

# Методы анализа теплового режима почв криолитозоны и мониторинг послепожарных эффектов

Пономарева Т.В. (1,2)\*, Пономарев Е.И. (1,3), Шушпанов А.С. (1), Краснощекоев К.В. (3), Сорокин А.В. (3), Швецов Е.Г. (1), Литвинцев К.Ю. (4), Дергунов А.В. (3)

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

(2) Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

(3) Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН» (ФИЦ КНЦ СО РАН), Красноярск, Россия

(4) Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

\*e-mail: bashkova\_t@mail.ru, тел.: +7 391 2494092

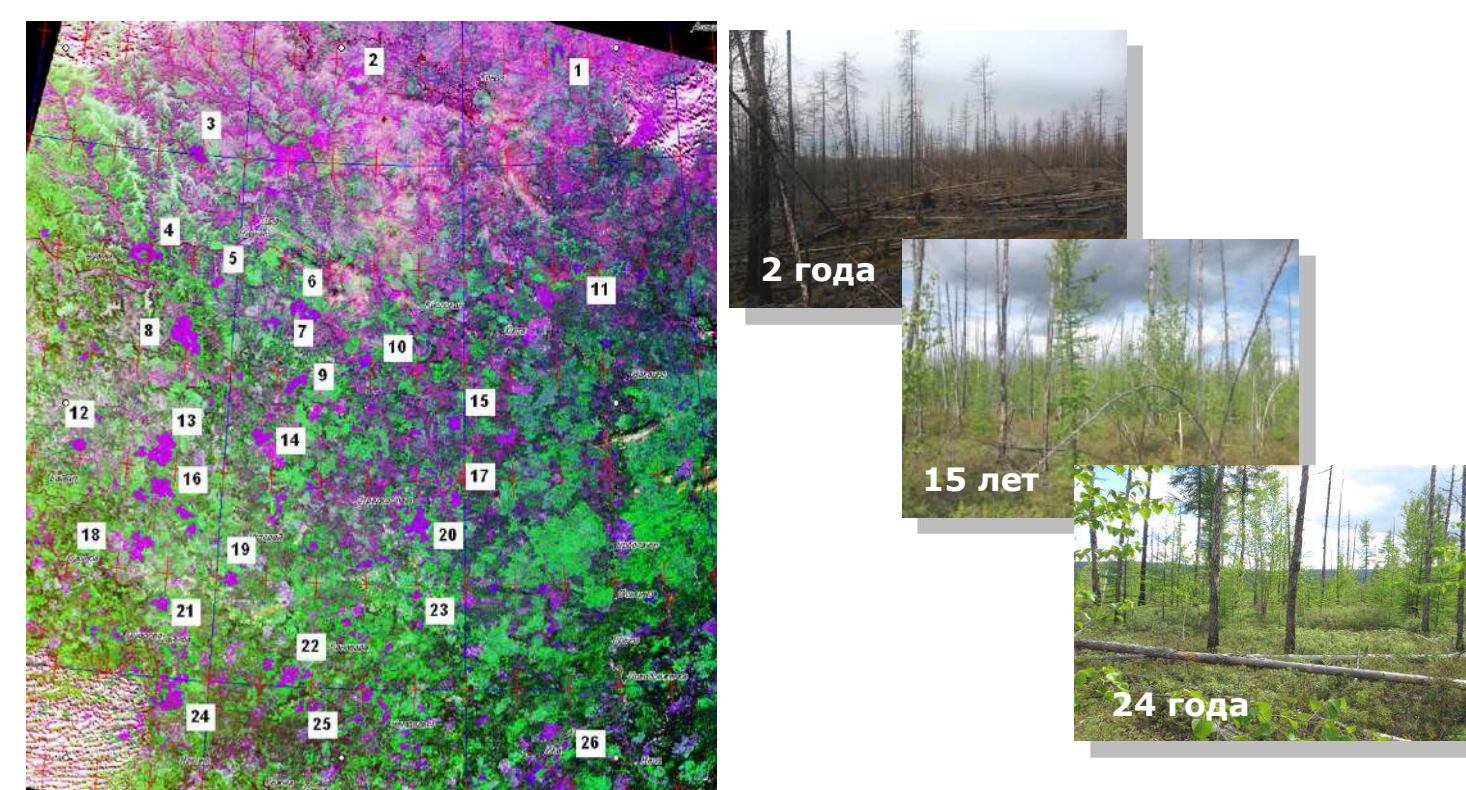
На основе комплексного анализа данных съемок в тепловом диапазоне (спутниковые материалы, наземная радиометрическая съемка, подспутниковые эксперименты и численное моделирование) предложен метод количественного описания изменений температурных режимов послепожарных участков в криолитозоне с учетом структуры и строения почвенных профилей. Экспериментально получены изображения почв в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра, а также двумерные и трехмерные массивы данных радиояркихостных температур, соответствующие различным почвенным горизонтам. На основе этих данных, рассчитаны температурные градиенты. Градиенты температуры в условиях средней тайги в профиле криогенных почв на послепожарном участке в верхних горизонтах в 2-3 раза выше (от 0,3 до 0,6 °C/см), чем в почвах фоновых участков (от 0,1 до 0,3 °C/см). На послепожарных участках наблюдаются более контрастные условия температурного режима между органогенными и минеральными горизонтами, что обуславливает увеличение интенсивности протекания почвенных реакций. Получены оценки влияния массовых послепожарных повреждений растительных покровов на состояние пограничного слоя «напочвенный покров»-«почва»-«сезонно-талый слой» в листовничниках мерзлотной зоны Сибири. Показано, что при существенном повреждении напочвенного покрова и подстилки избыточный прогрев значительных участков в мерзлотной зоне может способствовать приращению глубины сезонно-талого слоя почвы на дополнительные 10–20% относительно среднестатистической нормы.

**Послепожарные изменения** древесного яруса лесных экосистем, а также пирогенная трансформация напочвенного покрова и верхних горизонтов почв является причиной снижения их теплоизолирующей функции и ведет к изменению теплового режима. Вызванные нарушениями растительных покровов послепожарные изменения теплового баланса «переходного слоя» способны провоцировать избыточный прогрев верхней части многолетнемерзлых пород (Анисимова, Шерстюкова, 2016; Десяткин, Десяткин, 2017). В районах распространения вечной мерзлоты такие процессы обуславливают целый ряд послепожарных процессов: аномалии теплового баланса почвенного профиля, варьирование глубины сезонно-талого слоя, изменения грунтового стока, сказывающегося на режиме питания рек и т.д. (Безкорвайная и др., 2017; Knorre et al., 2019; Ponomarev et al., 2019).

**Цель работы** – количественное описание изменений температурных режимов на послепожарных участках в криолитозоне Сибири.

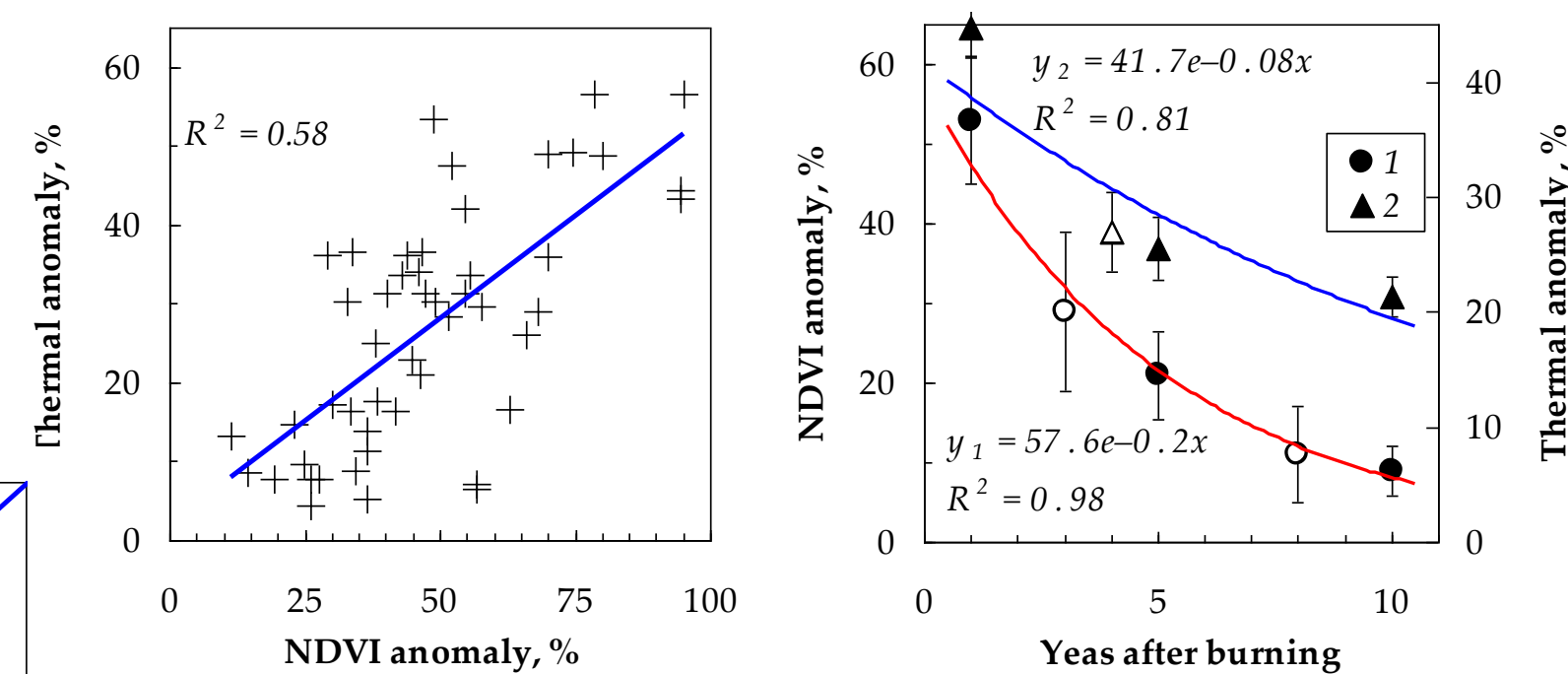


**Район исследований** - Средняя Сибирь в границах 57°–67° с.ш., 85°–110° в.д. Притундровые леса и редкостойная тайга Среднесибирского плоскогорно-таежного лесного района.



Долговременный тренд аномалий подстиляющей поверхности:

- 1) индекс NDVI, усреднение за июнь – август
- 2) Усредненные значения температуры летнего периода

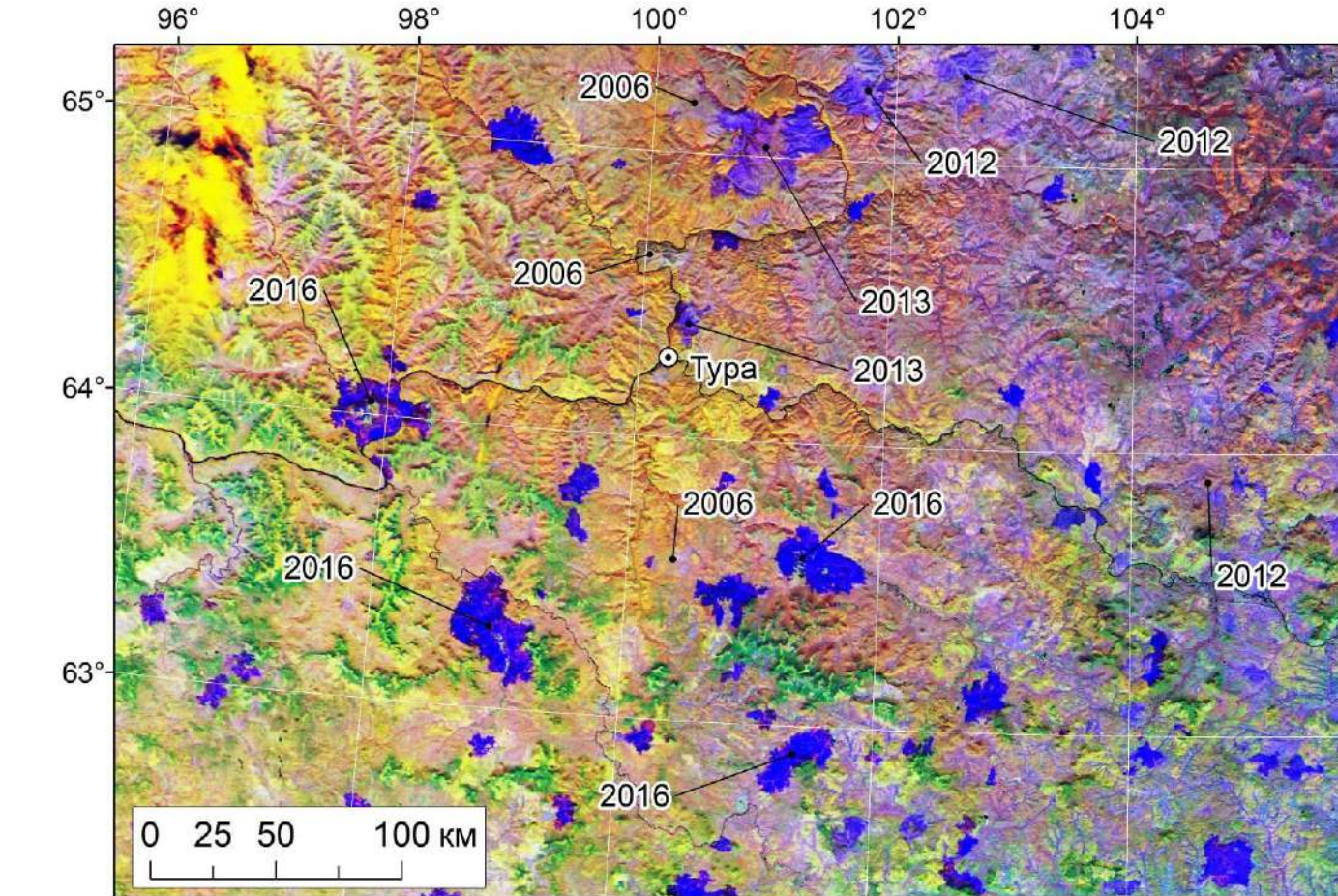


Избыточный прогрев значительных участков в мерзлотной зоне может вести к сезонному увеличению глубины протаивания почвенного профиля (Z) в среднем на 10–20% больше, чем среднестатистическая норма (Пономарев, Пономарева, 2018).

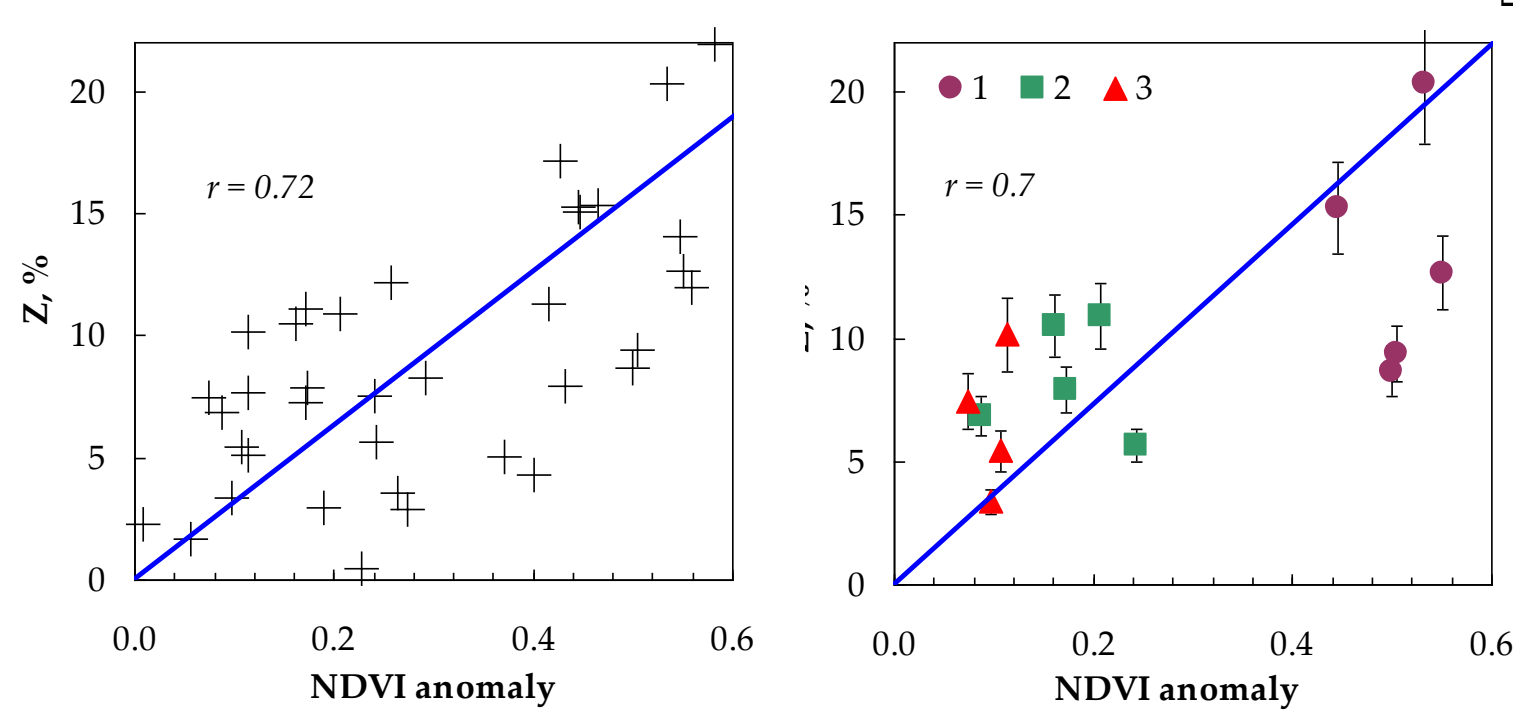
Низкая скорость выравнивания тепловой аномалии, по крайней мере, в первые 10 лет после пожара, позволяет рассматривать этот фактор долговременного влияния на состояние сезонного талого слоя почвы, как один из значимых, определяющее стабильное функционирование экосистем (Knorre et al., 2019).

Математическая модель теплообмена и движения фронта растепления почв в условиях криолитозоны Сибири основана на использовании конечно-объемного метода для уравнения теплопроводности с учетом фазового перехода вода-лед.

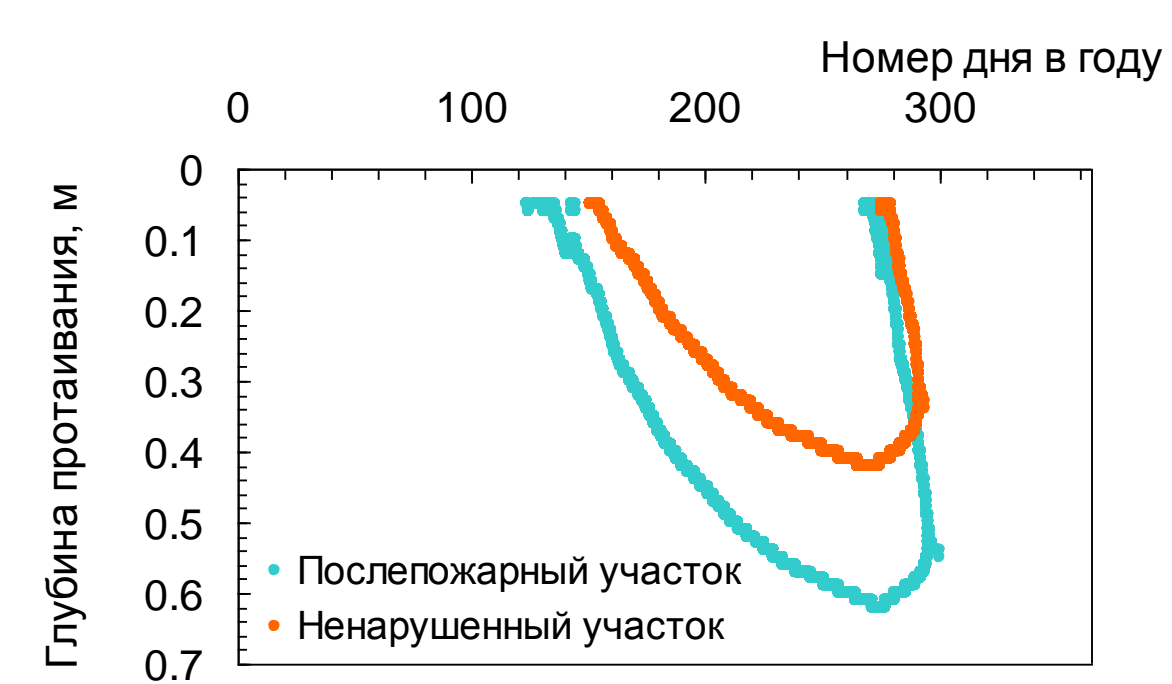
Определяли усредненные значения вегетационного индекса NDVI и температуры на постпирогенных участках и на фоновых участках в непосредственной близости от пожара. По всему набору исходных данных выполнено подекадное (10 дней) усреднение с учетом сроков восстановительной сукцессии (1-ый, 5-ый, 10-ый год после пожара).



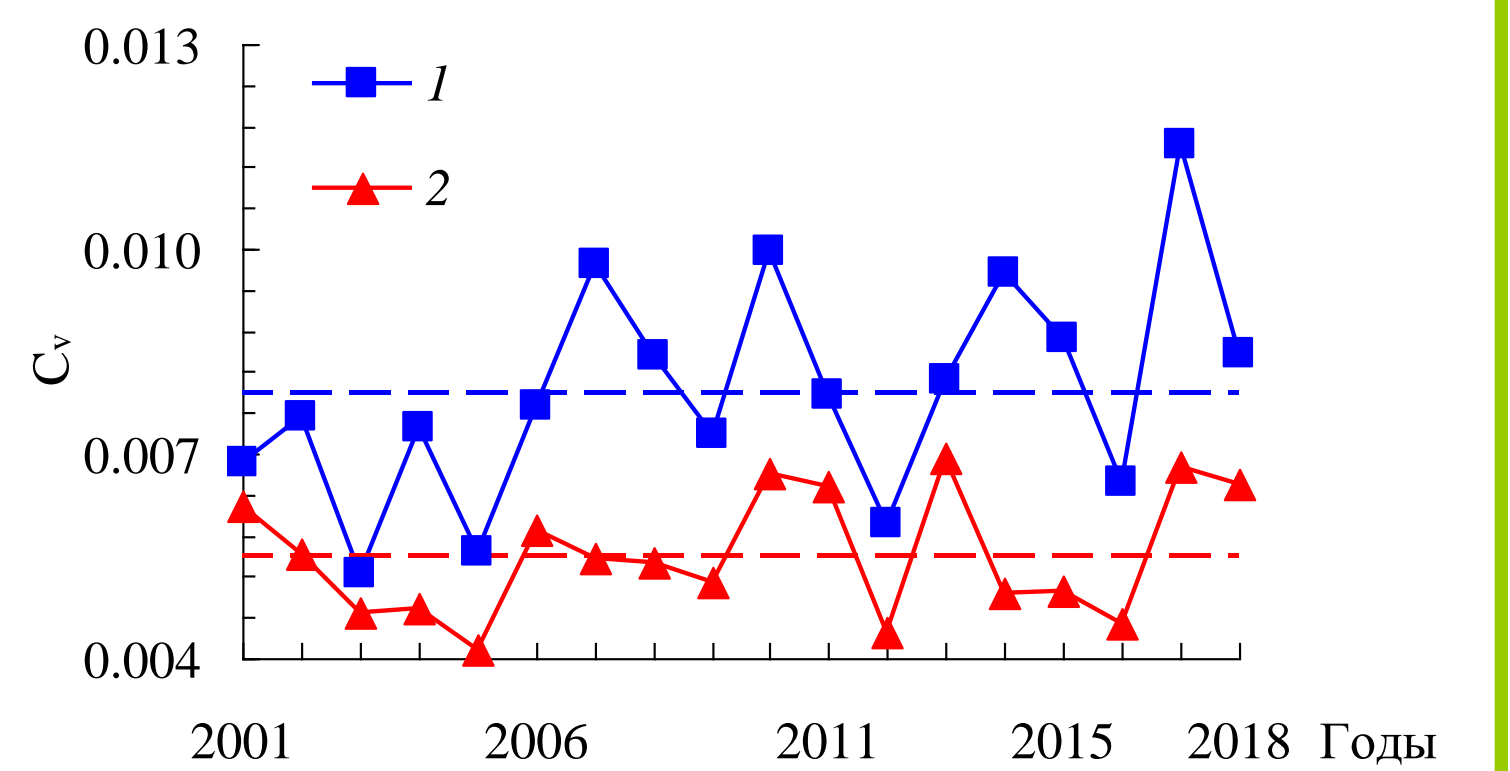
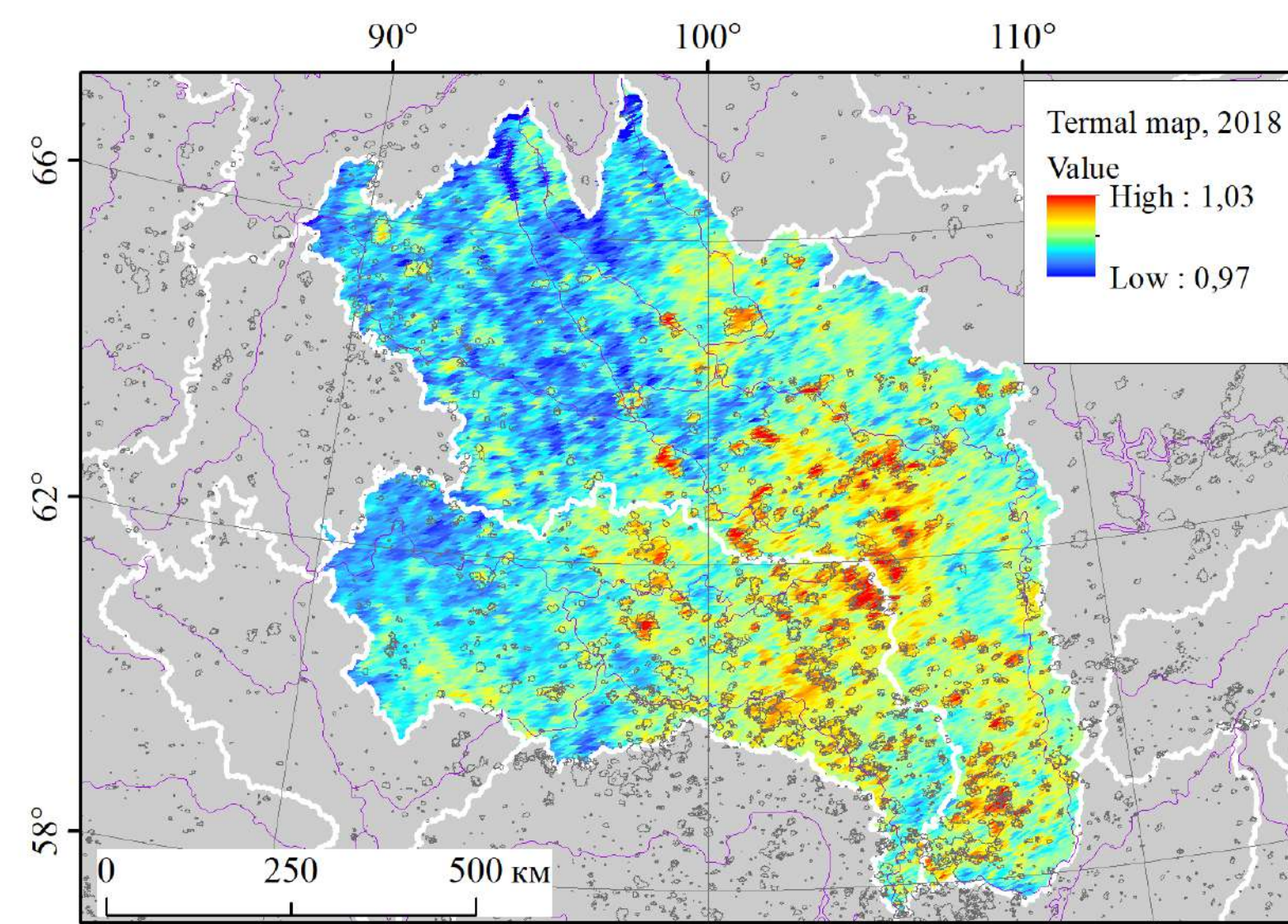
Скорость выравнивания тепловых аномалий относительно фоновых значений температуры поверхности в **2,5 раза ниже** (см. коэффициенты аппроксимирующих функций), чем скорость восстановления характеристик альbedo и индекса NDVI.



Численные оценки приращения относительной глубины протаивания (Z): 1 – через один год после пожара, 2 – через 5 лет после пожара, 3 – через 10 лет после пожара.



## Интегральный эффект пожарного воздействия на данных ДЗ в ИК-диапазоне



Средне-летние значения коэффициента вариации температуры подстиляющей поверхности ( $C_s$ ) в связи с накопительным эффектом нарушения пожарами.

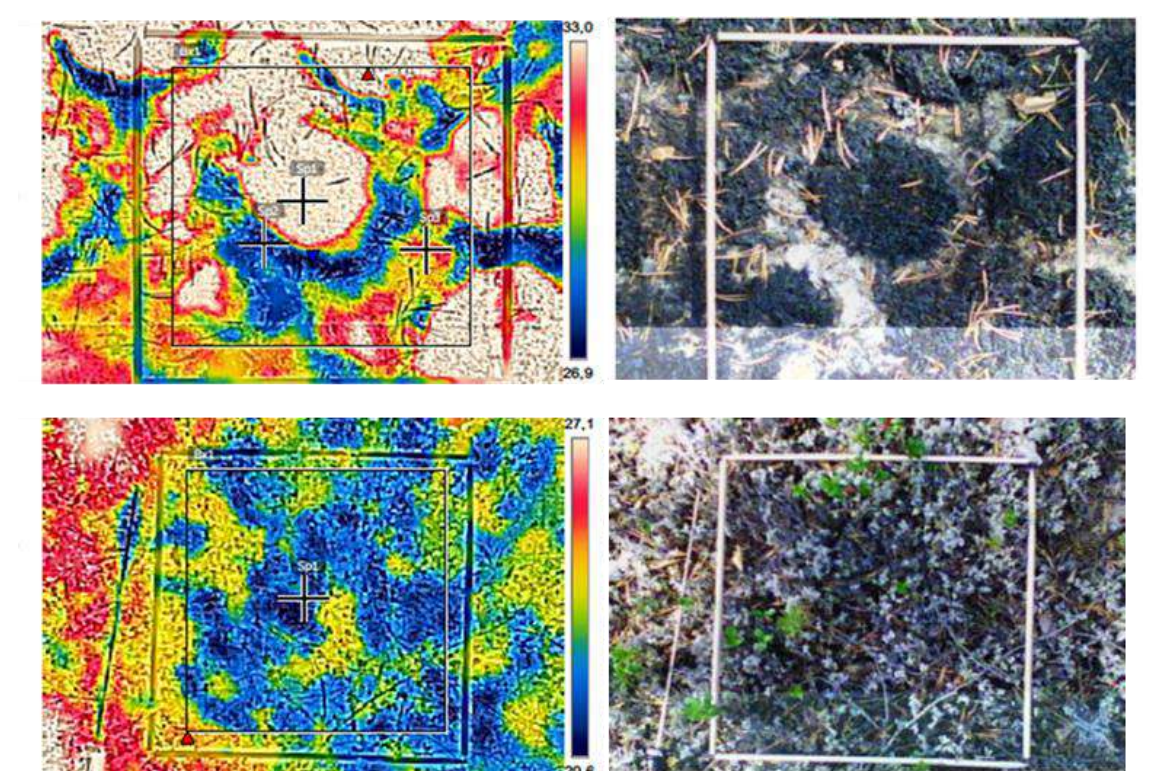
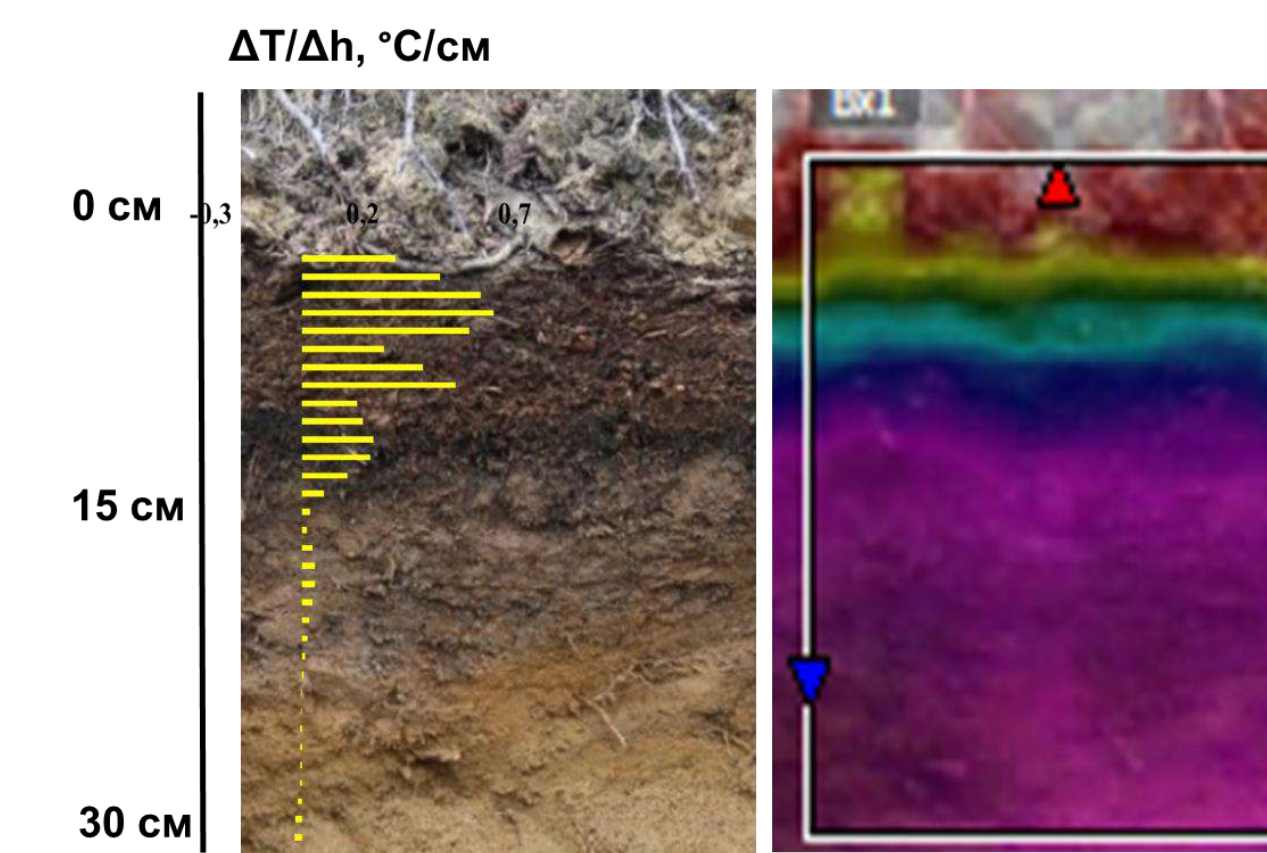
Бассейны:  
1 – Нижняя Тунгуска,  
2 – Подкаменная Тунгуска

Бассейновый подход в оценке межсезонных вариаций температурного поля с учетом степени нарушения растительных покровов и подстилки. Бассейны Нижней и Подкаменной Тунгуски, Эвенкия

## Подспутниковый эксперимент.

### Методы получения натуральных данных о тепловом состоянии почв

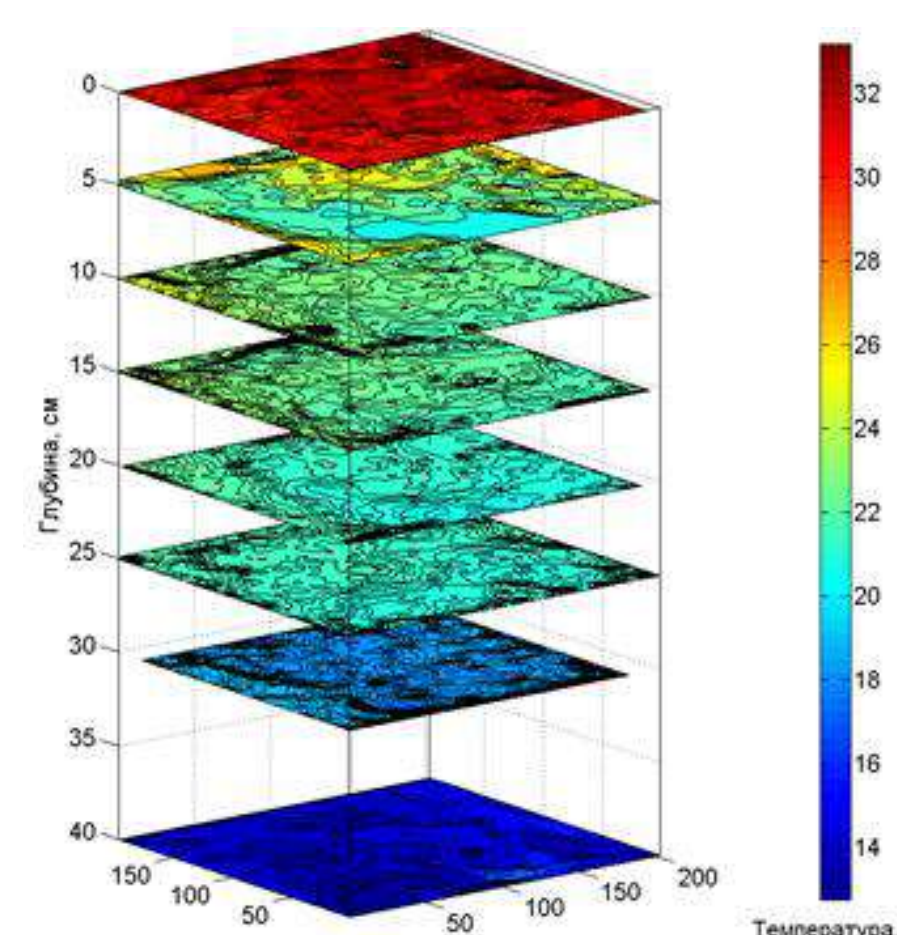
В условиях криолитозоны Сибири в среднетаежных темнохвойных насаждениях, как ненарушенных, так и постпирогенных, были проведены наземные радиометрические съемки почвенных профилей в тепловом диапазоне (Патент, 2018). Получены инфракрасные (ИК) изображения поверхности и вертикальных разрезов почв, 2D и 3D массивы данных радиояркихостных температур. На основе этих данных, вычисляются температурные градиенты.



Изображение почвенного профиля сухоторфяно-подбуря оподзоленного на послепожарном участке, заросшем ерником на месте темнохвойного насаждения в видимом (фото слева) и тепловом (фото справа) диапазонах, и градиенты температуры ( $\Delta T/\Delta h$ ).

Уменьшение мощности и увеличение плотности после пожара сказывается на тепловых свойствах органогенного горизонта. Максимальные дневные температуры поверхности почвы по данным радиометрической съемки в среднем на 4–5 °C выше (а на свежей гари могут достигать значений  $\Delta T=10-15^\circ\text{C}$ ), чем на фоновом участке, минимальные ночные температуры выше на 2–3 °C.

По результатам проведенной многоспектральной послышной съемки (в видимом и тепловом диапазонах) получены 3D модели распределения температуры в почвенном профиле. Для почвенного монолита характерно выравнивание неоднородности температуры с глубиной, смещение гистограммы температуры в область пониженных значений, снижение дисперсии и  $\sigma$ -интервала отклонения от центральных значений температуры слоя.



## Заключение

1. Пирогенный фактор оказывает существенное влияние на термостабилизирующую функцию напочвенного покрова и органогенных горизонтов почв, способствуя приращению глубины сезонно-талого слоя почвы на дополнительные 10–20% относительно среднестатистической нормы.
2. Изменения температурного режима на послепожарных участках в Среднесибирском плоскогорно-таежном лесном районе проявляются в аномальном повышении средней температуры поверхности по сравнению с фоновыми значениями на величину до  $\Delta T = 7,2 \pm 1,3^\circ\text{C}$  в летний период. Это на 20–40% выше, чем температура ненарушенной территории.
3. На послепожарных участках наблюдаются более контрастные условия температурного режима между органогенными и минеральными горизонтами, что обуславливает увеличение интенсивности протекания почвенных процессов.
4. Интегральный эффект постпирогенных тепловых аномалий будет увеличиваться и, вероятно, приобретать все большие масштабы. С учетом уровня пирогенного воздействия в современных условиях, это может определять долговременную динамику сезонно-талых слоев всей криолитозоны Сибири.

## Литература

1. Анисимова О. А., Шерстюкова А. Б. Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России // Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 2. С. 90–99.
2. Безкорвайная И. Н., Борисова И. В., Клименко 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 КрасС АУ. 2017. № 9. С. 181–189.
3. Десяткин Р. В., Десяткин А. Р. Термический режим мерзлотной лугово-черноземной солонцеватой почвы в многолетнем цикле // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1344–1354. doi: 10.7868/S0032180X17090027.
4. Патент на изобретение № 2660224. Способ выявления и картирования структуры почвенного профиля методом съемки в инфракрасном диапазоне спектра / Пономарева Т.В., Пономарев Е.И. // Регистр. 05.07.2018.
5. Пономарев Е.И., Пономарева Т.В. Влияние послепожарных температурных аномалий на сезонное протаивание почв мерзлотной зоны Средней Сибири по дистанционным данным // Сиб. экологический журнал. 2018. № 4. С. 477–486. doi: 10.15372/SEJ20180408.
6. Knorre A.A. Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia / A.A. Knorre, A.V. Kirilyanov, A.S. Prokushkin, P.J. Krusic, U. Buntgen // Science of the Total Env. – 2019. – Vol. 652. – P. 314–319.
7. Ponomarev, E.I.; Ponomareva, T.V.; Prokushkin, A.S. Intraseasonal Dynamics of River Discharge and Burned Forest Areas in Siberia // Water. 2019, 11, 6, 1146. 11 p.

