

Факторы формирования экстремальной приземной температуры во время волны тепла 2010 года на Европейской территории России

А.А. Моргунова¹⁾, В.А. Семенов^{1),2)}*

¹⁾ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер., 3, стр. 1

²⁾ Институт географии РАН,
Россия, 119017, Москва, Старомонетный переулок, дом 29, стр. 4

*Адрес для переписки: *a.morgunova@ifaran.ru*

Реферат. Волна тепла лета 2010 года, длившаяся с конца июня до середины августа, с максимальными температурами в Москве, превышавшими +38°C, является самой экстремальной по продолжительности и температуре на Европейской территории России (ЕТР) за всю историю натуральных наблюдений. При этом как механизмы образования долгоживущего блокирующего антициклона, так и факторы формирования экстремально высоких температур во время этой волны тепла до конца не ясны. В работе анализируются баланс потоков тепла на поверхности, а также компоненты уравнения тенденции температуры в толще атмосферы в центре волны тепла. Показано, что рост температуры в начале волны тепла был связан преимущественно с аномалией приходящей коротковолновой радиации, достигавшей 70 Вт/м². Вклад неадиабатического нагрева в приземном слое в локальное изменение температуры в этот период составил 55% и горизонтальной адвекции 36%. Отмечается влияние доступной почвенной влаги на перераспределение энергии между потоками явного и скрытого тепла, а также влияние потока тепла в почву на динамику температуры, в отдельные периоды сравнимого с потоком явного тепла в атмосферу. Формирование максимальных значений температуры было связано, помимо радиационных факторов, главным образом, с адвекцией более теплого воздуха из регионов, расположенных к юго-востоку. В период температурного максимума 29 июля – 4 августа на 84% рост температуры был связан с процессами адвекции. Отмечены различия в преобладающих факторах изменения температуры воздуха в пограничном слое и свободной атмосфере.

Ключевые слова. Волны тепла, экстремальные температуры, атмосферное блокирование, потоки тепла, адвекция тепла, влажность почвы.

Factors of the formation of extreme surface air temperatures during the 2010 heatwave in European Russia

A.A. Morgunova¹⁾, V.A. Semenov^{1),2)}*

¹⁾ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences,
Bldg. 1, Pyzhevskiy Lane, 3, 119017, Moscow, Russian Federation

²⁾ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,
4, Staromonetny Lane, 29, 119017, Moscow, Russian Federation

* Correspondence address: a.morgunova@ifaran.ru

Abstract. The summer 2010 heat wave, which lasted from late June to mid-August and was characterized by maximum temperatures in Moscow exceeding +38°C, represents the most extreme event in terms of both duration and temperature over the European Territory of Russia (ETR) in the entire history of instrumental observations. However, both the mechanisms responsible for the formation of the long-lived blocking anticyclone and the factors leading to extremely high temperatures during this heat wave remain not fully understood. This study analyzes the surface heat flux balance as well as the components of the temperature tendency equation within the atmospheric column in the center of the heat wave. It is shown that the temperature increase at the onset of the heat wave was primarily associated with an anomaly of incoming shortwave radiation reaching 70 W m⁻². During this period, the contribution of diabatic heating in the near-surface layer to the local temperature tendency was 55%, while horizontal advection accounted for 36%. The influence of available soil moisture on the partitioning of energy between sensible and latent heat fluxes is demonstrated, as well as the role of ground heat flux in the temperature evolution, which during certain periods was comparable in magnitude to the sensible heat flux into the atmosphere. The formation of maximum temperature values, in addition to radiative factors, was mainly associated with the advection of warmer air from regions located to the southeast. During the period of temperature maximum (29 July – 4 August), 84% of the temperature increase was related to advective processes. Differences in the dominant factors controlling air temperature variability in the boundary layer and in the free atmosphere are also identified.

Keywords. Heat waves, extreme temperatures, atmospheric blocking, heat fluxes, heat advection, soil moisture.

Введение

Волны тепла относятся к числу наиболее опасных метеорологических явлений, оказывающих существенное воздействие на здоровье населения. Они сопровождаются ростом заболеваемости и смертности вследствие теплового стресса, обострения хронических заболеваний и ухудшения качества воздуха при природных пожарах (Kononov et al., 2011; Ревич, Шапошников, 2012; Zhao et al., 2024). Волны тепла, сопровождающиеся отсутствием осадков и часто формированием почвенных засух, влияют на экосистемы и сельскохозяйственное хозяйство (Lobell, Field, 2007; Thornton et al., 2009); а также на объекты инфраструктуры из-за сильного нагрева поверхностей (Rübelke, Vögele, 2011; McEvoy et al., 2012), в том числе на энергетику из-за снижения КПД

электростанций и роста нагрузки из-за повышенного потребления электроэнергии (Añel et al., 2017).

На территории России волны тепла чаще всего наблюдаются на Европейской территории России главным образом из-за климатологического максимума повторяемости блокирующих антициклонов в этом регионе (Lejenäs Økland, 1983; Мохов, Тимажев, 2022). С 1980-х годов на ЕТР наблюдается монотонный рост числа дней с экстремально высокой летней температурой, увеличивается продолжительность волн тепла (>5 дней), длительные события (>10 дней) стали встречаться в 1.5-2 раза чаще (Бардин, Платова, 2019), а сверхдлительные (≥ 20 дней) – в 6 раз чаще после 2000 года по сравнению с XX веком (Бардин и др., 2024).

Рекордным по количеству экстремально жарких дней и максимальным температурам выделяется лето 2010 года: количество дней за сезон с волнами тепла превысило 45 (Бардин и др., 2024), было зафиксировано множество температурных рекордов (Паршина, 2010; Бережная и др., 2010; Мохов, 2011), абсолютный максимум температуры в Москве был достигнут 29 июля и составил $+38.2^{\circ}\text{C}$ (Локощенко, 2012). Согласно данным палеореконструкций, аналогичного события не было на ЕТР по крайней мере последние 500 лет (Barriopedro et al., 2011). Это событие было связано с долгоживущим блокирующим антициклоном, который установился над центральными областями Европейской России и Поволжьем в середине июня и просуществовал 55 дней (Шакина и др., 2011). При этом в июле – августе было выделено пять периодов регенерации антициклона, связанных с вхождением в его циркуляцию антициклонов умеренных широт (Семенов и др., 2012). Антициклон сопровождался опусканием воздуха, адиабатическим нагревом, уменьшением облачности и высыханием почвы (Di Capua et al., 2021).

Формирование и продолжительное существование блокинга могло быть вызвано аномалиями температуры поверхности океана (ТПО) в Индийском океане и тропической Атлантике и распространением квазистационарных волн Россби в высокие широты Северного полушария (Варгин и др., 2012; Schneidereit et al., 2012; Trenberth, Fasullo, 2012; Kornhuber et al., 2020). Вместе с тем, например, в работе (Wehrli et al., 2019) сделан вывод об отсутствии влияния аномалий ТПО на формирование волны тепла на ЕТР 2010 г. Разногласия относительно причин формирования блокирующего антициклона показывают актуальность темы исследования и недостаток понимания процессов, обуславливающих причины формирования экстремальных волн тепла. Проблемы предсказуемости блокирующих антициклонов, в т.ч. летом 2010 г., обсуждаются в работе (Куликова и др., 2022).

В то же время сохраняется неопределенность относительно факторов формирования экстремальных температур. В работе (Гинзбург, 2011) динамика температуры летом 2010 года полностью объясняется радиационным балансом. Володин (2010) подчеркивает роль адвекции теплого воздуха из соседних регионов, предлагая механизм удаленного влияния засухи. В то же время в (Dole et al., 2011) говорится о незначительном вкладе адвекции в тенденцию температуры и значительной роли локальных обратных связей, свя-

занных с влажностью почвы. Показано, что наблюдаемая летом 2010 года температурная аномалия при прочих равных условиях определялась влагосодержанием почвы (Кислов и др., 2015). Во время волны тепла 2003 года в Западной Европе изменение температуры хорошо описывалось динамикой потока явного тепла, выросшего за счет снижения испарения (Black et al., 2004), что не наблюдалось во время волны тепла 2010 года на ЕТР.

Предыдущие исследования показали, что во время волны тепла 2010 года на ЕТР уменьшение облачности на 30-40% по сравнению с климатической нормой привело к резкому увеличению приходящей солнечной радиации (Miralles et al., 2014). В период наиболее высоких температур приходящая коротковолновая радиация превышала норму на 15-20% (Barriopedro et al., 2011). Важным фактором стало аномально низкое содержание влаги в почве в июне-июле 2010 года (Hauser et al., 2016), что вызвало сокращение потока скрытого тепла, увеличение потока явного тепла, снижение эвапотранспирации (Miralles et al., 2014).

Исходя из предположения, что антициклон создает внутри себя условия, близкие к равновесному режиму вертикальных потоков турбулентного и радиационного тепла, максимальная температура в Москве была оценена из энергобалансового уравнения, которое с учетом суточного хода показало значения максимальных температур, близких к реальности (Гинзбург, 2011).

В работе представлен анализ баланса среднесуточных радиационных и турбулентных потоков тепла, получены оценки равновесной температуры поверхности. Также анализируются компоненты уравнения тенденции температуры в толще атмосферы и обсуждается роль различных факторов в формировании экстремально высоких температур.

Методы и материалы

В работе использовались среднечасовые поля температуры поверхности, температуры воздуха на стандартных вертикальных уровнях реанализа, геопотенциала, скорости ветра, скрытого и явного тепла, приходящей суммарной солнечной и длинноволновой радиации, влажности почвы реанализа ERA5 с пространственным разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (Hersbach et al., 2020). Для балансовых расчетов данные усреднялись по пространству по области $36-43^\circ$ в.д., $53-57^\circ$ с.ш. – область максимальных температур, которая была выбрана путем осреднения температуры за июль. Исходя из предположения, что условия внутри антициклона близки к равновесному энергетическому режиму, при котором изменения теплосодержания верхнего слоя малы по сравнению с потоками тепла на поверхности (Гинзбург, 2011), температура подстилающей поверхности восстанавливалась из уравнения баланса радиационных, турбулентных потоков тепла и потока тепла в почву:

$$\sigma T_s^4 = S(1 - a) + F - H - LE - G,$$

где:

σ – постоянная Стефана-Больцмана, T_s – температура поверхности, S – суммарная (прямая и рассеянная) приходящая солнечная радиация, α – альбедо поверхности, F – нисходящая длинноволновая радиация, H – турбулентный поток явного тепла, E – турбулентный поток влаги (испарение), L – удельная теплота парообразования, и G – поток тепла в почву. Данные о потоке тепла в почву в реанализе отсутствуют, поэтому этот поток рассчитывался как остаточный член уравнения баланса. Суточные аномалии потоков тепла и температуры рассчитывались относительно базового периода 1991–2020 гг. Влияние динамических и термодинамических процессов на изменение температуры воздуха оценивалось из уравнения тенденции температуры (см., напр., Jiménez-Esteve, Domeisen, 2022):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - \omega \frac{\partial T}{\partial p} + \frac{1}{\rho C_p} \omega + Q,$$

где в левой части представлено изменение температуры воздуха $T(x, y, z, t)$ со временем. Первые два члена в правой части представляют собой горизонтальную адвекцию, третий член – это вертикальная адвекция, четвертый – эффект изменения температуры при адиабатическом изменении объема воздуха, Q представляет неадиабатический нагрев воздуха. Член Q оценивался как остаточный, при условии локального температурного баланса, и включает в себя радиационные процессы, турбулентные потоки и тепло фазовых переходов.

Для оценки направлений переноса воздушных масс применялась лагранжева модель расчёта траекторий HYSPLIT – Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (Stein et al., 2015). Использовался режим обратных траекторий (backward trajectories), при котором вычисляется положение воздушной частицы в предыдущие моменты времени относительно заданной конечной точки. Расчёт выполняется путём численного интегрирования системы уравнений движения частицы в лагранжевой постановке с использованием архивных полей ветра, давления и других метеорологических параметров. Конечная точка траекторий задавалась в центре Москвы (55.776573 с.ш., 37.639160 в.д.) на высоте 300 метров над уровнем земной поверхности (AGL), 56-часовые обратные траектории рассчитывались 2 раза в сутки (00, 12 UTC).

Результаты

Волна тепла лета 2010 года продолжалась почти два месяца с третьей декады июня по середину августа (рис. 1а). Наиболее высокие температуры наблюдались в конце июля и начале августа, максимальная дневная температура в это время превышала 40°C, а среднесуточная температура превышала климатическую норму на более чем 10°C. Наблюдалось значительное увели-

чение суточного хода температуры – в наиболее жаркие дни максимальная амплитуда суточного хода могла достигать 20°C. При этом в Москве наблюдалось два периода тропических ночей, когда ночная температура не опускалась ниже 20°C: 17-26 июля и 3-10 августа. Эти периоды можно считать наиболее экстремальными по достигаемым температурным максимумам как в ночное, так и в дневное время.

Повышение температуры в начале волны тепла (третья декада июня) было связано с установлением антициклональных условий над исследуемой территорией. В первой половине июля антициклон сместился в северном направлении, что привело к затоку холодного воздуха и снижению температуры в анализируемом регионе, после чего с середины июля блокирование снова возобновилось (рис. 1б), вызвав повторный рост температуры.

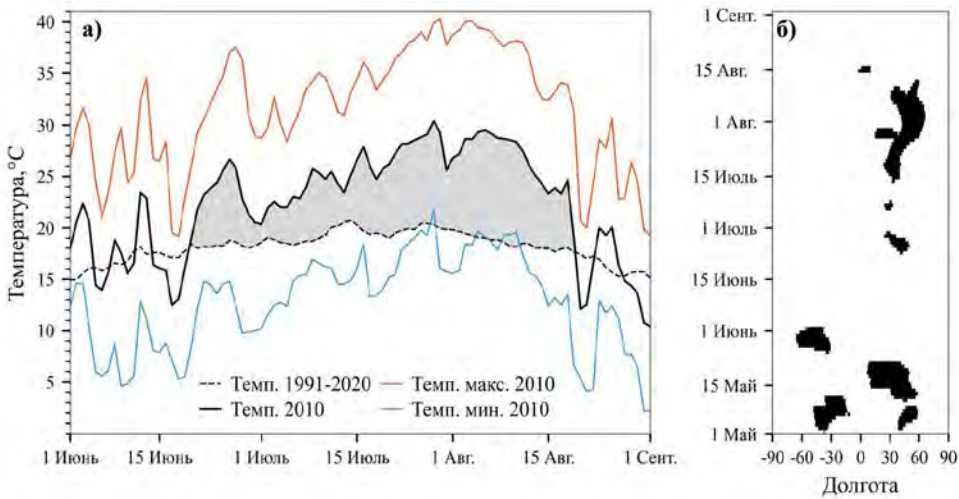


Рисунок 1. а) Среднесуточные (темп. 2010), максимальные (темп. макс. 2010) и минимальные (темп. мин. 2010) приповерхностные суточные температуры воздуха летом 2010 года, климатическая норма температуры за период 1991-2020 гг. (темп. 1991-2020) для анализируемого региона; б) долготное положение блокинга согласно индексу блокирования Тибальди-Мольтени в период с мая по сентябрь 2010 года

Figure 1. (a) Summer 2010 mean daily (T_2010), maximum (Tmax_2010), and minimum (Tmin_2010) near-surface air temperatures, and the 1991-2020 climatological mean temperature over the study region; (б) longitudinal position of blocking events in summer 2010 based on the Tibaldi–Molteni blocking index

На рис. 2 представлена эволюция среднесуточных значений радиационных и турбулентных потоков тепла в период с мая по сентябрь в абсолютных значениях и аномалиях относительно базового периода 1991-2020 гг.

Рост температуры начался с установления антициклональных условий и резкого роста приходящей коротковолновой радиации, аномалии которой составили около 70 Вт/м² в третьей декаде июня (рис. 2а, б). В это время наблюдался закономерный рост турбулентного потока скрытого тепла, который, однако, сократился к началу июля из-за уменьшения запасов влаги в почве и падения температуры (рис. 2 в, г).

Снижение температуры в период с 25 июня по начало июля было связано со сменой синоптической ситуации и влиянием адвекции (будет показано ниже или на рис. 4). Далее температура росла, достигая наибольших значений аномалии к концу первой декады августа. Рост температуры поддерживался за счет высокого потока приходящей коротковолновой радиации, аномалии которого в июле и первой половине августа составляли около 50 Вт/м^2 , и увеличивающегося потока нисходящей длинноволновой радиации вследствие роста температуры поверхности и увеличения влагосодержания атмосферы.

Также важно отметить, что к середине июля в центре ЕТР в течение длительного времени наблюдались экстремально высокие температуры, отсутствие осадков и сильная засуха. В этих условиях происходило быстрое формирование и распространение природных пожаров. Горели преимущественно торфяные болота и леса Мещерской низменности, что приводило к поступлению в атмосферу большого количества аэрозольных частиц, включая черный углерод (Бондур, 2011). Дымовые аэрозоли изменяли радиационный режим атмосферы за счёт поглощения и рассеяния солнечного излучения, что приводило к уменьшению потока приходящей к поверхности солнечной радиации и могло вызывать охлаждение приземного слоя воздуха (Chubarova et al., 2012; Péré et al., 2014).

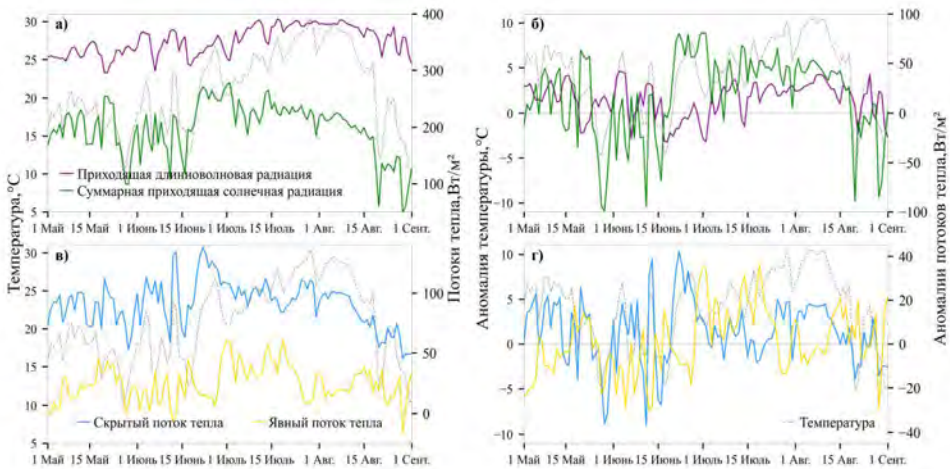


Рисунок 2. Абсолютные значения (а, в) и аномалии (б, г) средних суточных значений потоков тепла в течение лета 2010 года (Вт/м^2): суммарное приходящее к поверхности солнечное излучение (зеленая кривая) и противоизлучение атмосферы (фиолетовая кривая) – верхние графики; потоки явного (желтая кривая), скрытого тепла (голубая кривая), температуры на двух метрах (серая пунктирная кривая) – нижние графики, аномалии относительно периода 1991-2020 гг.

Figure 2. Absolute values (a, v) and anomalies (b, r) of daily mean surface heat fluxes in 2010 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$): net solar radiation at the surface (green curve) and downward longwave radiation (purple curve) in the upper panels; sensible heat flux (yellow curve), latent heat flux (blue curve), and 2-m air temperature (gray dashed curve) in the lower panels. Anomalies are calculated relative to the 1991-2020 climatological period

Важным механизмом сдерживания роста температуры поверхности во время волн тепла являются затраты энергии на испарение. При сокращении доступной для испарения влаги в почве поток скрытого тепла должен уменьшаться, поэтому энергия начинает расходоваться на нагрев поверхности и увеличение потока явного тепла (Seneviratne et al., 2010; Miralles et al., 2019). Однако на ЕТР такая закономерность прослеживается слабо, хотя абсолютные значения потока скрытого тепла по мере развития волны тепла действительно сокращаются (рис. 2в), в период достижения наиболее высоких температур в конце июля – начале августа наблюдается рост значений потока скрытого тепла как в аномалиях, так и в абсолютных значениях, а поток явного тепла, наоборот, снижается (рис. 2в, г). Такие результаты говорят о том, что механизм роста температуры за счет перераспределения энергии между потоками явного и скрытого тепла из-за влажности почвы в данном случае не является ключевым механизмом регулирования температуры, как это было, например, во время сильной волны тепла 2003 года в Западной Европе (Black et al., 2004).

На испарение с поверхности, главным образом, влияет содержание влаги в почве. Летом 2010 года перед наступлением волны тепла на протяжении трех недель наблюдалась положительная аномалия влажности почвы (рис. 3). Это способствовало сильному испарению с поверхности в начале волны тепла. По мере развития волны тепла влага в почве быстро расходовалась, что ограничило испарение. Можно предположить, что если к моменту наступления волны тепла содержание влаги в почве было бы аномально низким, перераспределение энергии между потоками явного и скрытого тепла было бы другим, с меньшим потоком скрытого тепла, и волна тепла была бы более интенсивная.

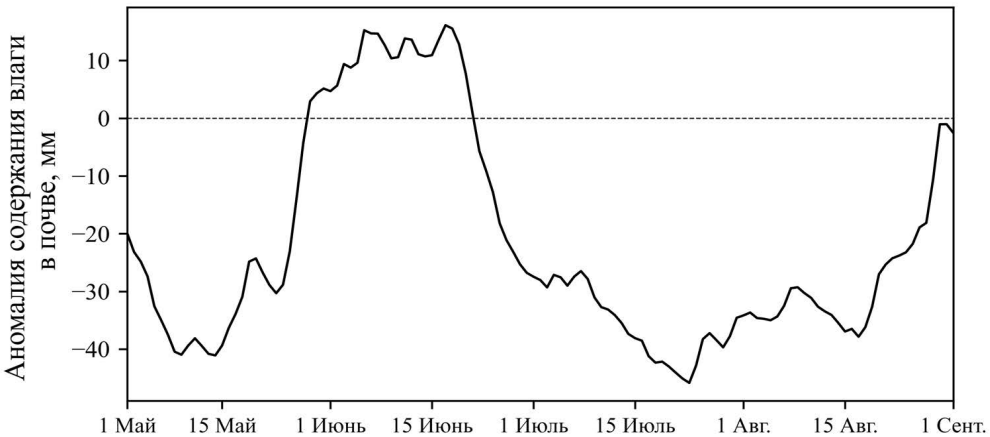


Рисунок 3. Аномалия влажности почвы (мм) в первом метре слоя почвы летом 2010 года относительно периода 1991-2020 гг. в анализируемом регионе

Figure 3. Soil moisture anomaly (mm) in the upper 1-m soil layer in summer 2010 relative to the 1991-2020 climatological period over the study region

Исходя из предположения, что во время блокирующего антициклона энергетический режим близок к равновесному, можно оценить температуру поверхности по балансу потоков тепла. Такая температура в среднем на 1.6°C превышает температуру по данным ERA5 во время волны тепла, что соответствует дисбалансу потоков тепла величиной примерно 10 Вт/м^2 . Это расхождение, по всей видимости, обусловлено потоком тепла в почву. Такое различие указывает на важность потока тепла в почву, максимум которого во время волны тепла достигал 22 Вт/м^2 , хотя среднее суточное значение в летний период в умеренных широтах составляет $5\text{--}15 \text{ Вт/м}^2$ (Monteith, Unsworth, 2013).

Поскольку формирование аномалий приповерхностной температуры объясняется не только изменениями потоков тепла на поверхности, но и процессами адвекции, вертикального переноса и адиабатического нагрева, были рассмотрены компоненты теплового баланса в толще атмосферы. На рис. 4 показаны вертикальные профили изменения компонент уравнения тенденции температуры в течение лета 2010 г. В вертикальной структуре хорошо прослеживаются различия во вкладах различных компонент баланса тепла ниже и выше высоты около 850 гПа, примерно соответствующей высоте пограничного слоя. В этом слое преобладают неадиабатические изменения температуры воздуха (рис. 4г). При этом адиабатический нагрев, связанный с опусканием воздуха (рис. 4в), наблюдается преимущественно выше уровня 850 гПа. Такое распределение говорит о том, что нагрев воздуха в пограничном слое происходит в большей степени за счет неадиабатических процессов, т.е. турбулентных потоков тепла от поверхности и радиационного нагрева, а рост температуры атмосферы выше пограничного слоя осуществляется, главным образом, за счет адиабатического нагрева. Так, например, в начале волны тепла в период 17-24 июня в приземном слое (950-1000 гПа) вклад неадиабатического нагрева в локальное изменение температуры составил 55%, горизонтальной адвекции 36% и адиабатического нагрева 9%. При этом в свободной атмосфере (500-850 гПа) для того же периода вклад адиабатического нагрева в локальное изменение температуры составил 113%, горизонтальной адвекции 47%, неадиабатических процессов -60% (отрицательный вклад, очевидно, из-за радиационного выхолаживания).

В период достижения наиболее высоких температур (29 июля – 5 августа) вклад горизонтальной адвекции в локальное изменение температуры составлял 84%, неадиабатического нагрева 29%, адиабатические процессы способствовали охлаждению (13%).

Значительный вклад в изменение температуры воздуха вносит горизонтальная адвекция (рис. 4б). Анализ обратных траекторий показал, что в начале волны тепла (рис. 5а) и в период достижения наиболее высоких температур (рис. 5г) наблюдалась адвекция теплого воздуха из региона Прикаспийской низменности и Средней Азии. При наличии восточноевропейского блокинга преобладающее направление приземного ветра в центре ЕТР восточное и юго-восточное. Хотя теплый воздух перемещался на расстояние более тысячи километров, он не терял тепло на испарение с поверхности, так как в регионах к юго-востоку от центра ЕТР влажность почвы была аномально низкой, и про-

ходящий над засушливой территорией воздух не обогащался влагой и приходил к краю засушливой области (в данном случае в центр ЕТР) очень теплым и сухим. В результате верхний слой почвы в центре ЕТР очень быстро высыхал и испарение сокращалось, то есть засушливые условия в почве распространялись в ту же сторону, в которую были направлены преобладающие приземные ветры (Володин, 2010; Schumacher et al., 2019).

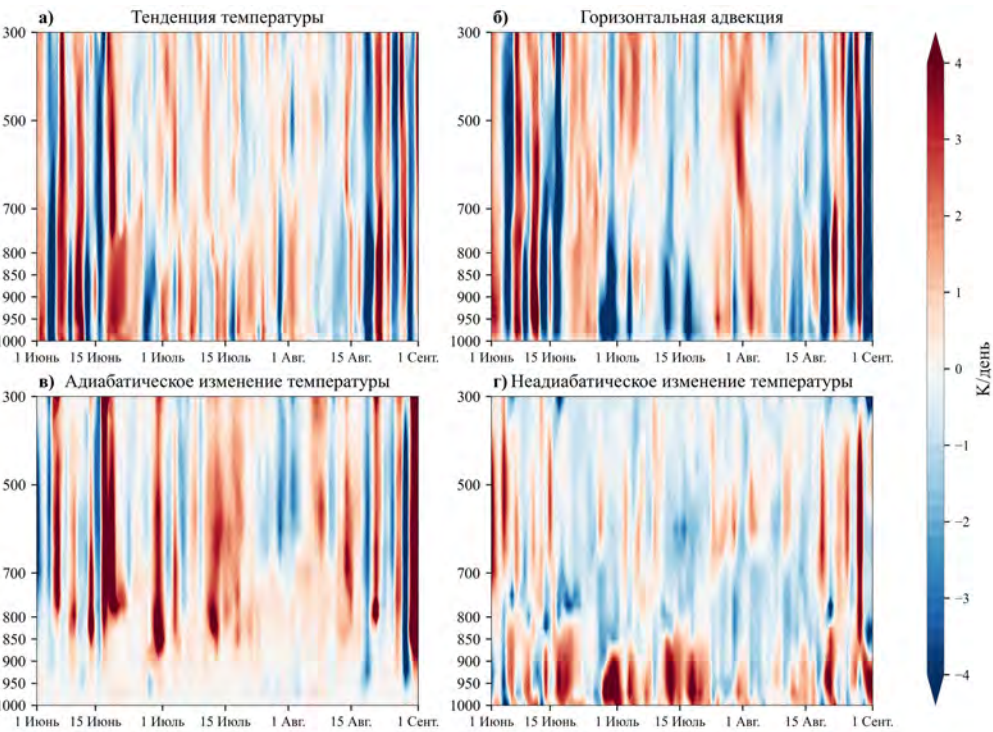


Рисунок 4. Компоненты уравнения тенденции температуры: а) тенденция температуры, б) горизонтальная адвекция, в) адиабатическое изменение температуры за счет расширения/сжатия воздуха, г) неадиабатический нагрев в К/день в координатах давление-время в течение лета 2010 года

Figure 4. Contributions to the temperature tendency equation: а) temperature tendency, б) horizontal advection, в) adiabatic heating/cooling due to expansion and compression, and г) diabatic heating ($K \cdot day^{-1}$) in pressure–time coordinates during the 2010 heat wave

В период с конца июня по 3 декаду июля адвекция более холодного воздуха внесла существенный отрицательный вклад в тенденцию температуры (рис. 4б) и привела к снижению приземной температуры относительно первого максимума в конце июня (рис. 1а). Это было связано с атмосферной динамикой и временным разрушением блокинга (рис. 1б). В конце июня наблюдалась адвекция холодной воздушной массы из Скандинавии (рис. 5б), что привело к резкому понижению температуры, а в середине июля – адвекция с севера ЕТР (рис. 5в).

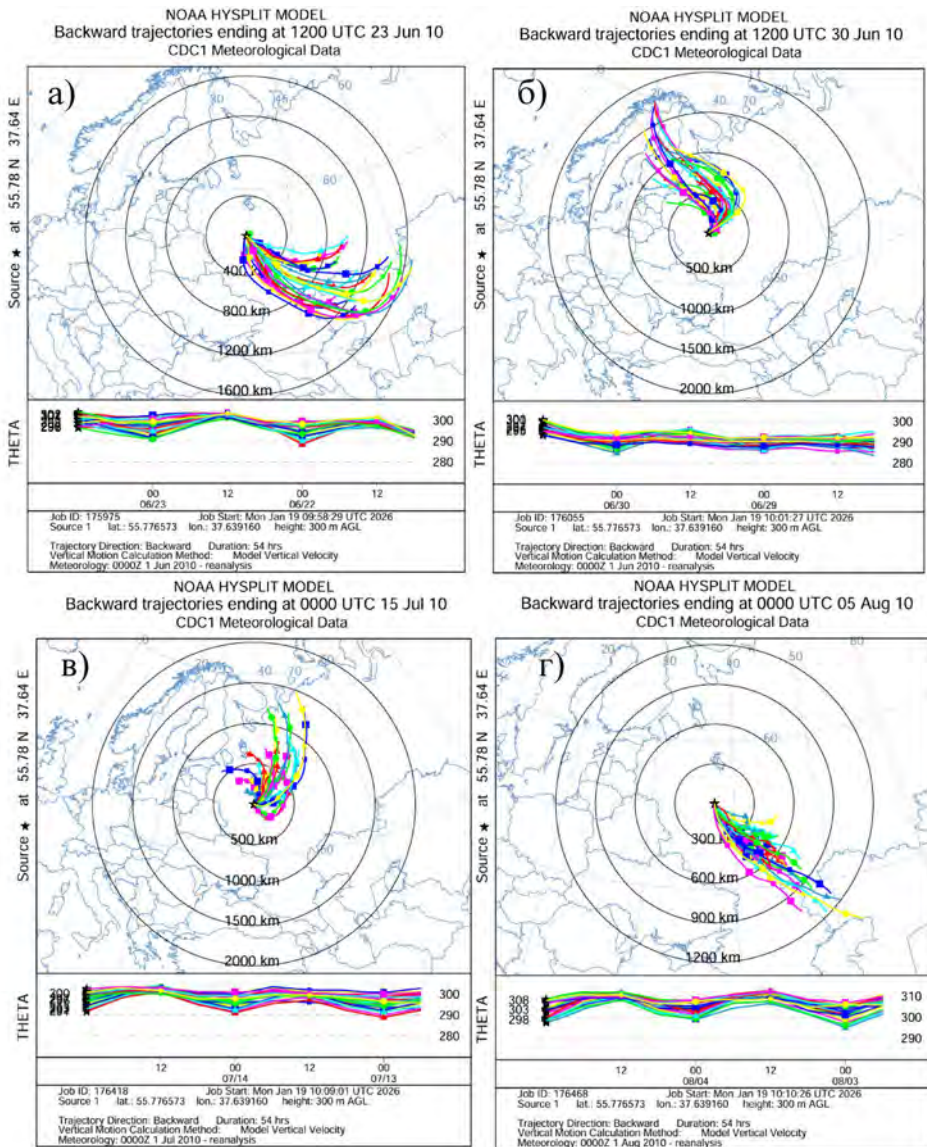


Рисунок 5. HYSPLIT обратные траектории, заканчивающиеся в Москве в точке 55.77 с.ш., 37.63 в.д. а) 23 июня 12:00 UTC; б) 30 июня 12:00 UTC; в) 15 июля 12:00 UTC; г) 5 августа 12:00 UTC

Figure 5. HYSPLIT backward trajectories ending in Moscow at 55.77°N, 37.63°E: а) 23 June, 12:00 UTC; б) 30 June, 12:00 UTC; в) 15 July, 12:00 UTC; г) 5 August, 12:00 UTC

Выводы

Анализ динамики потоков тепла на поверхности показал, что рост при-поверхностной температуры в начале волны тепла был связан прежде всего с сильной положительной аномалией приходящей коротковолновой радиации.

Вклад неадиабатического нагрева в локальное изменение температуры в приземном слое в этот период составлял 55%, при этом наблюдалась адвекция теплого воздуха, способствовавшая росту температуры (вклад 36%).

По мере развития волны тепла сокращение влажности почвы приводило к перераспределению энергии между турбулентными потоками тепла, сокращению потока скрытого и росту потока явного тепла. Полученные результаты также указывают на важность учета потока тепла в почву, в отдельные дни сравнимого со значениями потока явного тепла.

В период достижения наиболее высоких температур главным фактором роста температуры была адвекция теплого воздуха. В период с 29 июля по 5 августа 84% локального роста температуры было связано с вкладом горизонтальной адвекции. Вклад неадиабатических процессов составлял 29% (адиабатические процессы охлаждали атмосферу на 13%). Важным является направление адвекции в условиях антициклональной циркуляции – при изменении положения антициклона или при его разрушении над территорией может наблюдаться адвекция как холодного, так и теплого воздуха.

Таким образом, в разные периоды волны тепла достижению максимальных температур могут способствовать разные факторы. И хотя вклад динамических и термодинамических факторов в формирование волн тепла может значительно меняться по ходу события, от события к событию и по регионам, адвекция тёплого воздуха и положительные аномалии радиационных потоков были ключевыми механизмами формирования экстремальных температур во время волны тепла 2010 года.

В заключение следует отметить некоторые вопросы, оставшиеся за рамками данной работы, ответ на которые могут дать новые исследования. Это более детальный анализ неадиабатического компонента уравнения тенденции температуры с целью выделения вкладов радиационных процессов, турбулентного переноса тепла, фазовых переходов влаги и диффузии. Важные результаты можно получить при сопоставлении характеристик волн тепла на ЕТР в последние десятилетия с целью выявления возможных тенденций в механизмах формирования экстремальных температур при потеплении климата.

Благодарности

Работа в части анализа баланса потоков тепла была выполнена при поддержке проекта РНФ № 24-17-00138, в части анализа динамики атмосферы – при поддержке Госзадания Института географии РАН (FMWS-2024-0001).

Список литературы

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В. (2019) Долгопериодные вариации показателей экстремальности температурного режима на территории России и их связь с изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции и глобальным потеплением, *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 5-19.

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф. (2024) Экстремальные волны тепла и экстремальные летние сезоны в Европейской части России, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 5-25.

Бережная, Т.В., Голубев, А.Д., Найшуллер, М.Г. (2010) Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в июле 2010 г., *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 107-119.

Бондур, В.Г. (2011) Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г., *Исследование Земли из космоса*, № 3, с. 3-13.

Варгин, П.Н., Лукьянов, А.Н., Ганышин, А.В. (2012) Исследование динамических процессов в период формирования и развития блокирующего антициклона над Европейской частью России летом 2010 г., *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*, т. 48, № 5, с. 354-358.

Володин, Е.М. (2010) *О природе некоторых сверхэкстремальных аномалий летней температуры. Анализ условий аномальной погоды на территории России летом*, с. 48-57.

Кислов, А.В., Варенцов, М.И., Тарасова, Л.Л. (2015) Роль весенней влажности почвы в формировании крупномасштабных засух Восточно-Европейской равнины 2002 и 2010 гг., *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*, т. 51, № 4, с. 464-471.

Куликова, И.А., Круглова, Е.Н., Хан, В.М. (2022) Оценка практической предсказуемости блокирующих антициклонов с использованием современных гидродинамических моделей, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 5-23.

Локощенко, М.А. (2012) Катастрофическая жара 2010 года в Москве по данным наземных метеорологических измерений, *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*, т. 48, № 5, с. 523.

Мохов, И.И. (2011) Особенности формирования летней жары 2010 г. на Европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий, *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*, т. 47, № 6, с. 709.

Мохов, И.И., Тимажев, А.В. (2022) Повторяемость летних атмосферных блокирований в Северном полушарии в разных фазах явлений Эль-Ниньо, Тихоокеанской десятилетней и Атлантической мультидесятилетней осцилляций, *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*, т. 58, № 3, с. 239-249.

Паршина, Л.Н. (2010) Погода на территории Российской Федерации в июле 2010 г., *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 100-104.

Ревич, Б.А., Шапошников, Д.А. (2012) Изменения климата, волны жары и холода как факторы риска повышенной смертности населения в некоторых регионах России, *Проблемы прогнозирования*, № 2, с. 122-139.

Семенов, Е.К., Соколихина, Н.Н., Тудрий, К.О. (2012) К вопросу о регенерации субтропического антициклона как факторе его дальнейшей стабилизации (на примере лета 2010 г.), *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 5-15.

Шакина, Н.П., Иванова, А.Р., Бирман, Б.А., Скриптунова, Е.Н. (2011) *Блокирование: условия лета 2010 г. в контексте современных знаний. Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года* (сб. докладов), М., Триада ЛТД, с. 6-21.

Ael, J.A., Fernandez-Gonzalez, M., Labandeira, X., Lopez-Otero, X., De la Torre, L. (2017) Impact of cold waves and heat waves on the energy production sector, *Atmosphere*, vol. 8, no. 11, p. 209.

Barriopedro, D., Fischer, E.M., Luterbacher, J., Trigo, R.M., Garcia-Herrera, R. (2011) The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe, *Science*, vol. 332, pp. 220-224.

Black, E., Blackburn, M., Harrison, G., Hoskins, B., Methven, J. (2004) Factors contributing to the summer 2003 European heatwave, *Weather*, vol. 59, no. 8, pp. 217-223.

Chubarova, N., Nezval, Y., Sviridenkov, I., Smirnov, A., Slutsker, I. (2012) Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010, *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(3), pp. 557-568.

Di Capua, G., Sparrow, S., Kornhuber, K., Rousi, E., Osprey, S., Wallom, D., van den Hurk, B., Coumou, D. (2021) Drivers behind the summer 2010 wave train leading to Russian heatwave and Pakistan flooding, *Climate and Atmospheric Science*, vol. 4, no. 1, p. 55.

Dole, R., Hoerling, M., Perlwitz, J., Eischeid, J., Pegion, P., Zhang, T., Quan, X., Xu, T., Murray, D. (2011) Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? *Geophysical Research Letters*, vol. 38, no. 6.

Grumm, R.H. (2011) The central European and Russian heat event of July-August 2010, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 92, no. 10, pp. 1285-1296.

Hauser, M., Orth, R., Seneviratne, S.I. (2016) Role of soil moisture versus recent climate change for the 2010 heat wave in western Russia, *Geophysical Research Letters*, vol. 43, no. 6, pp. 2819-2826.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Homiyi, A., Muñoz-Sabater, J. (2020) The ERA5 global reanalysis, *Quarterly journal of the royal meteorological society*, vol. 146, no. 730, pp. 1999-2049.

Jimnez-Estevé, B., Domeisen, D.I.V. (2022) The role of atmospheric dynamics and large-scale topography in driving heatwaves, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 148, no. 746, pp. 2344-2367.

Konovalov, I.B., Beekmann, M., Kuznetsova, I.N., Yurova, A., Zvyagintsev, A.M. (2011) Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating

modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 11, no. 19, pp. 10031-10056.

Kornhuber, K., Coumou, D., Vogel, E., Lesk, C., Donges, J.F., Lehmann, J., Horton, R.M. (2020) Amplified Rossby waves enhance risk of concurrent heatwaves in major breadbasket regions, *Nature Climate Change*, vol. 10, no. 1, pp. 48-53.

Lejens, H., Økland, H. (1983). Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data, *Tellus A*, vol. 35, no. 5, pp. 350-362.

Lobell, D.B., Field, C.B. (2007) Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming, *Environmental research letters*, vol. 2, no. 1, p. 014002.

Mario, E., Raffaele, L., Onofrio, C., Maria, C.S.J., Valentina, B., Vincenzo, G., Onofrio, C., Shao, C., Giovanni, S. (2024) Coupling heat wave and wildfire occurrence across multiple ecoregions within a Eurasia longitudinal gradient, *Science of the total environment*, vol. 912, pp. 169269.

McEvoy, D., Ahmed, I., Mullett, J. (2012) The impact of the 2009 heat wave on Melbourne's critical infrastructure, *Local environment*, vol. 17, no. 8, pp. 783-796.

Miralles, D.G., Teuling, A.J., Van Heerwaarden, C.C., Vil-Guerau de Arellano, J. (2014) Mega-heatwave temperatures due to combined soil desiccation and atmospheric heat accumulation, *Nature Geoscience*, vol. 7, no. 5, pp. 345-349.

Miralles, D.G., Gentine, P., Seneviratne, S.I., Teuling, A.J. (2019) Land-atmospheric feedbacks during droughts and heatwaves: state of the science and current challenges, *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1436, no. 1, pp. 19-35.

Monteith, J., Unsworth, M. (2013) *Principles of environmental physics: plants, animals, and the atmosphere*, Academic Press, Cambridge, MA doi:10.1016/B978-0-12-386910-4.00013-5.

Nabizadeh, E., Lubis, S.W., Hassanzadeh, P. (2021) The 3D structure of northern hemisphere blocking events: Climatology, role of moisture, and response to climate change, *Journal of Climate*, vol. 34, no. 24, pp. 9837-9860.

Pr, J.C., Bessagnet, B., Mallet, M., Waquet, F., Chiapello, I., Minvielle, F., Pont, V., Menut, L. (2014) Direct radiative effect of the Russian wildfires and its impact on air temperature and atmospheric dynamics during August 2010, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 14, no. 4, pp. 1999-2013.

Rbbelke, D., Vgele, S. (2011) Impacts of climate change on European critical infrastructures: The case of the power sector, *Environmental science and policy*, vol. 14, no. 1, pp. 53-63.

Schneidereit, A., Schubert, S., Vargin, P., Lunkeit, F., Zhu, X., Peters, D.H., Fraedrich, K. (2012) Large-scale flow and the long-lasting blocking high over Russia: Summer 2010, *Monthly Weather Review*, vol. 140, no. 9, pp. 2967-2981.

Seneviratne, S.I., Cortia, T., Davina, E.L., Hirschia, M., Jaegera, E.B., Lehnera, I., Orlowskya, B., Teuling, A.J. (2010) Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review, *Earth-Science Reviews*, vol. 99, no. 3-4, pp. 125-161.

Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J., Cohen, M.D., Ngan, F. (2015) NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 96(12), pp. 2059-2077.

Thornton, P.K., van de Steeg, J., Notenbaert, A., Herrero, M. (2009) The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know, *Agricultural systems*, vol. 101, no. 3, pp. 113-127.

Trenberth, K.E., Fasullo, J.T. (2012) Climate extremes and climate change: The Russian heat wave and other climate extremes of 2010, *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, vol. 117, no. D17.

Schumacher, D.L., Keune, J., Van Heerwaarden, C.C., Vil-Guerau de Arellano, J., Teuling, A.J., Miralles, D.G. (2019) Amplification of mega-heatwaves through heat torrents fuelled by upwind drought, *Nature Geoscience*, vol. 12, no. 9, pp. 712-717.

Wehrli, K., Guillod, B.P., Hauser, M., Leclair, M., Seneviratne, S.I. (2019) Identifying key driving processes of major recent heat waves, *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, vol. 124, no. 22, pp. 11746-11765.

Zhao, Q., Li, S., Ye, T., Wu, Y., Gasparini, A., Tong, S., Urban, A., Vicedo-Cabrera, A.M., Tobias, A., Guo, Y. (2024) Global, regional, and national burden of heatwave-related mortality from 1990 to 2019: A three-stage modelling study, *PLoS medicine*, vol. 21, no. 5, pp. e1004364.

References

Bardin, M.Yu., Platova, T.V. (2019) Dolgoperiodnye variacii pokazatelej ekstremal'nosti temperaturnogo rezhima na territorii Rossii i ih svyaz' s izmeneniyami krupnomasshtabnoj atmosfernoj cirkulyacii i global'nyim potepleniem [Long-period Variations in Extreme Temperature Statistics in Russia as Linked to the Changes in Large-scale Atmospheric Circulation and Global Warmi], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 12, pp. 5-19.

Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Samohina, O.F. (2024) Ekstremal'nye volny tepla i ekstremal'nye letnie sezony v Evropejskoj Chasti Rossii [Extreme Heat Waves and Extreme Summer Seasons in European Russia], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, pp. 5-25.

Berezhnaya, T.V., Golubev, A.D., Najshuller, M.G. (2010) Anomal'nye gidrometeorologicheskie yavleniya na territorii Rossijskoj Federacii v iyule 2010 g. [Abnormal hydrometeorological phenomena on the territory of the Russian Federation in June 2010], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 107-119.

Bondur, V.G. (2011) Kosmicheskij monitoring prirodnyh pozharov v Rossii v usloviyah anomal'noj zhary 2010 g [Satellite monitoring of wildfires during the anomalous heat wave of 2010 in Russia], *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, no. 3, pp. 3-13.

Vargin, P.N., Luk'yanov, A.N., Gan'shin, A.V. (2012) Issledovanie dinamicheskikh processov v period formirovaniya i razvitiya blokiryushchego anticiklona nad Evropejskoj chast'yu Rossii letom 2010 g [Investigation of dynamic processes in the period of formation and development of the blocking anticyclone over European Russia in summer 2010], *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 48, no. 5, pp. 354-359

Volodin, E.M. (2010) O prirode nekotoryh sverhekstremal'nyh anomalij letnej temperatury [On the nature of some super-extreme summer temperature anomalies], *Analiz uslovij anomal'noj pogody na territorii Rossii*, pp. 48-57.

Kislov, A.V., Varcov, M.I., Tarasova, L.L. (2015) Rol' vesennej vlazhnosti pochvy v formirovanii krupnomasshtabnyh zasuh Vostochno-Evropejskoj ravniny 2002 i 2010 gg. [Role of spring soil moisture in the formation of large-scale droughts in the East European plain in 2002 and 2010]. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 51, no. 4, pp. 464-471.

Kulikova, I.A., Kruglova, E.N., Han, V.M. (2022) Ocenka prakticheskoy predskazuemosti blokiryushchih anticiklonov s ispol'zovaniem sovremennyh gidrodinamicheskikh modelej [Evaluation of practical predictability of blocking anticyclones using modern hydrodynamic models], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 5-23.

Lokoshchenko, M.A. (2012) Katastroficheskaya zhara 2010 goda v Moskve po dannym nazemnyh meteorologicheskikh izmerenij [Catastrophic Heat of 2010 in Moscow from Data of Ground-Based Meteorological Measurements], *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 48, no. 5, pp. 523-523.

Mohov, I.I. (2011) Osobennosti formirovaniya letnej zhary 2010 g. na Evropejskoj territorii Rossii v kontekste obshchih izmenenij klimata i ego anomalij [Specific Features of the 2010 Summer Heat Formation in the European territory of Russia in the Context of General Climate Changes and Climate Anomalies], *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 47, no. 6, pp. 709.

Mohov, I.I., Timazhev, A.V. (2022) Povtoryaemost' letnih atmosfernnyh blokirovaniy v Severnom polusharii v raznyh fazah yavlenij El'-Nin'o, Tihookeanskoj desyatiletnej i Atlanticheskoy mul'tidesyatiletnej oscillyacij [Frequency of summer atmospheric blockings in the Northern Hemisphere in different phases of El Niño and Pacific Decadal and Atlantic Multidecadal Oscillations], *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 58, no. 3, pp. 239-249.

Parshina, L.N. (2010) Pogoda na territorii Rossijskoj Federacii v iyule 2010 g. [Weather conditions in the Russian Federation in July 2010], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 100-104.

Revich, B.A., Shaposhnikov, D.A. (2012) Izmeneniya klimata, volny zhary i holoda kak faktory riska povyshennoj smernosti naseleniya v nekotorykh regionah Rossii [Climate change, heat waves, and cold spells as risk factors for increased mortality in some regions of Russia], *Problemy prognozirovaniya – Studies on Russian Economic Development*, no. 2, pp. 122-139.

Semenov, E.K., Sokolihina, N.N., Tudrij, K.O. (2012) K voprosu o regeneracii subtropicheskogo anticiklona kak faktore ego dal'nejshej stabilizacii (na primere leta 2010 g.) [On the problem of the subtropical anticyclone regeneration as a factor of its stabilization], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 5-15.

Shakina, N.P., Ivanova, A.R., Birman, B.A., Skriptunova, E.N. (2011) Blokirovaniye: usloviya leta 2010 g. v kontekste sovremennykh znaniy [Blocking: conditions in the summer of 2010 in the context of modern knowledge], *Analiz uslovij anomal'noj pogody na territorii Rossii letom 2010 goda (cb. dokladov)* pp. 6-21.

Añel, J.A., Fernández-González, M., Labandeira, X., López-Otero, X., De la Torre, L. (2017) Impact of cold waves and heat waves on the energy production sector, *Atmosphere*, vol. 8, № 11, p. 209.

Barriopedro, D., Fischer, E.M., Luterbacher, J., Trigo, R.M., García-Herrera, R. (2011) The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe, *Science*, vol. 332, pp. 220-224.

Black, E., Blackburn, M., Harrison, G., Hoskins, B., Methven, J. (2004) Factors contributing to the summer 2003 European heatwave, *Weather*, vol. 59, no. 8, pp. 217-223.

Chubarova, N., Nezval, Y., Sviridenkov, I., Smirnov, A., Slutsker, I. (2012) Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010, *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(3), pp. 557-568.

Di Capua, G., Sparrow, S., Kornhuber, K., Rousi, E., Osprey, S., Wallom, D., van den Hurk, B., Coumou, D. (2021) Drivers behind the summer 2010 wave train leading to Russian heatwave and Pakistan flooding, *Climate and Atmospheric Science*, vol. 4, no. 1, p. 55.

Dole, R., Hoerling, M., Perlwitz, J., Eischeid, J., Pegion, P., Zhang, T., Quan, X., Xu, T., Murray, D. (2011) Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? *Geophysical Research Letters*, vol. 38, no. 6.

Grumm, R.H. (2011) The central European and Russian heat event of July-August 2010, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 92, no. 10, pp. 1285-1296.

Hauser, M., Orth, R., Seneviratne, S.I. (2016) Role of soil moisture versus recent climate change for the 2010 heat wave in western Russia, *Geophysical Research Letters*, vol. 43, no. 6, pp. 2819-2826.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J. (2020) The ERA5 global reanalysis, *Quarterly journal of the royal meteorological society*, vol. 146, no. 730, pp. 1999-2049.

Jiménez-Esteve, B., Domeisen, D.I.V. (2022) The role of atmospheric dynamics and large-scale topography in driving heatwaves, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 148, no. 746, pp. 2344-2367.

Konovalov, I.B., Beekmann, M., Kuznetsova, I.N., Yurova, A., Zvyagintsev, A.M. (2011) Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 11, no. 19, pp. 10031-10056.

Kornhuber, K., Coumou, D., Vogel, E., Lesk, C., Donges, J.F., Lehmann, J., Horton, R.M. (2020) Amplified Rossby waves enhance risk of concurrent heatwaves in major breadbasket regions, *Nature Climate Change*, vol. 10, no. 1, pp. 48-53.

Lejens, H., Økland, H. (1983). Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data, *Tellus A*, vol. 35, no. 5, pp. 350-362.

Lobell, D.B., Field, C.B. (2007) Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming, *Environmental research letters*, vol. 2, no. 1, p. 014002.

Mario, E., Raffaele, L., Onofrio, C., Maria, C.S.J., Valentina, B., Vincenzo, G., Onofrio, C., Shao, C., Giovanni, S. (2024) Coupling heat wave and wildfire occurrence across multiple ecoregions within a Eurasia longitudinal gradient, *Science of the total environment*, vol. 912, pp. 169269.

McEvoy, D., Ahmed, I., Mullett, J. (2012) The impact of the 2009 heat wave on Melbourne's critical infrastructure, *Local environment*, vol. 17, no. 8, pp. 783-796.

Miralles, D.G., Teuling, A.J., Van Heerwaarden, C.C., Vilà-Guerau de Arellano, J. (2014) Mega-heatwave temperatures due to combined soil desiccation and atmospheric heat accumulation, *Nature Geoscience*, vol. 7, no. 5, pp. 345-349.

Miralles, D.G., Gentile, P., Seneviratne, S.I., Teuling, A.J. (2019) Land-atmospheric feedbacks during droughts and heatwaves: state of the science and current challenges, *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1436, no. 1, pp. 19-35.

Monteith, J., Unsworth, M. (2013) Principles of environmental physics: plants, animals, and the atmosphere, Academic press. Cambridge, MA., doi:10.1016/B978-0-12-386910-4.00013-5.

Nabizadeh, E., Lubis, S.W., Hassanzadeh, P. (2021) The 3D structure of northern hemisphere blocking events: Climatology, role of moisture, and response to climate change, *Journal of Climate*, vol. 34, no. 24, pp. 9837-9860.

Pr, J.C., Bessagnet, B., Mallet, M., Waquet, F., Chiapello, I., Minvielle, F., Pont, V., Menut, L. (2014) Direct radiative effect of the Russian wildfires and its impact on air temperature and atmospheric dynamics during August 2010, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 14, no. 4, pp. 1999-2013.

Rbbelke, D., Vgele, S. (2011) Impacts of climate change on European critical infrastructures: The case of the power sector, *Environmental science and policy*, vol. 14, no. 1, pp. 53-63.

Schneider, A., Schubert, S., Vargin, P., Lunkeit, F., Zhu, X., Peters, D.H., Fraedrich, K. (2012) Large-scale flow and the long-lasting blocking high over Russia: Summer 2010, *Monthly Weather Review*, vol. 140, no. 9, pp. 2967-2981.

Seneviratne, S.I., Cortia, T., Davina, E.L., Hirschia, M., Jaegera, E.B., Lehnera, I., Orlowskya, B., Teuling, A.J. (2010) Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review, *Earth-Science Reviews*, vol. 99, no. 3-4, pp. 125-161.

Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J., Cohen, M.D., Ngan, F. (2015) NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 96(12), pp. 2059-2077.

Thornton, P.K., van de Steeg, J., Notenbaert, A., Herrero, M. (2009) The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know, *Agricultural systems*, vol. 101, no. 3, pp. 113-127.

Trenberth, K.E., Fasullo, J.T. (2012) Climate extremes and climate change: The Russian heat wave and other climate extremes of 2010, *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, vol. 117, no. D17.

Schumacher, D.L., Keune, J., Van Heerwaarden, C.C., Vilà-Guerau de Arellano, J., Teuling, A.J., Miralles, D.G. (2019) Amplification of mega-heatwaves through heat torrents fuelled by upwind drought, *Nature Geoscience*, vol. 12, no. 9, pp. 712-717.

Wehrli, K., Guillod, B.P., Hauser, M., Leclair, M., Seneviratne, S.I. (2019) Identifying key driving processes of major recent heat waves, *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, vol. 124, no. 22, pp. 11746-11765.

Zhao, Q., Li, S., Ye, T., Wu, Y., Gasparrini, A., Tong, S., Urban, A., Vicedo-Cabrera, A.M., Tobias, A., Guo, Y. (2024) Global, regional, and national burden of heatwave-related mortality from 1990 to 2019: A three-stage modelling study, *PLoS medicine*, vol. 21, no. 5, pp. e1004364.

Статья поступила в редакцию (Received): 06.02.2026.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 15.03.2026.

Принята к публикации (Accepted): 21.03.2026.

Для цитирования / For citation

Моргунова, А.А., Семенов, В.А. (2026) Факторы формирования экстремальной приземной температуры во время волны тепла 2010 года на Европейской территории России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 12, № 2, с. 201-220, doi:10.21513/2410-8758-2026-2-201-220.

Morgunova, A.A., Semenov, V.A. (2026) Factors of the formation of extreme surface air temperatures during the 2010 heatwave in European Russia, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 12, no. 2, pp. 201-220, doi:10.21513/2410-8758-2026-2-201-220.