

Температура почвы и грунта в Москве и ее современные изменения

И. А. Корнева*, М. А. Локощенко*

Приведены результаты непрерывных ежедневных измерений температуры грунта на глубине до 320 см в МГУ под естественным покровом и на специальном участке под оголенной поверхностью за период с 1955 по 2013 г. Выявлено статистически достоверное потепление грунта как в Москве, так и в сельской местности (на примере станции Подмосковная) на всех уровнях за последние шесть десятилетий, причем под оголенной поверхностью в МГУ оно происходило существенно быстрее (со средней скоростью $0,04^{\circ}\text{C}/\text{год}$), нежели под естественным покровом в обоих местах ($0,02^{\circ}\text{C}/\text{год}$). Получены статистически значимые связи среднегодовой температуры грунта с температурой воздуха и высотой снежного покрова (на участке под естественным покровом). В ходе проведенных экспериментов обнаружены значительные микроклиматические различия (до $1,3^{\circ}\text{C}$ на разных горизонтах) в температурном режиме грунта на расстоянии 50 м, связанные с разной освещенностью отдельных участков и возможным отопляющим влиянием в крупном городе подземных коммуникаций. Температура грунта в среднем за год под естественным покровом остается почти постоянной с глубиной (до уровня 320 см).

Ключевые слова: температура грунта, изменения климата, вытяжные почвенно-глубинные термометры, городской остров тепла.

1. Введение

Современное потепление климата, отмечающееся на большей части земного шара, исследуется в основном по данным о температуре воздуха T на высоте 2 м над подстилающей поверхностью. Как известно, наиболее интенсивное повышение температуры воздуха происходило в последние десятилетия, особенно в крупных городах ([16, 19] и др.). Для более полного исследования происходящих изменений климата необходим также анализ других климатических показателей, включая температуру поверхности почвы и грунта на разной глубине. Помимо научного значения данные о динамике температуры почвы и грунта важны и для решения многих прикладных задач (сельское хозяйство, строительство и т. д.).

В связи с прикладной значимостью изменчивость температуры почвы и грунта T_r в XX в. и в начале XXI в. в России исследуется в основном для территорий, покрытых вечной мерзлотой [3, 10, 11, 20]. Так, устойчивое потепление грунтов на глубине 1,6 и 10 м отмечено на севере Европейской России, в Сибири и на Дальнем Востоке со скоростью от $0,008$ до $0,060^{\circ}\text{C}/\text{год}$ за период 1961—2005 гг. [10]. Работ по изучению температурного режима почв и грунтов

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова; e-mail: loko@geogr.msu.ru.

в Центральной России крайне мало. Так, например, в [15] рассмотрены изменения температуры грунта только для одной станции Центрального региона — Костромы, где ее повышение на глубине 1,6 м составило в среднем $0,019^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Вероятно, аналогичное потепление (возможно, даже более быстрое) происходит и в Московском регионе. В связи с этим целью данной работы явились анализ многолетних изменений температуры на разной глубине почвы и грунта в Москве (по данным Метеорологической обсерватории МГУ — МО МГУ) и выявление их микроклиматических различий в сравнении условий естественного покрова и оголенной поверхности. Интересным аспектом в рамках общей задачи явилось также сравнение многолетней динамики температуры почвы и грунта в крупном городе (Москва) с ее фоновыми изменениями в сельской местности.

2. Измерения температуры почвы и грунта

Регулярные измерения температуры почвы и грунта T_t проводят в России с конца XIX в. [1, 2], самые первые результаты в справочных изданиях приведены за 1890-е годы [13]. Так, в Московском регионе на старейшей ныне действующей станции Обсерватория им. Михельсона (бывшая ТСХА) такие измерения были начаты в 1898 г., а на станции Никольское-Горушки — в 1894 г. с применением еще термометров в деревянной оправе [13].

В настоящее время на сети метеорологических станций используют традиционные методы измерений температуры почвы и грунта. Прежде всего в стандартные метеорологические сроки измеряют срочную и максимальную температуру поверхности с помощью ртутных термометров и минимальную — с помощью спиртового термометра. Кроме того, в верхнем пахотном слое в теплое время года проводят измерения температуры на глубине 5, 10, 15 и 20 см с помощью коленчатых ртутных термометров Савинова [9].

На более глубоких горизонтах (начиная с 20 см) используют вытяжные почвенно-глубинные термометры ТПВ-50. В отличие от савиновских эти термометры оснащены защитной трубкой для уменьшения теплопередачи по вертикали, а также медными или латунными опилками вокруг резервуара для увеличения их инерции [12]. В настоящее время материалом трубок служит как эбонит (рис. 1а), так и полиэтилен низкого давления (ПНД, рис. 1б). Погрешность измерения температуры с помощью термометров ТМ-10 в диапазоне от 0 до 40°C составляет $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, а в диапазоне отрицательных значений температуры от 0 до -20°C : $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ [12]. Другие приборы для измерения температуры почвы и грунта (например, термометры сопротивления) пока не нашли широкого и повсеместного применения.

В Метеорологической обсерватории МГУ с 1954 г. ведут непрерывные наблюдения за температурой поверхности почвы и грунта на двенадцати горизонтах (включая поверхность) от 0 до 320 см. Отсчеты по вытяжным термометрам производят в дневной срок раз в сутки, кроме горизонтов 20 и 40 см, на которых измерения осуществляют в стандартные метеорологические сроки (восемь раз в сутки на участке под естественным покровом и четыре раза — на участке с оголенной поверхностью). В теплое время года так бывает всегда, однако при значительной высоте снежного покрова (более 15 см при его увеличении в начале зимы и более 5 см при сходе весной) наблюдения по всем восьми вытяжным термометрам производят только раз в сутки. Заметим, что до 1966 г. наблюде-

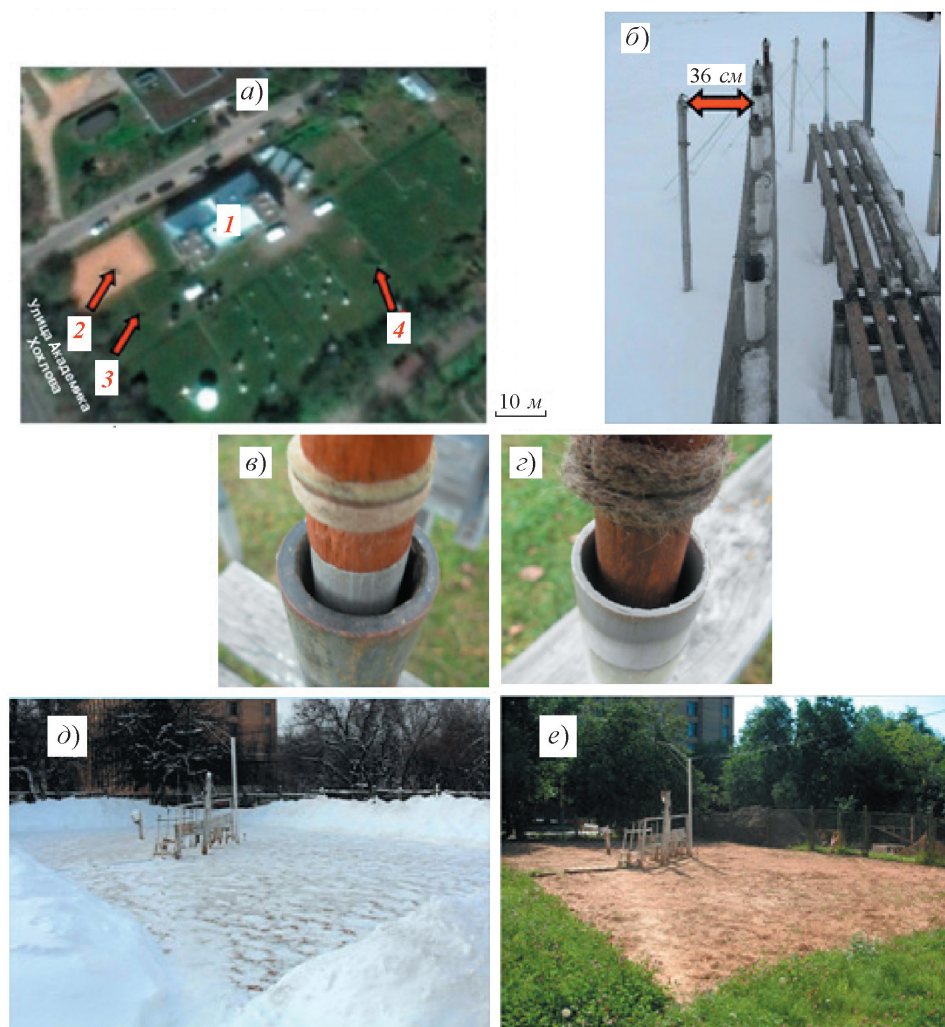


Рис. 1. Измерения температуры почвы и грунта в МГУ.

а) спутниковый снимок территории Метеорологической обсерватории МГУ (1 — здание обсерватории; 2 — участок с оголенной поверхностью; 3 — участок под естественной поверхностью с 1955 по 1964 г.; 4 — участок под естественной поверхностью с 1965 г. по настоящее время); б) синхронные измерения на глубине 160 см под естественным покровом; в, з) термометры ТПВ-50 в футлярах из эбонита (в) и ПНД (з); д, е) участок с оголенной поверхностью зимой (д) и летом (е).

ния за температурой почвы и грунта проводили на станциях четыре раза в сутки на трех горизонтах — не только на глубине 20 и 40 см, но и на горизонте 60 см.

Измерения температуры почвы и грунта в слое 20—320 см осуществляют в МГУ одновременно на двух участках: на стандартном участке под естественным покровом (рис. 1б) и на дополнительном участке с оголенной поверхностью (рис. 1д, е). Участок с оголенной поверхностью размером 12 × 20 м не предусмотрен Наставлениями ни Госкомгидромета СССР [9] в прошлом, ни Росгидромета ныне и является долгосрочным научным экспериментом, начатым еще в 1954 г., со времени основания Метеорологической обсерватории МГУ. Температурный режим здесь воспроизводит условия городских поверх-

ностей, очищаемых зимой от снега: тротуаров, дорожных покрытий и т. п. Ныне участки с оголенной поверхностью, насколько известно авторам, используют в измерениях лишь на двух метеостанциях России: в МГУ и на станции Иркутск ОГМС. Сведения о нескольких подобных участках, организованных в XIX в., содержатся в работе [2]. Данные о T_r в МГУ на всех глубинах (до 320 см) в среднем за период 1955—1965 гг. приведены в [4], за период 1977—2000 гг. — в [14], только в пахотном слое до 20 см за период 1966—1980 гг. — в [5]. Предварительные результаты нашего анализа данных о температуре почвы и грунта за весь период 1955—2012 гг. опубликованы в работах [6, 7, 17, 18].

3. Исследование микроклиматических различий температур почвы и грунта в МГУ

Как сказано выше, регулярные измерения температуры почвы и грунта в Метеорологической обсерватории МГУ были начаты в 1954 г. одновременно на двух участках: под естественной и под оголенной поверхностью. Вплоть до настоящего времени участок под оголенной поверхностью находится на том же месте. Участок под естественным покровом в 1964 г. был перенесен на 50 м к северо-востоку, однако старая площадка сохранилась (рис. 1а). В период с февраля 2012 г. по октябрь 2013 г. авторами был проведен эксперимент по синхронным одновременным измерениям температуры почвы и грунта на обеих площадках — старой и новой. Задачей эксперимента явилось определение поправочных коэффициентов к результатам измерений на старой площадке в 1954—1964 гг. для получения однородного ряда данных за весь период. Измерения проводили на трех горизонтах (20, 160 и 320 см), всего в течение 20 месяцев было получено 75 серий одновременных отсчетов. Для исключения возможных неточностей в инструментальных поправках термометров ТМ-10 измерения проводили одними и теми же термометрами с их одновременной перестановкой с одной площадки на другую и обратно. В результате в каждой из серий на всех трех горизонтах были получены три пары перекрестных отсчетов — попеременно на каждой из площадок.

Сначала отсчеты производили и на старой, и на новой площадке, после чего термометры меняли местами (переносили с одной площадки на другую) и приблизительно через час (летом — через 40 мин, зимой — через 90 мин) T_r измеряли в обоих местах повторно. Столь долгая выдержка обеспечивала установление показаний термометров в новых местах с учетом их большой инерции. В то же время T_r на большой глубине меняется медленно, и в среднем даже за полтора часа возможные изменения значений находятся в пределах точности их измерений. Затем термометры возвращали обратно на свои исходные места и спустя еще час синхронные отсчеты брали для контроля в третий раз.

Оказалось, что значения T_r на старой и новой площадках значительно различаются, причем на глубине 20 см их разность на обеих площадках даже меняет знак в зависимости от сезона. В холодный сезон T_r на старой площадке практически всегда была больше, чем на новой, в среднем на 0,3°C. В теплое время года, напротив, значения T_r на этой глубине на старой площадке были меньше, чем на новой, в среднем на 1,0°C (от 0,7 до 1,3°C). Горизонт 20 см расположен достаточно близко к поверхности почвы, поэтому данные различия могут объясняться микроклиматическими особенностями: более открытой местностью на новой площадке и большей ее освещенностью летом в дневные часы. От-

метим, что несколько серий измерений летом при пасмурной погоде показали очень близкие значения T_r на глубине 20 см в обоих местах, а в отдельные дождливые дни их разность даже меняла знак: на старой площадке значения оказывались больше, чем на новой.

На глубине 160 см в холодный период года температура грунта на старой площадке была устойчиво выше, чем на новой, — в среднем на $0,6^\circ\text{C}$. В теплое время года значения в обоих местах практически совпали: T_r на новой площадке оказалась в среднем выше всего на $0,1^\circ\text{C}$, что находится в пределах точности измерений (рис. 2а). На самом глубоком горизонте измерений (320 см) в течение всего года старая площадка оказалась теплее, чем новая. Разность температуры в холодный период составила в среднем $1,2^\circ\text{C}$ (рис. 2б), а в теплый сезон — $0,3^\circ\text{C}$.

В холодный период года разность значений T_r на обеих площадках может быть связана с отопляющим влиянием подземных коммуникаций. Действительно, приблизительно в 20 м от старой площадки, вдоль ул. Академика Хохлова, на глубине 2 м проходит теплотрасса. В пользу предположения о ее влиянии в качестве внешнего источника тепла (хотя теплотрасса защищена железобетонным коробом) говорит как превышение зимой значений на этой площадке, так и выявленное увеличение разности T_r с глубиной.

Для проверки влияния теплотрассы были проведены дополнительные синхронные измерения температуры почвы на глубине 20 см в четырех точках вдоль линии, соединяющей новую площадку с ул. Академика Хохлова (местом прохождения теплотрассы). Однако результаты этих измерений не показали значимых различий в значениях температуры по мере приближения к теплотрассе. Кроме того, каждый раз при включении осенью и выключении весной отопления авторы проводили учащенные серии измерений, но однозначных связей обнаружено не было. Так, хотя отопление весной 2013 г. выключили только 30 апреля, значения T_r на новой площадке 19, 23 и 26 апреля на глубине 20 см были уже больше, чем на старой площадке, а на глубине 160 см — совпали на обеих площадках. С другой стороны, осенью того же года отопление в МГУ было включено 2 октября, но уже 26 сентября T_r на глубине 20 и 160 см на старой площадке превышала соответствующие значения на новой. Таким образом, предположение о преобладающем влиянии теплотрассы не находит одно-

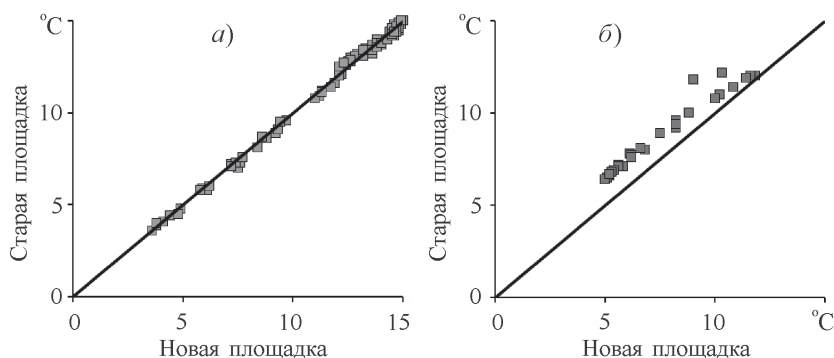


Рис. 2. Сравнение значений температуры грунта в МГУ в 2012—2013 гг. на старой и новой площадках измерений под естественным покровом: а) на глубине 160 см за теплый период; б) на глубине 320 см за холодный период.

значного подтверждения. Возможно, различия в температурном режиме обеих площадок связаны также с локальными особенностями почвенного профиля, например, с разными условиями увлажнения почвы, различиями в ее гранулометрическом составе и т. п.

По результатам проведенного эксперимента была определена поправка к среднегодовым значениям T_r на старой площадке за период с 1955 по 1964 г. Теплотрасса была заложена еще при строительстве новых зданий МГУ на Ленинских горах, условия измерений температуры почвы и грунта здесь не изменялись, так что результаты измерений на старой площадке можно соотнести с полученными на ней данными до 1965 г. Поправка была определена отдельно для каждого месяца, а затем получено среднегодовое значение. Оно было интерполировано по всему почвенному профилю на горизонты, не задействованные в эксперименте. Таким образом, ряд T_r на всех глубинах за период с 1955 по 2013 г. теперь, с введением поправки, можно считать статистически однородным.

Еще одной задачей работы явилось методическое исследование возможного влияния материала защитного футляра вытяжных почвенно-глубинных термометров ТПВ-50 на проводимые измерения. В последние годы на сети Росгидромета внедряют новые футляры из полиэтилена низкого давления (ПНД) взамен традиционных эбонитовых. Ранее, на протяжении всей истории измерений, начиная с конца XIX в., общепринятым материалом защитных внешних трубок служил эбонит вследствие его малой теплопроводности, а на некоторых станциях на заре наблюдений использовали также деревянные трубки [13]. Заметим, что коэффициент теплопроводности обычного эбонита составляет 0,16, древесины — 0,15, а полиэтилена — 0,36—0,43 Вт/(м · К). Таким образом, традиционные материалы близки по своим свойствам теплопередачи, тогда как у новых футляров теплопередача больше. Кроме того, толщина стенок старых трубок из эбонита составляет 5—6 мм, а новых из ПНД — лишь 3 мм. К тому же новые футляры, производимые ОАО “Эколог”, более широкие, и зазор между штангой и внутренней поверхностью футляра в них больше (рис. 1в, г).

Для проверки возможной погрешности, связанной с изменением материала защитных трубок и их размера, в Метеорологической обсерватории МГУ зимой 2012/13 г. были проведены специальные сравнительные измерения T_r в футлярах старого и нового образца на горизонте 160 см — достаточно глубоко для надежных измерений, поскольку ход температуры здесь сглаженный и суточная изменчивость отсутствует. С этой целью рядом со стандартной скважиной на глубине 160 см, оснащенной с 2011 г. новым полиэтиленовым футляром, была пробурена новая до той же глубины, и в ней установлен эбонитовый футляр старого образца. Расстояние между скважинами составило 36 см (рис. 1б).

Было проведено 50 синхронных отсчетов термометрами в обеих трубках и восемь дополнительных отсчетов с попеременной перестановкой термометра из одной скважины в другую (как и в эксперименте по сравнению T_r на старой и новой площадках). Заметим, что подобные сравнения предпочтительно проводить в сезоны, когда вертикальный температурный градиент в почве особенно велик и различия в показаниях, связанные с разным коэффициентом теплопередачи, могут быть значительными. С этой точки зрения время эксперимента оказалось удачным, поскольку зима 2012/13 г. выдалась холодной: среднемесячная температура воздуха в декабре 2012 г. и в январе 2013 г. составила соот-

ветственно $-8,6$ и $-8,3^{\circ}\text{C}$, а в отдельные дни температура понижалась до -23°C . Тем не менее получена исключительно тесная связь между данными измерений в футлярах разного материала. Линейный коэффициент корреляции составил $0,997$ по основной выборке данных (ее размер $n = 50$) и $0,998$ по дополнительной выборке ($n = 8$), причем коэффициент в уравнении линейной регрессии в последнем случае составил 1 , что означает отсутствие систематического смещения оценок. Таким образом, проведенные сравнения показали полную идентичность термических условий на горизонте 160 см в обоих футлярах, несмотря на их разный материал и размеры. Это подтверждает однородность имеющегося ряда данных о $T_{\text{г}}$ в МГУ после замены футляров в 2011 г.

4. Распределение температуры почвы и грунта с глубиной

За период 1955—2013 гг. по данным Метеорологической обсерватории МГУ было также исследовано распределение температуры почвы и грунта с глубиной. На рис. 3а приведены средние многолетние глубинные профили $T_{\text{г}}$ для участков под естественным покровом и оголенной поверхностью, причем для участка под естественным покровом — отдельно для периода измерений на старой (1955—1964 гг.) и на новой площадках (1965—2013 гг.). Как видно, температура под естественным покровом почти не менялась с глубиной как до, так и после переноса площадки в МГУ, и на станции Подмосковная в те же годы, а небольшие различия на отдельных горизонтах в МГУ до 1965 г., вероятно, объясняются неточными инструментальными поправками к термометрам ТМ-10. Заметим также, что среднегодовая $T_{\text{г}}$ на всех горизонтах в МГУ за период 1965—2013 гг. ($7,7$ — $7,8^{\circ}\text{C}$) заметно превышала значения за первые 10 лет измерений 1955—1964 гг. ($7,1$ — $7,4^{\circ}\text{C}$), что было связано не с переносом площадки (старая, напротив, в целом “теплее”), а с повышением температуры почвы и грунта при современном потеплении климата.

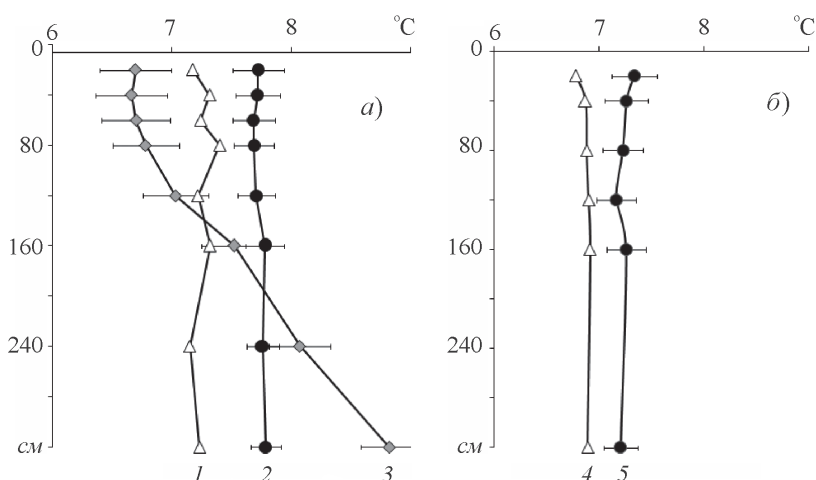


Рис. 3. Среднемноголетние профили температуры грунта: а) по данным МО МГУ для участка с естественным покровом за периоды 1955—1964 гг. (1) и 1965—2013 гг. (2) и для участка под оголенной поверхностью за период 1955—2013 гг. (3); б) по данным станции Подмосковная за периоды 1956—1964 гг. (4) и 1965—2013 гг. (5).

Доверительные интервалы указаны с доверительной вероятностью $0,95$.

В отличие от участка под естественным покровом, под оголенной поверхностью в среднем за все 59 лет измерений распределение температуры с глубиной качественно иное. Если в приповерхностном слое до глубины 60 см средние значения, как и под естественным покровом, близки, то ниже отмечается устойчивое и статистически значимое (с учетом доверительных интервалов) повышение T_r с глубиной (рис. 3а).

Под оголенной поверхностью, очищаемой от снега, в холодное время года происходит интенсивное выхолаживание почвы и грунта, которое не уравнивается в полной мере дополнительным прогревом этой поверхности летом, что, видимо, приводит к повышению T_r с глубиной в среднем за год. Заметим, что температура почвы и грунта повышалась здесь с глубиной даже в годы с аномально жарким летом (в 1972 и 2010 гг.). Очевидно, что в среднем за год по сравнению с условиями естественного покрова значения T_r в верхнем приповерхностном слое здесь меньше вследствие сильного охлаждения зимой. Увеличение значений T_r на больших глубинах может быть связано с боковым притоком тепла от окружающей местности, защищенной снежным покровом. Логично предположить, что на большой глубине термическое влияние оголенной поверхности ослабевает, и профиль T_r должен постепенно приближаться к условиям естественного покрова. Однако, как видим, асимптотического приближения профилей на обоих участках друг к другу не происходит: они пересекаются, и ниже горизонта 160 см значения T_r под оголенной поверхностью оказываются уже существенно больше. В работе [20] высказано предположение о влиянии на качественный вид профиля температуры почвы и грунта глубины сезонного промерзания — так, в год с очень глубоким промерзанием среднегодовая T_r по их данным также повышалась с глубиной, а в год с очень малой глубиной промерзания она оставалась на всех уровнях почти неизменной. Действительно, на участке под оголенной поверхностью в МГУ промерзание грунта всегда больше и существует дольше, нежели под естественным покровом [14]. Заметим в связи с этим, что средняя за год температура почвы и грунта под оголенной поверхностью в 1956 г., отмеченном рекордно большой глубиной промерзания (195 см), повышалась с глубиной в слое от 80 до 240 см быстро, со средней скоростью $0,98^\circ\text{C}/\text{м}$, тогда как, например, в 1989 г., когда промерзание было небольшим (с наибольшей глубиной лишь 84 см), T_r увеличивалась в этом слое крайне медленно: $\partial T_r / \partial z = 0,38^\circ\text{C}/\text{м}$. Таким образом, наличие устойчивого, длительного и глубокого промерзания в холодное время года на участке под оголенной поверхностью служит одним из возможных объяснений повышения T_r с глубиной. Однако глубина промерзания никогда не достигала в МГУ 2 м, тогда как устойчивое повышение T_r на рис. 3а прослеживается и глубже (до 3,2 м).

Как было отмечено выше, приблизительно в 20 м от речного помоста на этом участке на глубине 2 м пролегает теплотрасса, влияние которой на измерения T_r нельзя полностью исключить. Однако теплотрасса находится в теплоизоляционном коробе. К тому же, если бы ее обогревающее влияние было существенным, то увеличение с глубиной температуры почвы и грунта отмечалось бы и на старой площадке под естественным покровом, находящейся на том же расстоянии от теплотрассы (рис. 1а), поскольку последняя была заложена уже в 1953 г. Тем не менее T_r под естественным покровом даже в те годы была почти одинаковой на всех глубинах. Это не подтверждает заметного влияния

теплотрассы как искусственного источника тепла на большой глубине. Еще одной причиной повышения T_r с глубиной под оголенной поверхностью может служить возможная неоднородность почвенного профиля на этом участке.

Заметим, что самые ранние измерения T_r в Российской империи в XIX в. на разных участках — как под естественным покровом, так и под оголенной поверхностью — были обобщены в работе [2]. Как было показано П. И. Ваннари, на станциях на севере и в центре России под естественным покровом среднегодовая температура почвы и грунта почти не изменялась вдоль профиля; под оголенной поверхностью (в то время таких участков было несколько) наблюдалось значительное повышение T_r с глубиной. Таким образом, наши данные подтверждают сделанный П. И. Ваннари вывод.

Распределение температуры почвы и грунта с глубиной было также проанализировано по данным станции Подмосковная, расположенной в 24 км к западу от Москвы (рис. 3б). Так же, как и в МГУ, среднегодовые значения температуры почвы и грунта на всех горизонтах за период 1956—1964 гг. там ниже (6,8—6,9°C), чем в среднем за последующие полвека (7,2—7,3°C), что подтверждает тренд повышения температуры почвы и грунта. Отметим, что температура почвы и грунта на всех горизонтах измерений в МГУ за оба периода оказалась выше, чем на станции Подмосковная, что может быть следствием влияния городского острова тепла. Как показано авторами в работе [18], в Московском регионе это влияние проявляется не только в приземном слое воздуха, но и в верхнем слое почвы и грунта.

5. Динамика температуры почвы и грунта в Московском регионе за последние десятилетия

Рассмотрим многолетние изменения температуры почвы и грунта на разной глубине за последние 59 лет в Москве по данным измерений в МГУ в условиях различной поверхности. На рис. 4 приведены среднегодовые значения температуры грунта за период с 1955 по 2013 г. на самом глубоком уровне измере-

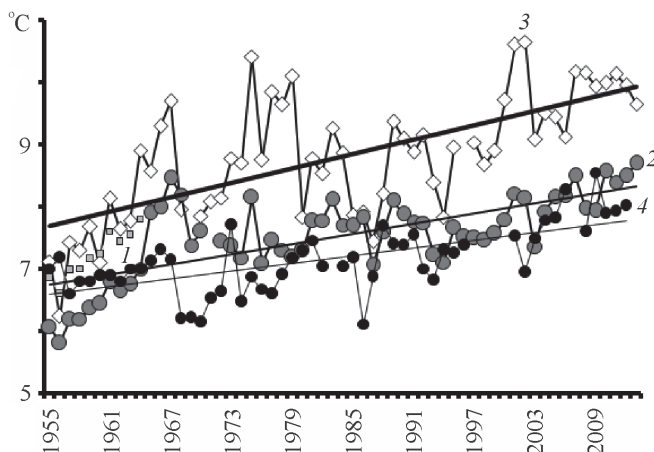


Рис. 4. Изменения температуры грунта на глубине 320 см для участка с естественным покровом в МГУ (1 — без поправки за период 1955—1964 гг., 2 — за период 1955—2013 гг. с учетом поправки до 1965 г.), уравнение регрессии: $y = 0,03x + 6,73$; для участка с оголенной поверхностью в МГУ за период 1955—2013 гг. (3), уравнение регрессии: $y = 0,04x + 7,65$; на станции Подмосковная за период 1956—2013 гг. (4) под естественным покровом, уравнение регрессии: $y = 0,02x + 6,57$.

ний (320 см). Для горизонта 160 см аналогичные среднегодовые значения T_r за период 1955—2012 гг. приведены авторами в [6], а за весь период измерений в Москве 1898—2011 гг. (включая данные ТСХА) — в работах [17, 18].

Для первых 10 лет измерений на рис. 4 отдельно показаны как исходные данные (серые квадраты), так и значения с введенной поправкой по результатам экспериментов (серые кружки). Как видно, наблюдается устойчивое повышение T_r , особенно под оголенной поверхностью: в среднем на $0,04^\circ\text{C}/\text{год}$. Примечательно, что повышение температуры воздуха T за этот же период составило в МГУ также $0,04^\circ\text{C}/\text{год}$. Отметим, что в последнее десятилетие увеличения T_r под оголенной поверхностью, как и температуры воздуха, не наблюдается, о чем свидетельствуют степенные тренды (начиная с 4-й степени). Под естественным покровом температура грунта в МГУ также повышается со временем, но медленнее, нежели под оголенной поверхностью: в среднем лишь на $0,03^\circ\text{C}/\text{год}$ — по-видимому, вследствие теплоизолирующей роли естественного покрова. Очевидно, что снежный покров зимой, а также травостой и слой дернины в остальное время года замедляют тепловой обмен между почвой и атмосферой, поэтому температурный режим почвы и грунта под естественной поверхностью определяется не только изменениями температуры воздуха, но и высотой снежного покрова H . Как показано авторами в [6], при дополнительном учете этой высоты при расчете множественного коэффициента корреляции температуры почвы и грунта под естественным покровом с температурой воздуха и со средней высотой снежного покрова H за все дни его существования его значение R^* превышает значение обычного линейного коэффициента корреляции T_r и T . Так, за период 1955—2013 гг. значение R^* составило для глубины 160 см 0,83, а для глубины 320 см — 0,66 (линейный коэффициент корреляции R температуры грунта и воздуха — соответственно лишь 0,74 и 0,59). При использовании для расчета R^* не среднего, а накопленного значения высоты снежного покрова за весь холодный сезон (предложенного в [8]) также получены значения R^* , превышающие R (0,79 и 0,63 соответственно для горизонтов 160 и 320 см). Неудивительно, что статистические связи T_r с метеорологическими величинами у поверхности почвы ослабевают с увеличением глубины.

Заметим, что повышение температуры почвы и грунта под оголенной поверхностью происходит и на всех прочих глубинах приблизительно с той же скоростью: $0,04^\circ\text{C}/\text{год}$ (см. таблицу). Приведенное здесь же значение для температуры поверхности на условной глубине 0 см не полностью сравнимо с остальными, поскольку зимой термометры ТМ-3 устанавливаются на поверхности снега. Под естественным покровом, кроме только самого верхнего горизонта, коэффициент линейного тренда постепенно увеличивается с глубиной: от $0,01^\circ\text{C}/\text{год}$ на горизонте 40 см до $0,03^\circ\text{C}/\text{год}$ на глубине 320 см.

Значимость коэффициентов линейных трендов температуры почвы и грунта за период 1955—2013 гг. авторы оценивали в соответствии с классическим критерием Стьюдента достоверности различий между выборочными математическими ожиданиями X и Y :

$$Z = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{\sigma^2(X)}{n} + \frac{\sigma^2(Y)}{m}}}, \quad (1)$$

где $\sigma^2(X)$ и $\sigma^2(Y)$ — их выборочные дисперсии, n и m — размеры выборок (в нашем случае $n = m = 20$ на краях ряда длиной 20 лет в начале и в конце рас-

Коэффициенты линейных трендов изменения температуры почвы и грунта ($^{\circ}\text{C}/\text{год}$) в МГУ за 1955—2013 гг. и на станции Подмосковная за 1956—2013 гг.

Глубина, см	МГУ		Подмосковная, под естественным покровом
	под естественным покровом	под оголенной поверхностью	
0		0,03	0,04
20	0,019	0,04	0,02
40	0,014	0,04	0,02
60	0,015	0,04	Нет данных
80	0,015	0,04	0,02
120	0,017	0,04	0,02
160	0,022	0,04	0,02
240	0,026	0,04	Неполные данные
320	0,027	0,04	0,02

Примечание. Температура подстилающей поверхности, в соответствии с [9], измеряется на отдельном участке размером 4×6 м в условиях снежного покрова зимой и с оголенной поверхностью в теплое время года. Значения коэффициента под естественным покровом в МГУ приведены с точностью до $\pm 0,001$ для наглядной демонстрации его изменений с глубиной.

смаатриваемого периода). Величина Z , рассчитанная для участка под естественным покровом, в слое 20—120 см оказалась больше критического значения $Z_{\text{кр}}$ с уровнем значимости $\alpha = 1\%$. Начиная с глубины 160 см и ниже, а также на поверхности почвы и на всех глубинах под оголенной поверхностью разности средних многолетних значений T_r за первые и последние 20 лет измерений достоверны даже с $\alpha = 0,1\%$. Таким образом, потепление почвы и грунта в Москве за последние 59 лет является статистически значимым.

Требуется выяснить, отражает ли это потепление изменение фоновых условий или же оно является лишь следствием усиления городского острова тепла. В работах [17, 18] подробно изучена пространственная структура подземного острова тепла по данным о T_r на станциях Московского региона. Было выявлено существенное превышение T_r в начале 1960-х годов в центральной части Москвы на всех горизонтах до 320 см по сравнению с ее значениями на периферии города и в сельской местности в Подмосковье. Однако, как известно, последние 60 лет были отмечены не только увеличением столичного мегаполиса, но и общим потеплением климата. Поэтому были привлечены к анализу данные станции Подмосковная. Заметим, что до начала 2000-х годов окружающая эту станцию местность оставалась совершенно открытой. Как видно на рис. 4, за период с 1956 по 2013 г. среднегодовая T_r на глубине 320 см повышалась здесь в среднем на $0,02^{\circ}\text{C}/\text{год}$: приблизительно в два раза медленнее, чем на этом же горизонте в МГУ под оголенной поверхностью, и в полтора раза медленнее, чем под естественным покровом. Как видно из данных таблицы, коэффициент линейного тренда на станции Подмосковная был в два раза меньше, чем под оголенной поверхностью в МГУ, и на всех прочих глубинах (кроме самой поверхности). Под естественным покровом скорость потепления в МГУ и на станции Подмосковная была сравнительно схожей на всех глубинах, за исключением горизонта 320 см.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что отмеченное в МГУ потепление почвы и грунта за последние десятилетия является следствием не только локальных причин (увеличения размеров города), но отражает и общие изменения климата, опосредованные через теплообмен приземного слоя воздуха с приповерхностными горизонтами почвы и грунта.

6. Выводы

За последние 59 лет в Москве происходило устойчивое потепление почвы и грунта со средней скоростью $0,02^{\circ}\text{C}/\text{год}$ под естественным покровом (от $0,01^{\circ}\text{C}/\text{год}$ на глубине 40 см до $0,03^{\circ}\text{C}/\text{год}$ на глубине 240 и 320 см) и $0,04^{\circ}\text{C}/\text{год}$ под оголенной поверхностью на всех горизонтах измерений; в последнее десятилетие это потепление замедлилось. Скорость потепления в течение всего периода под естественным покровом была меньше вследствие его теплоизолирующей роли. Тем не менее в обоих местах потепление почвы и грунта оказалось статистически значимым.

Повышение температуры почвы и грунта под естественным покровом на станции Подмосковная, расположенной в 24 км от Москвы, за период 1956—2013 гг. происходило приблизительно с той же скоростью, что и в МГУ ($0,02^{\circ}\text{C}/\text{год}$), кроме глубины 320 см, где оно было медленнее. Это говорит о том, что потепление почвы и грунта является следствием не только локального увеличения размеров города, но и общего глобального потепления.

Вертикальный профиль температуры почвы и грунта под естественным покровом характеризуется почти неизменными значениями на всех глубинах, а под оголенной поверхностью — увеличением значений T_r с глубиной, что может быть связано как с влиянием внешних источников тепла, так и с более глубоким промерзанием в холодный период года на этом участке.

В ходе эксперимента по одновременным измерениям температуры почвы и грунта в двух местах на расстоянии 50 м под естественным покровом выявлены значительные микроклиматические различия (вплоть до значений порядка 1°C). Применительно к малой глубине одной из вероятных причин таких различий служит разная освещенность измерительных площадок днем.

Экспериментальные сравнения показали, что различия в коэффициенте теплопроводности защитных футляров вытяжных почвенно-глубинных термометров из эбонита и полиэтилена низкого давления (старого и нового образца) не приводят к систематическому смещению оценок температуры почвы и грунта.

Авторы сердечно благодарят И. Н. Гапонова за любезно предоставленные данные станции Подмосковная и С. С. Быховца за ценные советы.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 14-05-00594).

Литература

1. Быховец С. С., Сорокинов В. А. и др. История наблюдений за температурой почвы на сети метеорологических станций России. — Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 1, с. 7—20.
2. Ваннари П. И. О температуре почвы в некоторых местностях Российской Импе-

рии. — Зап. Имп. Акад. наук, 1897, т. V, № 7, с. 1—58.

3. Израэль Ю. А., Павлов А. В., Анохин Ю. А. и др. Статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории Российской Феде-

- рации. — Метеорология и гидрология, 2006, № 5, с. 27—38.
- 4. Климат Москвы** (особенности климата большого города). /Под ред. А. А. Дмитриева, Н. П. Бессонова. — Л., Гидрометеиздат, 1969, 324 с.
- 5. Климат, погода, экология Москвы.** /Под ред. Ф. Я. Клинова. — СПб, Гидрометеиздат, 1995, 440 с.
- 6. Корнева И. А., Локощенко М. А.** Динамика температуры грунта в Москве и ее связи с метеорологическими величинами. /В сб.: Тезисы конференции молодых специалистов по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. — Обнинск, НПО “Тайфун”, 4—6 июня 2013, с. 138—141.
- 7. Корнева И. А., Локощенко М. А.** Многолетние изменения температуры грунта на разных глубинах в Москве. /В сб.: Труды XVI Международной школы-конференции молодых ученых “Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты”. — М., ГЕОС, 2012, с. 119—122.
- 8. Локощенко М. А.** Снежный покров и его современные изменения в Москве. — Метеорология и гидрология, 2005, № 6, с. 71—82.
- 9. Наставление** гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3, часть 1. — Л., Гидрометеиздат, 1969.
- 10. Павлов А. В.** Тренды современных изменений температуры почвы на севере России. — Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 3, с. 22—27.
- 11. Павлов А. В., Малкова Г. В.** Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России. — Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 4, с. 32—39.
- 12. Справочник** по гидрометеорологическим приборам и установкам. — Л., Гидрометеиздат, 1971, 372 с.
- 13. Справочник** по климату СССР. Вып. 8. — М., Гидрометеиздат, 1964.
- 14. Справочник** эколого-климатических характеристик г. Москвы (по наблюдениям Метеорологической обсерватории МГУ). /Под ред. А. А. Исаева. — М., Изд-во МГУ, 2003, т. 1, 300 с; 2005, т. 2, 410 с.
- 15. Шерстюков А. Б.** Температура почвогрунтов России на глубинах до 320 см в условиях изменяющегося климата. — Труды ВНИИГМИ-МЦД, 2007, вып. 173, с. 72—88.
- 16. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** /T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, et al. (eds.). — Cambridge, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
- 17. Lokoshchenko M. A. and Korneva I. A.** Underground urban “heat island” below Moscow city and dynamics of the soil temperature. /In: Proceedings of the 8th International Conference on Urban Climate (ICUC-8). — Dublin, Ireland, August 2012, paper index: 516.
- 18. Lokoshchenko M. A. and Korneva I. A.** Underground urban “heat island” below Moscow city. — Urban Climate, 2015 (in print).
- 19. Lokoshchenko M. A. and Vasilenko E. L.** Change of air temperature in Moscow during last two and quarter centuries. /In: Proceedings of the 7th International Conference on Urban Climate (ICUC-7). — Yokohama, Japan, 2009, paper index: B8-5.
- 20. Zhang T., Barry R. G., Gilichinsky D., et al.** An amplified signal of climatic change in soil temperatures during the last century at Irkutsk, Russia. — Climatic Change, 2001, vol. 49, pp. 41—76.