

Пространственная неоднородность летнего турбулентного теплообмена на равнинах России

Т.Б. Титкова^{}, А.Н. Золотокрылин*

Институт географии РАН,
Россия, 109017, Москва, Старомонетный пер., 29

^{*} Адрес для переписки: titkova@igras.ru

Реферат. Работа направлена на анализ статистических характеристик теплового баланса системы «подстилающая поверхность-атмосфера» на равнинах России с выявлением природных зон максимальных горизонтальных градиентов, а также оценку изменений пространственной неоднородности теплообмена в различных ландшафтных зонах на фоне интенсивного потепления. Горизонтальные градиенты турбулентного теплообмена рассматривались на равнинах России от арктической тундры до сухой степи и полупустынь в среднем за летний период 1991-2020 гг. Для исследования привлечены параметры потока явного и скрытого тепла из архива реанализа ERA5-Land с разрешением $0.1 \times 0.1^\circ$ по долготе и широте. Произведен анализ среднего, абсолютной и относительной изменчивости турбулентного теплообмена, а также их трендов с оценкой значимости и горизонтальных градиентов. По максимальным градиентам параметров выявлены районы повышенных горизонтальных градиентов турбулентного теплообмена.

В летний период одним из природных рубежей повышенных горизонтальных градиентов теплообмена на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири является зона средней тайги с примыкающими к ней частями северной и южной тайги. Неоднородность теплообмена на этой территории обусловлена квазистационарной вторичной ветвью Арктического фронта с повышенной повторяемостью выхода циклонов, поступающих из Атлантико-Европейского сектора, и положением здесь высотной фронтальной зоны, возникающей на стыке холодных и теплых воздушных масс. Второй природный рубеж повышенной неоднородности потоков тепла проходит в суббореальных ландшафтах, где также отмечаются повышенные горизонтальные градиенты климатических параметров и характеристик поверхности. Здесь возрастает поток суммарной радиации, увеличивается дефицит почвенной влаги и уменьшается сумма летних осадков.

Пространственная неоднородность турбулентного теплообмена увеличилась в начале XXI века севернее областей с максимальными горизонтальными градиентами турбулентного теплообмена. В субарктических ландшафтах Западной Сибири этот рост связан с общими положительными трендами приземной температуры и с участвовавшими положительными аномалиями летней температуры. В суббореальных ландшафтах на значимый рост потоков теплообмена оказывает влияние в основном рост летних темпе-

ратур и уменьшение увлажнения с одновременным ростом повторяемости атмосферных блокингов на востоке Восточно-Европейской равнины и в Западной Сибири.

Ключевые слова. Турбулентный теплообмен, явное тепло, скрытое тепло, горизонтальные градиенты, тренды, ландшафты.

The spatial heterogeneity of the summer turbulent heat exchange on the plains of Russia

T.B. Titkova^{}, A.N. Zolotokrylin*

Institute of Geography RAS,
29, Staromonetny lane, 109017, Moscow, Russian Federation

^{*}Correspondence address: *titkova@igras.ru*

Abstract. The article is aimed at the analysis of statistical characteristics of heat exchange on the plains of Russia. Nature zones with maximum horizontal spatial heterogeneity of turbulent heat exchange during the summer period are identified. Changes in the spatial heterogeneity of heat and exchange in different landscape zones against the background of intense warming are assessed. The spatial heterogeneity of turbulent heat exchange on the plains of Russia was considered for the summer period of 1991-2020 (on average). The are located from arctic tundra to dry steppe and semi-deserts. Parameters of sensible and latent heat fluxes is taken for the study from the archive of the ERA5-Land reanalysis. It's resolution for longitude and latitude is 0.1°. A statistical analysis of the turbulent heat exchange is performed with the estimation of mean values, absolute and relative variability, and their trends. Their significance and horizontal gradients also are assessed. Areas with elevated spatial heterogeneity of turbulent heat exchange are identified using maximal horizontal gradients of parameters.

During summer period, the zone of the middle taiga with adjacent parts of northern and southern taiga is one of the natural limits for areas with elevated spatial heterogeneity of heat exchange on the East European Plain and in Western Siberia. Increased horizontal gradients of the heat exchange on this territory result from the quasi-stationary secondary brunch of the Arctic front with increased repeatability of cyclones coming from the Atlantic-European sector, and from the location of the high-altitude frontal zone that occurs at the intersection of cold and warm air masses. The second nature frontier of elevated spatial heterogeneity of heat fluxes is found in subboreal landscapes. The have elevated horizontal gradients of climate parameters and surface characteristics. The flux of total radiation and the deficit of soil moisture increase there, while the sum of summer precipitation decreases.

The horizontal spatial heterogeneity of the vertical heat exchange increased at the beginning of the XXI century. This occurred mainly to the north of zones with maximum horizontal gradients of the turbulent heat exchange. In subarctic landscapes of Western Siberia, the growth was connected with general positive

surface temperature trends and with increasing positive anomalies of summer temperature. In subboreal landscapes, the significant growth of fluxes of heat exchange is also resulted mainly from the growth of summer temperatures and the decrease of humidification along with simultaneous increase in repeatability of atmospheric blocking in the east of the East European Plain and in Western Siberia.

Keywords. Turbulent heat exchange, sensible heat, latent heat, horizontal gradients, trends, landscapes.

Введение

Природная зона со своим типом растительности является одним из ключевых факторов, влияющим на энергетический обмен между поверхностью суши и атмосферой. В северных зональных ландшафтах турбулентные потоки тепла во многом определяются адвекцией тепла и повышением температуры (Тепловодообмен..., 2007; Kodama et al., 2000). Летом в субарктических и бореальных ландшафтах почва и воздух прогреваются в разной степени в зависимости от типа растительности: чем гуще растительность, тем быстрее прогревается земля (Jacqueline et al., 2022; Kropp et al., 2020). В южных ландшафтах на поток явного тепла наибольшее влияние оказывает возрастающая результирующая радиация, а поток скрытого тепла более чувствителен к осадкам и в основном зависит от влажности почвы (Guo Zhang et al., 2010; Bonan, 2015).

В целом, оценки линейных трендов потоков скрытого и явного тепла (основанные на реанализе NCEP-NCAR) показали, что из-за повышения температуры поверхности ожидается увеличение восходящих тепловых потоков (Gulev, Velyaev, 2012). На колебание составляющих теплового баланса наибольшее влияние оказывает общий положительный тренд температуры, что на Европейской части России (ЕТР) составляет $0.46^{\circ}\text{C}/10$ лет, а в Западной Сибири (ЗС) $0.26^{\circ}\text{C}/10$ лет за летний период 1976-2020 гг. (Третий..., 2022). Также на турбулентные потоки тепла заметное влияние оказывают колебание общей циркуляции атмосферы, выраженное ослабление зональной атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе и повышение повторяемости числа дней с атмосферными блокинами на востоке ЕТР (Бардин и др., 2019, 2021).

Зоны максимальной неоднородности теплообмена разграничивают глобальные области структур баланса тепла и влаги земной поверхности, обусловленные особенностями динамики атмосферной циркуляции. При этом зонам с максимальными горизонтальными градиентами теплообмена свойственна пространственно-временная динамика границ. Предпосылки изменения пространственной неоднородности теплообмена в системе «подстилающая поверхность – атмосфера» во многом зависят от глобальных и региональных изменений климатических условий и обусловлены природной зоной, подчиняясь зональным закономерностям и аональным особенностям.

Целью работы является анализ статистических характеристик теплообмена на равнинах России с выявлением природных зон с максимальными

горизонтальными градиентами турбулентного теплообмена в летний период, а также оценка изменений горизонтальных градиентов теплообмена в различных ландшафтных зонах на фоне интенсивного потепления.

Объекты, материалы и методы исследования

Территория исследования – ЕТР и ЗС, представленная природными ландшафтами России от арктической тундры до сухой степи и полупустынь. Рассмотрены летние сезоны (июнь-август) за тридцатилетний период 1991-2020 гг.

Для исследований турбулентных потоков теплообмена привлечен архив ежемесячных усредненных данных реанализа пятого поколения ERA5-Land с разрешением $0.1 \times 0.1^\circ$ (<https://climate.copernicus.eu/>). Использовался поток явного тепла SL (Дж/м²), поток скрытого тепла SS (Дж/м²). Поток явного тепла – это перенос тепла между поверхностью Земли и атмосферой за счет турбулентного движения воздуха, исключая любой перенос тепла в результате конденсации или испарения. Величина потока явного тепла определяется разницей температур между поверхностью и вышележащей атмосферой, скоростью ветра и шероховатостью поверхности. Поток скрытого тепла – это обмен скрытым теплом с поверхностью, посредством турбулентной диффузии. Эти переменные одного уровня, и они накапливаются с начала времени прогноза до конца шага прогноза, в данном случае за месяц. По соглашению ECMWF для вертикальных потоков положительное значение указывает на поток вниз. По оценкам (Muñoz-Sabater et al., 2021), реанализ ERA5-Land имеет общую 4%-ю ошибку в данных у береговой линии из-за вклада в расчет прибрежных точек, где важно пространственное разрешение.

Разделение функций передачи тепла атмосфере между явным и скрытым теплом непосредственно влияет на приземный климат. Поэтому был произведен расчет отношений потоков явного и скрытого тепла, выраженных коэффициентом Боуэна. Отношение Боуэна – это отношение энергии, доступной для явного нагрева (разница температур без эвапотранспирации), к энергии, доступной для скрытого нагрева (энергия, необходимая для изменения состояния, без изменения температуры). Коэффициент Боуэна используется для описания типа теплопередачи для поверхности, имеющей влажность. Коэффициент Боуэна используется для расчета потери (или получения) тепла. В нашей работе, для расчета отношения Боуэна, мы использовали отношение потоков SL/SS. Если отношение Боуэна больше 1, явное тепло играет большую роль в передаче тепла атмосфере, чем скрытое. Поскольку большая часть тепла отдается атмосфере в явном, а не скрытом виде, климат должен быть относительно теплым. С другой стороны, если отношение Боуэна меньше 1, то большую роль играет скрытое тепло и теплообмен с атмосферой происходит, главным образом, за счет теплоты фазовых переходов, которая не приводит к потеплению нижних слоев воздуха, но может увеличить их влаго-содержание. Поэтому климат будет холодным и влажным.

Для каждого узла данных с шагом 0.1° вычислялось среднее, тренды, стандартное отклонение, коэффициент вариации турбулентных потоков теплообмена и отношения Боуэна за летний период 1991-2020 гг. Были рассчитаны горизонтальные градиенты потоков явного и скрытого тепла для средне-летних значений. Под градиентом параметров понимается вектор, характеризующий их изменение на единицу расстояния. Подробная методика расчета горизонтальных градиентов приведена в работе (Титкова и др., 2020). В данной работе градиенты потоков вычислялись с шагом в 1° широты и долготы за каждый летний сезон 1991-2020 гг. Для этого было произведено осреднение данных с шагом 1° по сетке. По ним были получены тренды градиентов потоков со скоростью в 10 лет с оценкой значимости на 5%-м уровне по критерию Стьюдента. Рассмотрены межгодовые колебания горизонтальных градиентов вертикальных потоков тепла в природных зонах. Для обработки массивов данных и их картографирования использовался пакет анализа MATLAB.

Результаты

Статистические характеристики потоков теплообмена

Передача тепла от природных зон ЕТР атмосфере максимальна в суббореальных ландшафтах, особенно в полупустынных (более 6 МДж/м^2), что обусловлено высокой суммарной радиацией при разреженной растительности (рис. 1, Ia). По направлению к северу в бореальных зонах передача тепла снижается в подтаежных и южно-таежных ландшафтах. Здесь значения потоков тепла не превышают 3 МДж/м^2 . Поток тепла вновь увеличивается в северотаежных ландшафтах, что обусловлено как климатическими условиями – выходом полярных воздушных масс с Атлантики, так и типом лесной растительности с густым пологом. Севернее – в северных бореальных и субарктических ландшафтах – многолетняя мерзлота летом при разреженной растительности уменьшает поглощение тепла почвой и снижает температуру ее поверхности и, следовательно, передачу тепла атмосфере. На территории ЗС максимальный поток явного тепла наблюдается в суббореальных ландшафтах (сухостепная зона), который постепенно уменьшается в северном направлении. В бореальных ландшафтах (вблизи границы средней и северной тайги) отмечается возрастание потока, а затем к северу происходит новое снижение с последующей его стабилизацией в субарктических ландшафтах.

Как видно из рис. 1, Ib абсолютная изменчивость потоков тепла (среднеквадратическое отклонение) увеличивается с их ростом в суббореальных ландшафтах ЕТР, но при этом наблюдается отклонение распределения абсолютной изменчивости по сравнению с широтным изменением самих потоков в бореальных ландшафтах. Оно выражается в формировании меридиональной области повышенной абсолютной изменчивости потоков явного тепла, простирающейся от субарктических до суббореальных ландшафтов. Повышенные значения абсолютной изменчивости потоков в ЗС имеют скорее меридиональ-

ное распределение, чем зональное. Максимальные значения относительной изменчивости потоков наблюдаются в лесостепной зоне Зауралья.

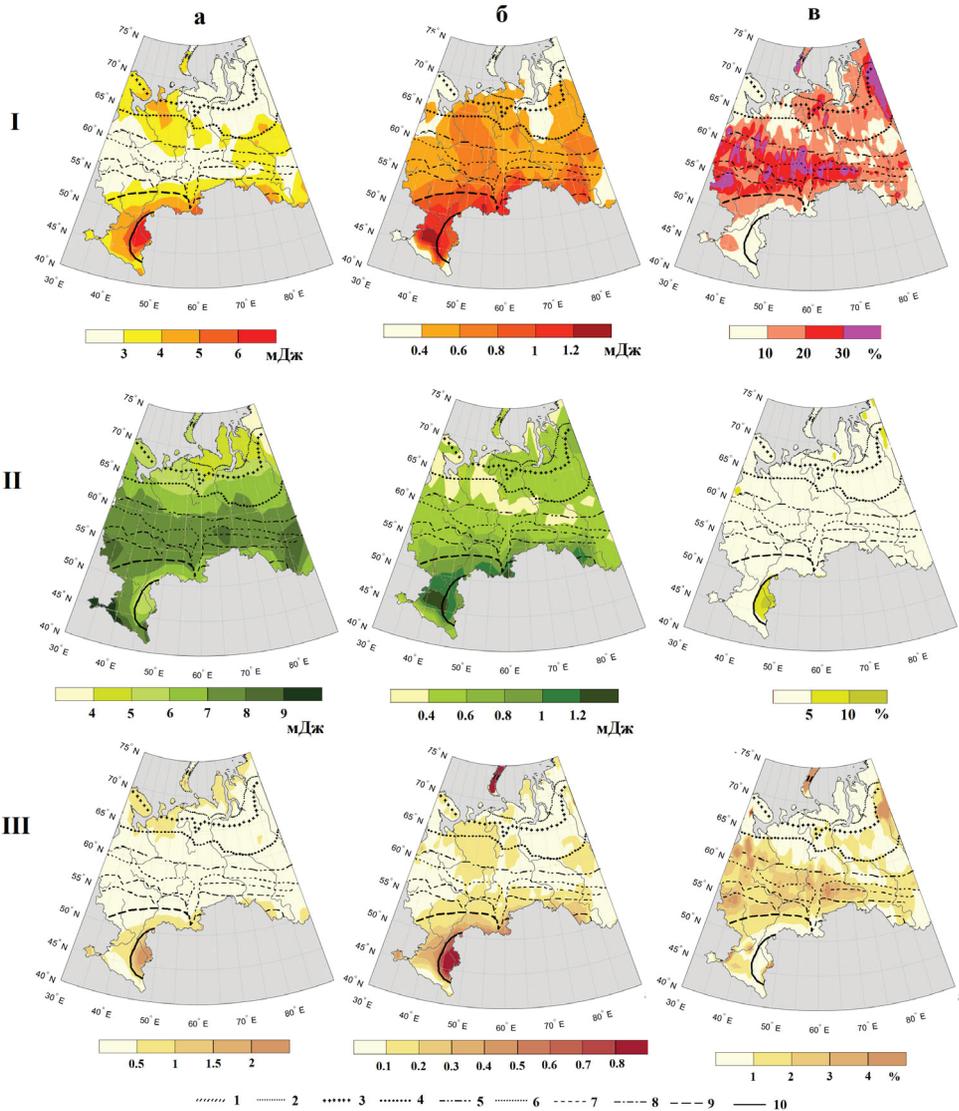


Рисунок 1. Статистические характеристики потока явного тепла (I), потока скрытого тепла (II), отношения Боуэна (III) за июнь-август, 1991-2020 гг.

a) среднее, б) среднеквадратическое отклонение, в) коэффициент вариации. Условные обозначения южных границ ландшафтных зон: 1 – Арктические; Субарктические (2 – Тундровые, 3 – Лесотундровые); Бореальные (4 – Северотаёжные, 5 – Среднетаёжные, 6 – Южнотаёжные, 7 – Подтаёжные, 8 – Широколиственно-лесные); Суббореальные (9 – Лесостепные, 10 – Степные типичные и сухостепные)

Figure 1. Statistical characteristics of the sensible heat flux (I), latent heat flux (II), Bowen ratio (III) from June to August, 1991-2020

a) mean, b) standard deviation, c) coefficient of variation. The legend for southern borders of landscape zones: 1 – Arctic; Subarctic (2 – Tundra, 3 – Forest tundra); Boreal (4 – North taiga, 5 – Middle taiga, 6 – South taiga, 7 – Subtaiga, 8 – Broad-leaved forest); Subboreal (9 – Forest steppe, 10 – Typical steppe and dry steppe)

Относительная изменчивость потоков тепла (коэффициент вариации) имеет мозаичную структуру на ЕТР с максимальными значениями преимущественно в северной части суббореальных ландшафтов (подтаежных и широколиственно-лесных) (рис. 1, IV). Совокупность данных потоков явного тепла в целом можно считать однородной. Коэффициент вариации незначителен ($< 10\%$) на севере и юге ЕТР. Рассеивание данных больше 30% встречается в основном на ЕТР в зоне южной тайги и в подтаежных ландшафтах.

Тренды потока явного тепла разнонаправлены на территории ЕТР и ЗС (рис. 2а) и на большей части незначимы. Отрицательный тренд характерен в западной части бореальных ландшафтов и в субарктических ландшафтах ЕТР. Напротив, тренды потоков явного тепла положительны в суббореальных ландшафтах ЕТР. Отрицательные тренды доминируют в субарктических и бореальных ландшафтах ЗС. Положительные значимые тренды наблюдаются в суббореальных (сухостепных) ландшафтах ЗС. На фоне повышения средней температуры (Третий..., 2022) тренд потока явного тепла увеличивается и составляет $4\text{--}6\%$ /10 лет.

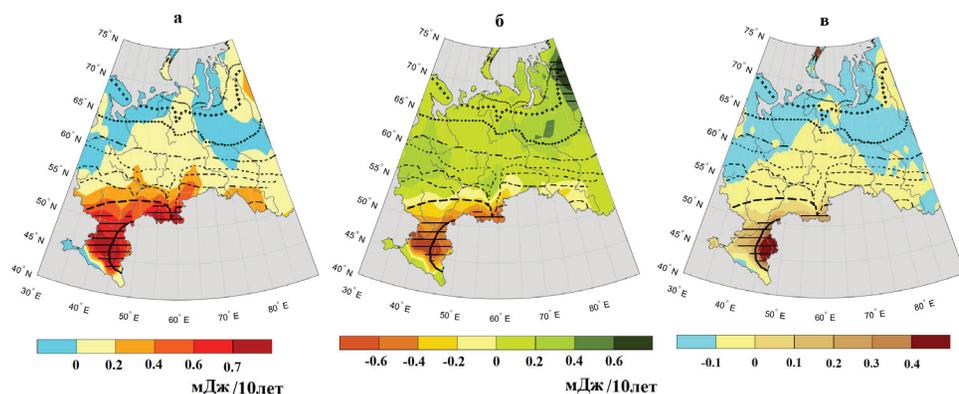


Рисунок 2. Линейный тренд /10 лет потока явного тепла (а), потока скрытого тепла (б), отношения Боуэна (в) за июнь-август, 1991-2020 гг.

Значимые тренды показаны штриховкой. Условные обозначения см. рис. 1

Figure 2. Linear trend /10 years of the sensible heat flux (a), the latent heat flux (b), Bowen ratio (c) from June to August, 1991-2020

Significant trends are shown by hatching. For legend see Fig. 1

Потоки скрытого тепла (рис. 1, IIa) возрастают при смене бореальных ландшафтов суббореальными на ЕТР и ЗС, уменьшаясь при этом как в северном, так и в южном направлении. Абсолютная и относительная изменчивость потоков скрытого тепла достигает максимальных значений в суббореальных (сухостепных и полупустынных) ландшафтах. Степень рассеивания данных незначительна (меньше 10%) (рис. 1, IIб, в). Тренды потоков скрытого тепла в большей части незначимы и имеют положительные тенденции в бореальных ландшафтах, которые сменяются на отрицательные в суббореальных ландшафтах (рис. 2б).

Как видно из рис. 1, III, на значительной части территории бореальных, а также в части суббореальных ландшафтов отношение Боуэна не превышает 0.5 , что указывает на влажный климат территории с умеренно теплым летом

(Григорьев, Будыко, 1965). При повышении отношения Боуэна в степной зоне возрастает сухость климата, который характеризуется как недостаточно влажный с теплым или очень теплым летом. Абсолютная и относительная изменчивость отношения Боуэна повышается как в бореальных, так и в суббореальных ландшафтах. Положительный тренд отмечается преимущественно в недостаточно увлажненных суббореальных ландшафтах, в то время как в бореальных ландшафтах с влажным климатом наблюдается отрицательный тренд отношения Боуэна (рис. 2в).

Зоны пространственной неоднородности турбулентного теплообмена

На равнинах России обширная полоса максимальных горизонтальных градиентов турбулентных потоков явного и скрытого тепла покрывает всю зону средней тайги и примыкающие к ней части северной и южной тайги (рис. 3а, б). Эта зона максимальных градиентов потоков явного и скрытого тепла обусловлена широтной зональностью, а также типом растительности. На севере, в субарктических и части северных бореальных ландшафтов, многолетняя мерзлота летом при разреженной растительности вызывает поглощение тепла почвой, которое снижает температуру поверхности и, следовательно, поток тепла в атмосферу. При переходе в среднюю тайгу, где доминируют хвойные вечнозеленые леса, рост суммарной радиации увеличивает проводимость полого. В южной тайге с более разнообразной растительностью и густым пологом растет эвапотранспирация (Wild et al., 2013; Eugster et al., 2000). В результате горизонтальный градиент потоков тепла увеличивается между этими природными зонами.

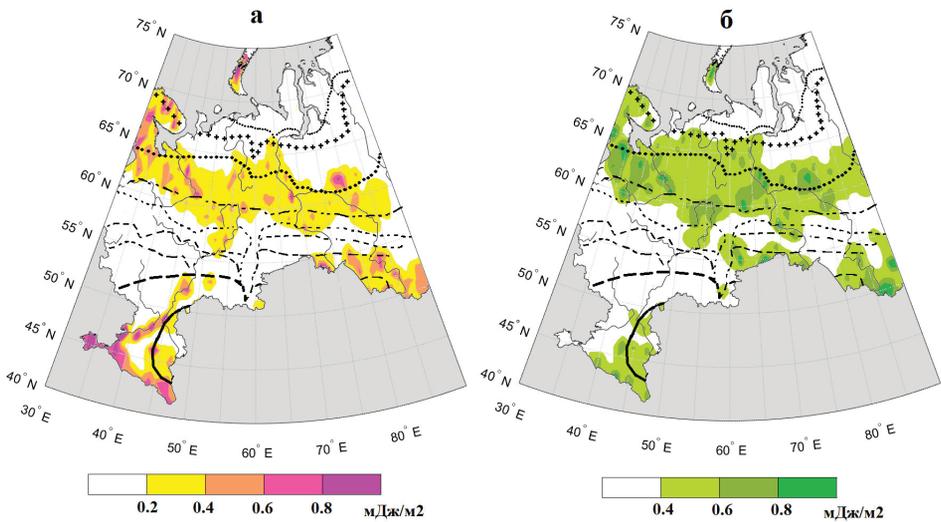


Рисунок 3. Горизонтальные градиенты потоков теплообмена на равнинах России за июнь-август, в расчете на 1° широты и долготы за 1991-2020
а) явного тепла, б) скрытого тепла. Условные обозначения см. рис. 1

Figure 3. Horizontal gradients of heat fluxes at the plains of Russia, from June to August, per 1° of latitude and longitude, 1991-2020
а) sensible heat, б) latent heat. For legend see Fig. 1

Вторая полоса повышенных горизонтальных градиентов явного тепла проходит в суббореальных ландшафтах сухой степи на ЕТР и в степях ЗС (см. рис. 2а). В зоне степей возрастает поток результирующей радиации, увеличивается дефицит почвенной влаги и уменьшается сумма летних осадков (Guo Zhang et al., 2010; Bonan, 2015). Эта полоса повышенных горизонтальных градиентов потоков тепла сопровождается максимальными горизонтальными градиентами летней температуры воздуха, а также *июльских осадков* и характеристик поверхности (NDVI, эвапотранспирации, влажности почвы) (Титкова, Золотокрылин, 2020, 2022).

Тренды горизонтальных градиентов вертикальных потоков тепла

Зоны максимальных трендов потоков явного и скрытого тепла сопряжены с областями повышенной неоднородности растительного компонента ландшафтов. Пространственная неоднородность турбулентного теплообмена увеличилась в начале XXI века в основном севернее самих областей с максимальными горизонтальными градиентами турбулентного теплообмена (рис. 4). Заметный рост турбулентного теплообмена отмечается в субарктических ландшафтах ЗС. Это касается в основном потоков скрытого тепла при мозаичном увеличении потоков явного тепла. На увеличение турбулентного теплообмена влияет общий положительный тренд средней летней температуры в этом районе до $0.4-0.6^\circ / 10$ лет (Третий..., 2022), а также участвовавшие здесь положительные аномалии летних температур, в особенности в июне и августе (Титкова, Золотокрылин, 2023).

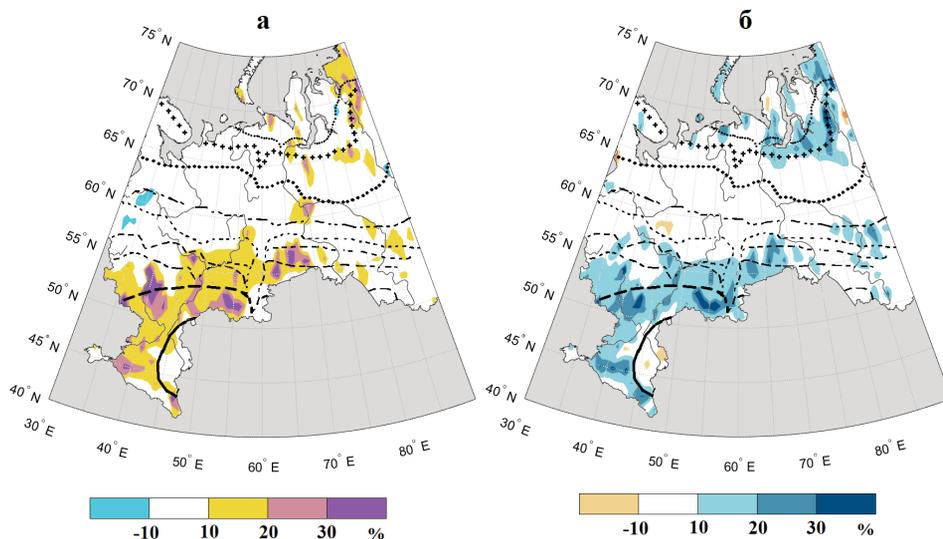


Рисунок 4. Значимый линейный тренд градиентов (% / 10 лет) потоков теплообмена за июнь-август 1991-2020 гг.

а) явного тепла, б) скрытого тепла. Тренд значим при значениях $>$ ($<$) 10%.
Условные обозначения см. рис. 1

Figure 4. Significant linear trend of gradients (% / 10 лет) of heat fluxes, from June to August, 1991-2020

а) sensible heat, б) latent heat. The trend is significant at values $>$ ($<$) 10%.
For legend see Fig. 1

Значимый рост трендов потоков явного тепла отмечается в суббореальных ландшафтах ЕТР (степь и частично лесостепь). Здесь за 1991-2020 гг. наблюдалось усиление температурных градиентов, что привело к активному росту турбулентного теплообмена, снижению влажности почвы и эвапотранспирации, значительному иссушению территории (Титкова, Золотокрылин, 2022).

Межгодовое изменение горизонтальных градиентов потоков теплообмена в некоторых ландшафтных зонах ЕТР и ЗС представлено на рис. 5. Значимый тренд горизонтальных градиентов потоков тепла отмечается в лесотундре ЗС, а также в степных и сухостепных ландшафтах ЕТР и ЗС. Горизонтальный тренд градиентов в зоне среднетаежных ландшафтов ЕТР и ЗС с наибольшими горизонтальными градиентами тепла не выражен.

Обсуждение результатов и выводы

На равнинах России выявлены районы повышенной пространственной неоднородности турбулентного теплообмена. Одним из природных рубежей повышенных горизонтальных градиентов теплообмена на ЕТР и ЗС летом является вся зона средней тайги с примыкающими к ней частями как северной, так и южной тайги. В летний период здесь проходит квазистационарная вторичная ветвь климатического Арктического фронта, которая разделяет субарктический (арктический трансформированный) и умеренный воздух. Она локализуется в западной части ЕТР в зоне южнотаежных лесов, ближе к Уралу – в зоне среднетаежных лесов, а в Западной Сибири – в области перехода от среднетаежных к северотаежным лесам (Титкова и др., 2015). Для этой территории характерна повышенная повторяемость выхода циклонов, поступающих из Атлантико-Европейского сектора (Бардин и др., 2015). Повышенная циклоническая активность связана с положением высотной фронтальной зоны, возникающей на стыке холодных и теплых воздушных масс (Вязилова, Вязилов, 2020). Согласно климатическому районированию, западная часть территории характеризуется влажным климатом с умеренно теплым летом и мягкой зимой. Отношение Боуэна составляет в среднем 0.5.

Второй природный рубеж пространственной неоднородности потоков тепла проходит в суббореальных ландшафтах, где возрастает поток результирующей радиации, увеличивается дефицит почвенной влаги и уменьшается сумма летних осадков. Здесь отмечаются повышенные горизонтальные градиенты климатических параметров и характеристик поверхности (Титкова, Золотокрылин, 2022). Климат этих ландшафтов континентальный, отличается большей продолжительностью безморозного периода и большей сухостью. Отношение Боуэна здесь больше 1.

Неоднородность турбулентного теплообмена увеличилась в начале XXI века севернее самих областей с максимальными горизонтальными градиентами турбулентного теплообмена. В субарктических ландшафтах ЗС на это влияет общий положительный тренд летней температуры с участвовавшими здесь положительными аномалиями температуры (Третий, 2022; Титкова, Золотокры-

лин, 2023). В суббореальных ландшафтах на значимый рост потоков теплообмена оказывает влияние рост летних температур и уменьшение увлажнения (Титкова, Золотокрылин, 2022). Летнее увеличение неоднородности теплообмена на фоне увеличения температуры вызывается ростом повторяемости атмосферных блокировок на востоке ЕТР и западе Сибири (Бардин, 2019; Бардин, 2021).

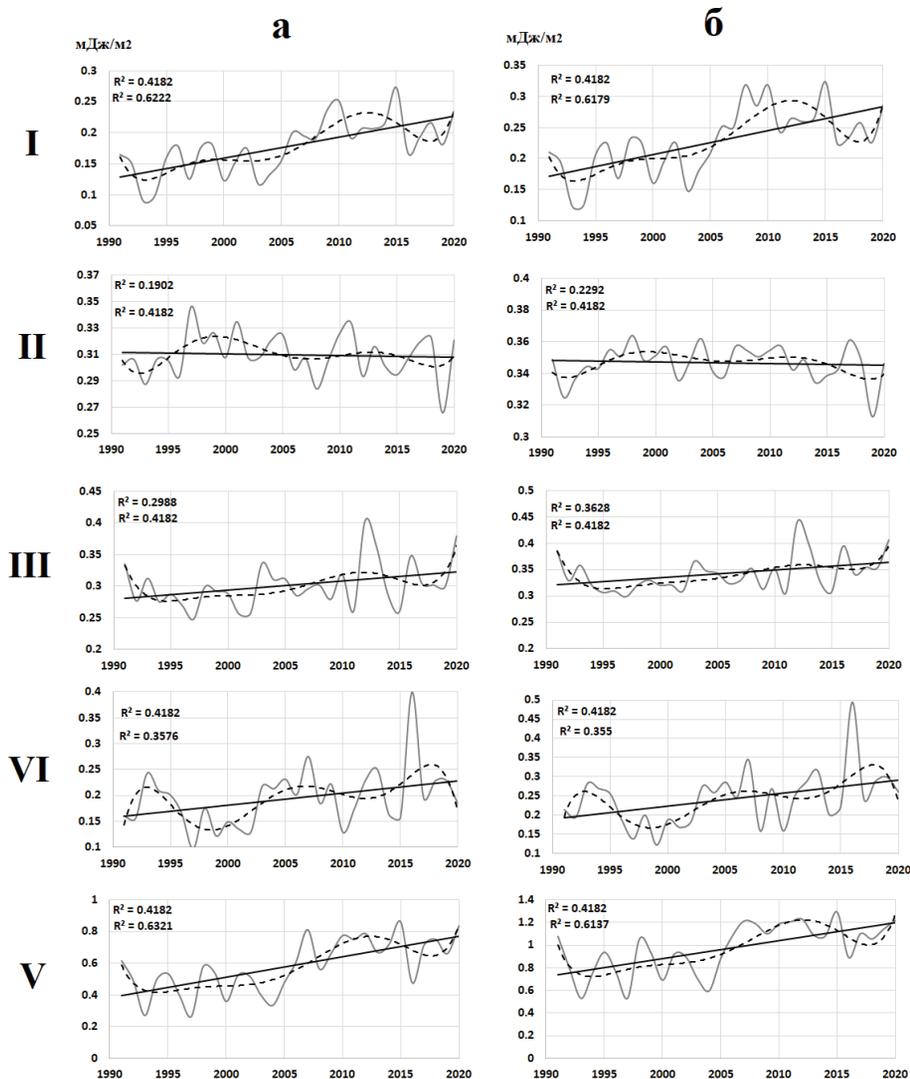


Рисунок 5. Изменения горизонтальных градиентов потоков теплообмена в некоторых ландшафтных зонах Европейской территории России и Западной Сибири за летний период с линейным трендом и полиномом 6-й степени: а) явное тепло, б) скрытое тепло
 Ландшафтные зоны: I лесотундра Западной Сибири, II средняя тайга Европейской части России, III средняя тайга Западной Сибири, IV степь Европейской части России, V сухая степь Европейской части России

Figure 5. Changes in horizontal gradients of heat fluxes in some landscape zones of the European territory of Russia and Western Siberia, for the summer period with linear trend and polynomial of degree 6: а) sensible heat, б) latent heat
 Landscape zones: I forest tundra of Western Siberia, II middle taiga of the European part of Russia, III middle taiga of Western Siberia, IV steppe of the European part of Russia, V dry steppe of the European part of Russia

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00047 «Структура потоков тепла и влаги в зональных равнинных ландшафтах России в условиях глобального потепления».

Список литературы

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф. (2021) Долгопериодные изменения повторяемости циклонов в умеренных широтах Северного полушария, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 7, № 2, с. 57-80, doi: 10.21513/2410-8758-2021-2-57-80.

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф. (2019) Изменчивость антициклонической активности в умеренных широтах Северного полушария, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 3, с. 32-58, doi: 10.21513/0207-2564-2019-3-32-58.

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф. (2015) Особенности изменчивости циклонической активности в умеренных широтах Северного полушария, связанные с ведущими модами циркуляции в Атлантико-Европейском секторе, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 2, с. 14-40.

Вязилова, Н.А., Вязилов, А.Е. (2020) Климатологии штормовых циклонов, выходящих на европейскую территорию России из различных районов генезиса, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, № 186, с. 90-100.

Григорьев, А.А., Будыко, М.И. (1965) Связь балансов тепла и влаги с интенсивностью географических процессов, *Доклады Академии наук СССР*, т. 162, № 1, с. 151.

Тепловодообмен в мерзлотных ландшафтах Восточной Сибири и его факторы (2007) Тверь, ИГРАН, ИМСО, Изд. Москва, 576 с.

Титкова, Т.Б., Золотокрылин, А.Н. (2023) Климат зональных ландшафтов равнин России при современном глобальном потеплении в летний период, *Известия, серия географическая*, т. 87, № 3, с. 391-402, doi: 10.31857/S2587556623030111.

Титкова, Т.Б., Золотокрылин, А.Н. (2022) Летние климатические изменения на юге Европейской России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 1, с. 107-121, doi: 10.21513/2410-8758-2022-1-107-121.

Титкова, Т.Б., Золотокрылин, А.Н., Виноградова, В.В. (2020) Климатический рубеж в Северном Прикаспии: индикаторы и размещение, *Известия РАН, серия географическая*, т. 84, № 6, с. 864-873, doi: 10.31857/S2587556620050167.

Титкова, Т.Б., Виноградова, В.В., Михайлов, А.Ю. (2015) Климатические вариации Арктического фронта в теплый период года и их проявления в

ландшафтах севера, *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, № 4, с. 39-46.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2022) под ред. В.М. Катцова, Росгидромет, Санкт-Петербург, Научно-технологические технологии, 676 с.

Bonan, G. (2015) Surface Energy Fluxes, *Ecological Climatology: Concepts and Applications*, 3rd edn., Cambridge University Press, available at: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107339200>.

Eugster, W. et al. (2000) Land-atmosphere energy exchange in Arctic tundra and boreal forest: available data and feedbacks to climate, *Glob. Chang. Biol.*, vol. 6, pp. 84-115.

Gulev, S.K., Belyaev, K. (2012) Probability Distribution Characteristics for Surface Air–Sea Turbulent Heat Fluxes over the Global Ocean, *Journal of Climate*, vol. 25, no. 1, pp. 184-206, doi: 10.1175/2011jcli4211.1.

Guo, Zhang, Guang-Sheng, Zhou, Fu-Lin, Yang (2010) Dynamics of sensible and latent heat fluxes over a temperate desert steppe ecosystem in Inner Mongolia, *Mar*, 21(3), pp. 597-603.

Jacqueline, Oehri et al. (2022) Vegetation type is an important predictor of the arctic summer land surface energy budget, *Nature Communications*, vol. 13(1), p. 6379, doi: 10.1038/s41467-022-34049-3.

Muñoz-Sabater, J. et al. (2021) ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 13, pp. 4349-4383, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>.

Kodama, Y., Ishii, Y., Nomura, M., Sato, N., Yabuki, H., Ohata, T. (2000) Seasonal energy exchange over tundra region near Tiksi, *Eastern Siberia, Act. Rep. GAME-Siberia*, pp. 13-14.

Kropp, H. et al. (2020) Shallow soils are warmer under trees and tall shrubs across Arctic and Boreal ecosystems, *Environ. Res. Lett.*, no. 16, p. 015001.

Wild, M., Folini, D., Schar, C., Loeb, N., Dutton, E.G., Konig-Langlo, G. (2013) The global energy balance from a surface perspective, *Clim. Dyn.*, no. 40, pp. 3107-3134.

References

Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Samokhina, O.F. (2021) Dolgoperiodnye izmeneniya povtoryaemosti ciklonov v umerennyh shirotah severnogo polushariya [Long-period variations of cyclone frequency in the northern extratropics], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 7, no. 2, pp. 57-80, doi: 10.21513/2410-8758-2021-2-57-80.

Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Samokhina, O.F. 2019. Izmenchivost' anticiklonicheskoy aktivnosti v umerennyh shirotah Severnogo polushariya

[Variability of anti-cyclonic activity in the northern extratropics], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, no. 3, pp. 32-58, doi: 10.21513/0207-2564-2019-3-32-58.

Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Samokhina, O.F. (2015) Osobennosti izmenchivosti ciklonicheskoy aktivnosti v umerenny`x shirotax Severnogo polushariya, svyazanny`e s vedushhimi modami cirkulyacii v Atlantiko-Evropejskom sektore [Features of the variability of cyclonic activity in the temperate latitudes of the Northern Hemisphere associated with the leading circulation modes in the Atlantic-European sector], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, no. 2, pp. 14-40.

Vyazilova, N.A., Vyazilov, A.E. (2020) Klimatologii shtormovy`x ciklonov, vy`xodyashhix na evropejskuyu territoriyu Rossii iz razlichny`x rajonov genezisa [Climatology of storm cyclones entering the European territory of Russia from various regions of genesis], *Trudy` VNIIGMI-MCD*, no. 186, pp. 90-100.

Grigoriev, A.A., Budyko, M.I. (1965) Svyaz` balansov tepla i vlagi s intensivnost`yu geograficheskix processov [Relationship between heat and moisture balances and the intensity of geographic processes], *Doklady` Akademii nauk SSSR*, vol. 162, no. 1, p. 151.

Teplovodoobmen v merzlotny`x landshaftax Vostochnoj Sibiri i ego faktory` [Heat and water exchange in the permafrost landscapes of Eastern Siberia and its factors] (2007) IGRAN, IMSO, Tver, Moscow, Russia, 576 p.

Titkova, T.B., Zolotokrylin, A.N. (2023) Klimat zonal`ny`x landshaftov ravnin Rossii pri sovremennom global`nom poteplenii v letnij period [Climate of zonal landscapes of the Russian plains under modern global warming in the summer], *Izvestiya ser. Geograficheskaya*, vol. 87, no. 3, pp. 391-402, doi: 10.31857/S2587556623030111.

Titkova, T.B., Zolotokrylin, A.N. (2022) Letnie klimaticheskie izmeneniya na yuge Evropejskoj Rossii [Summer climate changes in the south of European Russia], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 8, no. 1, pp. 107-121, doi: 10.21513/2410-8758-2022-1-107-121.

Titkova, T.B., Zolotokrylin, A.N., Vinogradova, V.V. (2020) Klimaticheskij rubezh v Severnom Prikaspii: indikatory i razmeshchenie [Climatic Frontier in the Northern Caspian Region: Indicators and Location], *Izvestiya RAN, seriya geograficheskaya*, no. 6, pp. 864-873, doi: 10.31857/S2587556620050167.

Titkova, T.B., Vinogradova, V.V., Mixajlov, A.Yu. (2015) Klimaticheskie variacii Arkticheskogo fronta v teply`j period goda i ix proyavleniya v landshaftax severa [Climatic variations of the Arctic front in the warm season and their manifestations in the landscapes of the north], *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, no. 4, pp. 39-46.

Tretij ocenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [The third assessment report on climate change and

its consequences on the territory of the Russian Federation] (2022) In V.M. Kattsov, High technology, Roshydromet, St. Petersburg, Russia, 676 p.

Bonan, G. (2015) Surface Energy Fluxes, *Ecological Climatology: Concepts and Applications*, 3rd edn., Cambridge University Press, available at: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107339200>.

Eugster, W. et al. (2000) Land-atmosphere energy exchange in Arctic tundra and boreal forest: available data and feedbacks to climate, *Glob. Chang. Biol.*, vol. 6, pp. 84-115.

Gulev, S.K., Belyaev, K. (2012) Probability Distribution Characteristics for Surface Air–Sea Turbulent Heat Fluxes over the Global Ocean, *Journal of Climate*, vol. 25, no. 1, pp. 184-206, doi: 10.1175/2011jcli4211.1.

Guo, Zhang, Guang-Sheng, Zhou, Fu-Lin, Yang (2010) Dynamics of sensible and latent heat fluxes over a temperate desert steppe ecosystem in Inner Mongolia, *Mar*, 21(3), pp. 597-603.

Jacqueline, Oehri et al. (2022) Vegetation type is an important predictor of the arctic summer land surface energy budget, *Nature Communications*, vol. 13(1), p. 6379, doi: 10.1038/s41467-022-34049-3.

Muñoz-Sabater, J. et al. (2021) ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 13, pp. 4349-4383, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>.

Kodama, Y., Ishii, Y., Nomura, M., Sato, N., Yabuki, H., Ohata, T. (2000) Seasonal energy exchange over tundra region near Tiksi, *Eastern Siberia, Act. Rep. GAME-Siberia*, pp. 13-14.

Kropp, H. et al. (2020) Shallow soils are warmer under trees and tall shrubs across Arctic and Boreal ecosystems, *Environ. Res. Lett.*, no. 16, p. 015001.

Wild, M., Folini, D., Schar, C., Loeb, N., Dutton, E.G., Konig-Langlo, G. (2013) The global energy balance from a surface perspective, *Clim. Dyn.*, no. 40, pp. 3107-3134.

Поступила в редакцию: 25.09.2023 г.

Доработана после рецензирования: 17.10.2023 г.

Принята к публикации: 06.11.2023 г.

Для цитирования / For citation:

Титкова, Т.Б., Золотокрылин, А.Н. (2023) Пространственная неоднородность летнего турбулентного теплообмена на равнинах России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 4, с. 467-481, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-467-481.

Titkova, T.B., Zolotokrylin, A.N. (2023) The spatial heterogeneity of the summer turbulent heat exchange on the plains of Russia, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 4, pp. 467-481, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-467-481.