Всероссийская конференция с международным участием,
посвященная 75-летию Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
«Лесные экосистемы бореальной зоны: биоразнообразие, биоэкономика, экологические риски»
Россия, Красноярск, 26–31 августа 2019 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА И ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА В ВОДОСБОРНОМ БАССЕЙНЕ РУЧЬЯ КУЛИНГДАКАН

Л. Оргогозо[1], А.С. Прокушкин[2], О.С. Покросвский[1,3], К. Грене[4], М. Кинтар[5,6], Ж. Вирс[1], С. Одри[1]

[1] GET (Géosciences Environnement Toulouse, Лаборатория Наук о Земле и Окружающей Среде Тулуза), Тулуза, Франция

[2] Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск

[3] Лаборатория биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды (BIO-GEO-CLIM), Томск

[4] LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Лаборатория Наук Климата и Окружающей Среды), Жиф-сюр-Иветт, Франция

[5] IMFT (Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, Институт Механики Жидкости Тулузы), Тулуза, Франция

[6] CNRS, IMFT, Тулуза, Франция

Растительность и сезонно-талый слой в бореальных лесах - Эвапотранспирация

Проблема: количественная оценка сезонной и пространственной изменчивости эвапотранспирационных потоков воды из сезонно-талого слоя в лесопокрытых районах криолитозоны

Исследуемая территория:

- **Центральная Сибирь, бассейн реки Нижняя Тунгуска**
- **Растительный покров: лиственничные леса; литология: базальты и туфы**
- **Основная пространственная изменчивость: северная или южная экспозиция склона**

Цели:

- **Количественное моделирование теплопереноса и гидрологического транспорта в почвах лесопокрытых районов криолитозоны**
- **Исследование влияния эвапотранспирационных потоков на динамику сезонно-талого слоя**

Методологический подход:

Численное моделирование тепловых и гидрологических переносов в масштабе экспериментального водосбора

→ Временной масштаб : несколько лет
Пространственный масштаб : десятки км^2

Пример применения: сезонная динамика вечной мерзлоты в водосборном бассейне ручья Кулингдакан

Количественное моделирование тепловых и гидрологических переносов

Численное моделирование сопряженных процессов переноса воды и энергии с фазовым переходом в почвах: это сложная проблема, которую исследуют с семидесятых годов до настоящего временни
(например: Guymon and Luthin, 1974, Yu et al., 2018)

Длительные вычисления: необходимость использования высокопроизводительной вычислительной техники (HPC) - необходимо использование массовых параллельных вычислений
(например: Painter *et al.*, 2013, Walvoord and Kurylyk, 2016)

=> новый криогидрогеологический вычислитель с открытым исходным кодом для моделирования гидродинамики OpenFOAM®: permaFoam

openfoam.com:

OpenFOAM The open source CFD toolbox

openfoam.org:

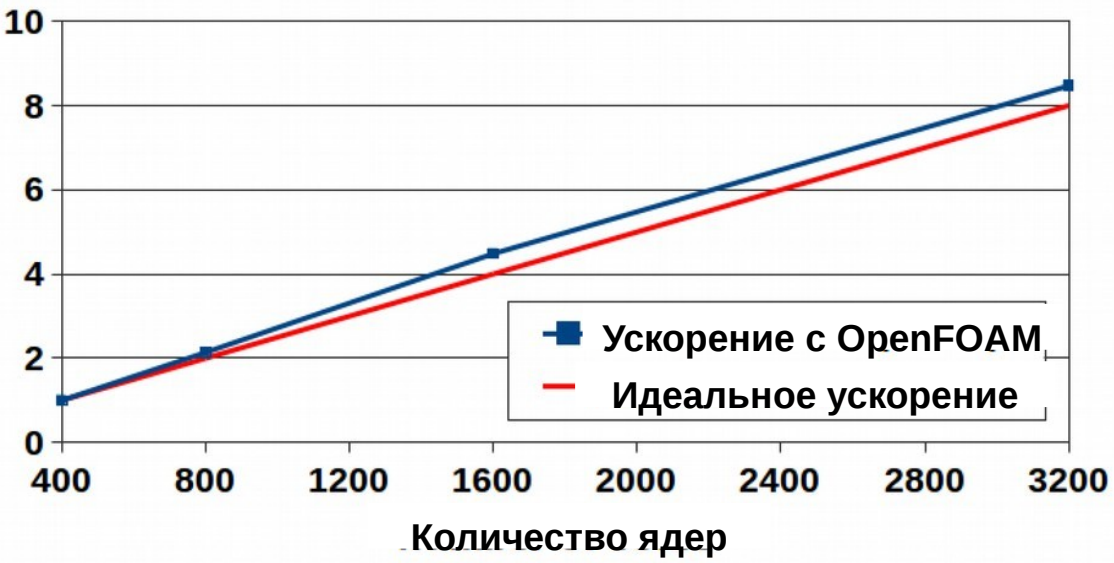
OpenFOAM
The OpenFOAM Foundation

Home Download Development Resources Contact Us

OpenFOAM: известный открытый исходный код для генеральной вычислительной гидродинамики (C++, конечные объёмы, сопряженные физические процессы, массово-параллельные вычисления)

Совместные разработки в большом и разнообразном сообществе, включая научный (e.g.: CINECA, IHPC, HLRS) и индустриальный сектор (e.g.: Фольксваген, Huawei, FM Global)

Постоянное техобслуживание способности использовать современные вычислительные архитектуры (Orgogozo et al., 2014b, Bricteux et al., 2017)



кривая масштабируемости из Orgogozo et al., 2015

- **С 400 до 3200 ядер**
- **Сетка с 1.2 миллиард елементов**
- **Полученная с суперкомпютером EOS (www.calmip.univ-toulouse.fr)**

permaFoam: физические уравнения

Трехмерные сопряженные теплоперенос и перенос воды в пористых средах с переменной насыщенностью, с учетом эвапотранспирации и замерзания / оттаивания воды в порах (Orgogozo et al., 2019)

сопряжения, нелинейности

Уравнение Ричардса с эвапотранспирацией:

$$C_H(h)\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla\cdot K_H(h,T)\nabla(h+z) + Q_{AET}(h,T)$$

Уравнение теплопередачи с замерзанием / оттаиванием:

$$\frac{\partial C_T(h,T)T}{\partial t} + \nabla\cdot v(h,T)C_{T,liquid}T = \nabla\cdot K_T(h,T)\nabla T + L\frac{\partial\theta_{ice}(h,T)}{\partial t}$$

Жёсткая система, нелинейности, сопряжения, немногие справочные решения: бенчмарк InterFrost (Grenier *et al.*, 2018)

permaFoam: физические уравнения

Трехмерные сопряженные теплоперенос и перенос воды в пористых средах с переменной насыщенностью, с учетом эвапотранспирации и замерзания / оттаивания воды в порах (Orgogozo et al., 2019)

сопряжения, нелинейности

Уравнение Ричардса с эвапотранспирацией:

$$C_H(h)\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla\cdot K_H(h,T)\nabla(h+z) + Q_{AET}(h,T)$$

Уравнение теплопередачи с замерзанием / оттаиванием:

$$\frac{\partial C_{T_{eq}}(h,T)\,T}{\partial t} + \nabla\cdot v(h,T)\,C_{T_{liquid}}T = \nabla\cdot K_{T_{eq}}(h,T)\nabla T + L\frac{\partial \theta_{ice}(h,T)}{\partial t}$$

Жёсткая система, нелинейности, сопряжения, немногие справочные решения: бенчмарк InterFrost (Grenier *et al.*, 2018)

Член “эвапотранспирационное поглощение воды в почве”

- Геометрия корневых систем (корнеобитаемый слой → $V_{root\,zone}$, $\chi_{root\,zone}(\mathbf{x})$) на склонах в водосборном бассейне ручья Кулингдакан: натурные наблюдения (Viers *et al.*, 2013)

- Оценка потенциальной эвапотранспирации (PET / ПЭТ): формула Hamon (Lu et al., 2005) Уже использовалась в лесных бореальных районах (Frolking *et al.*, 1996, 1997)

$$\mathrm{PET}_d = \begin{cases} 218,527\,\frac{L_d}{(T_{air}+273.3)}\,\exp\left(17.26939\,\frac{T_{air}}{T_{air}+237.3}\right) & T_{air} > 0 \\ 0 & T_{air} \leq 0 \end{cases}$$

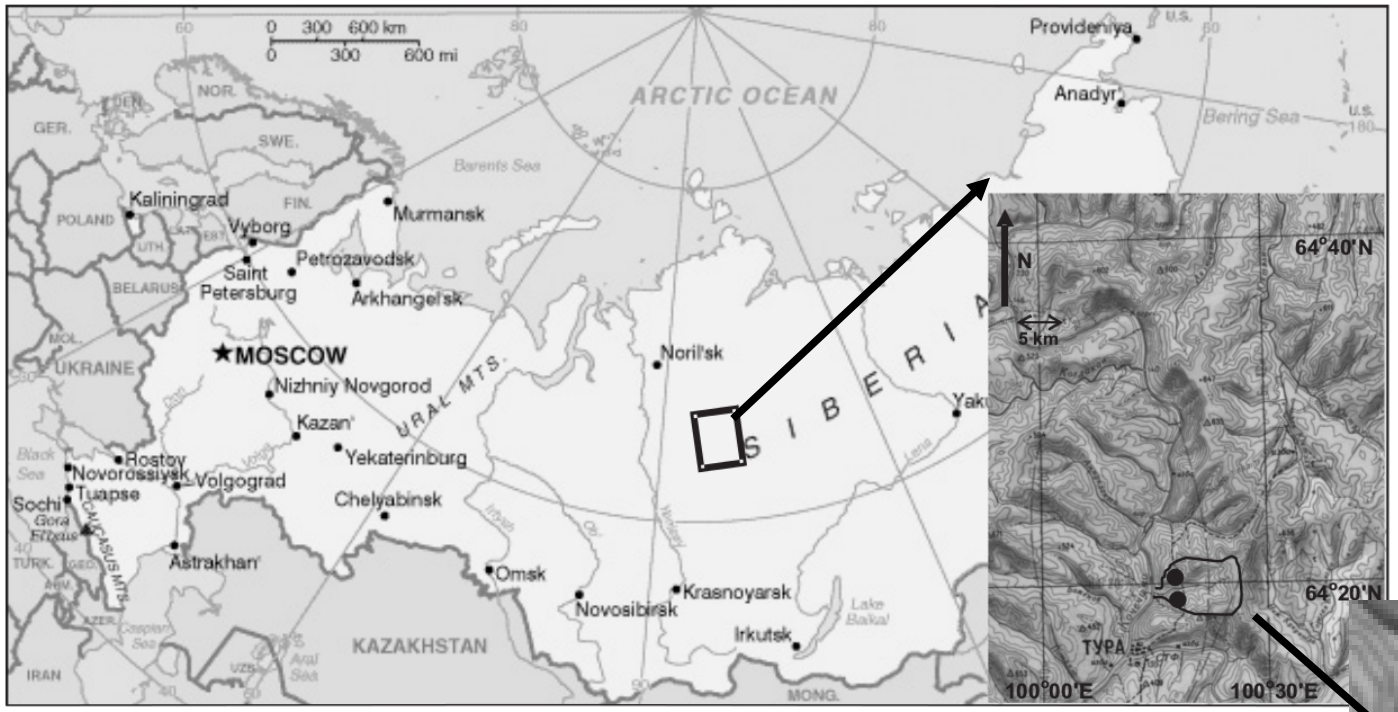
- Поле фактической эвапотранспирации (AET / ФЭТ) в почве с замерзанием / оттаиванием (Orgogozo *et al.*, 2019, модифицировано из Orgogozo, 2015)

$$Q_{AET}(h,\mathbf{x}) = \begin{cases} Q_{PET}(\mathbf{x}) & \left(\frac{(\theta_l(h,\mathbf{x})-\theta_{WP}(\mathbf{x}))}{\Delta t} - Q_{PET}(\mathbf{x})\right) \geqq 0 \\ \frac{(\theta_l(h,\mathbf{x})-\theta_{WP}(\mathbf{x}))}{\Delta t} & -Q_{PET}(\mathbf{x}) < \left(\frac{(\theta_l(h,\mathbf{x})-\theta_{WP}(\mathbf{x}))}{\Delta t} - Q_{PET}(\mathbf{x})\right) < 0 \\ 0 & \left(\frac{(\theta_l(h,\mathbf{x})-\theta_{WP}(\mathbf{x}))}{\Delta t} - Q_{PET}(\mathbf{x})\right) \leqslant -Q_{PET}(\mathbf{x}) \end{cases}$$

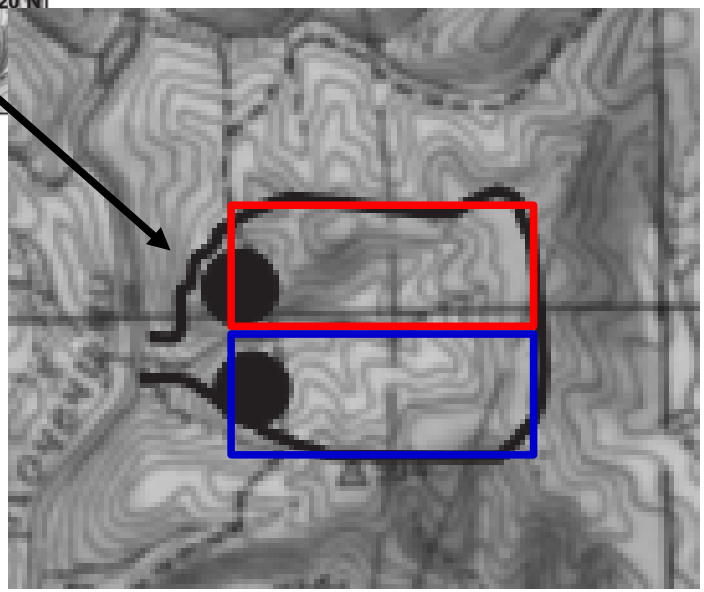
Где:

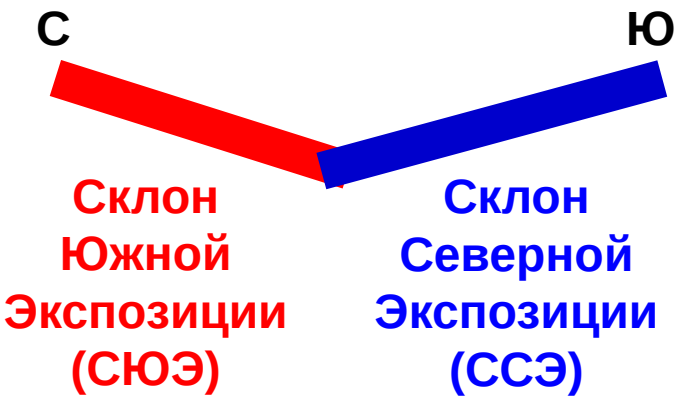
$$Q_{PET}(\mathbf{x}) = PET * (S_{soil}/V_{root\,zone}) * \chi_{root\,zone}(\mathbf{x})$$

Кулингдакан: водосборный бассейн в зоне сплошной мерзлоты



(из Prokushkin et al., 2005)





Ориентация и форма водосбора ручья Кулингдакан (например: Prokushkin et al., 2005, Viers et al., 2015) подходящих для упрощенного 2D представления

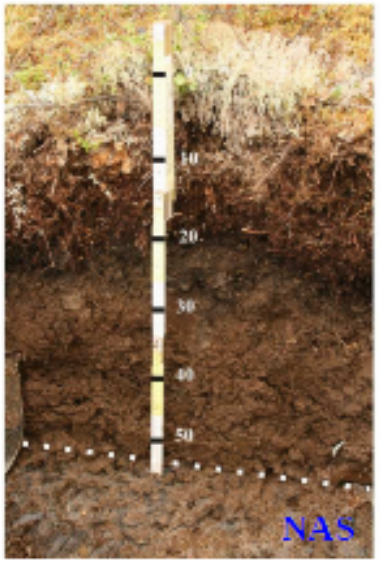
Кулингдакан: мерзлотный таежный водосбор

Склон Южной Экспозиции (СЮЭ)

Склон Северной Экспозиции (ССЭ)

древостои

почвенные профили



Существенная вариабельность растительного покрова СЮЭ / ССЭ:

- надземная фитомасса СЮЭ: 3.02 кгС/м² ; ССЭ: 1.53 кгС/м²

- индекс листовой поверхности СЮЭ: 0.69 м²/м² ; ССЭ: 0.2 м²/м²

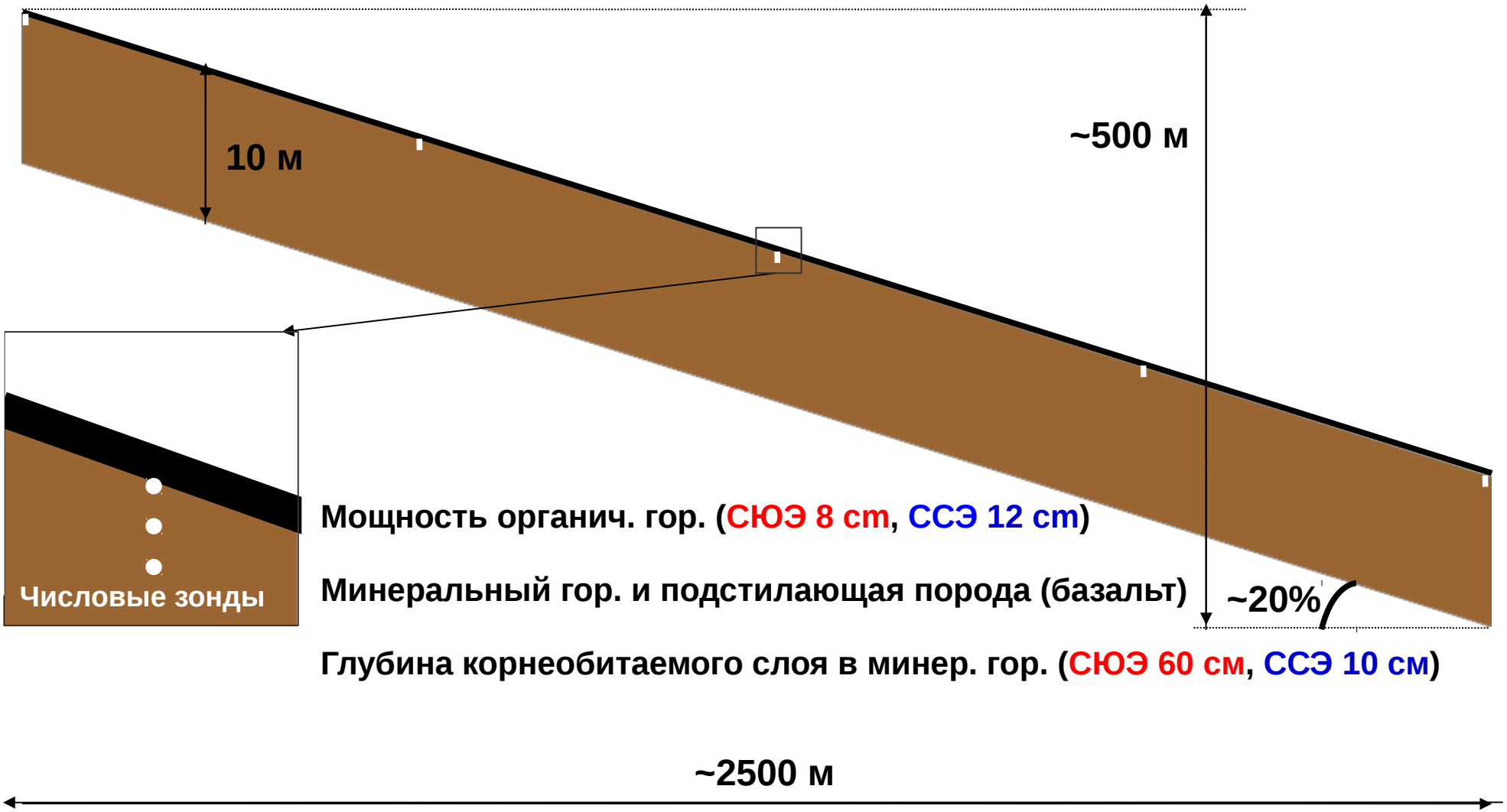
- глубина корнебитаемого слоя СЮЭ: 60 см ; ССЭ: 10 см

Высокая инсоляция в СЮЭ → древостой лиственницы большего размера, чем в ССЭ

Более подробная информация о растительном покрове водосбора ручья Кулингдакан: Viers et al., 2013, 2015, Prokushkin et al., 2018.

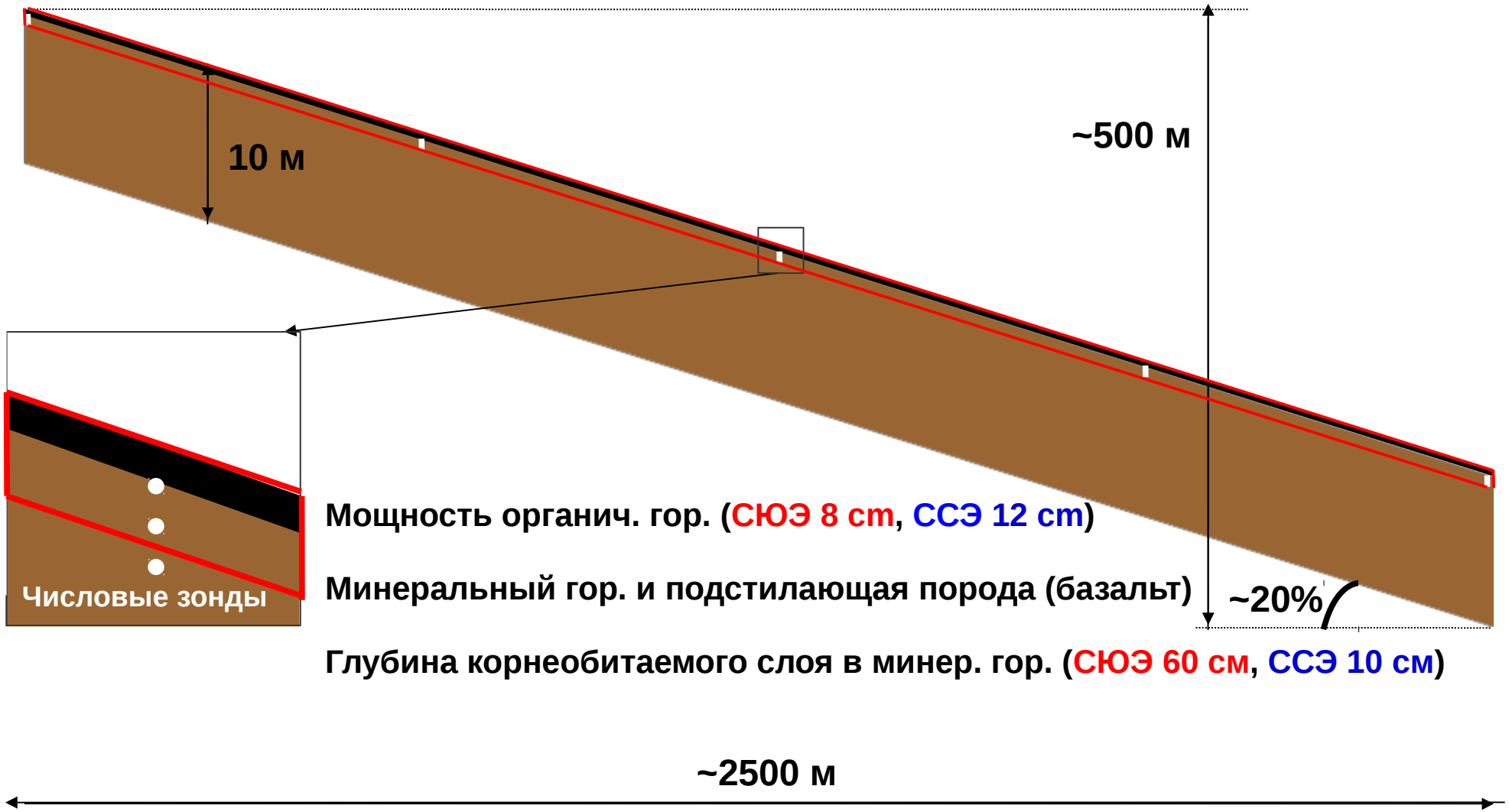
Значительные различия по глубине сезонно-талого слоя СЮЭ / ССЭ (Gentsch, 2011):
Макс. СТС: СЮЭ: 1.22м / ССЭ: 0.58 м

Упрощенное 2D представление склонов водосбора



Сетка:
2.5 миллиона элементов
Размер элементов: толщины между 5.10^{-3} м (верх) и 0.2 м (низ), ширина 0.2 м

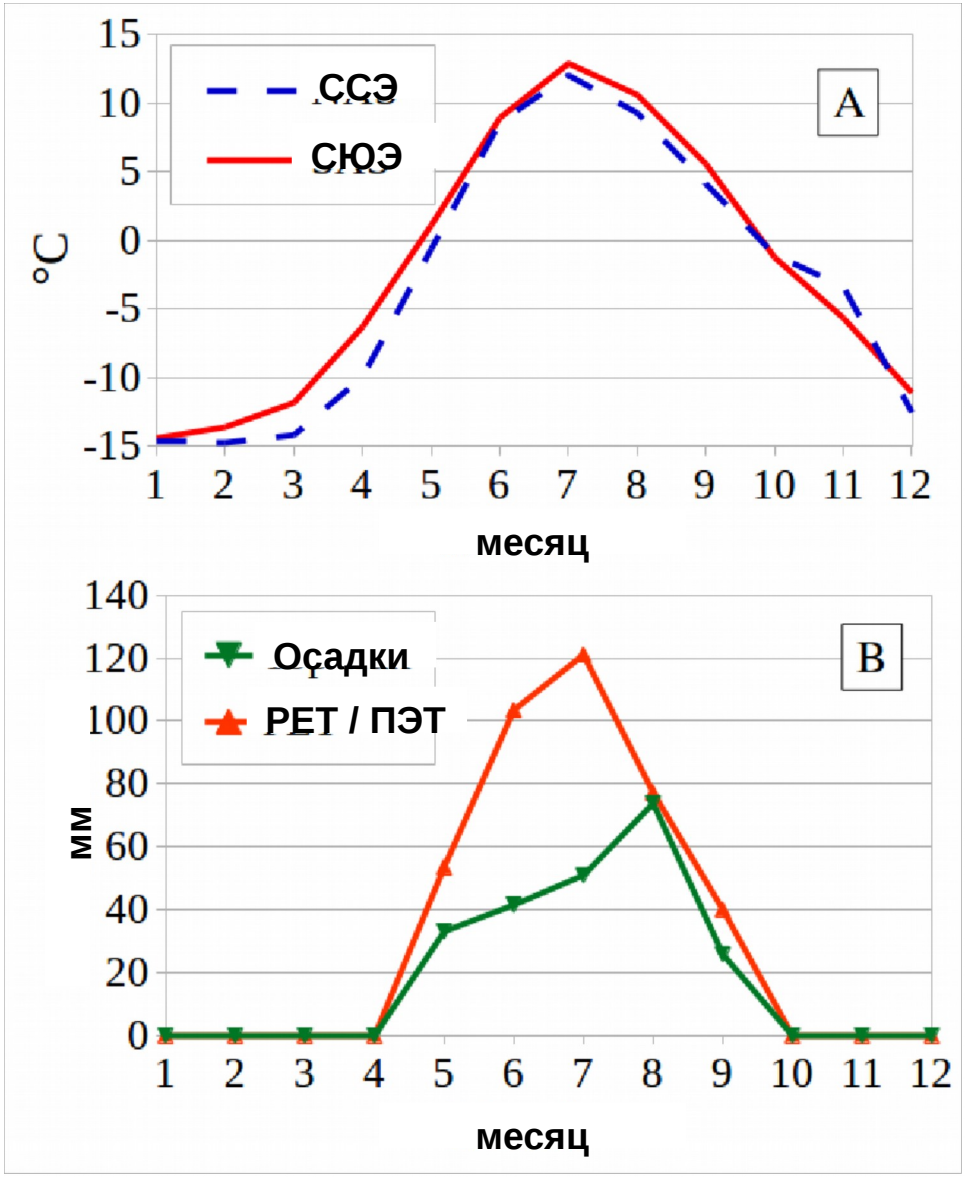
Упрощенное представление в 2D склонов водосбора



Сетка:
2.5 миллиона элементов
Размер элементов: толщины между 5.10^{-3} м (верх) и 0.2 м (низ), ширина 0.2 м

Климатические условия

Многолетние средние значения наблюдаемых ежемесячных климатических параметров



Исходные данные для переходного моделирования на склонах в течение гидрологического цикла (начальные условия: многолетный цикл).

Температуры в минеральном горизонте почвы

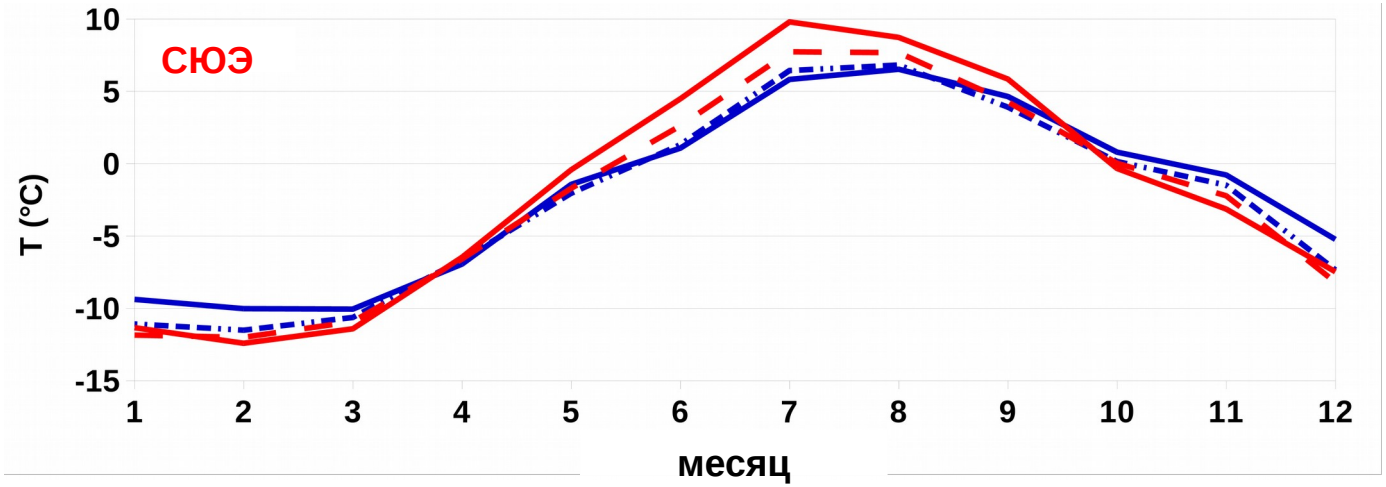
Хорошое согласие между наблюдениями и результатами моделирования

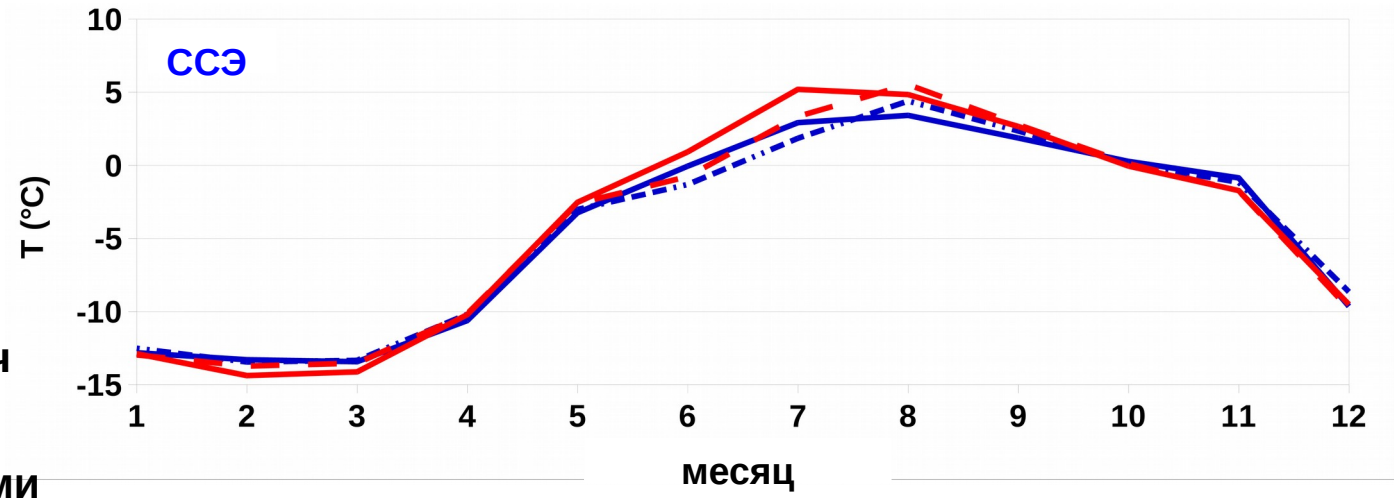
среднеквадратичная ошибка между измеренными и вычисленными значениями

СЮЭ: 1.07 °C ; ССВ: 0.74 °C

Информация о вычислениях:

- **Сетка: ~ 2 400 000 элементов**
- **Макс. временные шаги: 5с до 1ч**
- **Вычислительные ресурсы: запросы с 20 - 500 процессорными ядрами (процессоры: Intel(r) IVYBRIDGE 2,8 Ghz 10-cores) в суперкомпьютере EOS из CALMIP (www.calmip.univ-toulouse.fr)**



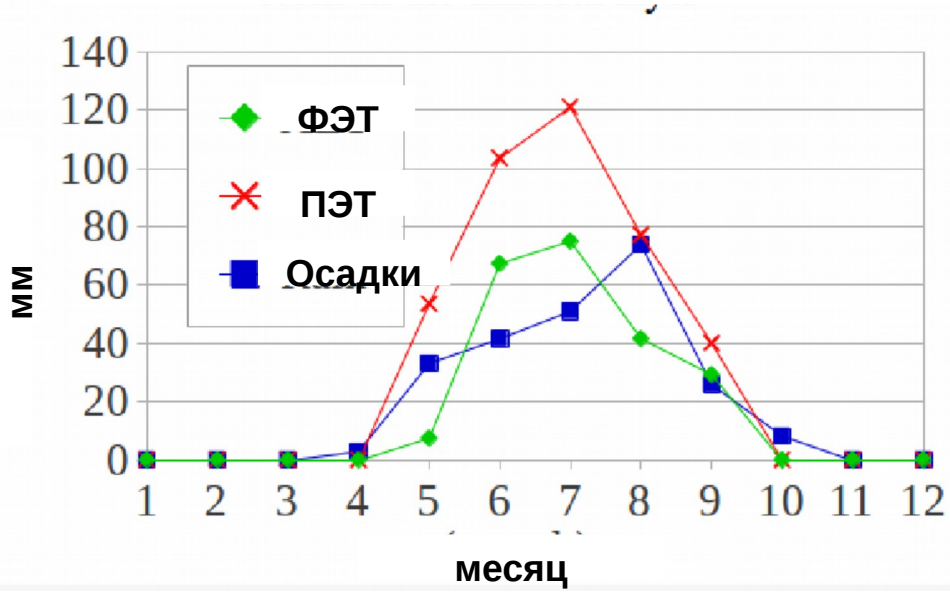


Мин. Гор. - 10 см (измерена) — Мин. Гор. - 10 см (вычислена)

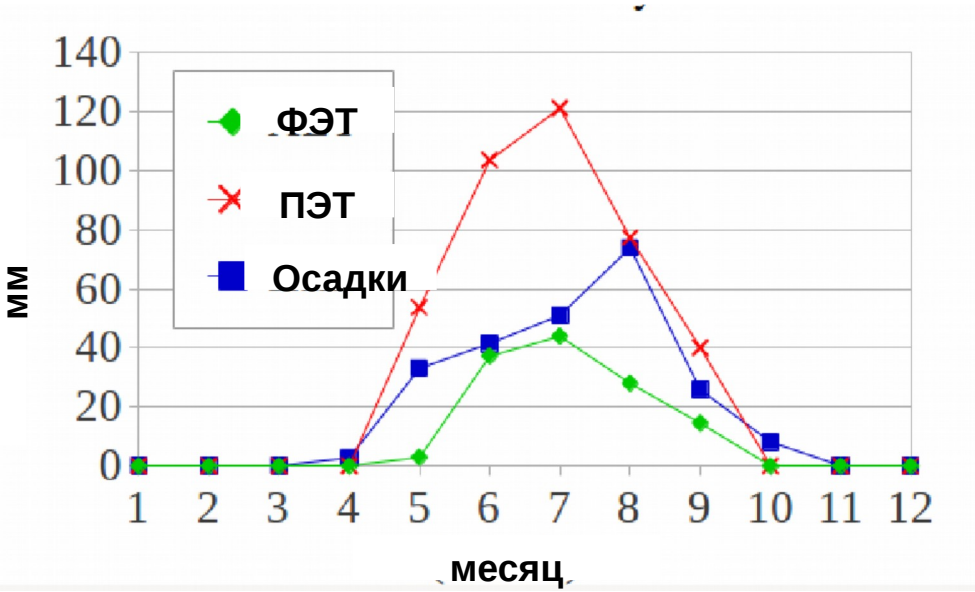
Мин. Гор. - 20 см (измерена) — Мин. Гор. - 20 см (вычислена)

Фактическая эвапотранспирация

СЮЭ - фактическая глубина корнеобитаемого слоя 0.6 м в минеральном горизонте



ССЭ - фактическая глубина корнеобитаемого слоя 0.1 м в минеральном горизонте



Осадки, ПЭТ: климатические наблюдения – ФЭТ: результаты вычислений

Два ограничения к фактической эвапотранспирации: низкие температури и недостаток влаги

Склоны СЮЭ провели 2 месяца в условиях осушения (ФЭТ > осадки)

Чувствительность к глубине корнеобитаемого слоя?

Два численных теста:

- Тест с Фактическими Условиями (ФУ тест): с фактической глубиной корневой системы, тест уже представлен

- Тест с Произвольной Глубиной Корней (ПГК тест): в этом тесте для всех склонов принята произвольная глубина корнеобитаемого слоя, равная средней мировой глубине корневой системы (1 м – по Schenk and Jackson, 2002)

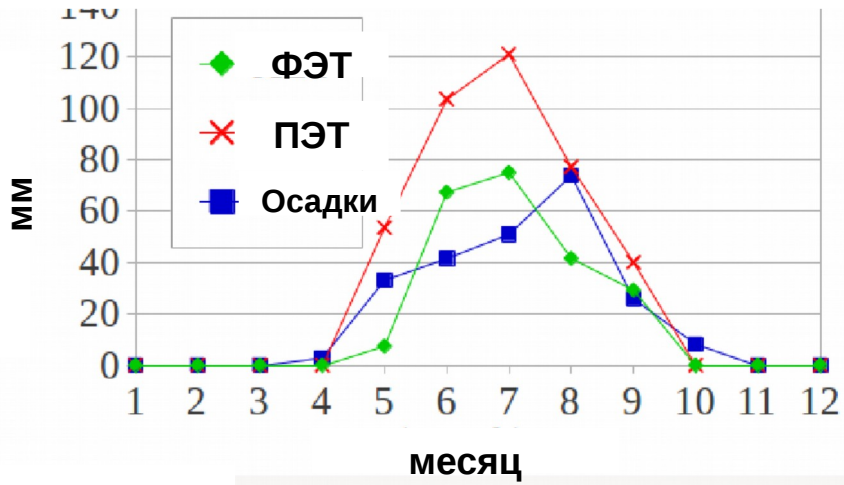
Как соотносятся ФЭТ, потоки воды и СТС в каждом тесте?

Является ли глубина корнеобитаемого слоя важным параметром для криогидрогеологических исследований?

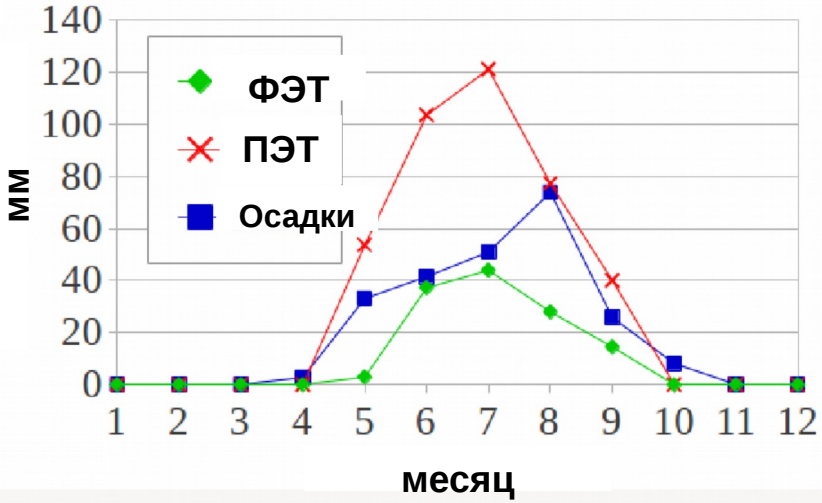
Чувствительность к глубине корнеобитаемого слоя? ФЭТ

ФУ тест

СЮЭ - фактическая глубина корнеобитаемого слоя: 0.6 м в минеральном горизонте

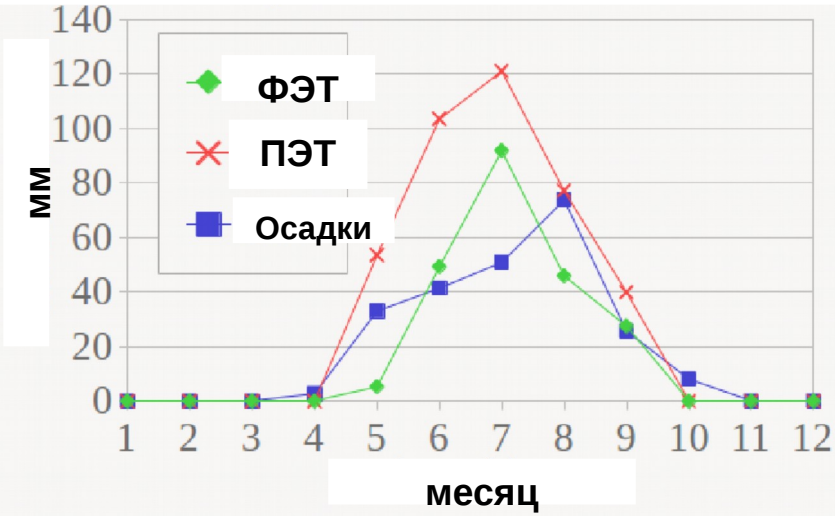


ССЭ - фактическая глубина корнеобитаемого слоя: 0.1 м в минеральном горизонте

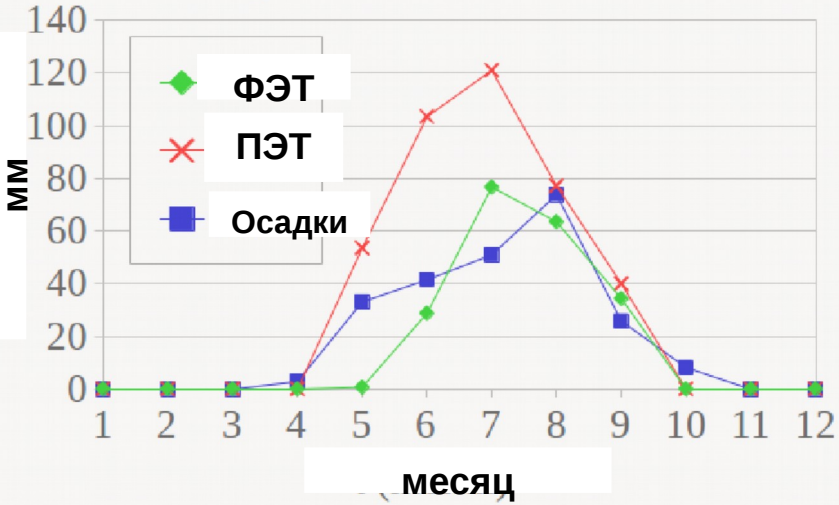


ПГК тест

СЮЭ - произвольная глубина корнеобитаемого слоя: 1 м в минеральном горизонте

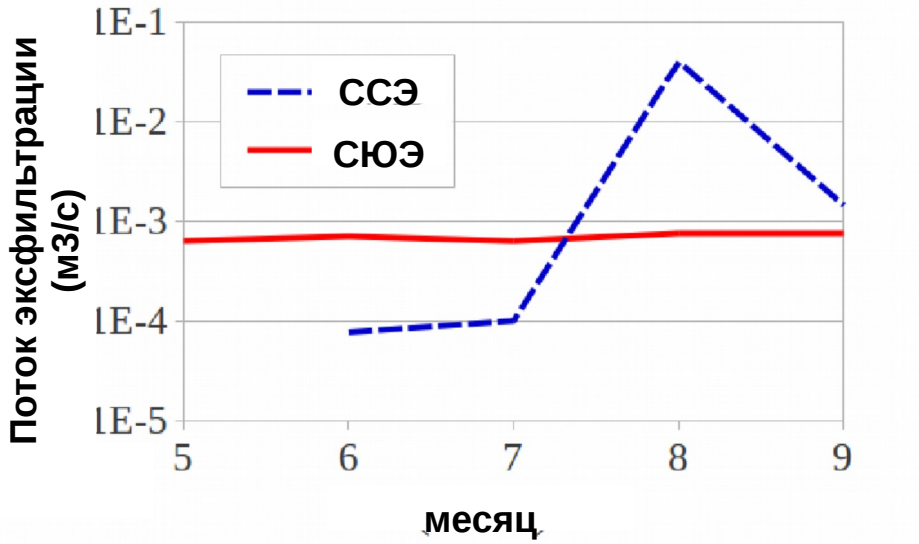


ССЭ - произвольная глубина корнеобитаемого слоя: 1 м в минеральном горизонте

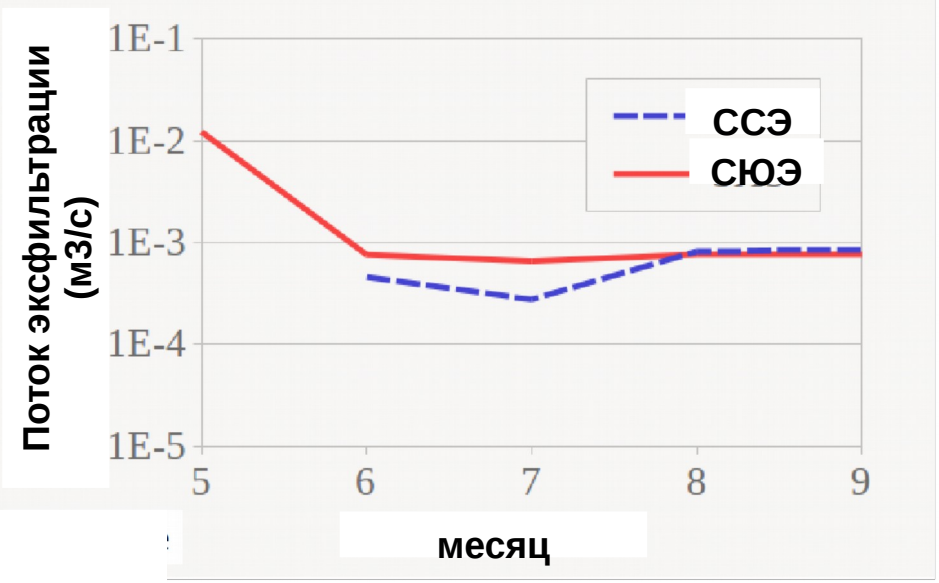


Чувствительность к глубине корнеобитаемого слоя? Потоки воды, СТС

ФУ тест С фактической глубиной корневой системы: СЮЭ 0.6 м ; ССЭ 0.1 м



ПГК тест С произвольной глубиной корневой системы: 1 м во всех склонах



Макс. измеренный СТС СЮЭ: 1.22 m
ССЭ: 0.58 m

Макс. вычисленный СТС в тесте ФУ:
СЮЭ: 1.41 m
ССЭ: 0.62 m

Макс. вычисленный СТС в тесте ПГК:
СЮЭ: 1.1 m
ССЭ: 0.9 m

Значительная разница между ФУ тестом и ПГК тестом!

ФУ тест хорошо согласуется с имеющимися результатами натурных наблюдений (потоки воды: Prokushkin *et al.*, 2007, Bagard *et al.*, 2013 ; Сезонно-талый слой: Gentsch 2011).

Выводы

PermaFoam позволяет выполнить численное моделирование динамики сопряженных процессов теплового и гидрологического переноса в условиях вечной мерзлоты в масштабе водосборного бассейна (благодаря высокой производительности параллельных вычислений), что позволяет воспроизвести пространственную изменчивость первого порядка, наблюдаемую в естественных условиях (С / Ю склоны).

Является ли глубина корнеобитаемого слоя важным параметром для криогидрогеологических исследований? Да, данная глубина определяет вариабельность потоков воды и мощности сезонно-талого слоя.

Следующий этап

Моделирование переносов в слое бриофитов и лишайников

Моделирования динамики вечной мерзлоты в условиях различных сценариев изменения климата

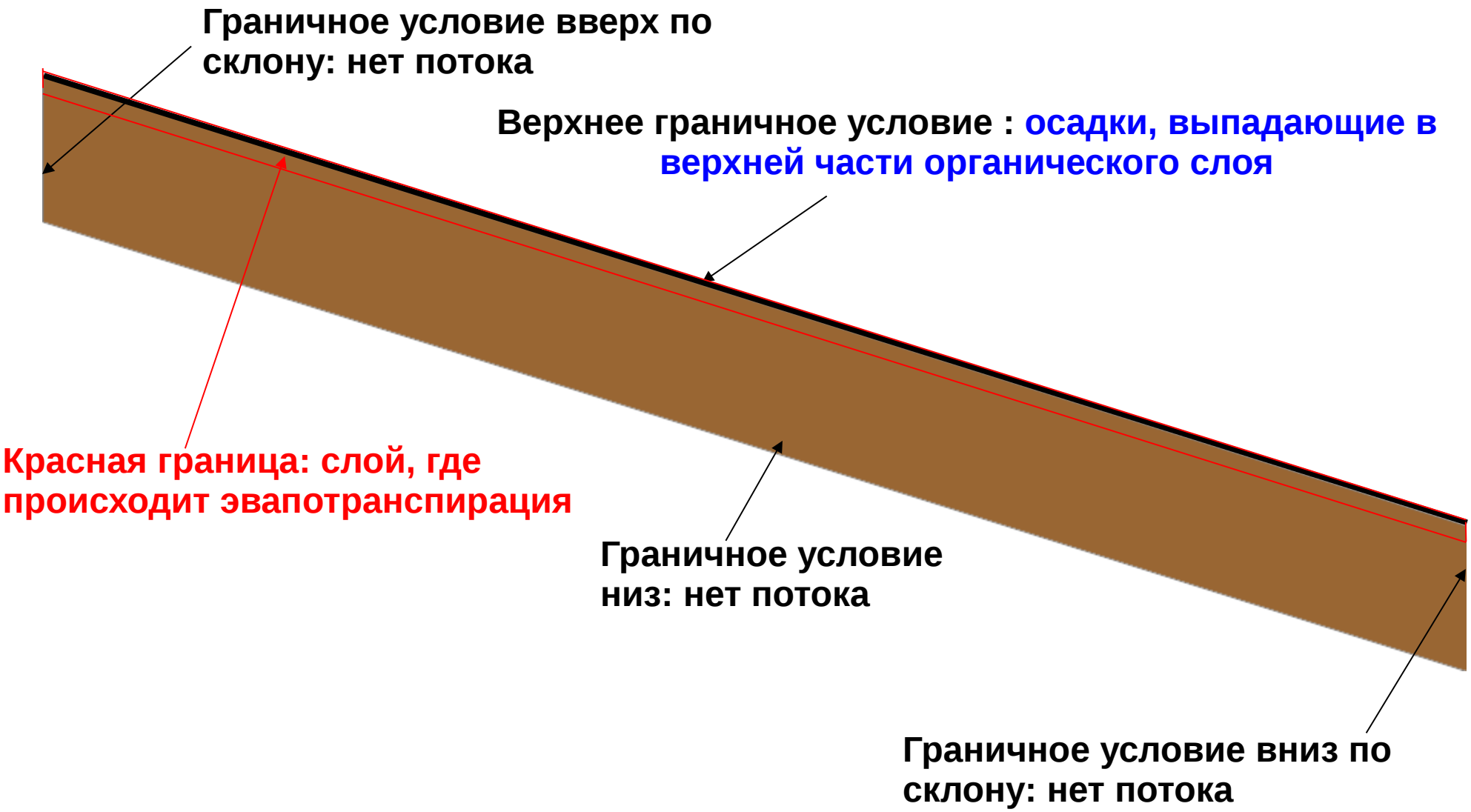
Всероссийская конференция с международным участием,
посвященная 75-летию Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
«Лесные экосистемы бореальной зоны: биоразнообразие, биоэкономика, экологические риски»
Россия, Красноярск, 26–31 августа 2019 г.

Спасибо за внимание!

Контакт: laurent.orgogozo@get.omp.eu

Граничные условия для уравнения теплопередачи

Граничные условия для уравнения гидрологического переноса

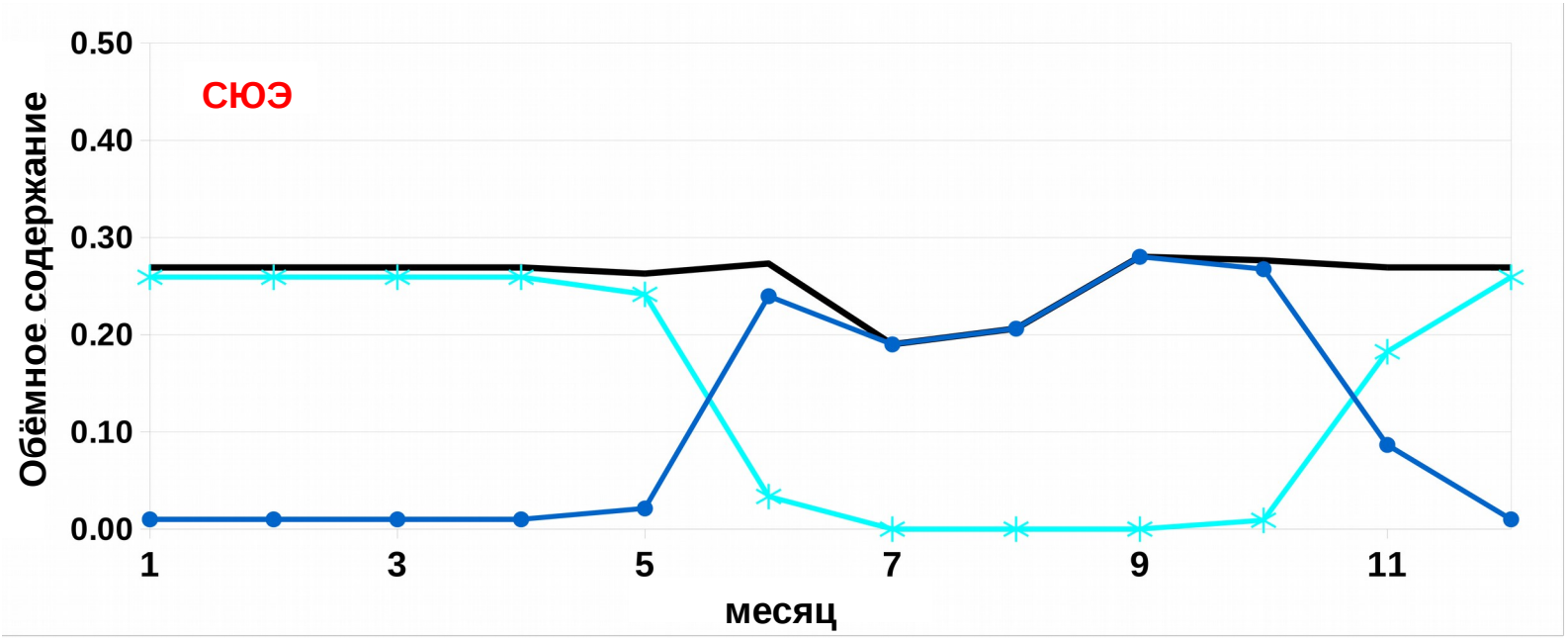


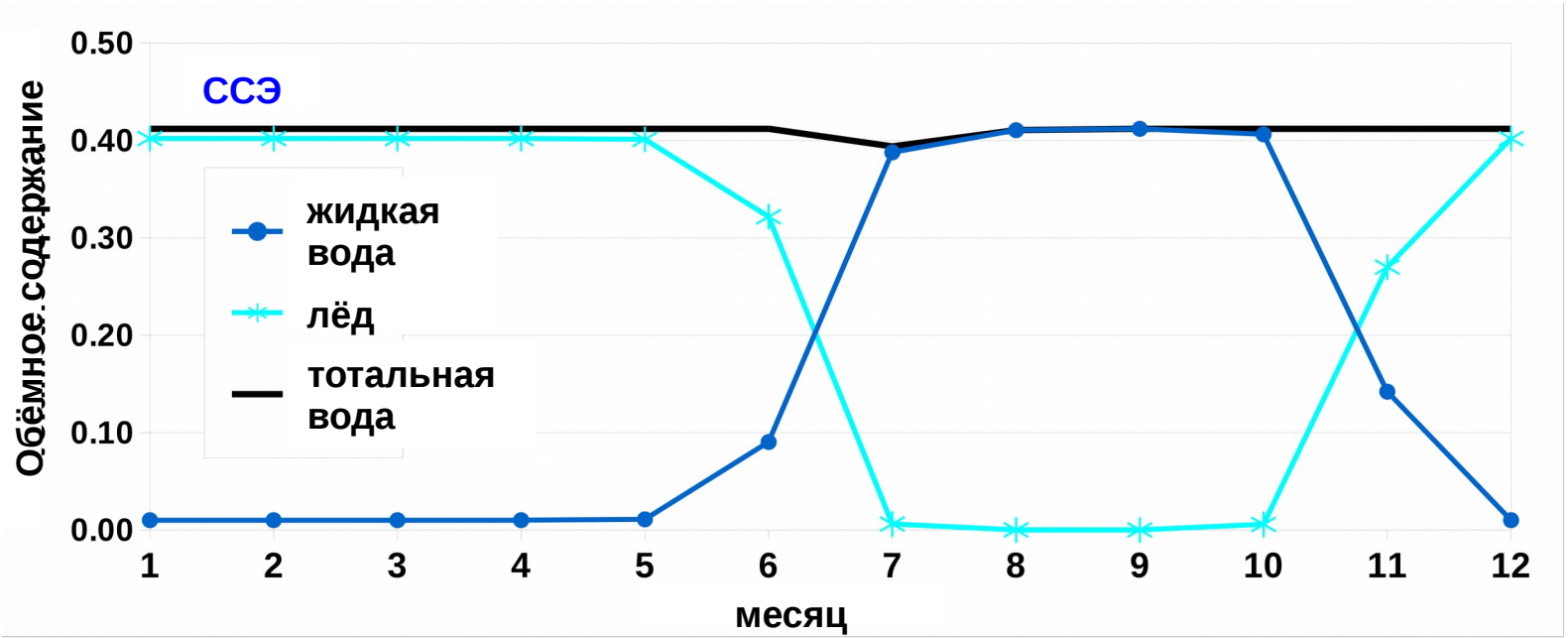
Содержание воды в минеральном горизонте

Вычисленные результаты

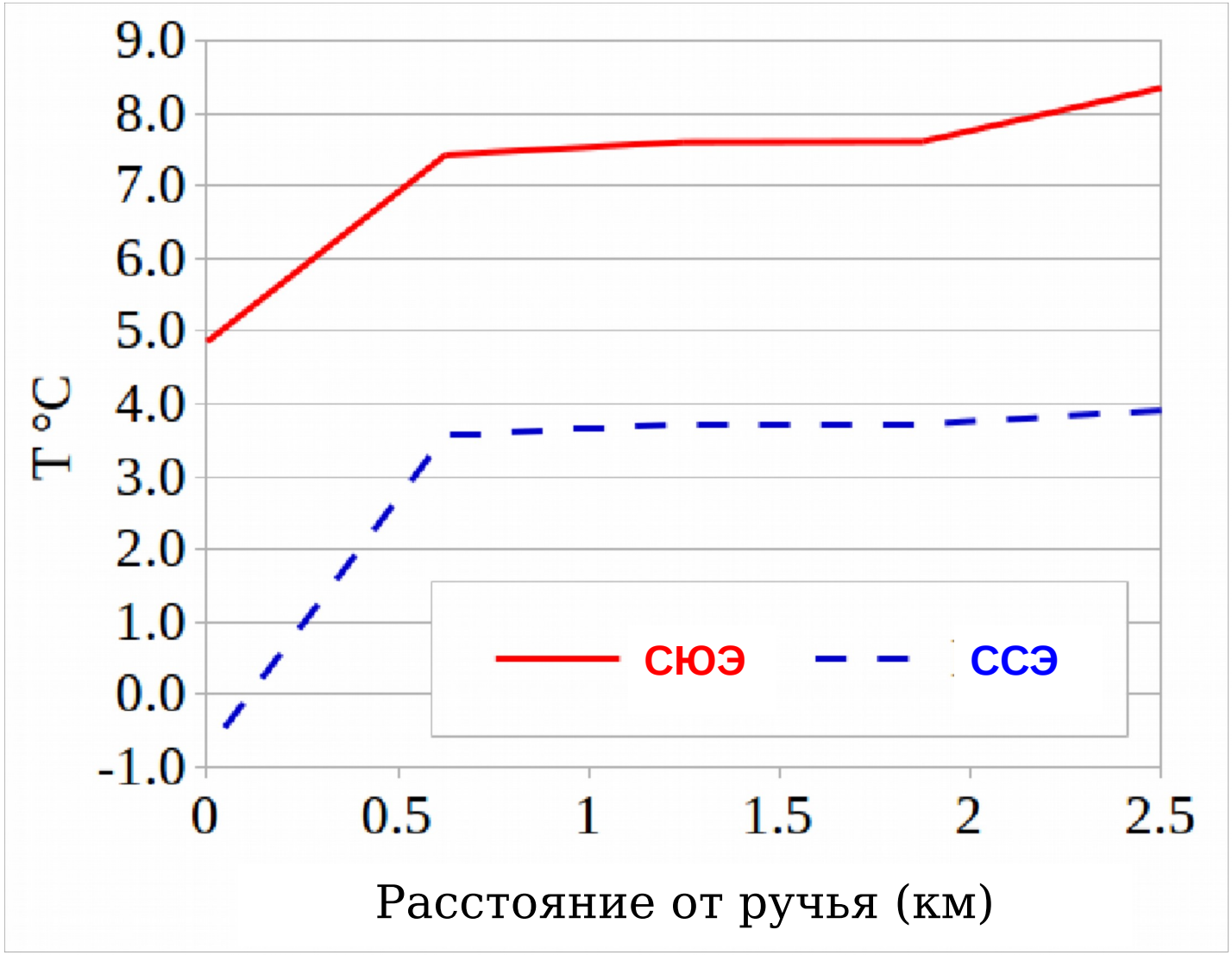
20 см глубина в минеральном горизонте

Как и ожидалось, склоны южной экспозиции более сухие и оттаивают быстрее, чем склоны северной экспозиции.





Вариабельность вдоль склонов



Вариабельность вдоль склонов обнаруживается:

более жаркие условия вверх склона по сравнению с нижней