

УДК 551.525.4

Обсерватория «Фоновая»: результаты измерения температуры почвы

Т.К. Складнева[✉], Б.Д. Белан, Г.А. Ивлев*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 06.02.2025;
после доработки 29.04.2025;
принята к печати 26.05.2025

В связи с постоянным ростом содержания парниковых газов в атмосфере в обсерватории «Фоновая» (Томская область) в приземном слое ведется многолетний непрерывный мониторинг атмосферных параметров. Для исследования биофизических процессов в деятельном слое почвы был запущен в эксплуатацию комплекс для измерения почвенной температуры. Проведен анализ данных четырехлетних наблюдений за температурным режимом почвы на измерительной площадке с естественным покровом в слое 0–320 см. Установлено, что с мая по октябрь до глубины 320 см наблюдаются положительные температуры. Максимальная глубина сезонного промерзания не превышала 60 см. Стандартное отклонение температуры почвы на всех глубинах зимой в два–четыре раза меньше стандартного отклонения температуры летом. Суточный ход температуры почвы с апреля по октябрь ярко выражен до глубины 10 см, ниже амплитуда суточного хода затухает. С ноября по март амплитуда суточного хода минимальная (0,02 °С). Полученные результаты могут быть использованы для исследования биофизических процессов в деятельном слое почвы и газообмена на границе почва – атмосфера.

Ключевые слова: температура почвы, поверхность с естественным покровом, приземная температура воздуха; профиль температуры, радиационный баланс; soil temperature, natural surface, surface air temperature, temperature profile, radiation balance.

Введение

В последние десятилетия отмечается неуклонный рост содержания парниковых газов, в атмосфере, что, в свою очередь, влияет на климат, проявляясь в числе прочего в увеличении температуры воздуха на глобальном, континентальном и региональном уровнях [1]. Одним из важнейших параметров для решения теоретических и прикладных задач, связанных с оценкой отклика земной поверхности на изменения климата, является температура почв. Она позволяет судить о чувствительности ландшафтов к антропогенному воздействию, изменению природной среды и климатическим флуктуациям.

Гидрометеорологической службой России за более чем столетний период наблюдений собран огромный массив данных о температуре почв на сети метеорологических станций страны. Измерения проводятся на стандартных глубинах 20, 40, 80, 120, 160, 240 и 320 см. Данные наблюдений в обобщенном виде опубликованы в «Справочнике по климату СССР» в 34 выпусках [2] и «Метеорологическом

ежемесячнике». Подробный анализ данных метеостанций о температуре воздуха и почв был проведен В.Н. Димо [3], составившей серии карт температуры почв в сезонном и годовом циклах в рамках почвенно-географического районирования территории СССР. Они отражали географические закономерности распределения температур почвы под травянистой растительностью на площадках метеостанций и рассматривались автором как карты температурных режимов почв сельскохозяйственного освоения.

Впервые для характеристики температурного режима почвы В.Н. Димо предложила использовать суммы активных температур (выше 10 °С) на глубине 20 см [3]; для вычисления таких значений мы используем среднесуточную температуру выше 10 °С. На современном этапе во Всероссийском научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации – Мировом центре данных создана база данных по температуре почвы на глубинах до 320 см в России (<http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=4>) и опубликован Атлас почв Российской Федерации (<https://soil-db.ru/soilatlas/razdel-5-pochvennyy-pokrov/parametry-temperaturnyh-rezhimov-pochv-estestvennyh-landshaf-tov>). Согласно приведенным в атласе сведениям:

* Татьяна Константиновна Складнева (tatyana@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru).

– одним из показателей, характеризующих температурный режим почв, является среднегодовая температура почвы. Она будет тем выше, чем больше в годичном цикле преобладает нагревание почвы, и тем ниже, чем большую роль играет охлаждение. В пределах территории России среднегодовая температура почвы на глубине 20 см изменяется от $-14,5$ до $+15,2$ °С;

– суммы температур выше 10 °С в почве на глубине 20 см являются основным показателем ее тепловых ресурсов. В сезоннопромерзающих почвах продолжительность периода с температурой выше 10 °С составляет три-четыре месяца;

– суммы температур ниже 0 °С в почве на глубине 20 см характеризуют накопление холода в почве в период промерзания и нахождения почвы в мерзлом состоянии и принимаются за критерий оценки степени суровости зимних почвенных условий;

– почвы России вне области распространения многолетнемерзлых пород характеризуются сезонным промерзанием. Глубина промерзания почвы зависит от многих факторов: температуры воздуха, снежного и растительного покрова, типа почвы и ее гранулометрического состава, влажности почвы, рельефа местности, хозяйственной деятельности человека.

В последние десятилетия наблюдается тенденция устойчивого потепления грунтов. В работе [4] в 1961–2005 гг. отмечено потепление на севере европейской территории России, в Сибири и на Дальнем Востоке на глубине 1,6 и 10 м, его скорость $0,008$ – $0,060$ °С/год. По данным [5] в Костроме повышение температуры грунта на глубине 1,6 м составило в среднем $0,019$ °С/год.

Авторы работы [6] показали, что с 1955 по 2013 г. в Москве (Метеорологическая обсерватория МГУ) происходило устойчивое потепление почвы и грунта со средней скоростью $0,02$ °С/год под естественным покровом (от $0,01$ °С/год на глубине 40 см до $0,03$ °С/год на глубине 240 и 320 см) и $0,04$ °С/год под оголенной поверхностью на всех горизонтах измерений; в то же время отмечается, что в последнее десятилетие это потепление замедлилось. Повышение температуры почвы и грунта под естественным покровом на станции Подмосковная, расположенной в 24 км от Москвы, в 1956–2013 гг. происходило приблизительно с той же скоростью, что и в метеорологической обсерватории МГУ ($0,02$ °С/год), кроме глубины 320 см, где оно шло медленнее. Это говорит о том, что потепление почвы и грунта является следствием не только локального увеличения размеров города, но и общего глобального потепления.

Исследованию температурного режима почв в разных регионах и климатических условиях посвящены статьи [7–10]. Полученные в них результаты позволили оценить временную изменчивость температуры почвы на разных глубинах, глубину промерзания почвы, установить различия почвенно-климатических характеристик, проследить внутригодовую динамику температуры почв в естественно и антропогенно нарушенных условиях.

В статье [11] проведена оценка пространственной неоднородности сезонной и многолетней изменчивости температурного режима почвы в условиях современного климата Сибири (1988–2017 г.) на глубинах 20, 40 и 80 см. Показано, что после установления устойчивого снежного покрова наблюдается существенное снижение, в сравнении с бесснежными осенним и весенним периодами, вариативности температур почвы. После формирования на территории Западной Сибири снежного покрова в 30–90 см (ноябрь–март) температура почвы ниже 80 см остается положительной. При этом в вышележащих слоях при устойчивом снежном покрове температура почвы находится в диапазоне от 5 до $-2,7$ °С, а суточные колебания имеют амплитуду от $1,5$ до $2,5$ °С. В Западной Сибири значения стандартного отклонения многолетних рядов летних температур почвы (июль–август) превышают стандартные отклонения рядов зимних температур в $2,2$ – $2,7$ раза. Разница температур воздуха и почвы зимой в 5 – 10 раз больше, чем летом.

Регулярные измерения температуры почвы на территории Томской области ведутся на сети метеорологических станций в стандартные сроки с помощью традиционных методов [12, 13].

Почва – это сложная многокомпонентная система. Ее способность проводить тепло зависит в первую очередь от состава и свойств слагающих почву компонентов, их химического, минералогического, гранулометрического составов, структурно-текстурных особенностей (дисперсности, пористости, слоистости, плотности твердой фазы), влажности, агрегатного состояния почвенной влаги и температуры [14]. Почва получает тепло с прямой и рассеянной радиацией. Баланс тепла зависит от интенсивности солнечной радиации, альбедо, температуры, теплоемкости и теплопроводности почв. Главная особенность теплового режима всех почв – движение тепловой волны от поверхности вглубь профиля.

В обсерватории «Фоновая» ($56^{\circ}25'07''$ с.ш.; $84^{\circ}04'27''$ в.д.) ведется многолетний непрерывный мониторинг атмосферных параметров в приземном слое атмосферы [15], перечень которых постоянно расширяется: в частности, начаты измерения потоков парниковых газов на границе почва – атмосфера. Для исследования биофизических процессов в деятельном слое почвы в июне 2020 г. был запущен в эксплуатацию комплекс измерения почвенной температуры.

С целью выявления закономерностей температурного режима почвы в районе обсерватории «Фоновая» с июня 2020 г. по май 2024 г. в настоящей работе анализируются результаты измерения температуры почвы на разных глубинах (0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 160, 200, 240, 280, 320 см).

Материалы и методы

Основной тип биогеоценоза на измерительной площадке – разнотравно-злаковый луг (во время половодья никогда не затопливается), почва –

аллювиальная серогумусовая (дерновая) глеевая (AYg-G-CG~ по классификации 2004 г. [16]). Гранулометрический состав почвы на глубине 0–10 и 10–30 см – легкий суглинок. Содержание в этих слоях физической глины – 26,4 и 28,0%; соотношение песок:ил:глина – 6,7:1,0:1,4 и 5,4:1,0:1,1.

В обсерватории «Фоновая» измерения температуры проводится с помощью созданного в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН комплекса измерения почвенной температуры (КИПТ), который состоит:

а) из зонда, содержащего цифровые датчики на различной глубине (0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 160, 200, 240, 280, 320 см);

б) независимого блока датчиков температуры почвы (БДТП), которые размещаются отдельно от зонда на глубинах 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30 и 40 см;

в) печатной платы, на которую передаются данные с зонда и БДТП.

Высокоточные цифровые термометры вертикально расположенного в почве зонда соединены с платой КИПТ по трехпроводной схеме и защищены термоусадочной трубкой. Показания температуры почвы (t_n) передаются на плату КИПТ. Производитель утверждает, что точность датчиков благодаря калибровке в диапазоне $-55 \div +50$ °С доведена до $\pm 0,1$ °С [17]. Показания температуры почвы с датчиков БДТП также передаются на печатную плату КИПТ. В отличие от зонда БДТП представляет собой восемь индивидуальных датчиков температуры почвы. К каждому подходит соединительный кабель с горизонтальным участком протяженностью не менее 100 см. Это позволяет избежать собственного температурного воздействия зонда на измере-

ние датчиками температуры почвы на соответствующей глубине. Измерительная площадка, на которой установлен КИПТ, расположена на открытом хорошо освещенном пространстве. Покров почвы является естественным, в вегетационный период на нем произрастает трава, которую регулярно скашивают. Травостой представлен преимущественно мятликом узколиственным (*Poa angustifolia* L.; $\approx 50\%$) и кострецом безостым (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub.; $\approx 30\%$), а также пыреем ползучим (*Agropyron répens*), канареечником тростниковидным (*Phalaris arundinacea* L.), мышиным горошком (*Vicia cracca*), одуванчиком лекарственным (*Taraxacum officinale*) и другим разнотравьем.

Измерение температуры почвы на всех глубинах осуществляется каждые пять минут. Результаты записываются в базу данных измерительного комплекса обсерватории «Фоновая» [15]. Разработчиком комплекса рекомендовано для анализа результатов измерений в верхнем 40-сантиметровом слое использовать данные БДТП, так как они не подвержены влиянию защитной термоусадочной трубки зонда, а ниже 40 см – данные зонда. С учетом рекомендаций в работе для анализа результатов измерения использованы данные БДТП до глубины 40 см и данные зонда на глубинах 50–320 см.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены временные профили среднесуточных значений t_n до глубины 320 см и температуры воздуха (t_v) на высоте 10 м. В обсерватории «Фоновая» t_v у поверхности земли не измеряется, а фиксируется на высотах 10, 20, 30 и 40 м.

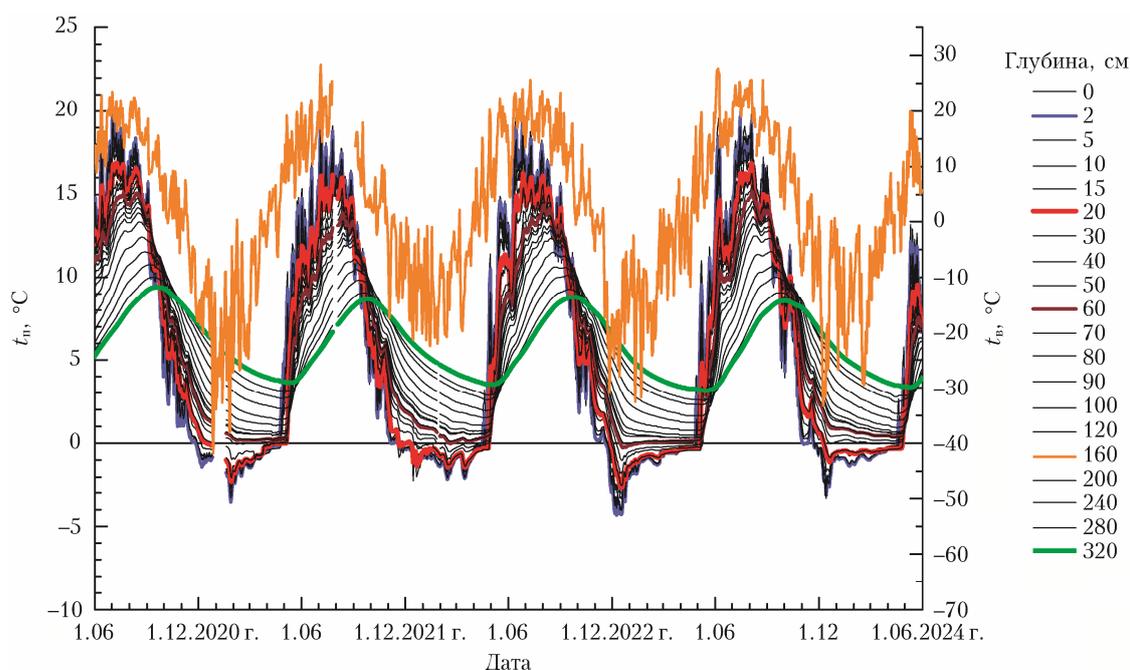


Рис. 1. Временной ход среднесуточной температуры почвы на разных глубинах и температуры воздуха в обсерватории «Фоновая» (см. цветные рисунки на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.38-2025/iss.7>)

Мы сравнили среднесуточные значения приземной температуры воздуха на высоте 2 м на метеорологической станции № 29532 с. Кожевниково [https://gr5.ru] с нашими данными на высоте 10 м. Метеорологическая станция с. Кожевниково расположена на расстоянии около 20 км от обсерватории «Фоновая». Сравнение показало разность температур < 1 °С (0,1 ± 0,8), что позволяет использовать значения температуры воздуха, измеряемые на высоте 10 м в обсерватории «Фоновая» для дальнейшего анализа.

Среднесуточная t_b изменялась от -41,7 до 28,3 °С; t_n до глубины 70 см — от -4,3 до 20,3 °С, при положительных температурах ниже 80 см — от 0,3 до 14,9 °С. Стандартное отклонение температуры воздуха зимой (ноябрь—март) в 1,6 раза выше, чем летом (июнь—август). Стандартное отклонение температуры почвы на всех глубинах зимой меньше, чем летом (0,35 ± 0,56 и 0,71 ± 2,22 °С). Данное различие обусловлено амплитудами, характерными для зимних и летних температур приземного воздуха и почвы. Ход температуры почвы до глубины 60 см повторяет колебания температуры воздуха. Начиная с глубины 100 см вариации t_n более сглажены по сравнению с верхними слоями почвы. За период измерений среднесуточная t_n на глубине 320 см составила 6,1 ± 1,9 °С (min t_{n320} = 3,2 °С, max t_{n320} = 9,4 °С). При этом среднегодовая t_{n320} за 2021, 2022, 2023 и 2024 гг. составила 5,88, 5,88, 5,52 и 5,92 °С соответственно, что свидетельствует об относительно стабильных температурных условиях почвообразующей породы. Полученные вариации среднегодовых температур значительно меньше приведенных в работе [7].

Анализ динамики изменения температуры поверхности почвы с мая по август показал, что существует значимая зависимость среднесуточной t_n от t_b . Зависимость аппроксимируется выражением $t_{n0} = 0,6789t_b + 2,67881$, $R = 0,92$.

Как отмечается в [18], если температура поверхности почвы меняется с определенным периодом, то колебания температуры в почве происходят с тем же периодом. Амплитуда колебаний с глуби-

ной уменьшается, а сроки наступления максимумов и минимумов температуры на глубине запаздывают относительно соответствующих сроков для температуры поверхности, что объясняется классической теорией теплопроводности Фурье [19].

Максимальный прогрев всего профиля почвы (0–320 см) зарегистрирован в 2020 г. Так, на глубине 20 см почва прогрелась до максимальных температур 17–18 °С в начале июля, которые сохранялись до третьей декады августа. Со сдвигом в две недели почва прогрелась до 13,4 °С на глубине 100 см, а на уровне 320 см — до максимума 9,4 °С лишь в первой декаде сентября. В последующие два года максимальные t_n были почти на 1,5° ниже, но сроки максимального прогрева практически не менялись. В целом за период измерений максимальный прогрев почвы сохранялся на глубине 20 см с первой декады июля по вторую декаду августа (t_{n20} = 15,4 ± 0,6 °С), на глубине 100 см — с третьей декады июля по первую декаду сентября (t_{n100} = 12,7 ± 0,6 °С), на глубине 200 см — с первой декады августа по третью декаду сентября (t_{n200} = 10,6 ± 0,5 °С) и на глубине 320 см — со второй декады сентября по первую декаду октября (t_{n320} = 8,8 ± 0,4 °С).

Нагревание и охлаждение почвы

Территория обсерватории «Фоновая» относится к району с большой продолжительностью периода с устойчивым снежным покровом (с ноября по март). Снежный покров — один из основных факторов промерзания и оттаивания почвы, которые, в свою очередь, сильно влияют на жизнедеятельность растений, водный режим самих почв и их физические свойства. До установления постоянного снежного покрова глубина промерзания определяется отрицательными температурами воздуха, типом почвы, ее влажностью к моменту наступления отрицательных температур и характером растительности, которая имеет различные терморегулирующие способности.

Процесс промерзания почвы достаточно медленный. Верхний 20-сантиметровый корнеобитаемый слой почвы постепенно промерзает в ноябре (табл. 1,

Таблица 1

Даты начала прогрева и остывания почвы

Глубина, см	$t_n > 0$ °С				$t_n < 0$ °С			
	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
2	24.04	17.04	28.04	18.04	27.11	18.11	20.11	22.11
5	25.04	18.04	28.04	19.04	30.11	20.11	23.11	24.11
10	26.04	24.04	29.04	26.04	30.11	20.11	24.11	24.11
15	03.05	26.04	03.05	26.04	06.12	20.11	27.11	07.12
20	05.05	28.04	06.05	27.04	17.12	20.11	30.11	10.12
30	29.04	29.04	07.05	28.04	(27.12.20–17.02.21)*	21.12	01.12	11.12
40	16.04	26.04	10.05	15.04	25.01.21	26.01.22	04.12	29.02.24
50	11.03	11.04	08.05		04.02.21	01.02.22	09.12	
60			16.01		–	–	16.12	–

* Остывание произошло в период, когда был сбой в работе системы фиксации температуры.

см. рис. 1). В почвенной климатологии принято считать, что температура почвы на этой глубине является средним показателем теплового состояния данного слоя [3]. В конце ноября – начале декабря температура почвы на глубине 20 см становится отрицательной и остается такой до начала мая (7.12.2020 г. – 5.05.2021 г., 20.11.2021 г. – 28.04.2022 г., 30.11.2022 г. – 6.05.2023 г., 10.12.2023 г. – 27.04.2024 г.). Прогрев почвы до большей температуры и высокие температуры воздуха летом 2020 г. способствовали сокращению периода промерзания почвы по сравнению с 2021 г. (табл. 1). Так, на глубине 20 см отрицательные температуры зарегистрированы в 2020 г. на три недели позже (с 17.12), чем в 2021 г., а на глубине 30 см 26.12.2020 г. температура была еще положительной.

В 2021 и 2022 гг. (1–4.02) почва промерзала до глубины 50 см. Ниже слоя 50 см температура оставалась положительной. На глубине 320 см минимальная температура 3,5 °С отмечена только в первой декаде мая; диапазон ее изменения составил 5 °С (3,5 °С – min; 9,4 °С – max). В конце ноября 2022 г. процесс промерзания почвы ниже 20 см протекал быстрее, чем в двух предыдущих зимах. Так, 28.11 почва промерзла до глубины 30 см, 9.12 – до 50 см, а 16.12 – до 60 см из-за небольшой высоты снежного покрова $S = 2 \div 11$ см и низких температур воздуха $-25 \div -30$ °С.

С появлением устойчивого снежного покрова, когда приземная t_v переходит в область отрицательных значений, t_n на глубинах 10–50 см стабилизируется в диапазоне от $-4,0$ до $+2,0$ °С с разницей температур соседних уровней измерения не больше 0,8 °С. В течение этого периода t_n меняется незначительно и не зависит от сезонных и межгодовых колебаний высоты снежного покрова. Данные измерений за четыре года показывают, что на температуру почвы не влияют резкие похолодания и оттепели. Так, в январе – феврале 2023 г. t_v колебалась от -32 до $+5$ °С, при этом на глубине

20 см – от $-1,4$ до $-0,6$ °С. Подобная незначительная изменчивость t_n в снежный период обусловлена в основном теплоизолирующими свойствами снежного покрова и значительной (с осени) влажностью почвы, которые являются факторами инерционности температурного хода.

Положительные температуры почвы на всех глубинах зарегистрированы с мая по октябрь за весь период наблюдений. До глубины 30 см она начинает постепенно прогреваться с середины апреля (18.04–6.05). Рост температуры на глубине 50 см начинается раньше (11.03.2021 г. и 11.04.2022 г.) за счет поступления тепла, накопившегося в более глубоких слоях, с постепенным прогревом на глубине 40 см (16.04.2021 г. и 26.04.2022 г.).

При характеристике теплового режима почв особый интерес представляет сумма активных температур на глубине максимального распространения корней (20 см). Весной при установлении устойчивых активных температур в слое 0–20 см растения начинают интенсивно развиваться. Активная температура на глубине 20 см устанавливалась с 26.05 по 24.09, средняя температура за этот период составила $t_n = 13,9 \pm 2,1$ °С. Чем продолжительнее период с активными температурами, тем выше теплообеспеченность почв. По суммам активных температур выделяют 10 градаций теплообеспеченности почв, в том числе «ниже средней» (1200–1600 °С) [20]. Теплообеспеченность почвы на территории обсерватории «Фоновая» была ниже средней (1529 °С).

В табл. 2 приведены среднемесячные температуры почвы на разных глубинах за период измерений. В верхнем 30-сантиметровом слое отрицательные температуры сохраняются с декабря по апрель. Наблюдается фазовый сдвиг времени достижения максимальных среднемесячных температур на разных глубинах относительно поверхности почвы: на глубине 20 см она наблюдается в июле, 60 см – в августе, а 320 см – только в сентябре.

Таблица 2

Среднемесячные температуры почвы на разных глубинах

Глубина, см	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	-1,0	-1,1	-0,6	0,9	9,4	14,4	16,9	15,3	9,8	4,4	0,4	-1,1
5	-1,2	-1,2	-0,8	0,3	8,4	14,0	16,5	15,1	10,0	4,7	0,5	-1,4
20	-0,8	-0,9	-0,7	-0,8	6,4	12,8	15,3	14,6	10,9	6,0	1,8	-0,7
30	-0,7	-0,8	-0,7	-0,3	5,7	12,2	14,8	14,4	11,0	6,3	2,0	-0,5
40	-0,1	-0,4	-0,2	-0,1	4,8	11,1	14,1	14,3	11,3	6,8	2,6	0,3
60	0,5	0,3	0,3	0,3	4,4	10,3	13,3	13,9	11,5	7,4	3,5	1,2
80	1,0	0,7	0,5	0,5	3,9	9,5	12,4	13,4	11,6	7,8	4,2	1,8
100	1,3	0,9	0,7	0,7	3,3	8,6	11,5	12,7	11,4	8,1	4,7	2,3
120	1,8	1,3	1,1	1,0	3,1	7,9	10,8	12,3	11,4	8,4	5,3	2,9
160	2,5	1,9	1,6	1,4	2,8	6,9	9,6	11,3	11,0	8,8	6,0	3,7
200	3,1	2,6	2,2	1,9	2,8	6,2	8,6	10,4	10,6	8,9	6,6	4,5
320	4,9	4,4	3,9	3,6	3,5	4,9	6,4	7,9	8,7	8,5	7,2	6,2

Среднемесячные и средние за сезон профили распределения температуры почвы с глубиной

В зависимости от среднегодовой температуры и длительности промерзания почвы выделяют четыре типа температурного режима почв [20]: мерзлотный, длительно сезоннопромерзающий, сезоннопромерзающий и непромерзающий. Длительно сезоннопромерзающий и сезоннопромерзающий типы свойственны большей части территории России. Сезоннопромерзающий характеризуется неглубоким промерзанием (на глубину не более 200 см). Длительность периода промерзания почв варьируется от нескольких дней до пяти месяцев. Среднегодовая температура почвы при этом положительная, минимальная среднемесячная температура почвы на глубине 20 см отрицательная. Для почв Томской области характерны длительно сезоннопромерзающий и сезоннопромерзающий типы температурного режима.

На рис. 2 построены вертикальные профили t_n для каждого месяца. В ноябре и марте на территории Томской области сохраняется устойчивый снежный покров и t_n близка к температурам в зимние месяцы. Вертикальные профили t_n в эти месяцы максимально близки к зимним. Профиль распределения t_n в мае аналогичен распределению в летние месяцы (рис. 2, а).

На основе анализа дифференцированного по сезонам года массива температурных данных выделены четыре типа вертикальных профилей температуры: зимний (ноябрь–март), весенний (апрель), летний (май–август) и осенний (сентябрь–октябрь) (рис. 2, б). Зимой в верхнем 20-сантиметровом слое среднесезонная t_n изменяется в диапазоне от $-0,75 \pm 0,63$ (0 см) до $-0,31 \pm 0,98$ °С (20 см), летом – от $14,34 \pm 3,41$ (0 см) до $12,48 \pm 4,16$ °С (20 см). В апреле на поверхности $t_n = 0,85 \pm 2,48$ °С, а на глубине 20 см сохраняется отрицательная температура – $-0,17 \pm 0,66$ °С. Осенний тип вертикального распределения t_n характеризуется положительными значениями по всей глубине измерения: $6,92 \pm 2,66$ (0 см), $8,32 \pm 1,83$ (20 см), $8,68 \pm 0,36$ °С (320 см). Особенность осеннего типа – незначительный рост температуры с глубиной. Глубина промерзания почвы не превышала 60 см.

На рис. 2, в приведены профили минимальных, максимальных и средних значений t_n за период измерений. Среднее значение среднегодовых температур почвы по всем глубинам составило $5,64 \pm 0,13$ °С. Из всего массива данных определены максимальные и минимальные t_n для каждого года измерений. Для них построены вертикальные профили средних значений и среднеквадратические отклонения, характеризующие диапазон изменения максимальных и минимальных значений t_n от года к году. Максимальные температуры на поверхности почвы не превышали 24 °С, а минимальные не опускались

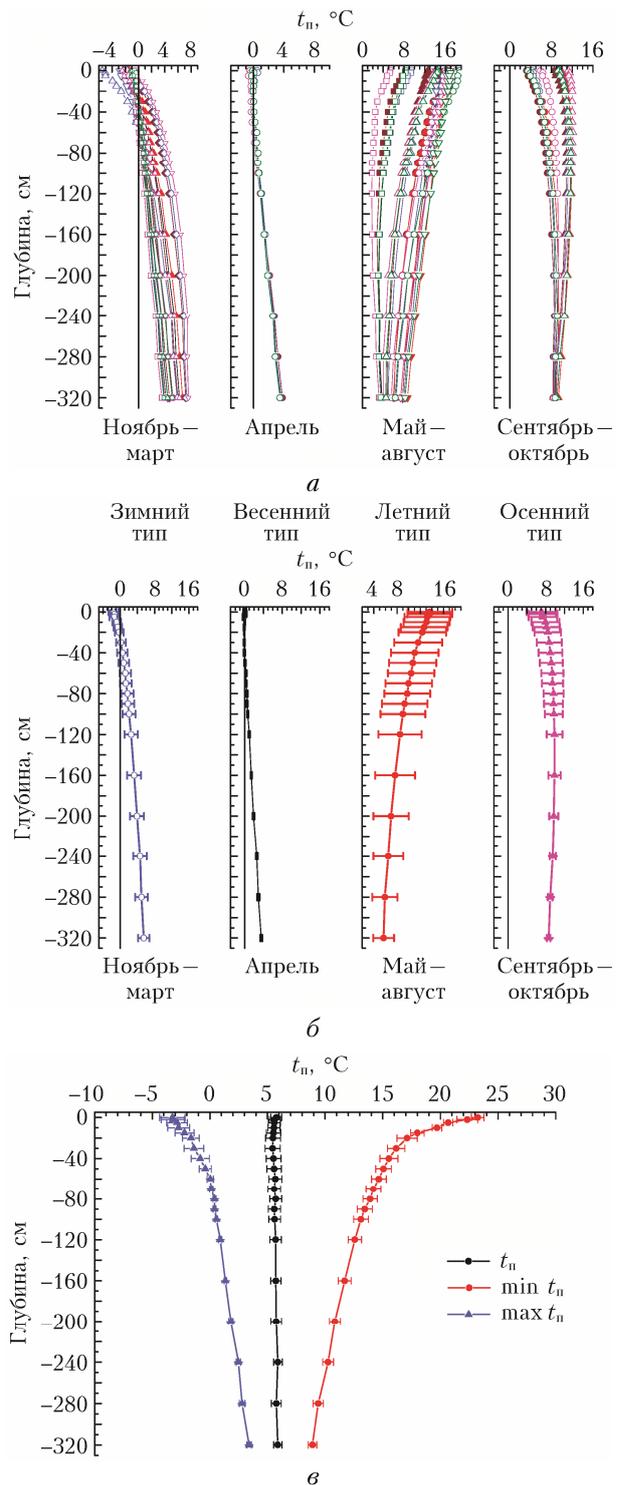


Рис. 2. Профили распределения температуры почвы с глубиной: 12 среднемесячных (а), средние по четырем типам (б); профили минимальных, максимальных, средних значений температуры за весь период измерений (в)

ниже $-4,5$ °С. На глубине 20 см максимальная температура составила $17,11 \pm 0,88$ °С, минимальная $-1,64 \pm 0,72$ °С; на глубине 320 см – $8,9 \pm 0,37$ и $3,4 \pm 0,19$ °С соответственно.

Суточный ход

Тепловой режим почвы – это совокупность процессов поступления, переноса, аккумуляции и отдачи тепла. Количественно он выражается через радиационный и тепловой балансы. В обсерватории «Фоновая» ведутся измерения радиационных характеристик атмосферы [21], позволяющие рассчитать радиационный баланс (B). Характеристики влажности почвы в районе исследований не измеряются, что не позволяет рассчитать тепловой баланс.

Для определенных нами выше четырех типов сезонных профилей температуры почвы (зимнего, весеннего, летнего, осеннего) получены среднесуточные кривые изменений температуры до глубины 30 см (рис. 3). Ниже 30 см суточные колебания затухают. Здесь температура остается довольно стабильной и изменяется лишь по мере смены сезонов года. На рис. 3 также приведен суточный ход B и t_b . Для всех выделенных сезонных типов, кроме зимнего, суточный ход t_n в поверхностном слое 10 см зависит в основном от B и t_b в приземном слое атмосферы. Для зимнего типа суточный ход t_n характеризуется минимальными значениями амплитуды ($\Delta t_{n0} = 0,02^\circ\text{C}$, $\Delta t_{n5} = 0,01^\circ\text{C}$, $\Delta t_{n20} = 0,03^\circ\text{C}$).

В апреле почва начинает постепенно прогреваться, разрушается снежный покров и значительно изменяется альbedo подстилающей поверхности. Полуденная высота Солнца над горизонтом достигает 48° . За счет увеличения продолжительности светового дня и изменения угла падения прямых солнечных лучей растет приход суммарной солнечной радиации. В течение суток наблюдается рост B , положительные его значения отмечаются с 08:00 до 19:00, максимальные – с 12:00 до 14:00. Суточная амплитуда B составила $311,15 \text{ Вт/м}^2$. Температура воздуха достигала максимального значения $6,5^\circ\text{C}$ с 15:00 до 17:00, ее суточная амплитуда составила $\Delta t_b = 7,83^\circ\text{C}$. Постепенный прогрев почвы начина-

ется с 08:00, максимальные значения t_n отмечены в 15:00, суточная амплитуда $\Delta t_{n0} = 1,62^\circ\text{C}$. Почва на глубине 5 см максимально прогревается к 18:00 ($t_{n5} = 0,77^\circ\text{C}$; $\Delta t_{n5} = 0,78^\circ\text{C}$), а на глубине 10 см – на два часа позже, сохраняя максимальные значения с 19:00 по 21:00. Ниже 10-сантиметрового слоя суточная амплитуда температуры почвы мала ($\Delta t_{n20} = 0,09^\circ\text{C}$).

С мая по август суточная амплитуда B возрастает ($415,2 \text{ Вт/м}^2$), растет и суточная амплитуда t_b ($10,67^\circ\text{C}$). Прогрев почвы в течение суток становится более интенсивным до глубины 10 см ($\Delta t_{n0} = 4,28^\circ\text{C}$, $\Delta t_{n5} = 2,61^\circ\text{C}$). На глубине 20 см суточный ход выражен слабо ($\Delta t_{n20} = 0,48^\circ\text{C}$). Ночью t_n выше t_b , так как почва дольше сохраняет тепло. С восходом солнца идет интенсивный рост t_b и к 16:00 она превышает температуру на поверхности почвы на 4°C .

В сентябре-октябре максимальные значения B ниже 185 Вт/м^2 , положительные значения наблюдаются с 09:00 до 17:00. Суточная амплитуда B почти в два раза меньше, чем летом ($\Delta B = 220,8 \text{ Вт/м}^2$). Температура воздуха в среднем не превышает 10°C ($\Delta t_b = 6,57^\circ\text{C}$). В течение суток t_b меньше t_n с 21:00 до 10:00. Суточный ход t_n ярко выражен до глубины 10 см ($\Delta t_{n0} = 1,75^\circ\text{C}$, $\Delta t_{n5} = 0,95^\circ\text{C}$).

Приведенные на рис. 3 графики отражают закономерности суточной изменчивости при средних условиях облачности. При реальных условиях облачности, существенно изменяющихся в течение дня, суточный ход часовых значений B может значительно отличаться от средних.

В табл. 3 приведены результаты оценок изменений t_n на всех измеряемых глубинах в зависимости от месячных сумм радиационного баланса. В апреле при месячной сумме $B = 157,5 \text{ МДж/м}^2$ основное увеличение температуры почвы за месяц

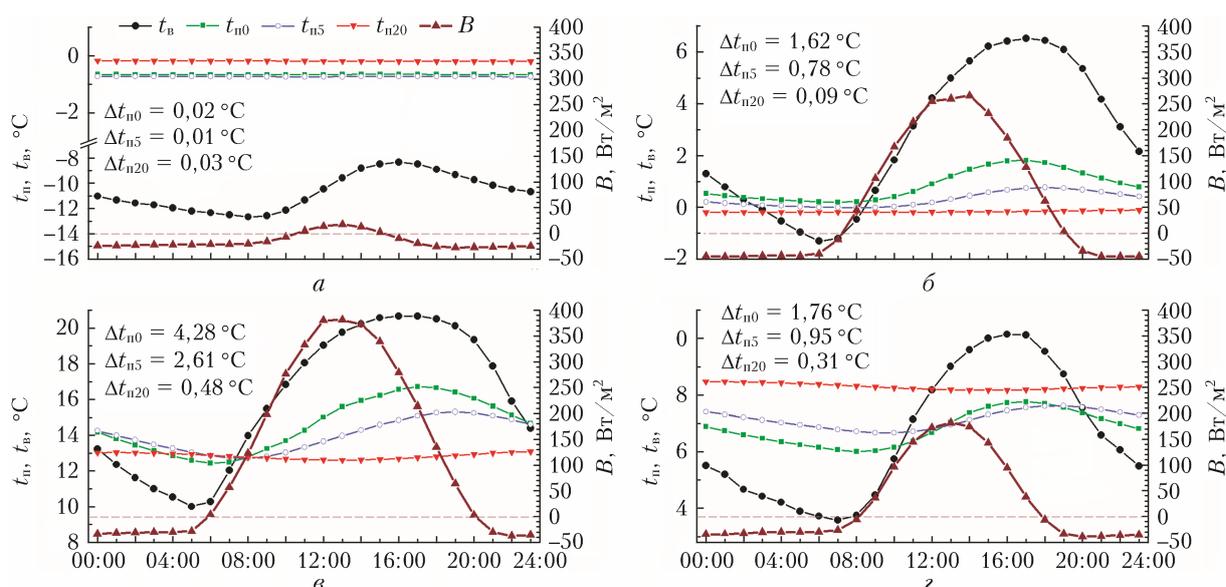


Рис. 3. Среднесуточный ход температуры почвы на глубине 0, 5 и 20 см; температуры воздуха на высоте 10 м; радиационного баланса для зимнего (а), весеннего (б), летнего (г) и осеннего (з) типов

Изменение температуры почвы, °С, за месяц и месячный радиационный баланс

Месяц	Глубина, см							В, Дж/м ²
	0	5	20	60	100	200	320	
Апрель	5,6±4,3	4,3±3,8	1,8±2,2	0,3±0,3	0,1±0,1	-0,1±0,1	-0,2±0,04	157,5±19,9
Май	7,4±3,8	7,5±2,9	7,7±2,3	6,8±1,2	5,2±1,0	2,3±0,7	0,4±0,3	303,9±23,9
Июнь	4,9±6,9	5,3±6,1	5,2±4,5	4,4±2,2	3,7±1,2	2,6±0,5	1,4±0,1	334,3±47,2
Июль	1,4±3,2	1,2±2,7	1,5±1,9	2,3±1,5	2,6±0,9	2,6±0,3	1,8±0,2	353,3±33,9
Август	-3,3±0,9	-2,9±0,6	-2,0±0,7	-0,9±0,7	-0,1±0,4	1,19±0,2	1,3±0,2	230,9±11,7
Сентябрь	-8,0±3,4	-7,6±2,4	-6,6±0,7	-4,5±0,6	-2,9±0,6	-0,8±0,4	0,4±0,2	118,3±9,3
Октябрь	-5,3±2,1	-5,0±1,5	-4,2±1,0	-3,4±0,4	-3,0±0,3	-2,1±0,4	-0,8±0,2	13,6±3,3

на ~5 °С отмечен в верхнем 5-сантиметровом слое. В мае, при росте приходной части B и месячном балансе 303,9 МДж/м² почва прогревается до глубины 20 см на 8 °С. В июне рост температуры в корнеобитаемом слое замедляется и месячный прирост не превышает 5,2 °С. В августе начинается процесс остывания почвы, при $B = 230,9$ МДж/м² поверхностный слой почвы за месяц остывает в среднем на 3 °С. Самое существенное остывание почвы происходит в сентябре – на 6–8 °С за месяц на разных уровнях до глубины 20 см.

Заключение

Результаты анализа изменений температуры почвы в обсерватории «Фоновая» показали, что положительные температуры до глубины 320 см наблюдаются с мая по октябрь. Теплообеспеченность почвы ниже средней (1529 °С). Стандартное отклонение температуры почвы на всех глубинах зимой меньше, чем летом (0,35±0,56 и 0,71±2,22 °С). Верхний 20-сантиметровый корнеобитаемый слой почвы постепенно промерзает в ноябре. Максимальная глубина сезонного промерзания не превышает 60 см. Активная температура на глубине 20 см фиксируется с конца мая до конца сентября (средняя температура за данный период составила 13,85±2,06 °С).

Анализ среднемесячных вертикальных профилей распределения температуры почвы с глубиной показал, что можно выделить четыре типа сезонных вертикальных профилей температуры: зимний (ноябрь–март), весенний (апрель), летний (май–август) и осенний (сентябрь–октябрь). Для каждого сезонного типа оценены среднесуточные вариации температуры почвы до глубины 30 см. Для зимнего типа суточный ход температуры почвы характеризуется минимальными амплитудами ($\Delta t_{п0} = 0,02$ °С, $\Delta t_{п5} = 0,01$ °С, $\Delta t_{п15} = 0,01$ °С). Для остальных типов он ярко выражен до глубины 10 см ($\Delta t_{п0} = 4,28$ °С, $\Delta t_{п5} = 2,61$ °С, $\Delta t_{п15} = 0,48$ °С). Для того чтобы установить, насколько эти результаты репрезентативны, необходимо продолжить измерения в данном районе.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. *Второй* оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет. 2014. Т. 1. 59 с.

2. *Справочник* по климату СССР. Ч. 2. Температура воздуха и почвы. М.: Гидрометеоздат, 1965. 396 с.
3. *Димо В.Н.* Тепловой и водный режим почв СССР. М.: Наука, 1968. 144 с.
4. *Павлов А.В.* Тренды современных изменений температуры почвы на севере России // Криосфера Земли. 2008. Т. XII, № 3. С. 22–27.
5. *Шерстюков А.Б.* Температура почвогрунтов России на глубинах до 320 см в условиях изменяющегося климата // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2007. Вып. 173. С. 72–88.
6. *Корнева И.А., Локощенко М.А.* Температура почвы и грунта в Москве и ее современные изменения // Метеор. и гидрология. 2015. № 1. С. 38–50.
7. *Воропай Н.Н., Киселев М.В., Черкашина А.А.* Температурный мониторинг почв на многолетнемерзлых породах в естественных и антропогенно нарушенных условиях // Лед и снег. 2019. № 4. С. 517–528.
8. *Воропай Н.Н., Атутова Ж.В., Шуклина Е.С.* Многолетняя динамика температуры почвы пирогенно трансформированных геосистем Тункинской котловины (Юго-Западное Прибайкалье) // География и природные ресурсы. 2022. № 2. С. 132–145.
9. *Худякова О.И., Решоткин О.В.* Динамика температуры мерзлотных почв в вегетационный период на фоне повышения среднегодовой температуры воздуха // Почвоведение. 2020. № 5. С. 576–589. DOI: 10.31857/S0032180X2005007X.
10. *Китаев Л.М., Аблеева В.А., Асаинова Ж.А., Желтухин А.С., Коробов Е.Д.* Сезонная динамика температуры воздуха, снеготолщин и промерзания почвы в центральной части Восточно-Европейской равнины // Лед и Снег. 2017. Т. 57, № 4. С. 518–526.
11. *Китаев Л.М., Туткова Т.Б.* Сезонная изменчивость температуры почвы в условиях региональной неоднородности метеорологического режима Сибири // Географические исследования. 2024. № 4. С. 148–159.
12. *Наставление* гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеоздат, 1985. Вып. 3, ч. 1. 230 с.
13. *Справочник* по гидрометеорологическим приборам и установкам. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 372 с.
14. *Морина О.М., Холоден Е.Э., Лобанов С.А., Дербенцева А.М.* Динамика температуры почв при антропогенных нагрузках. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2008. 115 с.
15. *Antonovich V.V., Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Balin Yu.S., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov V.S., Kokhanenko G.P., Novoselov M.M., Panchenko M.V., Penner I.E., Pestunov D.A., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Chernov D.G., Smargunov V.P., Yausheva E.P., Paris J.-D., Ancellet G., Law K.S., Pelon J., Machida T., Sasakawa M.* Station for the comprehensive monitoring of the atmosphere at Fonovaya Observatory, West Siberia: Current status and future needs // Proc. SPIE. 2018. V. 10833. DOI: 10.1117/12.2504388.

16. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
17. Базаров А.В., Бадмаев Н.Б., Кураков С.А., Гончиков Б.-М.Н., Цыбенов Ю.Б., Куликов А.И. Измерительный комплекс для автоматического долговременного контроля атмосферных и почвенных климатических параметров // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 4. С. 158–159.
18. Теории и методы физики почв / под ред. Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.
19. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. С. 246–250.
20. Димо В.Н. Тепловой режим почв СССР. М.: Колос, 1972. 360 с.
21. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Скляднева Т.К., Фофанов А.В. Радиационный блок измерительного комплекса обсерватории «Фоновая». Часть I. Методические аспекты и технические характеристики // Оптика атмосф. и океана. 2022. Т. 35, № 9. С. 759–765. DOI: 10.15372/AOO20220909; Belan B.D., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Sklyadneva T.K., Fofonov A.V. Solar radiation measurements at the Fonovaya Observatory: Part I: Methodical aspects and specifications // Atmos. Ocean. Opt. 2023. V. 36, N 1. P. 47–53.

T.K. Sklyadneva, B.D. Belan, G.A. Ivlev. Fonovaya observatory: soil temperature measurements.

The long-term monitoring of atmospheric parameters in the surface air layer is conducted at the Fonovaya observatory. To study biophysical processes in the active soil layer, a soil temperature measurement complex was put into operation. Four-year series of soil temperatures in the 0–320 cm layer at the measuring site with natural cover are analyzed. It has been established that positive temperatures are observed from May to October to depths of 320 cm. The maximal depth of seasonal freezing did not exceed 60 cm. The standard deviation of soil temperature at all depths in winter is 2–4 times smaller than the standard deviation in summer. The daily variation in soil temperature from April to October is clearly expressed to a depth of 10 cm, below which the amplitude of the daily variation fades. From November to March, the amplitude of the daily variation is minimal (0.02 °C). The results can be used to study biophysical processes in the active soil layer and gas exchange at the soil – air boundary.