

ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ В КРИОМЕТАМОРФИЧЕСКОЙ ПОЧВЕ СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ И ЕЕ ТЕПЛОБЕСПЕЧЕННОСТЬ

Остроумов В.Е.¹, Давыдова А.И.², Давыдов С.П.², Федоров-Давыдов Д.Г.¹,
Еремин И.И.³, Кропачев Д.Ю.³

¹ – Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
г. Пущино, Московская обл., Россия.

² – Северо-восточная научная станция Тихоокеанского института географии ДВО РАН,
пос. Черский, Республика Саха(Якутия), Россия.

³ – АО «НПП «Эталон», г. Омск, Россия.

Изучение тепловых потоков в системе «мерзлотная почва – многолетнемерзлая порода» на территории Колымской низменности начато в октябре 2014 года. На сегодняшний день обработаны данные двух полных годовых циклов измерения плотности теплового потока и температуры почвы. Исследования проводились в окрестностях пос. Черского, на Северо-восточной научной станции ТИГ ДВО РАН, расположенной в подзоне северной тайги. В качестве объекта мониторинга выбрана криометаморфическая палево-метаморфизованная легкосуглинистая почва на пологом склоне (4-5°) южной экспозиции в лишайниково-бруснично-зеленомошном лиственничном редколесье. Рис. 1

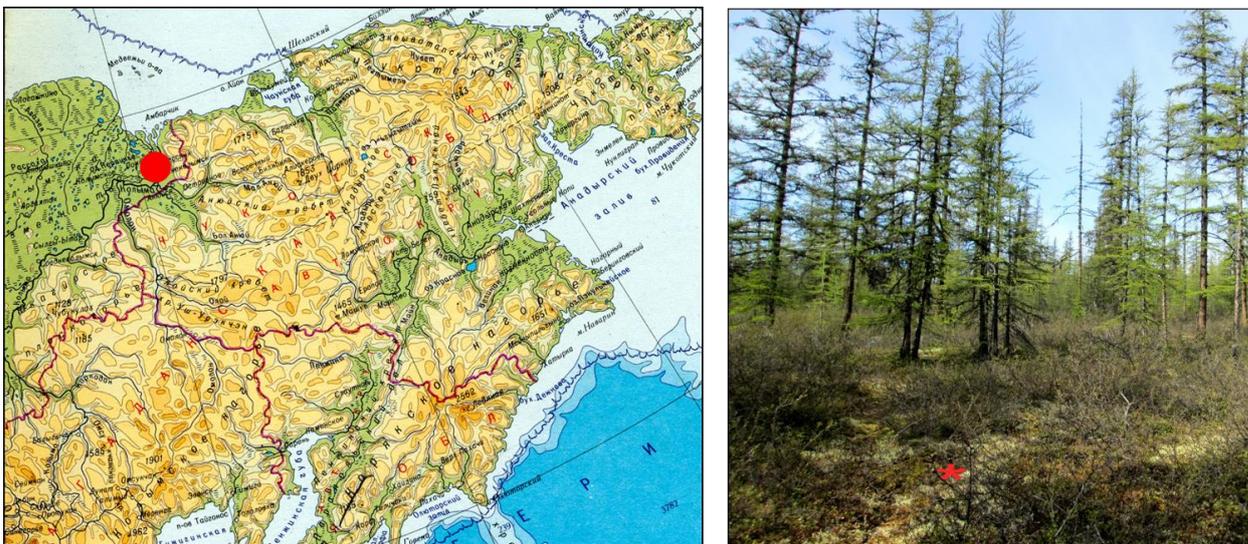


Рис.1 – Участок мониторинга

Мониторинг осуществлялся с помощью измерительной системы производства АО «НПО «Эталон» (г. Омск). Для измерения плотности теплового потока использовались датчики ДТП-0924 с аналого-цифровыми преобразователями сигнала и накопителем данных ЛЦД-1/100. Рис. 2. Для измерения температуры использовались датчики МЦДТ 0922 с такими же преобразователями сигнала и накопителем данных. Датчики теплового потока устанавливались в почвенный профиль на глубинах 0 см (под растительный покров), 40 см и 85 см (на подошву деятельного слоя). Температурные датчики помещались на глубины: 0, 20, 40, 80 и 85 см. Поток тепла вглубь системы «почва-мерзлота» считался положительным, а в противоположную сторону – отрицательным.



Рис. 2 - Измерительная система: ДТП-0924 и ЛЦД-1/100

Теплообеспеченность почвы - количество тепла, расходуемое на ее нагревание от нулевой температуры до максимальных значений - рассчитывается как часть годового теплооборота:

$$Q_{t>0} = C * \sum_{i_0}^{i_n} t_{max} * (h_{i+1} - h_i)$$

где: $Q_{t>0}$ – теплообеспеченность, МДж/м² год; C – теплоёмкость талой почвы, принятая равной 3,77 МДж/м³ град; t_{max} – максимальная за год среднесуточная температура почвы на глубине i , °С; h - глубина, м; индекс i соответствует номеру слоя почвы, i_0 обозначает приповерхностный слой, i_n обозначает слой почвы с нулевой максимальной температурой (подошва слоя сезонного протаивания). В качестве исходных данных использовались значения максимальных среднесуточных температур.

Среднегодовая температура почвы на 20 см за период наблюдений была равна - 0,7°С, средняя температура самого теплого месяца (июль или август) - 4,4-4,7°С, а самого холодного месяца (март) - -5,3...-5,9°С. Амплитуда среднемесячных температур на 20 см составляла 10,0-10,3°С. Рис. 3 Согласно классификации В.Н. Димо температурный режим изучаемой почвы в летнее время является мерзлотным очень холодным, а в зимнее – мерзлотным умеренно-холодным. По величине годовой амплитуды почвенный климат может быть охарактеризован как мягкий.

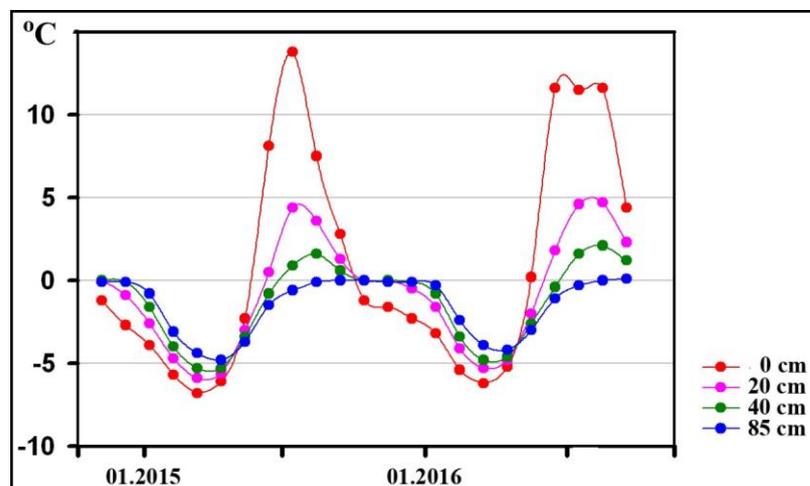


Рис.3 - Динамика температуры почвы

Сезонное изменение знака теплового потока в изучаемой системе приходилось на первые числа мая и вызывало инверсию температурного градиента. Рис. 4. Между периодами охлаждения и нагревания имел место короткий промежуток времени (4-12 дней) с нулевыми значениями потоков. После схода снежного покрова плотность теплового потока на дневной поверхности резко возрастала на 1-2 порядка. В дальнейшем эта величина постепенно снижалась на протяжении теплого периода. Так, в конце мая ее максимальные значения составляли 113-189, в июне – 81-103, в июле – 72-73, в августе – 47-61, а в сентябре – 38-46 Вт/м². Интенсивность отрицательных ночных потоков увеличивались с июня по сентябрь. На 40 и 85 см максимальные значения плотности потока наблюдались в июле или в августе, когда они были равны 18-23 и 9-11 Вт/м² соответственно. Асинхронность сезонного распределения тепловых потоков, фиксируемых на нулевой отметке и в толще почвы, объясняется их разной природой. Поверхностный поток возникает, в первую очередь, благодаря лучистой энергией солнца, интенсивность и продолжительность суточного поступления которой максимальна весной и в начале лета, то есть в период полярного дня и преобладания ясной погоды. В деятельном же слое и на его границе с мерзлотой теплоток обусловлен, в первую очередь, кондуктивным переносом энергии, лучше всего проявляющимся в разгар летнего сезона и во второй его половине.

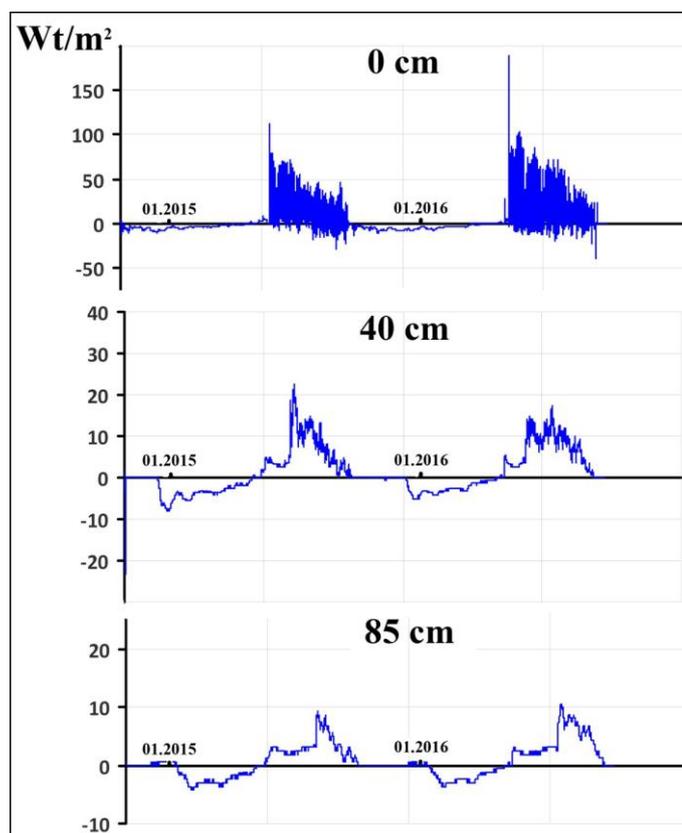


Рис. 4 - Динамика тепловых потоков

Переход системы к полупериоду сезонного охлаждения происходил в последнюю декаду сентября. Он выразился в смене направления теплового потока на дневной поверхности и его приостановке в средней и нижней частях профиля. Появление отрицательных потоков на глубине 40 см обнаруживается в момент начала промерзания слоя 20-40 см или несколько раньше. Период нулевых потоков на подошве деятельного слоя продолжался до конца ноября – середины декабря, после чего возобновлялось поступление тепловой энергии в толщу мерзлоты. Плотность такого потока доходила до

0,6 Вт/м². Смена его знака на отрицательный строго соответствовала моменту смыканию фронтов сезонной и многолетней мерзлоты. Рис. 5. Поток тепла в толщу мерзлоты, наблюдаемый в период промерзания средней и нижней частей профиля, скорее всего, объясняется выделением тепла при кристаллизации почвенной влаги, распространяющегося как вверх, так и вниз по профилю.

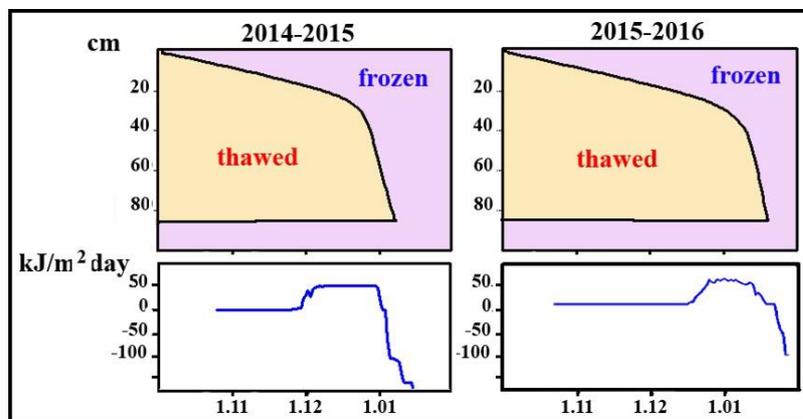


Рис. 5 - Ввод тепловой энергии в вечную мерзлоту при сезонном промерзании активного слоя

Плотность зимних потоков тепла были значительно меньше таковой как для положительных (дневных), так и для отрицательных (ночных) потоков в летнее время. На всех глубинах проявлялась тенденция к ее уменьшению на протяжении холодного периода, что связано, как с накоплением снежного покрова, так и с ослаблением морозов в начале весны. Максимальные значения плотности теплового потока вверх на поверхности снижались с 13-14 в октябре до 3 Вт/м² в апреле; для 40 см – с 5-8 в декабре до 2-3 Вт/м² в апреле и с 3-4 в январе до 2-3 Вт/м² в апреле. Из-за высокой теплопроводности мерзлого грунта плотность зимних потоков уменьшалась по профилю не так интенсивно, как летних.

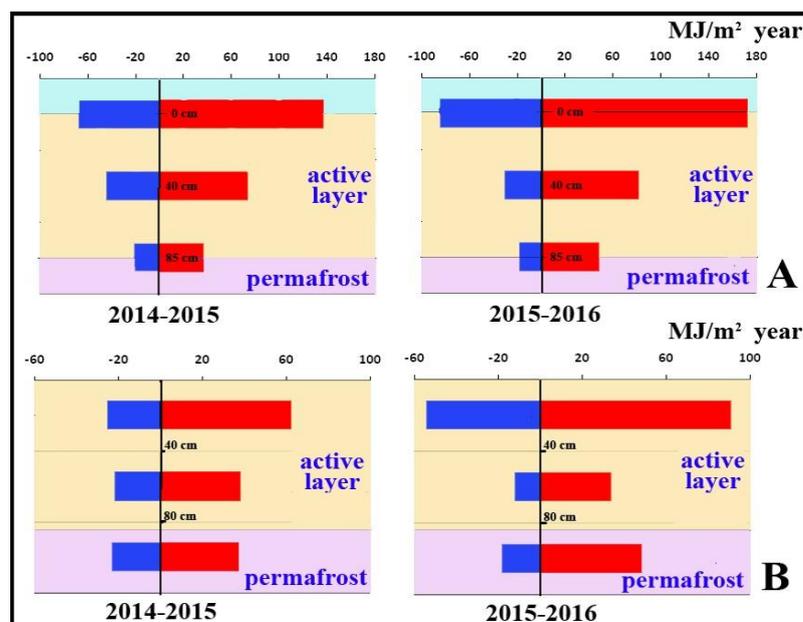


Рис. 6 - Годовые затраты и потери тепловой энергии:
 А - на разных глубинах грунта;
 Б - в разных слоях вечномёрзлых грунтов

При установке датчиков мы разделили систему «почва-мерзлота» на три блока: верхние горизонты почвы, нижние горизонты почвы и многолетнемерзлая порода. Общее поступление тепловой энергии в изучаемую систему в 2015 г. составило 136,29, а в 2016 г. – 172,21 МДж/м². Рис. 6А. Из этих величин на нагревание многолетней мерзлоты в теплое время года расходовалось 27,1 и 28,0% соответственно. Оставшиеся 72,9 и 72,0% тратились на нагревание деятельного слоя и фазовые переходы лед-вода в нем. Рис. 6В. При этом в верхнюю часть почвы поступало 45,8 и 52,6%, а в нижнюю – 27,1 и 19,4% соответственно. Величины теплообеспеченности почвы были равны 14,51 и 16,11 МДж/м², что составляло 10,7 и 9,4% от общего тепла, поступающего в систему «почва-мерзлота». Рис. 7. В первую зиму мониторинга деятельный слой терял 46,95, а во вторую - 66,28 МДж/м². Рис. 6. Тепловые потери многолетней мерзлоты соответственно были равны 23,10 и 18,51 МДж/м², а системы в целом - 70,05 и 84,79 МДж/м².

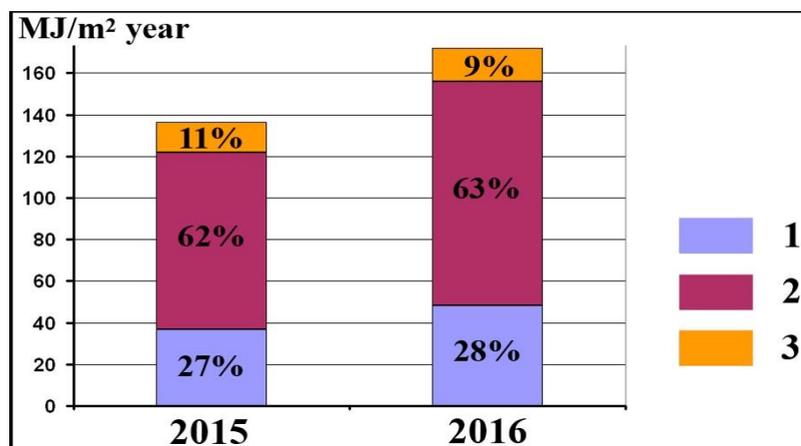


Рис. 7 - Содержание теплового переворота: 1-энергия расходуется на нагрев вечномерзлого грунта; 2-энергия расходуется на нагрев активного слоя от минимальных значений до 0°C и водно-фазовых переходов; 3-теплоотдача грунта

Положительный баланс тепла в первый год составлял: 66,24 МДж/м² (48,6% от общего поступления энергии), а во второй 87,42 МДж/м² (50,8%). Иначе говоря, количество энергии, поступающей с систему «почва-мерзлота» за лето оказалось примерно вдвое больше энергии, теряемой в течение зимы. При этом баланс для деятельного слоя был равен 52,37 МДж/м² (52,7%) и 57,72 МДж/м² (46,6%), а для многолетней мерзлоты- 13,87 МДж/м² (37,5%) и 29,7 МДж/м² (61,6%) в первый и второй годы соответственно. Результаты мониторинга теплового потока хорошо согласуются с тенденцией к повышению температур в системе «почва-мерзлота» и увеличению мощности деятельного слоя, установленной для изучаемой территории и отражающей глобальное изменение климата в сторону потепления.

Выводы:

1. Мониторинг тепловых потоков в системе «почва-мерзлота», проводимый параллельно с измерениями температуры, позволяет подробно рассмотреть процесс теплообмена почвы с атмосферой и многолетнемерзлой породой.

2. В изучаемой почве плотность теплового потока летом, как правило, выше, чем зимой. Из-за высокой теплопроводности мерзлой почвы величина этого показателя в холодное время года снижается по профилю не так резко, как в теплое. В полупериод нагревания (май-сентябрь) максимальные потоки на поверхности наблюдаются после схода снежного покрова, а в толще профиля и на границе с мерзлотой - в середине или

второй половине летнего сезона. В полупериод охлаждения (октябрь-апрель) на всех глубинах плотность потоков снижается от момента промерзания к весне.

3. Смена направления теплового потока в почвенном профиле сопровождается периодом с нулевыми значениями потока, который в осеннее время растягивается на несколько недель. Поступление тепла в многолетнемерзлую породу возобновляется во время промерзания средней и нижней частей деятельного слоя и продолжается до смыкания сезонной и многолетней мерзлоты. Происхождение этого потока (до $0,6 \text{ Вт/м}^2$), по видимому, связано с выделением теплоты кристаллизации почвенного раствора.

4. 72-73% тепла, поступающего в систему «почва-мерзлота» расходуется на нагревание деятельного слоя и фазовые переходы лед-вода и 27-28% - на нагревание многолетней мерзлоты. Теплообеспеченность почвы составляет около 10% от суммарной величины приходящей энергии. За годы мониторинга зимние потери тепла были примерно вдвое меньше его поступления в летнее время, что согласуется с общей тенденцией к повышению температуры мерзлоты и деятельного слоя.