

Взаимосвязь турбулентного теплообмена и NDVI в различных ландшафтных зонах равнин России в летний период

Т. Б. Титкова¹, А. Н. Золотокрылин¹, М. А. Тарасова^{1,2}

¹ *Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия*
E-mails: titkova@igras.ru, azolotokrylin1938@yandex.ru

² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова*
Москва, 119991, Россия
E-mail: mkolennikova@mail.ru

Проведена детальная оценка взаимосвязи турбулентного теплообмена и вегетационного индекса в течение летних месяцев XXI в. на равнинных ландшафтах Европейской территории России (ЕТР) и Западной Сибири (ЗС). Исследование дало возможность обобщить закономерности связей теплообмена и фитомассы в зависимости от вида ландшафта и региона. Анализ проводился на основе стандартных продуктов реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA5-Land и спутниковой информации MODIS (*англ.* Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index, нормализованный вегетационный индекс) с помощью метода линейной парной корреляции, а также оценки трендов как самих параметров, так и их связи в каждый месяц летнего сезона. Выявлено, что связь теплообмена с фитомассой находится на среднем уровне и не превышает 0,7 во всех ландшафтных зонах, при этом она значительно меняется в течение летнего сезона. Расчёты показали, что сопряжение турбулентного теплообмена и фитоособенно заметно прослеживается при разреженной растительности в субарктических и суббореальных ландшафтах. Связь потоков явного тепла и фитомассы в течение летнего периода в субарктических и бореальных ландшафтах максимально положительна в июне, затем ослабевает. В суббореальных ландшафтах высокие потоки явного тепла сопряжены с уменьшением фитомассы, где отрицательные связи усиливаются в течение летнего сезона, что наиболее выражено на ЕТР. Получено, что связь нормализованного вегетационного индекса с потоками скрытого тепла сильнее, чем с потоками явного тепла. Турбулентные потоки скрытого тепла и фитомасса положительно взаимосвязаны во всех ландшафтах с максимумом в суббореальной зоне вне зависимости от региона. Эти связи максимальны в июне в субарктической зоне, в июле в бореальной и в июле и августе в суббореальных ландшафтах. Показано, что в субарктической зоне даже незначительное увеличение теплообмена с начала XXI в. в начале летнего сезона сопровождается увеличением фитомассы. В суббореальных ландшафтах положительные тренды потоков явного тепла сопровождаются падением потоков скрытого тепла и фитомассы. Изменение взаимосвязи теплообмена с фитомассой с начала XXI в. наиболее заметно на ЕТР и слабее проявляется в ЗС. Сопряжённость теплообмена с фитомассой растёт в июне и августе и мало меняется в июле. Связь потоков скрытого тепла и фитомассы также растёт в июне и августе в субарктике и бореальной зоне ЕТР, а в суббореальных ландшафтах, наоборот, эти связи слабеют на протяжении всего летнего сезона на фоне уменьшения вегетационного индекса.

Ключевые слова: явное тепло, скрытое тепло, теплообмен, вегетационный индекс, природные зоны, Европейская часть России, Западная Сибирь

Одобрена к печати: 07.10.2024
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-219-231

Введение

Растительность определённого ландшафта выполняет теплообменную функцию фитомассы и связана с особенностями энергообмена между подстилающей поверхностью (в географическом смысле — ландшафтом) и атмосферой, что выражается соотношением потоков тепла и влаги. Оценки их взаимосвязи становятся компонентой геоэкологического

анализа территорий с выявлением закономерности связей тепловлагообмена и фитомассы в зависимости от вида ландшафта и региона.

Современные изменения климатической системы, в частности температурного фона и влагообеспеченности (IPCC..., 2022), понимание и математическое моделирование физических механизмов тепловлагообменом суши с атмосферой в различных климатических зонах очень востребовано. Распространение тепла от деятельной поверхности зависит от свойств почвы, в частности её отражательных свойств (альбедо) и влажности, от которой зависит затрата тепла на испарение. Состав и объём фитомассы определяет количество испарённой влаги и потерю тепла за счёт испускания излучения и поглощение теплового излучения в результате кондуктивно-конвективного теплообмена с воздухом и радиационного теплообмена с грунтом.

Важнейшим фактором, определяющим потоки энергии и массы на подстилающей поверхности, являются виды растительного покрова, для которых крайние значения отношения Боуэна (отношение потоков явного тепла к скрытому теплу) могут отличаться в несколько раз, что свидетельствуют о существенной изменчивости режима теплообмена внутри фитомассы и на его границе с атмосферой в зависимости от потока импульса и потоков энергии на поверхности (Степаненко и др., 2020).

К настоящему времени на основе численного моделирования изучены основные механизмы в системе тепловлагообмена суши с атмосферой, исследованы их главные закономерности и изменения. Тем не менее остаются вопросы взаимосвязи тепло- и влагообмена с фитомассой подстилающей поверхности в различных ландшафтных зонах и их изменения во времени в различных регионах на фоне продолжающихся климатических сдвигов (IPCC..., 2022). Различия в реакции ландшафтных зон на изменение тепловлагообмена могут быть обусловлены густотой растительности. Так, например, растительность довольно медленно реагирует на изменения температуры и условия увлажнения при густой биомассе и быстрее при разреженной, что связано с уровнем теплообмена в толще растительного покрова (Wang et al., 2018; Wu et al., 2016). В северных мерзлотных ландшафтах турбулентные потоки тепла и влаги хорошо реагируют на адвекцию тепла и повышение температуры (Тепловодообмен..., 2007; Kodama et al., 2000), что влечёт заметные изменения в растительной компоненте ландшафтов севера (Тишков и др., 2020; Титкова, Виноградова, 2019). Древесные насаждения значительно снижают температуру земной поверхности (Schwaab et al., 2021). В сухостепных ландшафтах особенно сильна связь тепловлагообмена с осадками и температурой (Титкова, Золотокрылин, 2022; Титкова и др., 2020). На фоне современного потепления различной степени интенсивности и вариации циркуляции атмосферы изменение потоков явного и скрытого тепла приводит к колебанию условий увлажнения (Wild, 2016; Третий..., 2022). Это влечёт за собой изменение турбулентного обмена явного и скрытого тепла зональными ландшафтами. Поэтому анализ величины связи динамики баланса тепловлагообмена и NDVI является важным для прогнозирования структуры изменения растительного компонента ландшафтов.

Работа направлена на оценку климатических закономерностей взаимосвязи турбулентного тепловлагообмена (потоков явного, скрытого тепла) и растительной компоненты в различных равнинных природных зонах и динамики этих связей в XXI в. на фоне текущих климатических тенденций.

Объекты, методы исследования и материалы

Объекты

Объект исследования — равнинные территории Европейской территории России (ЕТР) и Западной Сибири (ЗС), представленные субарктическими (от арктической тундры до лесотундры), бореальными (от северной тайги до широколиственных лесов) и суббореальными (от лесостепи до сухой степи) ландшафтами России (Ландшафты..., 2007). Помесячно рассмотрен летний период за 2000–2023 гг.

Методы исследования

Математические оценки физических механизмов связи между теплообменом и фитомассой рассматриваются как следствие общего представления об основных особенностях атмосферы вблизи поверхности земли, т.е. системы «почва – растительный покров – атмосфера». Она характеризуется наличием значительных градиентов температуры, потенциалов, концентрации веществ, приводящих к возникновению потоков различных субстанций. В этой системе происходит физический обмен энергии и влаги, приводящий к циркуляции биоэлементов в экосистемах зелёных растений суши. Основная же часть энергии уносится потоками тепла, уходящими от поверхности растительного покрова: эффективным излучением и турбулентным потоком тепла, а также транспирацией — потоком водяного пара, уносящим скрытую теплоту парообразования воды, испарившейся с поверхности клеток мезофилла листьев.

Интенсивные исследования в этой области позволили получить количественное описание основных особенностей теплообмена, происходящего в этой системе (Гусев, Насонова 2010; Оке, 1982). Потоки скрытого тепла, как и явного, являются необходимым параметром фотосинтеза, потому что влага через транспирацию участвует в процессе ассимиляции углекислого газа через открытые устьица. Любой процесс, приводящий к нехватке воды в растении (чрезмерные потери вследствие транспирации, недостаток почвенной влаги), будет препятствовать проникновению CO_2 . Доминирующей формой потерь воды растительным сообществом выступает транспирация, в силу чего ключевым сопротивлением этим потерям служит сопротивление устьиц. Наглядное представление о турбулентном обмене явным теплом, водяным паром и CO_2 между листом и атмосферой даёт соотношение: поток субстанции прямо пропорционален разности концентрации субстанции и обратно пропорционален сопротивлению системы потоку (в с/м). В некоторой степени сопротивление системы потоку обратны функциям коэффициентов молекулярного и турбулентного обмена в стандартных соотношениях между градиентом субстанции и её потоком. Оценки самих потоков теплообмена пропорциональны градиентам температуры и влажности. При этом сам градиент температуры и влажности зависит от внешних факторов (стратификации атмосферы, радиационной составляющей, ветра и т.д.), а также от географических условий природной зоны (от густоты и высоты растительности или её отсутствия). Учитывая вышесказанное, для нас будет полезно описание особенностей процессов теплообмена поверхности с растительным покровом в различных природных зонах соседних макрорегионах ЕТР и ЗС, выраженное корреляционной зависимостью.

Материалы

Для анализа были использованы ежемесячные усреднённые данные реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA5-Land (<https://cds.climate.copernicus.eu/>), а также спутниковая информация MODIS (*англ.* Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) (<https://lpdaac.usgs.gov/products/>). Анализировались стандартные продукты ERA5-Land: турбулентный поток явного тепла (*англ.* surface turbulent Sensible Heat flux — SH) и турбулентный поток скрытого тепла (*англ.* surface turbulent Latent Heat flux — LH) и стандартный продукт MODIS — нормализованный вегетационный индекс NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index).

Реанализ ERA5-Land — набор непрерывных данных с улучшенным разрешением $0,1 \times 0,1^\circ$ (Muñoz-Sabater et al., 2021), охватывающий временной период с 1950 г. по настоящее время. В основе реанализа лежит ретроспективное восстановление состояния атмосферы на основе численной модели с ассимиляцией данных наземных и спутниковых измерений из различных источников в согласованный набор сеточных данных. Турбулентный поток явного тепла определяется разницей температуры поверхности и атмосферы без учёта суммарного испарения. Поток скрытого тепла обусловлен энергией, высвобождаемой при фазовых переходах

системы. В модели ERA5-land поверхность представляет собой растительный слой, верхний слой голой почвы или верхний слой снежного покрова, не имеет теплоёмкости и поэтому мгновенно реагирует на изменения радиационного воздействия. Расчёт температуры поверхности производится из уравнения баланса подстилающей поверхности, эквивалентно подходу Пенмана – Монтейта, и решается неявно вместе с вертикальным турбулентным переносом в пограничном слое (The surface..., 2016). Эти переменные накапливаются от начала времени прогноза до конца шага прогноза. В работе считается, что восходящие потоки являются положительными, а нисходящие отрицательными.

Для оценки реакции растительности на изменения баланса тепло- и влагообмена деятельного слоя суши в различных ландшафтах были использованы данные вегетационного индекса NDVI по модели MOD13C2 версии 061 для среднемесячных значений (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13c2v061/>). Ежемесячный продукт принимает все значения MOD13A2, которые перекрывают месяц и доступны с 2000 г. по настоящее время. Глобальные данные представляют собой безоблачные пространственные композиты. Для определения NDVI используется контраст характеристик в двух каналах из набора мультиспектральных растровых данных: поглощения пигментом хлорофилла в красном канале и высокой отражательной способности растительного покрова в инфракрасном канале.

В среде программирования MatLab проводилась обработка данных реанализа ERA5 и спутниковых данных MODIS за 2000–2023 гг. за летние месяцы для каждого узла расчётной сетки, для чего все исследуемые параметры были приведены к единой сетке $0,1 \times 0,1^\circ$ по широте и долготе. Для определения взаимосвязи теплообмена с вегетационным индексом для каждой ландшафтной зоны ЕТР и ЗС за каждый летний месяц 2000–2023 гг. был применён метод парной корреляции с оценкой значимости коэффициента. Рассмотрены тренды самих турбулентных потоков тепла и влаги и NDVI. Изменение взаимосвязи теплообмена с вегетационным индексом оценивалось по трендам коэффициента корреляции (r) для каждой ландшафтной зоны. Значимость трендов параметров и коэффициента корреляции оценивалась по критерию Стьюдента при уровне значимости 10%.

Результаты

Взаимосвязь турбулентного теплообмена и NDVI в течение летнего сезона

Рассмотрим взаимозависимость турбулентного теплообмена и NDVI в течение летнего сезона (рис. 1, 2 (см. с. 223, 224), табл. 1). В начальный период развития фитомассы растения 2/3 энергии тратят на испарение, чтобы накапливать органическое вещество, образовывать мощную листовую поверхность, обеспечивать фотосинтез. В максимальную фазу развития вода уже не нужна растению в больших количествах. В этот период для созревания плодов нужно больше тепла, чем влаги, и теперь 2/3 радиации тратится на нагревание и только 1/3 идёт на испарение (Русин, Флит, 1971).

В июне увеличение турбулентного теплообмена в субарктической зоне (тундра, лесотундра) связано с увеличением NDVI, что ярче проявляется в ЗС ($0,4 < r < 0,5$) и менее заметно на ЕТР ($-0,2 < r < 0,3$) (см. рис. 2а, 31а, 1а (см. с. 225)). В бореальных ландшафтах (от северной тайги до подтаёжной зоны) связь потоков явного тепла и фитомассы средняя положительная на ЕТР ($0,2 < r < 0,7$) и незначима в обширных заболоченных районах ЗС ($-0,2 < r < 0,2$) (Ландшафты..., 2007) (см. рис. 31б). В суббореальных ландшафтах в июне пик вегетации уже пройден (Пугачёва, 2020) и увеличение турбулентных потоков явного тепла в среднем обусловлено уменьшением зелёной фитомассы в степи, сухой степи и полупустыне (см. рис. 1а, 21в), что наиболее ярко проявляется на юге ЕТР ($r < -0,5$). В июле и августе в субарктических и бореальных ландшафтах взаимосвязь турбулентных потоков явного тепла и NDVI слабая и колеблется от отрицательной до положительной в зависимости от района (см. рис. 1б, в).

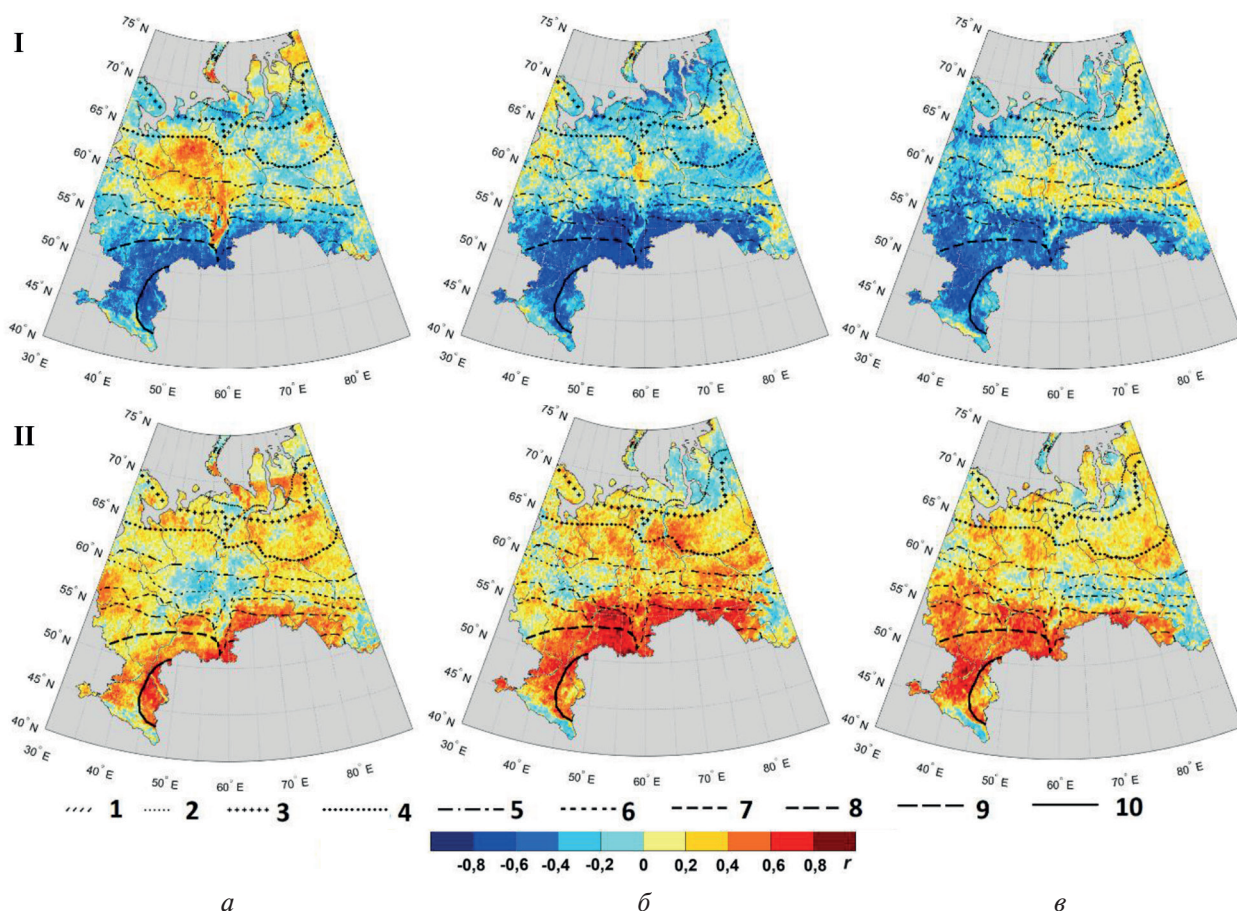


Рис. 1. Линейная корреляция (r) явного (I) и скрытого (II) тепла с вегетационным индексом в летние месяцы 2000–2023 гг.: *а* — июнь; *б* — июль; *в* — август. Условные обозначения южных границ ландшафтных зон: 1 — арктической зоны, 2 — тундры, 3 — лесотундры, 4 — северной тайги, 5 — средней тайги, 6 — южной тайги, 7 — подтаёжной зоны, 8 — широколиственно-лесной, 9 — лесостепи, 10 — степи

Таблица 1. Коэффициенты корреляции турбулентных потоков теплообмена и NDVI в среднем по ландшафтным зонам за летние месяцы 2000–2023 гг.

Ландшафтная зона	SH-NDVI						LH-NDVI					
	Июнь		Июль		Август		Июнь		Июль		Август	
	ETP	ЗС	ETP	ЗС	ETP	ЗС	ETP	ЗС	ETP	ЗС	ETP	ЗС
Тундра	0,31	0,41	0,04	0,08	0,09	0,07	0,43	0,6	0,24	0,15	0,4	0,39
Лесотундра	0,29	0,42	0,13	0,21	0,17	0,09	0,22	0,52	0,19	0,01	0,22	0,14
Северная тайга	0,18	0,12	0,06	0,2	0,01	0,14	0,28	0,41	0,41	0,25	0,45	0,29
Средняя тайга	0,2	0,02	0,15	-0,1	0,07	-0,1	0,4	0,41	0,4	0,47	0,43	0,27
Южная тайга	0,29	-0	0,04	-0,3	0,09	-0,1	0,21	0,41	0,42	0,45	0,14	0,18
Подтаёжная	0,21	-0,1	-0	-0,3	-0,1	-0,2	0,26	0,19	0,42	0,41	0,22	0,14
Широколиственно-лесная	0,01		-0		-0,1		0,25		0,14		0,31	
Лесостепь	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,5	-0,3	0,41	0,42	0,44	0,48	0,37	0,18
Степь	-0,6	-0,5	-0,6	-0,5	-0,6	-0,5	0,43	0,52	0,68	0,61	0,62	0,57
Сухостепная	-0,7		-0,6		-0,6		0,51		0,66		0,66	
Полупустыня	-0,5		-0,5		-0,5		0,51		0,58		0,51	

Примечание: полужирным начертанием выделены средние и сильные связи.

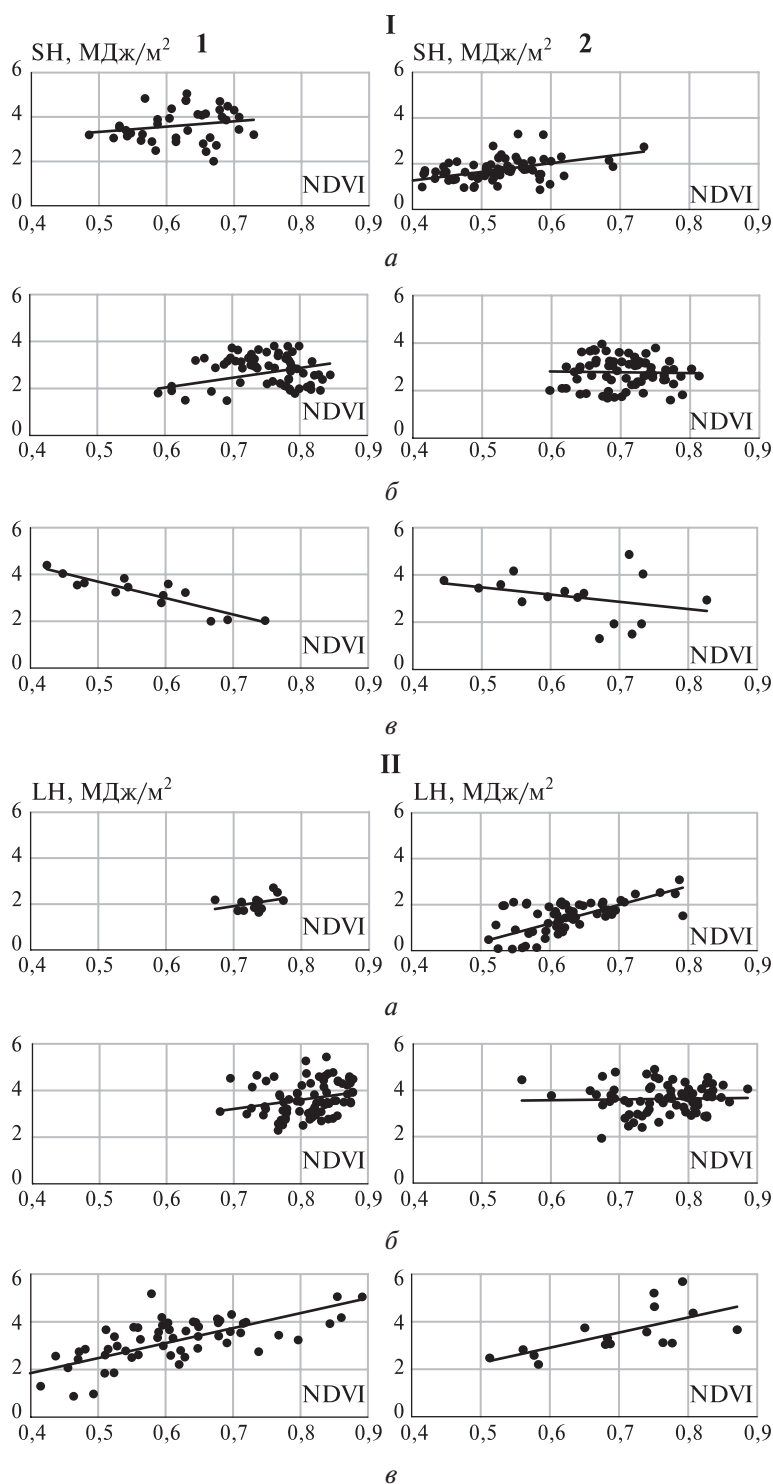


Рис. 2. Зависимость турбулентных потоков явного тепла (в МДж/м²) и NDVI (I), скрытого тепла (в МДж/м²) и NDVI (II) в некоторых ландшафтных зонах ЕТР (1) и ЗС (2) в июне с разрешением 0,1×0,1°: а — в тундре, б — в средней тайге, в — в степи

Значимые отрицательные зависимости турбулентных потоков явного тепла и NDVI на фоне повышения температуры в течение летнего периода усиливаются в суббореальных ландшафтах ЕТР и ЗС до значения коэффициента корреляции 0,8 и захватывают лесостепную зону.

В итоге можно сказать, что сопряжённость потоков тепла и фитомассы в течение летнего периода в субарктических и бореальных ландшафтах максимально положительная в июне и затем ослабевает, а в суббореальных ландшафтах отрицательная и усиливается от июня

к июлю. При этом существуют региональные отличия связи потока явного тепла и фитомассы в одних и тех же природных зонах соседних регионов ЕТР и ЗС.

Если рассматривать взаимосвязь турбулентных потоков скрытого тепла и фитомассы, то отметим, что связь в целом положительная в течение летнего периода с некоторыми региональными особенностями (см. рис. III, 2III). Так, в субарктических ландшафтах в июне максимальный коэффициент корреляции достигает 0,6 в ЗС и меньше на ЕТР ($r = 0,4$). В бореальной зоне на фоне постоянной густой растительности преобладают слабые связи параметров — от $-0,3$ в Предуралье на ЕТР и до $0,5$ в ЗС и на западе ЕТР. В суббореальных ландшафтах при разреженной фитомассе связи параметров вновь увеличиваются и коэффициент корреляции местами может достигать $0,7$. По мере продолжения летнего сезона (в июле и августе) в субарктической зоне взаимосвязь потоков скрытого тепла и NDVI ослабевает ($r < 0,3$). В бореальной зоне на фоне повышения сезонной температуры растёт положительная корреляция параметров, особенно в ЗС ($0,3 < r < 0,5$). На юге ЕТР и ЗС зависимость турбулентных потоков скрытого тепла и NDVI максимальна и доходит до $0,7$.

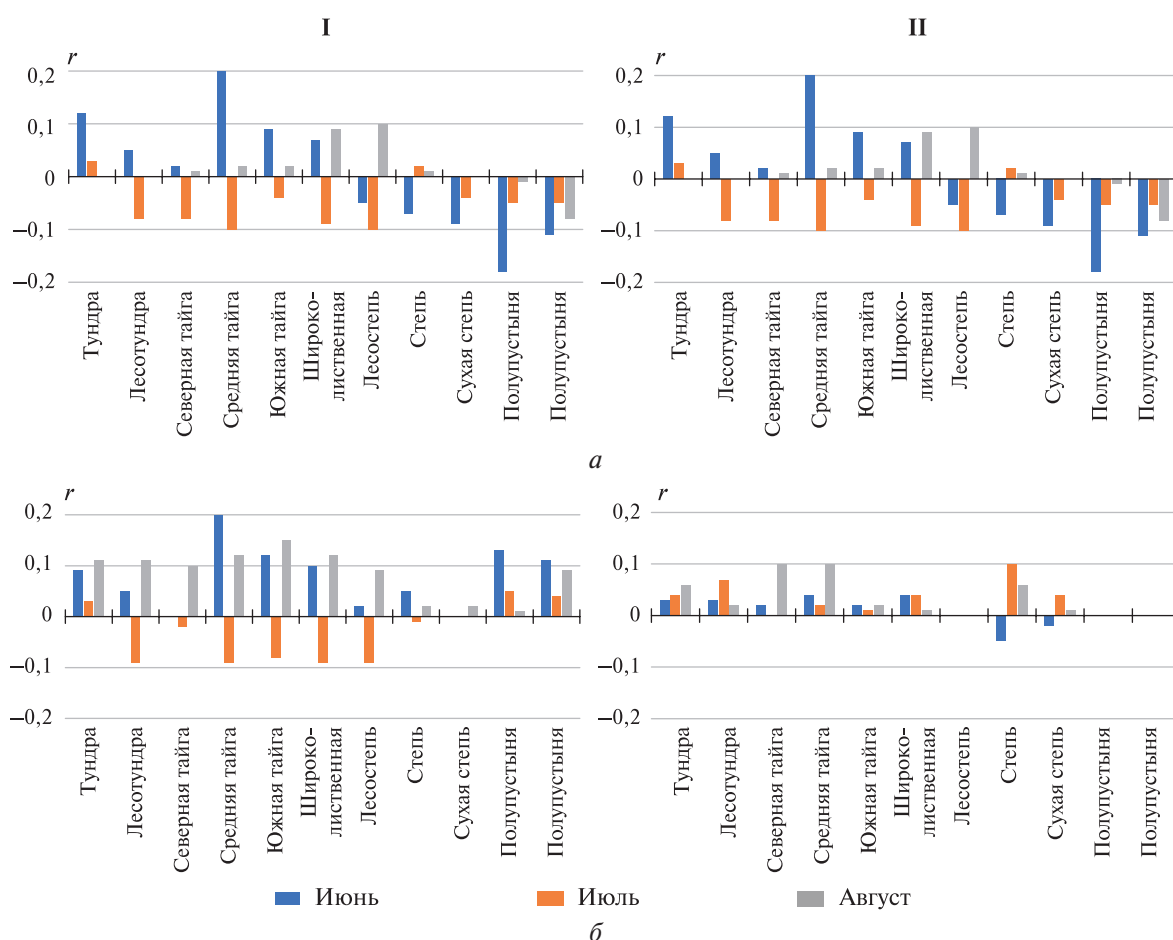


Рис. 3. Изменение взаимосвязи вегетационного индекса и потоков турбулентного теплообмена (тренд коэффициента корреляции/10 лет) по ландшафтным зонам в летние месяцы 2000–2023 гг. на ЕТР (I) и в ЗС (II): а — явного тепла; б — скрытого тепла. Значимое изменение коэффициента корреляции при значении больше 0,1 (меньше $-0,1$)

В результате можно сказать, что турбулентные потоки теплообмена и вегетационный индекс в меньшей степени положительно взаимосвязаны в субарктической и бореальной зоне и в большей степени в засушливой суббореальной зоне вне зависимости от региона. Связи максимальны в июне в субарктической зоне, в июле в бореальной и в июле и августе в суббореальной природной зоне.

Таким образом, связь турбулентного тепловлагообмена и NDVI особенно заметна при недостатке фитомассы в субарктических и суббореальных ландшафтах. Различие между ЕТР и ЗС наиболее ярко проявляется для потоков явного тепла, что является следствием различия во влажности почвы субарктической и бореальной зоны двух регионов. Взаимосвязь вегетационного индекса с потоками скрытого тепла сильнее, чем с потоками явного тепла.

Изменение сопряжённости тепловлагообмена с вегетационным индексом

На фоне продолжающегося глобального потепления, особенно ярко проявившегося в последние десятилетия (IPCC..., 2023), тренды турбулентного тепловлагообмена и вегетационного индекса в течение летнего периода имеют свои особенности в различных ландшафтных зонах ЕТР и ЗС (табл. 2).

В июне в субарктической зоне даже незначительный рост потоков явного тепла на фоне переувлажнённости ландшафтов приводит к значимым положительным трендам фитомассы, особенно в тундре ЗС.

Напротив, на юге, в суббореальных ландшафтах, значимый рост потоков явного тепла и уменьшение потоков скрытого тепла южнее степной зоны на ЕТР и южнее лесостепи в ЗС сопровождается отрицательным трендом вегетационного индекса. В июле значимых тенденций увеличения турбулентных потоков явного тепла не отмечается, но процессы сокращения потоков скрытого тепла и уменьшение NDVI продолжают южнее лесной зоны на ЕТР. В конце вегетационного сезона в большинстве ландшафтных зон увеличение турбулентных потоков явного тепла не приводит к заметным изменениям потоков скрытого тепла и фитомассы как на ЕТР, так и в ЗС.

Таким образом, в субарктической зоне даже незначительное изменение тепловлагообмена в начале летнего сезона может сопровождаться изменением фитомассы. В суббореальных ландшафтах увеличение потоков явного тепла сопровождается падением потоков скрытого тепла и вегетационного индекса также только в первой половине летнего сезона.

На фоне трендов исследуемых параметров изменяются и взаимосвязи тепловлагообмена с вегетационным индексом (см. рис. 3). Так, в июне взаимосвязь тепловлагообмена и NDVI возрастает в субарктической и бореальной зоне, особенно в средней тайге ЕТР. В суббореальных ландшафтах на фоне роста теплообмена взаимосвязь потоков тепла и фитомассы растёт, а уменьшение потоков скрытого тепла сопровождается ослаблением её связи с NDVI. В середине летнего сезона отсутствие значительных трендов теплообмена сопрягается с ослаблением связей с фитомассой в субарктических и бореальных ландшафтах и незначительным ростом в сухой степи и полупустыне ЕТР. При падении влагообмена связь потоков скрытого тепла с NDVI уменьшается. В августе при положительном тренде потоков явного тепла увеличивается их связь с фитомассой от тундры до лесостепи как на ЕТР, так и в ЗС.

Таким образом, с начала XXI в. изменение взаимосвязи тепловлагообмена с фитомассой наиболее заметно на ЕТР и слабее проявляется в ЗС. Взаимосвязь теплообмена с фитомассой растёт в июне и августе и незначительно уменьшается в середине летнего сезона как на ЕТР, так и в ЗС. Взаимосвязь потоков скрытого тепла и фитомассы увеличивается в июне и августе в субарктике и бореальной зоне ЕТР, а в суббореальной зоне эти связи слабеют на протяжении всего летнего сезона.

Выводы

Детальная оценка взаимосвязи турбулентного тепловлагообмена и фитомассы ландшафтов в соседних регионах даёт возможность обобщить её закономерность в зависимости от типа ландшафта и региона. Взаимодействие этих параметров — сложный процесс, он во многом зависит от климатических составляющих ландшафта, и оценка статистических связей, приведённая в работе, это подтверждает.

Таблица 2. Тренды параметров/10 лет теплообмена (явного тепла SH (в мДж/м²), скрытого тепла LH (в мДж/м²)) и вегетационного индекса NDVI за 2000–2023 гг. по ландшафтным зонам по летним месяцам

Ландшафтная зона	SH						LH						NDVI						
	Июнь		Июль		Август		Июнь		Июль		Август		Июнь		Июль		Август		
	ЕТР	ЗС	ЕТР	ЗС	ЕТР	ЗС	ЕТР	ЗС	ЕТР	ЗС	ЕТР	ЗС	ЕТР	ЗС	ЕТР	ЗС	ЕТР	ЗС	
Тундра	0,05	0,15	0	0,01	-0,05	-0,09	-0,08	0,11	0,22	0,07	0,02	0,01	0,03	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Лесотундра	0,09	0,02	0	0,01	-0,14	0,04	-0,15	0,07	-0,15	0,05	0	0,02	0,03	0,04	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02
Северная тайга	0,04	0,1	-0,01	0	-0,07	0,11	-0,2	-0,14	-0,17	0,17	0	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Средняя тайга	0,28	0,25	-0,01	0	-0,03	0,17	-0,12	-0,29	-0,26	0,04	0	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0	0,02	0,02
Южная тайга	0,29	0,27	-0,01	0,01	0,05	0,29	-0,08	-0,31	-0,37	-0,06	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0	0,02	0,01	0,01
Подтаёжная	0,27	0,44	0,01	0,01	0,2	0,48	-0,03	-0,47	-0,42	-0,18	0,02	0,02	0,02	0	0,01	0	0,02	0,01	0,01
Широколиственно-лесная	0,24		0,02		0,27		-0,01		-0,45		0,03		0,01		0		0,01		0,01
Лесостепь	0,27	0,56	0,02	0,02	0,51	0,5	0,14	-0,6	-0,6	-0,4	0,02	0,02	0	-0,01	0,01	-0,02	0,02	0,02	0,01
Степь	0,5	0,57	0,03	0,02	0,6	0,51	-0,5	-0,7	-1,2	-0,5	0,02	0,01	-0,03	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02	0,01
Сухостепная	0,54		0,01		0,52		-0,5		-1,1		0,02		-0,03		-0,03		-0,02		-0,02
Полупустыня	0,75		0,01		0,51		-1		-1		0,01		-0,03		-0,02		-0,01		-0,01

Примечание: полужирным начертанием выделены средние и сильные связи.

В целом связь теплообмена с фитомассой находится на среднем уровне, не превышает 0,7 во всех ландшафтных зонах и меняется в течение летнего сезона. При этом взаимосвязь теплообмена с фитомассой различается в одних и тех же ландшафтных зонах соседних регионов, что, по-видимому, связано с преобладающими видами растительности. Взаимосвязь турбулентного теплообмена и фитомассы особенно заметно прослеживается при разреженной растительности в субарктических и суббореальных ландшафтах. Различие между Европейской территорией России (ЕТР) и Западной Сибирью (ЗС) наиболее ярко проявляется для потоков явного тепла, что является следствием разных условий увлажнения и большей заболоченностью ландшафтов ЗС по сравнению с ландшафтами ЕТР субарктической и бореальной зоны двух регионов. Взаимосвязь вегетационного индекса с потоками скрытого тепла сильнее, чем с потоками явного тепла. Сопряжённость потоков явного тепла в течение летнего периода в субарктических и бореальных ландшафтах максимально положительная в июне и затем ослабевает, что ярче проявляется в ЗС. В суббореальных ландшафтах высокие потоки явного тепла сопряжены с уменьшением фитомассы. Отрицательные связи усиливаются в течение летнего сезона, что наиболее выражено на ЕТР. Турбулентные потоки скрытого тепла и фитомасса положительно взаимосвязаны во всех ландшафтных зонах с максимумом в суббореальной зоне вне зависимости от региона. Связи максимальны в июне в субарктической зоне, в июле в бореальной и в июле и августе в суббореальных ландшафтах.

Оценка трендов самих исследуемых параметров показала, что в субарктической зоне даже незначительное увеличение теплообмена с начала XXI в. в начале летнего сезона сопровождается увеличением фитомассы. В суббореальных ландшафтах увеличение потоков явного тепла сопровождается падением потоков скрытого тепла и фитомассы также только в первой половине летнего сезона. Проявление глобального потепления в изменениях связей теплообмена с вегетационным индексом значительно различается между ландшафтами. С начала XXI в. изменение сопряжённости теплообмена с фитомассой наиболее заметно на ЕТР и слабее проявляется в ЗС. Взаимосвязь теплообмена с фитомассой растёт в июне и августе и мало меняется в июле. Связь потоков скрытого тепла и фитомассы также растёт в июне и августе в субарктике и бореальной зоне ЕТР, а в суббореальных ландшафтах, наоборот, эти связи слабеют на протяжении всего летнего сезона на фоне уменьшения вегетационного индекса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 23-27-00047 «Структура потоков тепла и влаги в зональных равнинных ландшафтах России в условиях глобального потепления» (<https://rscf.ru/project/23-27-00047/>).

Литература

1. Гусев Е. М., Насонова О. Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой / отв. ред. Л. С. Кучмент, М.: Наука. 2010. 327 с.
2. Ландшафты (карта, м-б 1:15 000 000) // Национальный атлас России. Т. 2. Природа. Экология. М.: Картография, 2007. С. 398–399. <https://nationalatlas.ru/tom2/398-399.html>.
3. Оке Т. Р. Климаты пограничного слоя / пер. с англ. под ред. А. С. Дубова. Л.: Гидрометеоиздат. 1982. 360 с.
4. Пугачёва А. М. Климатические флуктуации сухих степей и их роль в процессе демутиации // Аридные экосистемы. 2020. № 3(84). С. 14–22. DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10102.
5. Русин Н. П., Флит Л. А. Солнце на земле. М.: Советская Россия. 1971. 204 с.
6. Степаненко В. М., Репина И. А., Федосов В. Э. и др. Обзор методов параметризации теплообмена в моховом покрове для моделей земной системы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 127–138. DOI: 10.31857/S0002351520020133.
7. Тепловодообмен в мерзлотных ландшафтах Восточной Сибири и его факторы / ред. Георгеади А. Г., Золотокрылин А. Н.. М., 2007. 275 с.
8. Титкова Т. Б., Виноградова В. В. Изменения климата в переходных природных зонах севера России и их проявление в спектральных характеристиках ландшафтов // Современные про-

- блемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 310–323. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323.
9. Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н. Летние климатические изменения на юге Европейской России // *Фундам. и приклад. климатология*. 2022. Т. 8. № 1. С. 107–121. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-1-107-121.
 10. Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В. Спектральный портрет равнинных ландшафтов России // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 3. С. 117–126. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-117-126.
 11. Тишков А.А., Белоновская Е.А., Вайсфельд М.А. и др. Региональные биогеографические эффекты «быстрых» изменений климата в Российской Арктике в XXI в. // *Арктика: экология и экономика*. 2020. № 2(38). С. 31–44. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-31-44.
 12. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Росгидромет. СПб.: Научно-технические технологии, 2022. 676 с. https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf.
 13. IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability* // 6th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor et al. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.
 14. IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Impacts, Adaptation and Vulnerability* // 6th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. H. Lee, J. Romero et al. Geneva, Switzerland, 2023. 184 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
 15. Kodama Y., Ishii Y., Nomura M., Sato N., Yabuki H., Ohata T. Seasonal energy exchange over tundra region near Tiksi, Eastern Siberia // *Activity Report. GAME-Siberia*. 2000. P. 13-14.
 16. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // *Earth System Science*. 2021. No. 13(9). P. 4349–4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.
 17. Schwaab J., Meier R., Mussetti G. et al. The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities // *Nature Communications*. 2021. V. 12. Article 6763. DOI: 10.1038/s41467-021-26768-w.
 18. The surface energy balance // IFS Documentation — Cy41r2: Operational implementation 8 March 2016. Part IV: Physical processes / European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. 2016. 214 p. P. 48–50. https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2021/81271-ifs-documentation-cy47r3-part-iv-physical-processes_1.pdf.
 19. Wang X., Wu C., Peng D., et al. Snow cover phenology affects alpine vegetation growth dynamics on the Tibetan Plateau: Satellite observed evidence, impacts of different biomes, and climate drivers // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2018. No. 256–257. P. 61–74. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.03.004>.
 20. Wild M. Decadal changes in radiative fluxes at land and ocean surfaces and their relevance for global warming // *WIREs Climate Change*. 2016. V. 7. No. 1. P. 91–107. DOI: 10.1002/wcc.372.
 21. Wu M., Schurgers G., Rummukainen M. et al. Vegetation–climate feedbacks modulate rainfall patterns in Africa under future climate change // *Earth System Dynamics*. 2016, Vol. 7. Iss. 3. P. 627–647. DOI: <https://doi.org/10.5194/esd-7-627-2016>.

Interrelation of turbulent heat and moisture exchange and NDVI in different landscape zones of the plains of Russia in the summer period

T. B. Titkova¹, A. N. Zolotokrylin¹, M. A. Tarasova^{1,2}

¹ *Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia,
E-mails: titkova@igras.ru, azolotokrylin1938@yandex.ru*

² *Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
E-mail: mkolennikova@mail.ru*

A detailed assessment of the interrelation between turbulent heat and moisture exchange and the NDVI vegetation index during the summer months of the 21st century on the plain landscapes of the European territory of Russia (ETR) and Western Siberia (WS) has been conducted. The research made it possible to generalize the patterns of relationships between heat and moisture exchange and phytomass depending on the type of landscape and region. The analysis was based on the reanalysis of European Centre for Medium-Range Forecasts (ERA5-Land) and satellite data from MODIS NDVI using the method of linear pair correlation, as well as trend assessment of both parameters and their relationship for each month of the summer season. It was found that the relationship between heat and moisture exchange and phytomass is at a medium level and does not exceed 0.7 in all landscape zones, while changing significantly during the summer season. Calculations showed that the coupling of turbulent heat and moisture exchange and phytomass is especially noticeable in sparsely vegetated areas in subarctic and subboreal landscapes. The connection between sensible heat fluxes and phytomass during the summer period in subarctic and boreal landscapes is maximally positive in June, and then weakens. In subboreal landscapes, high sensible heat fluxes are associated with a decrease in phytomass, where negative relationships strengthen during the summer season, most notably in ETR. It was found that the relationship between latent heat fluxes and the vegetation index is stronger than with sensible heat fluxes. Turbulent latent heat fluxes and phytomass are positively related in all landscapes, with a maximum in the subboreal zone, regardless of the region. These relationships are maximal in June in the subarctic zone, in July in the boreal zone and in both July and August in subboreal landscapes. It was shown that since the beginning of the 21st century, in the subarctic zone even a slight increase in heat and moisture exchange at the beginning of the summer season has been accompanied by an increase in phytomass. In subboreal landscapes, positive trends of sensible heat fluxes are accompanied by a decrease in latent heat fluxes and phytomass. The change in the relationship between heat and moisture exchange with phytomass since the beginning of the 21st century is most noticeable in ETR and less so in WS. The coupling of heat exchange with phytomass increases in June and August and changes little in July. The relationship between latent heat fluxes and phytomass also increases in June and August in the subarctic and boreal zones of ETR, while in subboreal landscapes these relationships weaken throughout the summer season against the background of a decrease in the vegetation index.

Keywords: sensible heat, latent heat, vegetation index, landscapes, heat and moisture exchange, European Russia, Western Siberia

Accepted: 07.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-219-231

References

1. Gusev E. M., Nasonova O. N., *Modelirovanie teplo- i vlagoobmena poverkhnosti sushy s atmosferoi* (Modeling of heat and moisture exchange between the land surface and the atmosphere), Kuchment L. S. (ed.), Moscow: Nauka, 2010, 327 p. (in Russian).
2. Landscape map (M 1:15 000 000), *Natsional'nyi atlas Rossii. T. 2. Priroda. Ekologiya* (National atlas of Russia. Vol. 2. Nature. Ecology), Moscow: Kartografiya, 2007, pp. 398–399, <https://nationalatlas.ru/tom2/398-399.html> (in Russian).
3. Oke T. R., *Boundary Layer Climates Paperback*, London: Methuen Publ., 1978. 372 p.
4. Pugacheva A. M., Climatic fluctuations of dry steppes and their role in the demutation process, *Arid ecosystems*, 2020, No. 3(84), pp. 181–187 (in Russian), DOI: 10.1134/S2079096120030063.

5. Rusin N.P., Flit L.A., *Solntse na zemle* (The Sun on Earth), Moscow: Soviet Russia, 1971, 204 p. (in Russian).
6. Stepanenko V.M., Repina I.A., Fedosov V.E. et al., An overview of parameterizations of heat transfer over moss-covered surfaces in the earth system models, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, Vol. 56, No. 2, pp. 101–111, DOI: 10.1134/S0001433820020139.
7. *Teplovodooobmen v merzlotnykh landshaftakh Vostochnoi Sibiri i ego faktory* (Heat and water exchange in the permafrost landscapes of Eastern Siberia and its factors), Georgeadi A.G., Zolotokrylin A.N. (eds.), Moscow, 2007, 275 p. (in Russian).
8. Titkova T.B., Vinogradova V.V., Climate changes in transitional natural areas of Russian northern regions and their display in landscape spectral characteristics, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 310–323 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323.
9. Titkova T.B., Zolotokrylin A.N., Summer climate change in the south of European Russia, *Fundamental and applied climatology*, 2022, Vol. 8, No. 1, pp. 107–121, (in Russian), DOI: 10.21513/2410-8758-2022-1-107-121.
10. Titkova T.B., Zolotokrylin A.N., Vinogradova V.V., The spectral portrait of plain landscapes in Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 117–126 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-117-126.
11. Tishkov A.A., Belonovskaya E.A., Weisfel'd M.A. et al., Regional biogeographical effects of “fast” climate changes in the Russian Arctic in the 21st century, *Arctic: Ecology and Economics*, 2020, No. 2(38), pp. 31–44 (in Russian), DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-31-44.
12. *Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation), Roshydromet, Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2022, 676 p. (in Russian), https://www.meteor.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf.
13. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, In: *6th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor et al. (eds.), Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2022. 3056 p., <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>, DOI: 10.1017/9781009325844.
14. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Impacts, Adaptation and Vulnerability In: *6th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, H. Lee, J. Romero et al. (eds.), Geneva, Switzerland, 2023, 184 p., DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
15. Kodama Y., Ishii Y., Nomura M., Sato N., Yabuki H., Ohata T., Seasonal energy exchange over tundra region near Tiksi, Eastern Siberia, *Activity Report. GAME-Siberia*, 2000, pp. 13–14.
16. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al., ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, *Earth System Science*, 2021. No. 13(9), pp. 4349–4383, DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.
17. The surface energy balance, In: *IFS Documentation — Cy41r2: Operational implementation 8 March 2016. Part IV: Physical processes*, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2016, 214 p., pp. 48–50, https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2021/81271-ifs-documentation-cy47r3-part-iv-physical-processes_1.pdf.
18. Schwaab J., Meier R., Mussetti G. et al., The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities, *Nature Communications volume*, 2021, Vol. 12, Article 6763, DOI: 10.1038/s41467-021-26768-w.
19. Wang X., Wu C., Peng D. et al., Snow cover phenology affects alpine vegetation growth dynamics on the Tibetan Plateau: Satellite observed evidence, impacts of different biomes, and climate drivers, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, No. 256–257, pp. 61–74, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.03.004>.
20. Wild M., Decadal changes in radiative fluxes at land and ocean surfaces and their relevance for global warming, *WIREs Climate Change*, 2016, Vol. 7. No. 1, pp. 91–107, DOI: 10.1002/wcc.372. DOI: 10.1002/wcc.372.
21. Wu M., Schurgers G., Rummukainen M. et al., Vegetation–climate feedbacks modulate rainfall patterns in Africa under future climate change, *Earth System Dynamics*, 2016, Vol. 7, Issue 3, pp. 627–647, DOI: <https://doi.org/10.5194/esd-7-627-2016>.