11080790. Available at: <https://www.mdpi.com/1999-4907/11/8/790/htm>.
35. **Abaimov A.P., Bondarev A.I., Zyryanova O.A., Shitov S.A.** Lesa Krasnoyarskogo Zapolyar'ya [Polar forests of Krasnoyarsk Region]. Novosibirsk: Nauka; 1997: 208. (In Russ.)
36. **Osawa A., Zyryanova O.A., Matsuura Y., Kajimoto T., Wein R.W.** Permafrost ecosystems. *Siberian Larch Forests*. Springer; 2010: 528. DOI:10.1007/978-1-4020-9693-8.
37. **Kawahigashi M., Prokushkin A., Sumida H.** Effect of fire on solute release from organic horizons under larch forest in Central Siberian permafrost terrain. *Geoderma*. 2011; 166(1):171–180. DOI:10.1016/j.geoderma.2011.07.027.
38. **Dymov A.A., Abakumov E.V., Bezkorovaynaya I.N., Prokushkin A.S., Kuzyakov Y.V., Milanovsky E.Y.** Impact of forest fire on soil properties. *Theoretical and Applied Ecology*. 2018;

- (4):13–23. DOI:10.25750/1995-4301-2018-4-013-023. Available at: <http://envjournal.ru/ari/v2018/v4/18402.pdf>.
39. **Mishra N., MdHaque O., Leigh L., Aaron D., Helder D., Markham B.** Radiometric cross calibration of Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). *Remote Sensing*. 2014; (6):12619–12638. Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/6/12/12619/htm>.
40. **Zanter K.** Landsat 8 (L8) data users handbook. U.S. Geological Survey. 2018. Available at: https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook.pdf (accessed 01.02.2022).
41. **Van Huissteden J.** Thawing permafrost. Permafrost carbon in a warming arctic. Springer Nature Switzerland AG; 2018: 508. DOI:10.1007/978-3-030-31379-1.
42. **Zhang Y., Carey S.K., Quinton W.L.** Evaluation of the algorithms and parameterizations for ground thawing and freezing simulation in permafrost regions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2008; (113):D17116. DOI:10.1029/2007JD009343. Available at: https://scholars.wlu.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1021&context=geog_faculty.
43. **Patankar S.V.** Numerical heat transfer and fluid flow. N.Y.: Hemisphere Publishing Corporation; 1980: 197. DOI:10.1201/9781482234213.
44. **Ferziger J.H., Koseff J.R., Monismith S.G.** Numerical simulation of geophysical turbulence. *Computers and Fluids*. 2002; 31(4):557–568. Available at: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.486.2251&rep=rep1&type=pdf>.
45. **Pavlov A.V.** Teplofizika landshaftov [Thermal physics of landscapes]. Novosibirsk: Nauka; 1979: 285. (In Russ.)
46. **Anisimov O.A., Anokhin Yu.A., Lavrov S.A., Malkova G.V., Myach L.T., Pavlov A.V., Romanovsky V.A., Streletsky D.A., Kholodov A.L., Shiklomanov N.I.** Glava 8. Kontinental'naya mnogoletnyaya merzlota. Metody Otsenki Posledstviy Izmeneniya Klimata dlya Fizicheskikh i Biologicheskikh Sistem. Pod red. S.M. Semenova. [Chapter 8. Continental Permafrost. Methods for Assessing the Effects of Climate Change on Physical and Biological Systems]. Moscow: Planeta; 2012: 301–359. Available at: http://downloads.igce.ru/publications/metodi_ocenki/08.pdf (accessed 01.02.2022). (In Russ.)
47. **Johansen O.** Thermal conductivity of soils. Hanover: CRREL Draft Translation; 1977: 637.
48. **Oke T.R.** Boundary layer climates. Routledge: Taylor & Francis Group; 1987: 435.
49. **Psiloglou B.E., Santamouris M., Asimakopoulos D.N.** Atmospheric broadband model for computation of solar radiation at the Earth's surface. Application to mediterranean climate. *Pure and Applied Geophysics*. 2000; (157):829–860. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/PL00001120.pdf>.
50. **Paltridge G.W., Platt C.M.R.** Radiative processes in meteorology and climatology. Amsterdam, N.Y.: Elsevier Scientific Publ. Co.; 1976: 318.
51. **Prata A.J.** A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1996; (122):1127–1151. DOI:10.1002/qj.49712253306.
52. **Herrero J., Polo M.J.** Parameterization of atmospheric longwave emissivity in a mountainous site for all sky conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2012; (16):3139–3147. DOI:10.5194/hess-16-3139-2012. Available at: <https://hess.copernicus.org/articles/16/3139/2012/hess-16-3139-2012.pdf>.
53. **Yakimov N.D., Ponomarev E.I.** Dynamics of post-fire effects in larch forests of Central Siberia based on satellite data. *E3S Web of Conferences. Regional Problems of Earth Remote Sensing*. 2020; 149(03008):6. DOI:10.1051/e3sconf/202014903008. Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/09/e3sconf_rpers2020_03008.pdf.
54. **Bezkorovaynaya I.N., Borisova I.V., Klimchenko A.V., Shabalina O.M., Zakharchenko L.P., Il'in A.A., Beskrovny A.K.** The influence of the pyrogenic factor on biological activity of soils under conditions of permafrost (Central Evenkia). *Vestnik KrasGAU*. 2017; (9):181–189. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_30103879_90341317.pdf. (In Russ.)