

XVIII Всероссийская открытая конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»
Москва, ИКИ РАН, 16–20 ноября 2020 г.

Мониторинг долговременных послепожарных эффектов в сезонно-талом слое в условиях криолитозоны Сибири

Евгений ПОНОМАРЁВ^{1,2},
К. Литвинцев³, Т. Пономарева^{1,2}, О. Масыгина¹, К. Финников², Е. Швецов¹

1. *Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН*

2. *Сибирский федеральный университет*

3. *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН*

По теме базового проекта № 0356-2019-0009, 0287-2019-0006;
РФФИ, Правительство Красноярского края,
Красноярский краевой фонд науки № 18-41-242003



RUSSIAN
FOUNDATION
FOR BASIC
RESEARCH



Введение

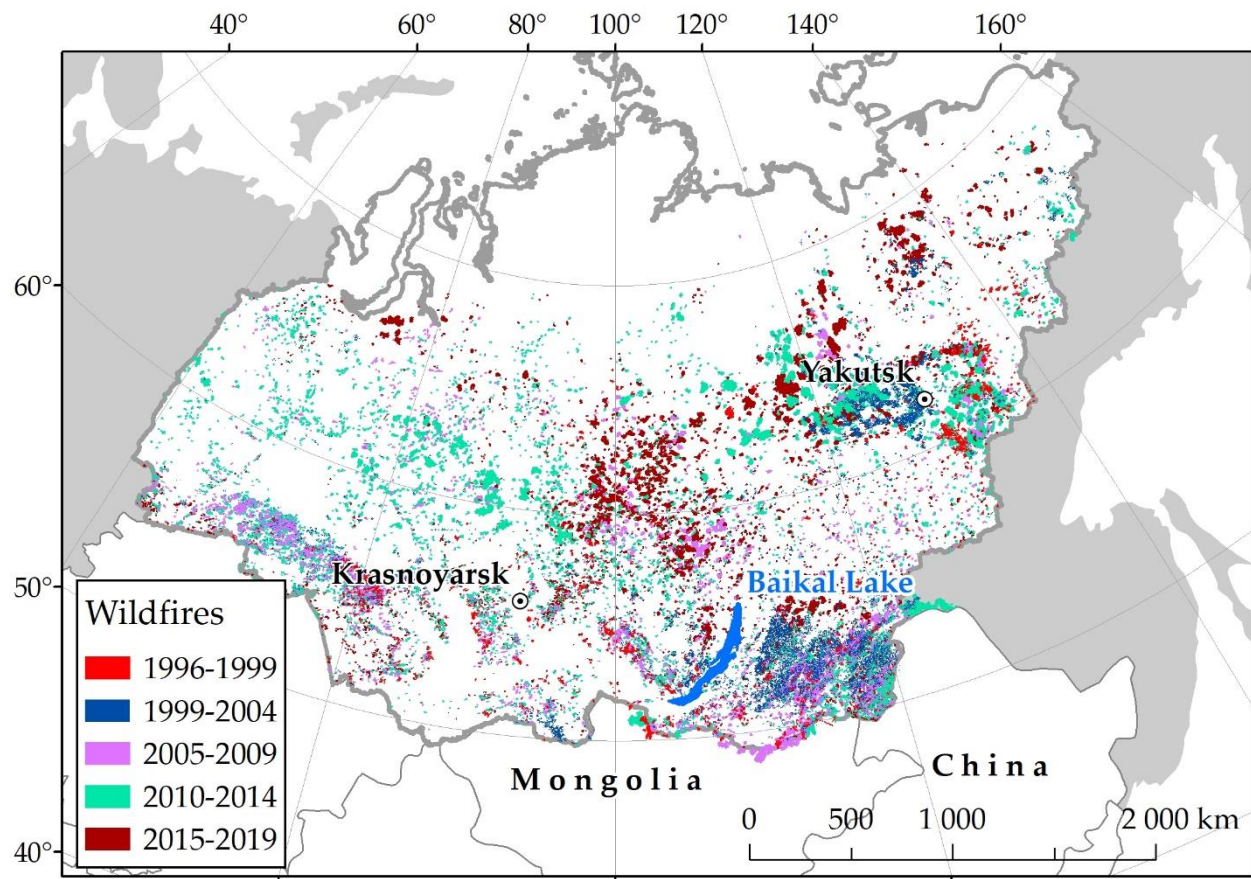
Большее половины территории лесных экосистем Сибири относится к мерзлотной зоне. Деграция мерзлоты и **долговременные аномалии сезонно-талого слоя (СТС)** могут определять масштабные изменения в существующих экосистемах. Причиной аномальных процессов в почвах, наряду с влиянием климатических изменений, является воздействие **массовых природных пожаров**.



Анализ данных спутникового мониторинга показал, что за последние 20 лет пожарами пройдено более **20% лиственничников Сибири** – около 12 миллионов гектар лесов. При этом отмечается увеличение в 6 раз числа пожаров с 44 до 299 очагов в год, а ежегодных площадей, пройденных огнем в регионе – **на порядок** величины.

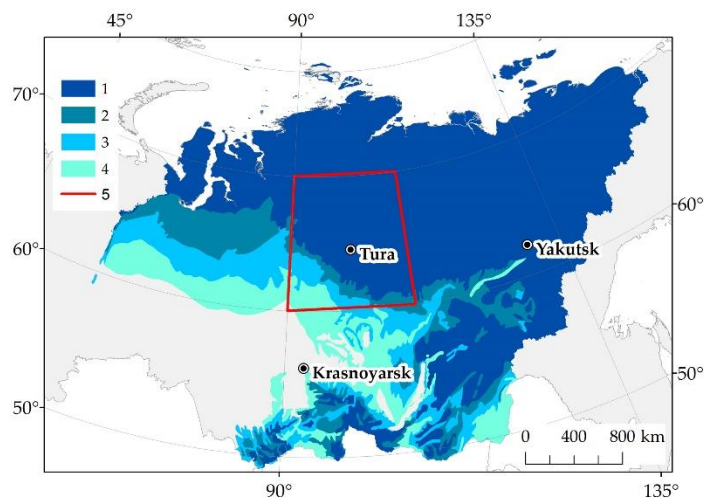
Цель работы – оценить влияние **температурных аномалий поверхности** послепожарных участков на **вариацию** сезонно-талого слоя с использованием модели передачи тепла для предельных случаев состояния почв и с учетом неоднородности теплофизических свойств в почвенных горизонтах.

Пожары в лесах Сибири



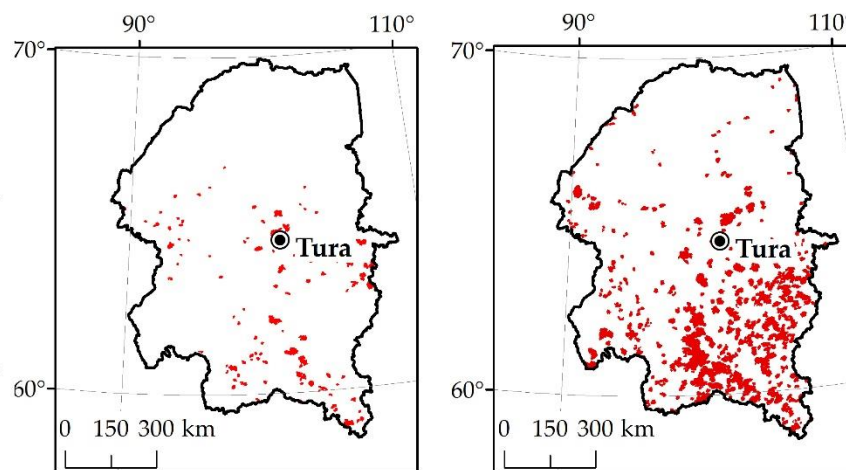
Материалы **базы данных пожаров** на территории Сибири по данным спутникового мониторинга **1996–2019** гг. (Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск).

Район исследований



Мерзлотная зона Сибири:

- 1 – непрерывная (90–100%); 2 – (50–90%);
- 3 – спорадическая (10–50%);
- 4 – островная (0–10%)



Крупные ($S > 5$ тыс. га) пожары в лиственничниках
Эвенкии (Красноярский край)
в 2000–2009 гг. (слева) и в 2010–2019 гг. (справа)

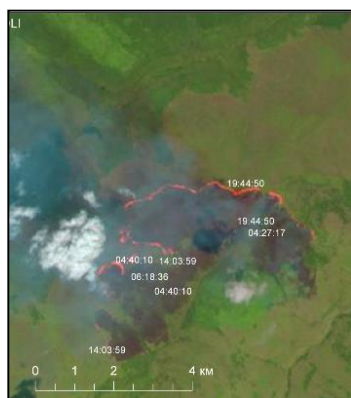
Работа выполнена для Среднесибирского плоскогорно-таежного лесного района (60–70°с.ш., 90–107° в.д.) с доминированием лиственничных насаждений (*Larix gmelinii*).

Почвы характеризуются процессами криотурбации, аккумуляцией органических материалов и низкой скоростью их разложения. Гранулометрический состав – суглинистый или глинистый с высоким содержанием гравия в нижней части профиля.

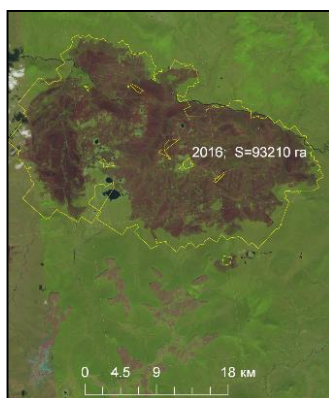
Формула: T (Oao)-O(F+H)-CR-C₁; **после пожара:** Opir-O(F+H)pir-CR-C (нарушение верхнего горизонта, понижение уровень залегания мерзлоты) (*Shishov et al., 2004*).

Мощность почвенного профиля не более 20–50 см. Уровень залегания мерзлоты <100 см.

Послепожарные участки на данных ДЗЗ

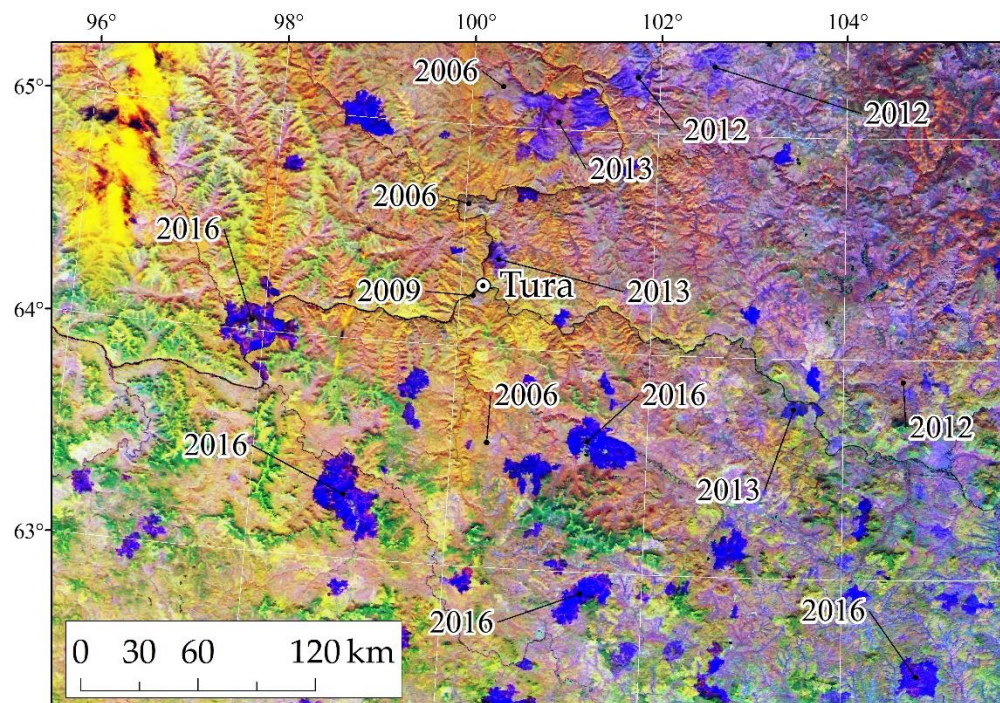


Landsat-8/OLI



Sentinel-2

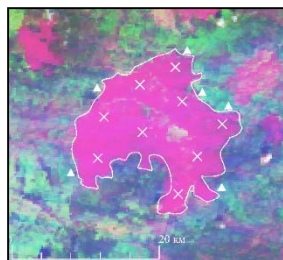
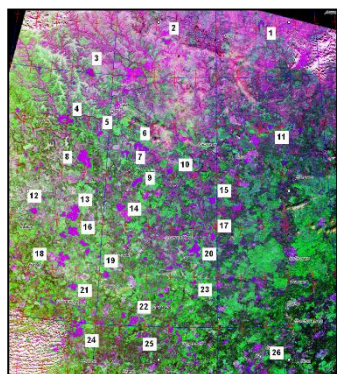
Съемки пожаров на спутниковых изображениях среднего пространственного разрешения 15–30 м.



Послепожарные участки на данных многоспектральной съемки **Terra/MODIS** (пространственное разрешение 250 м).

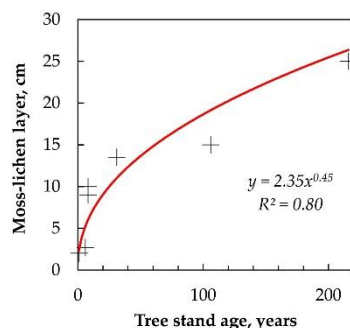
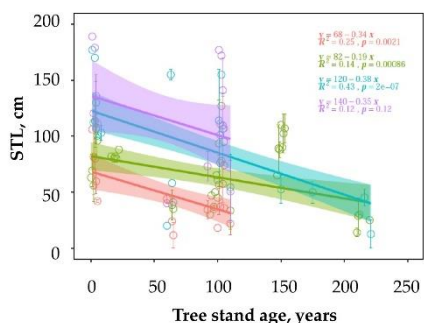
Комбинация #1, #2 и #31 (тепловой ИК) каналов с датировкой пожаров.

Исходные данные и методика анализа



Сезонные и межсезонные усредненные значения вегетационного индекса NDVI и температуры поверхности на постпирогенных участках в сравнении со среднестатистической нормой для фоновых территорий по материалам стандартных продуктов Terra/MODIS (MOD09GQ, MOD11A1).

Обобщенные характеристики почв и материалы натуральных измерений температурного режима для почвенных профилей, характерные для района исследований (Sobol et al., 2011; Гаврильев и др., 2013; Masyagina et al., 2015; Старцев и др., 2017; Безкорвайная и др., 2017; Губин и др., 2018).



Натурные измерения СТС и мохово-лишайникового покрова.
(а) Модель вариации СТС в зависимости от возраста древостоя и вегетационного периода; (б) Скорость восстановления мохово-лишайникового покрова.

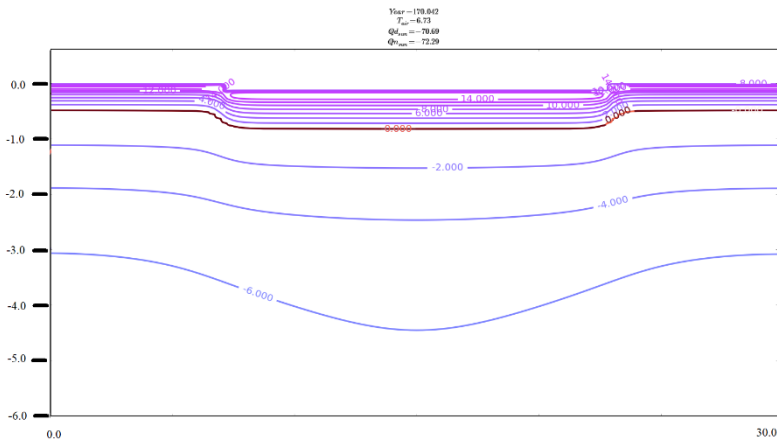
Этап численного моделирования

Математическая модель процесса теплопереноса в почве – уравнение переноса энергии с учетом теплоты фазового перехода:

$$c_p(x, T)\rho(x) \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda(x, T) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = -y_w(x, T)\rho_w \frac{\partial \alpha}{\partial t}$$

и уравнение для доли жидкой фазы воды (перепад температуры и процесс смены агрегатного состояния определяется теплообменом):

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = K (\max(T - T_0, 0) \cdot (1 - \alpha) + \min(T - T_0, 0) \cdot \alpha)$$



Входные параметры модели:

T – температура, К;

$c_p(T)$ – теплоемкость, Дж/(кг·К);

ρ – плотность, кг/м³;

$\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

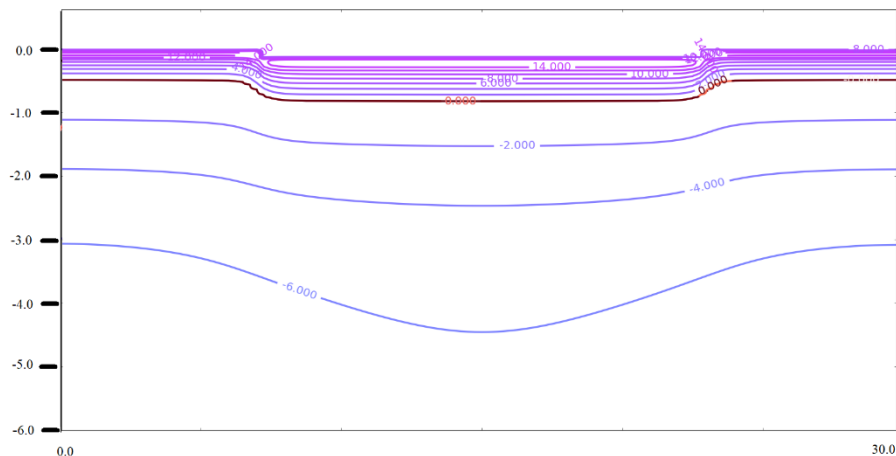
y_w – объемная доля воды в почве;

α – массовая доля жидкой фазы воды;

K – постоянная, 1/(ч·К), характеризующая интенсивность теплопередачи;

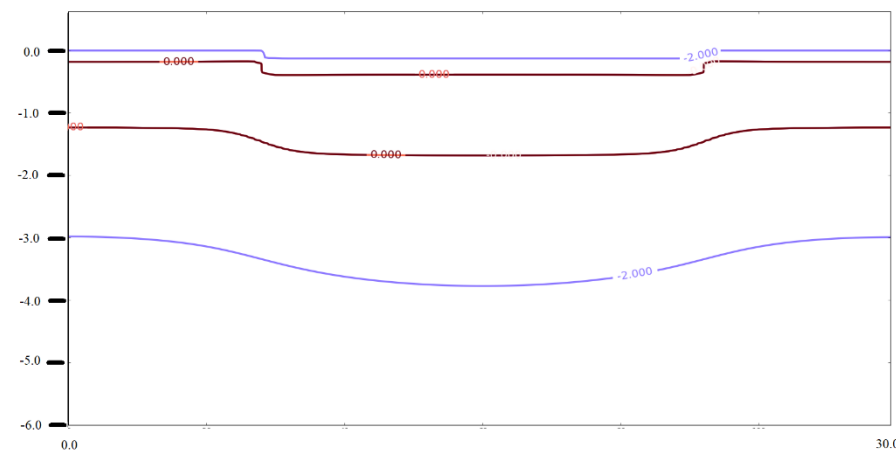
T_0 – температура точки фазового перехода

Пример визуализации расчетной области



День
№170
(май)

Уравнение переноса энергии решалось в плоской постановке с горизонтальной и вертикальной координатами, что необходимо для учета границы тепловой аномалии и динамики ее роста или сокращения

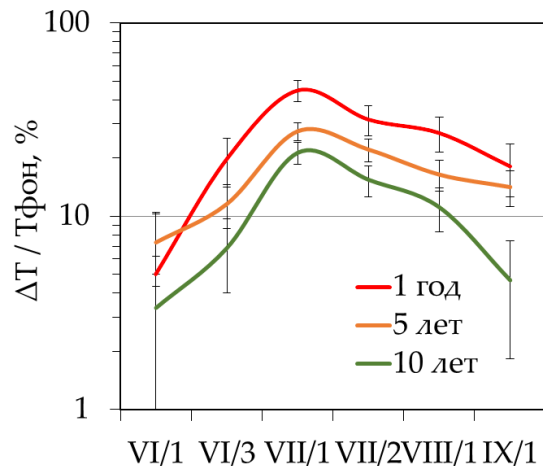


День
№286
(сентябрь)

В численных решениях учитывалось

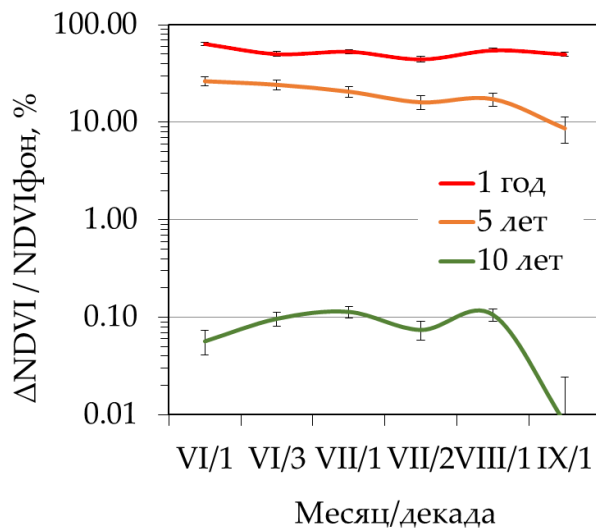
- 1) различия в **альbedo** поврежденных и неповрежденных пожаром участков (0,13 и 0,18 соответственно) и **степени черноты** (0,9 и 0,98 соответственно);
- 2) среднегодовые значения **метеопараметров** (источники данных: Climatic Research Unit, Weather Archive, NNDC Climate Data);
- 3) переменность структуры почвы и влагосодержания почвенных горизонтов;
- 4) физические свойства почв: плотность в сухом состоянии (60 кг/м^3 и 180 кг/м^3 для верхнего горизонта O_{ao} и O_{pir}), гранулометрический состав и пористость (от 0,36–0,48 для горизонтов C, CR до 0,67–0,91 для верхних горизонтов с учетом послепожарных различий);
- 5) структурная организация почвенных профилей (в расчетах и коэффициенты модели, и входные параметры почв менялись для горизонтов подстилки O_{ao}, O(F+N) и для нижележащих минеральных горизонтов CR и C);
- 6) объемная доля воды/льда ($y_w \sim 0,1$ – для «сухих» почв; 0,9 – для «насыщенных»), что существенно влияют на результаты моделирования СТС и определяло разброс результатов на величину до 30%.

Результаты. Температурные аномалии

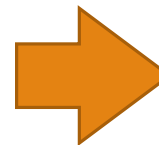


На постпирогенных участках фиксировалось снижение на величину >60% вегетационного индекса NDVI и повышение (в среднем на 47%) температуры поверхности в сравнении с фоновыми значениями.

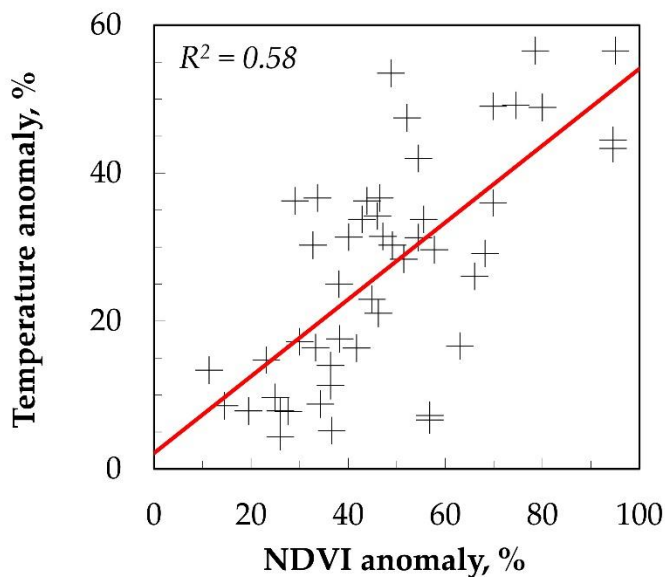
Значения вегетационного индекса за 10-летний срок восстанавливались до среднестатистической нормы (отклонения от нормы <1%).



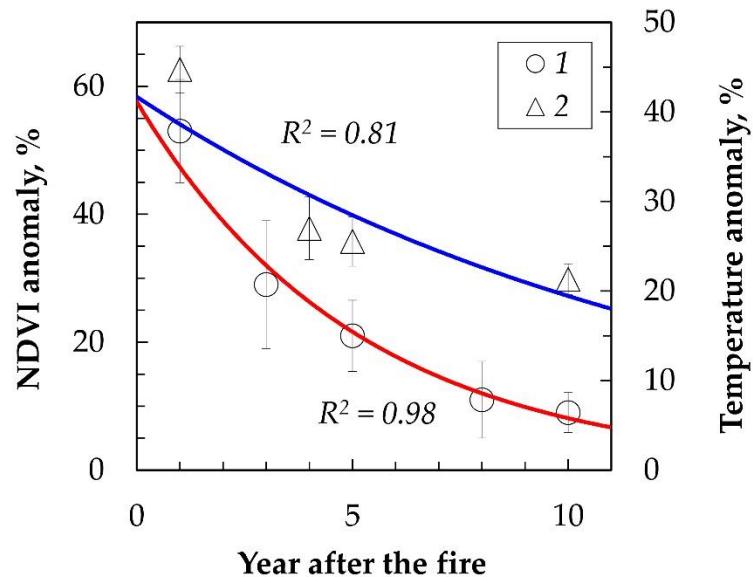
Аномалии теплового фона оставались значимыми в течение 10 и более лет восстановительных сукцессий – превышение относительно фоновых значений фиксируется на уровне ~20%.



Восстановительная динамика по данным ДЗ



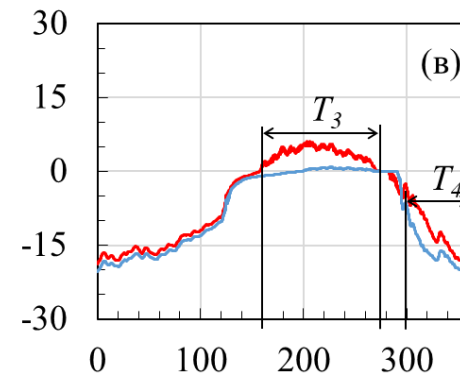
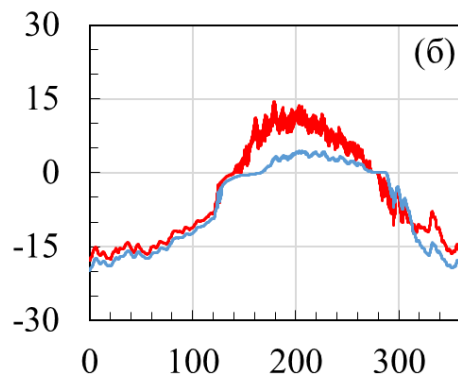
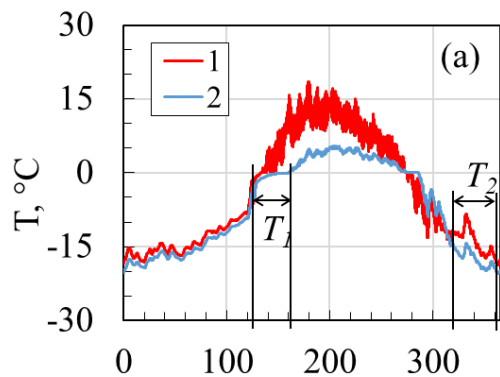
Температурные аномалии vs
аномалии NDVI



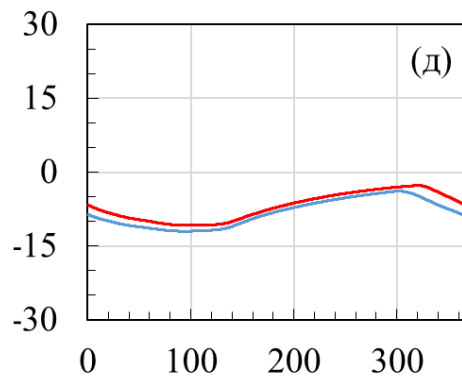
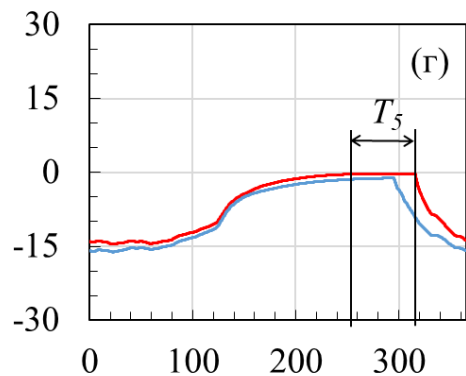
Скорость восстановления
1) индекс NDVI; 2) температурные аномалии

Послепожарные сукцессионные процессы в лиственныхниках криолитозоны *не компенсируют* температурный дисбаланс в течение не менее 15 лет, что определяется значительными изменениями **теплоизолирующих свойств** лесной подстилки, напочвенного покрова и мохово-лишайникового яруса.

Численные решения для почвенного профиля



День года

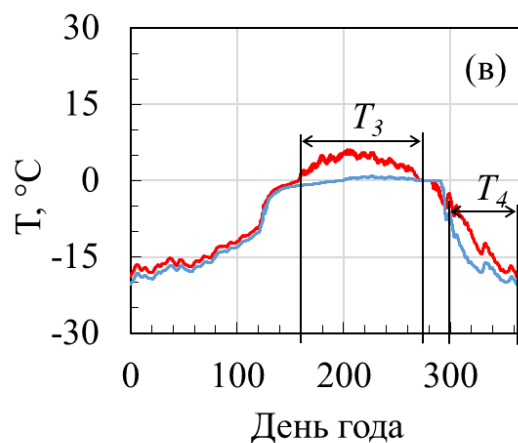


День года

Годовой цикл температуры в корнеобитаемом слое на глубинах 0,05 м; 0,10 м; 0,20 м (а, б, в); и в минеральных горизонтах 1,0 и 3,0 м (г, д).

Послепожарные (**красный цвет**), и ненарушенные (**синий цвет**) варианты.

Особенности температурного режима



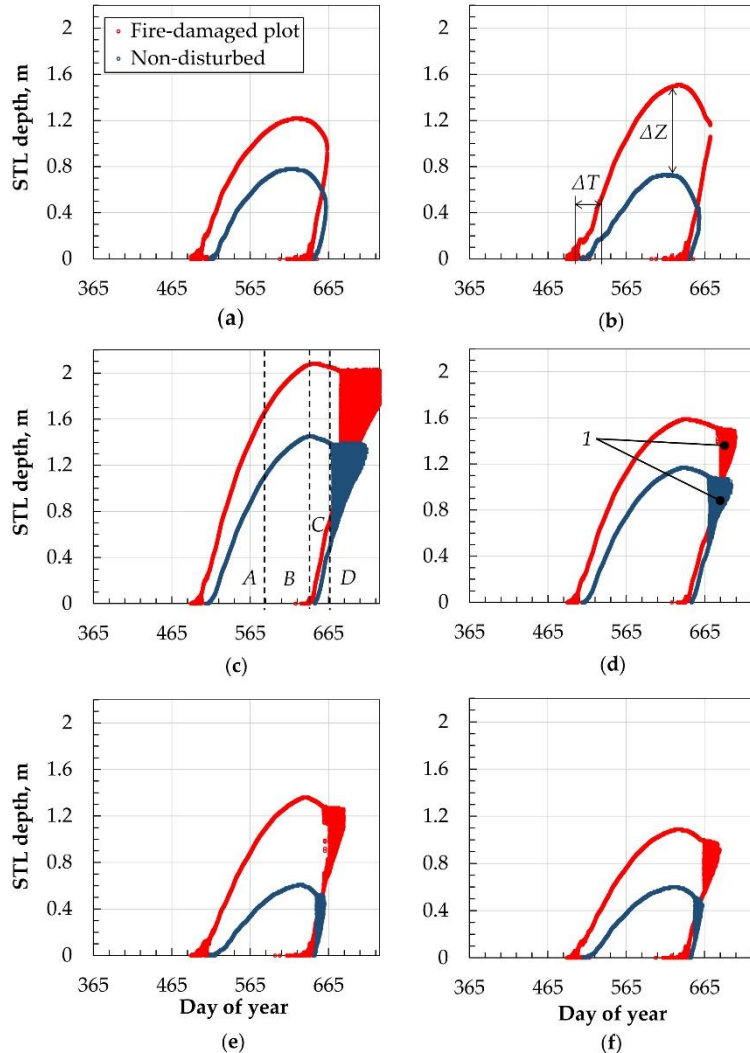
На глубине, начиная с 0,05 м, фазовые процессы после пожаров **начинаются на месяц раньше**. Этот эффект характерен для всего **корнеобитаемого слоя** (глубины 0,10 м и 0,20 м).

Для корнеобитаемого слоя послепожарных участков показана **«температурная инверсия» в осенний период**, когда температура верхних горизонтов почвы выше по сравнению с данными для неповрежденных участков.

На нарушенных участках фиксируются **периоды протаивания верхних горизонтов почвы** даже в условиях **сохранения отрицательных** или близких к 0°C температур на соответствующих глубинах неповрежденных пожарами участков.

В нижних слоях (на глубине 1 – 3 м), температурные аномалии на участках с нарушенной подстилкой и мохово-лишайниковым покровом не проявляются.

Решение для сезонной динамики СТС



Результаты численного моделирования для СТС для различных вариантов начальных условий содержания воды в почве:

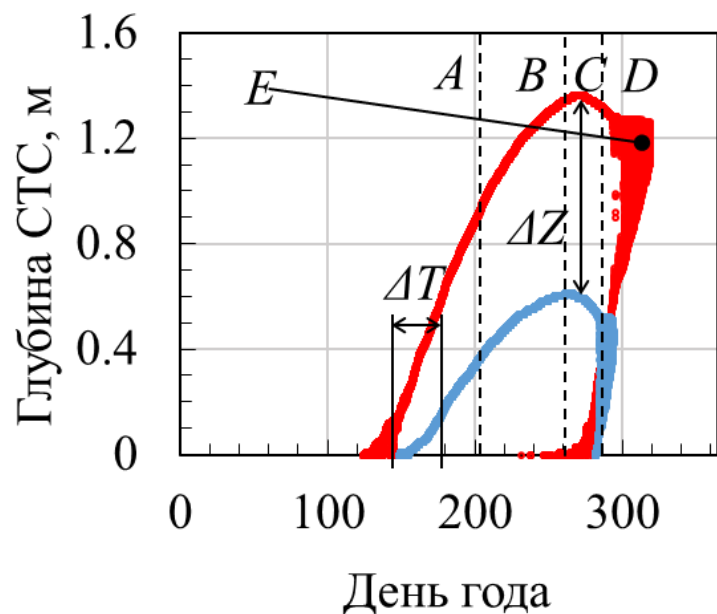
(a), (b) – для почв с низким значением объемной доли воды ($Q_w = 0.1 \cdot Q$)

(c), (d) – для насыщенных почв ($Q_w = 0.9 \cdot Q$); Q_w не дифференцировано по горизонтам

(e), (f) – для почвы с неоднородным содержанием Q_w по горизонтам.

Послепожарные (**красный цвет**), и ненарушенные (**синий цвет**) варианты.

Особенности сезонной динамики СТС



Процесс протаивания начинается на $\Delta T \sim 20$ дней раньше в весенний период.
Приращение глубины СТС после пожаров составляет $\Delta Z = 30\text{--}50\%$.

A – фаза активного протаивания СТС;
B – фаза падающей скорости приращения глубины СТС и достижение экстремума;
C – фаза начала замерзания верхних горизонтов (при сохранении талого слоя СТС) в условиях перехода температур воздуха ниже 0°C ;
D, E – период фазового переход в широком слое СТС.

Фаза D (до 20 дней) определяется содержанием влаги в почве и отсутствует в случае «сухих» почв (объемная доля воды $y_w \sim 0,1$)

Выводы

Изменения температурного режима на послепожарных участках проявляются в аномальном повышении средней температуры поверхности в летний период на 20–40% выше, чем среднестатистическая норма для территорий с неповрежденной растительностью.

В криолитозоне послепожарные изменения влияют на температурный баланс не только верхних горизонтов почв, но значимы во всем корнеобитаемом слое. Это провоцирует увеличение СТС на 30–50% относительно нормы.

Увеличение глубины сезонно-талого слоя после пожаров, аномально высокие температуры корнеобитаемого слоя в различные периоды года (весна, осень) могут быть положительным фактором, влияющим, например, на величину годичного прироста древостоев.

Однако в условиях масштабных пожарных воздействий в меняющемся климате такие эффекты могут сказаться на устойчивости лесных экосистем криолитозоны в целом.

Публикации по теме



Пономарев Е.И., Пономарева Т.В. (2018) Влияние послепожарных температурных аномалий на сезонное протаивание почв мерзлотной зоны Средней Сибири по дистанционным данным // **Сибирский экологический журнал**, 2018, № 4, С. 479–488. doi:10.15372/SEJ20180408

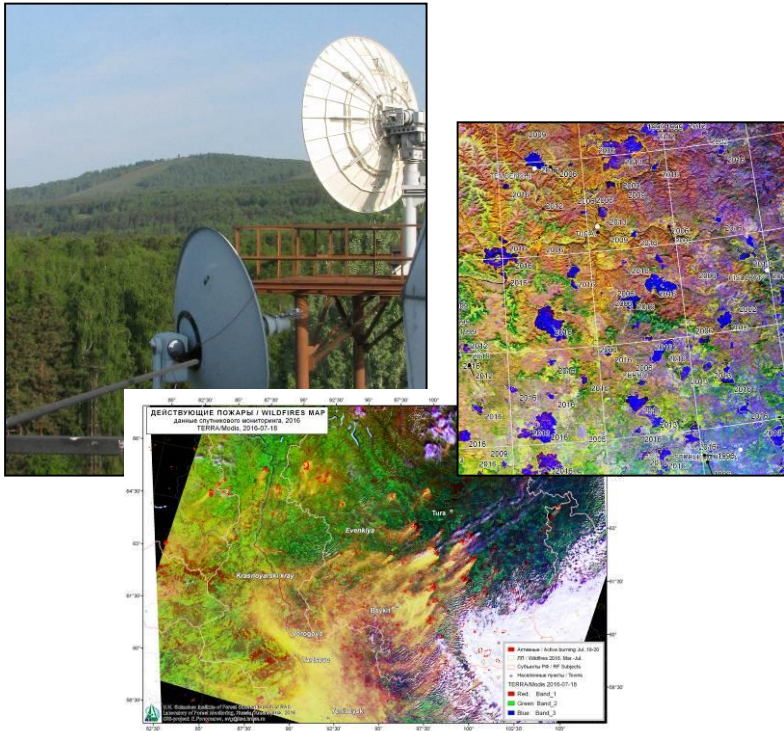


Ponomarev E., Ponomareva T., Masyagina O., Shvetsov E., Ponomarev O., Krasnoshchekov K., Dergunov A. (2019) Post-fire effect modeling for the permafrost zone in Central Siberia on the basis of remote sensing data // **Proceedings (MDPI)**, 2019, Vol. 18 (1), 6, 7 p. doi:10.3390/ECRS-3-06202.



Ponomarev E.I., Masyagina O.V., Litvintsev K.Y., Ponomareva T.V., Shvetsov E.G., Finnikov K.A. (2020) The effect of post-fire disturbances on a seasonally thawed layer in the permafrost larch forests of Central Siberia // **Forests**, 2020, 11 (8), 790, doi:<https://doi.org/10.3390/f11080790>

XVIII Всероссийская открытая конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»
Москва, ИКИ РАН, 16–20 ноября 2020 г.



Спасибо за внимание!

По теме базового проекта № 0356-2019-0009, 0287-2019-0006;
РФФИ, Правительство Красноярского края,
Красноярский краевой фонд науки № 18-41-242003



RUSSIAN
FOUNDATION
FOR BASIC
RESEARCH

