

founded in 1918

# **Взаимосвязь тепло-влагообмена и NDVI в различных ландшафтных зонах**

**Т. Б. Титкова<sup>1</sup>, А. Н. Золотокрылин<sup>1</sup>, М. А. Тарасова<sup>1,2</sup>,**

**Д. Л. Тарасов<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup> Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия*

*<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М. В.  
Ломоносова, Москва, 119991, Россия*

*E-mail: [titkova@igras.ru](mailto:titkova@igras.ru)*

Растительность определенного ландшафта выполняет тепло-влажнорегулирующую функцию фитомассы и связана с особенностями энергообмена между подстилающей поверхностью (в географическом смысле — ландшафтом) и атмосферой, что выражается соотношением потоков тепла и влаги (Оке, 1978; Finnikov et al., 2011; Wu et al., 2016; и др).

## Цель

На примере Европейской части России и Западной Сибири обобщить закономерности взаимосвязей тепло-влажноробмена и фитомассы в зависимости от вида ландшафта и региона в летние месяцы с помощью метода линейной парной корреляции, а также оценить динамику этих связей в XXI веке на фоне текущих климатических тенденций

## Обоснование методов

Физические механизмы связи между тепло-влажностью и фитомассой, рассматриваются в системе почва - растительный покров - атмосфера, которая характеризуется значительными градиентами температуры. В этой системе происходит физический обмен энергии и влаги, приводящий к циркуляции биоэлементов в экосистемах зеленых растений суши. Основная же часть энергии уносится эффективным излучением, турбулентным потоком тепла, транспирацией.

## Данные

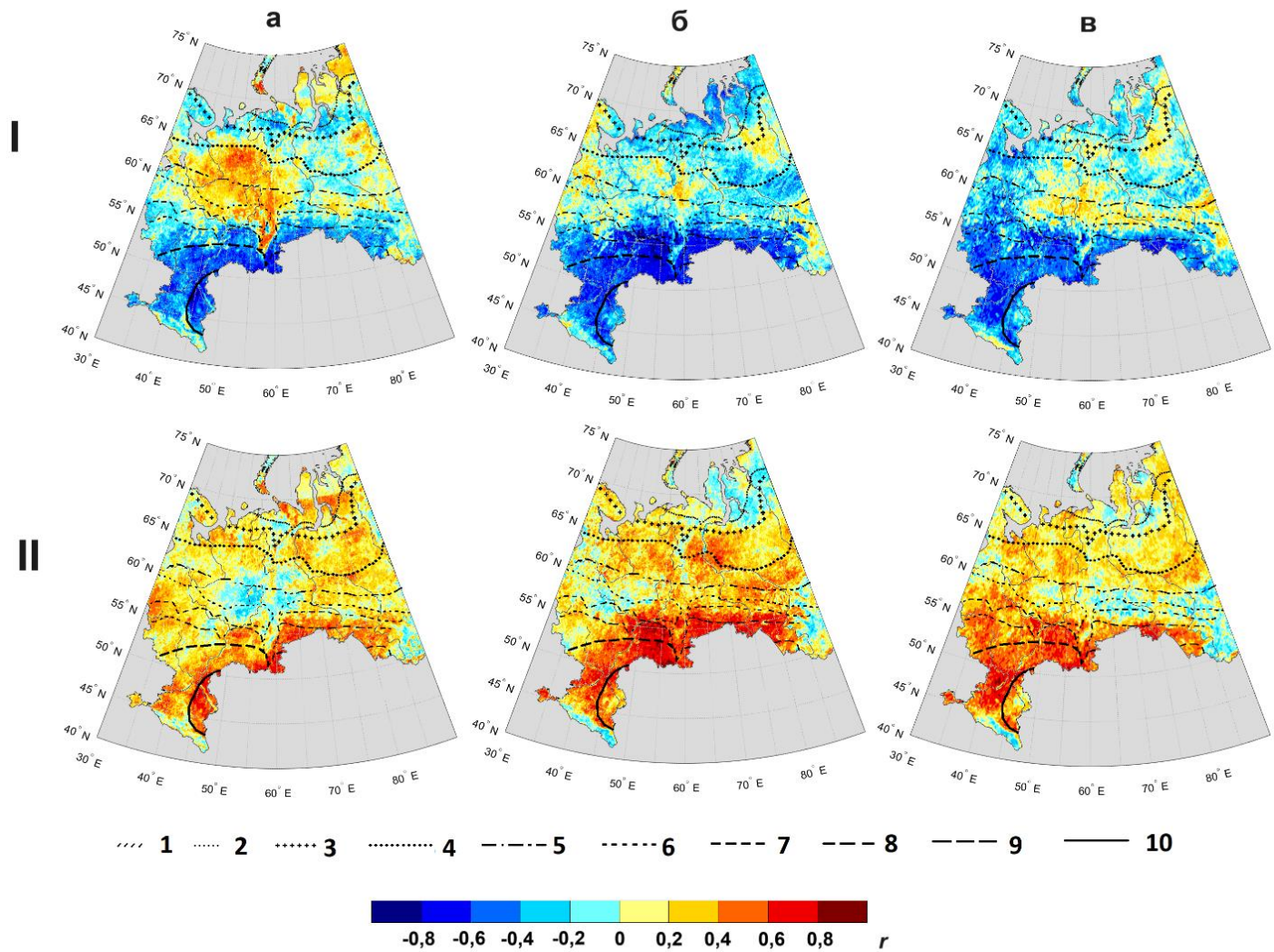
- ❑ реанализ ERA5-Land с разрешением (0,1×0,1°) (<https://climate.copernicus.eu/>): поток явного тепла SL (Дж/м<sup>2</sup>), потока скрытого тепла (Дж/м<sup>2</sup>)
- ❑ NDVI MODIS (MOD13C2.061) для среднемесячных значений с разрешением 0.05° × 0.05° (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13c2v006/>) для.

# Результаты

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
подтаежная	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	

Коэффициенты корреляции турбулентных потоков тепло-влагообмена и NDVI в среднем по ландшафтными зонам за летние месяцы 2000-2023 гг.

Связь тепло-влагообмена с фитомассой находится на среднем уровне и не превышает 0.7 во всех ландшафтных зонах, при этом значительно меняется в течение летнего сезона.



**Рис. 1.** Линейная корреляция ( $r$ ) явного (I) и скрытого (II) тепла с вегетационным индексом в летние месяцы 2000-2023: 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

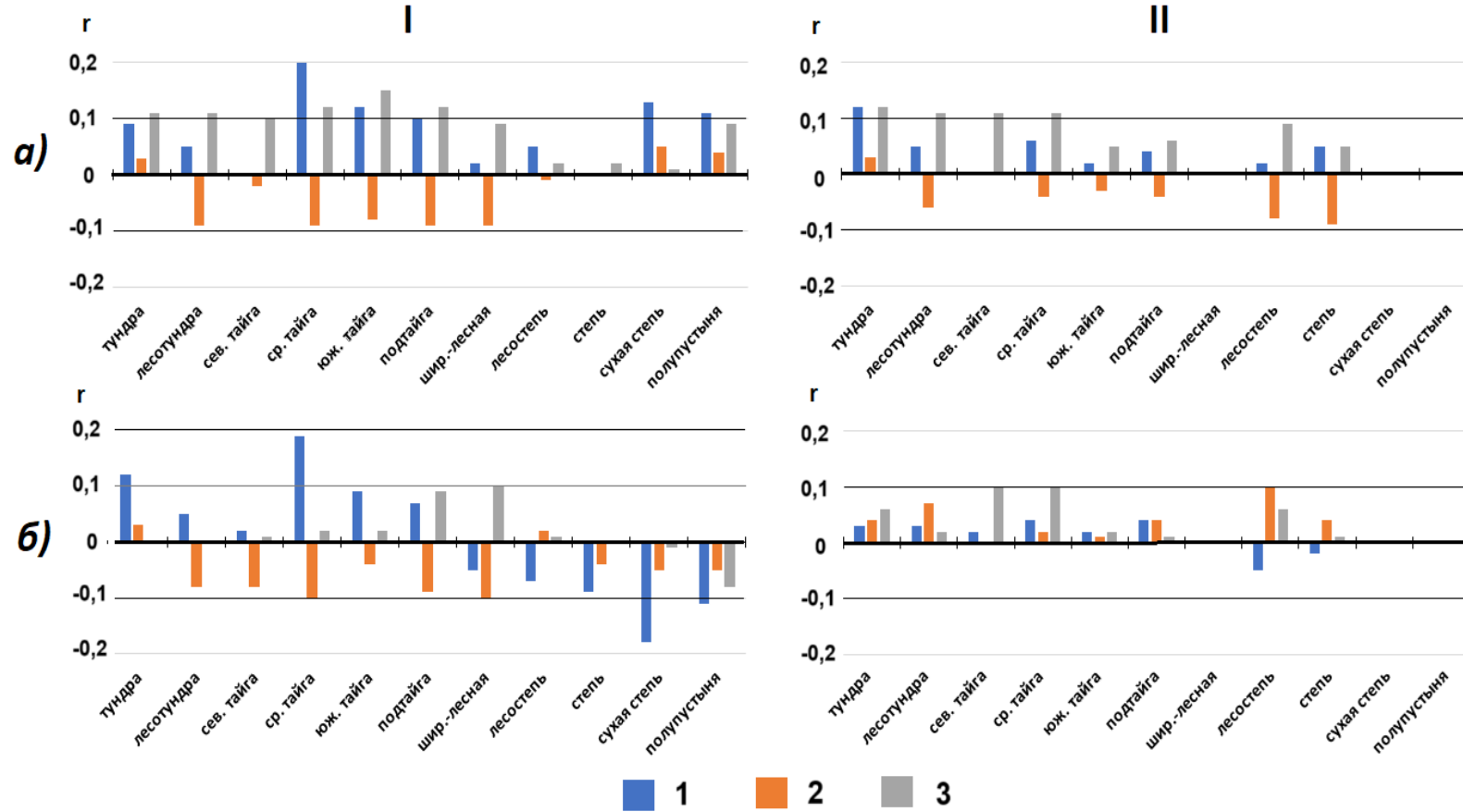
Сопряжение турбулентного тепло-влагообмена и фитомассы особенно заметно прослеживается при разреженной растительности в субарктических и суббореальных ландшафтах.

## Тренды параметров / 10 лет тепло-влагообмена (явного тепла SH мДж/м<sup>2</sup>, скрытого тепла LH мДж/м<sup>2</sup>) и вегетационного индекса NDVI за 2000-2023 по ландшафтным зонам по летним месяцам

Ландшафтная зона	SH мДж/м <sup>2</sup> / 10 лет						LH мДж/м <sup>2</sup> / 10 лет						NDVI / 10 лет					
	июнь		июль		август		июнь		июль		август		июнь		июль		август	
	ETP	ЗС	ETP	ЗС	ETP	ЗС	ETP	ЗС	ETP	ЗС	ETP	ЗС	ETP	ЗС	ETP	ЗС	ETP	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
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	0,02
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
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
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
подтаежная	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
широколиственно-лесная	0,24		0,02		0,27		-0,01		-0,45		0,03		0,01		0		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	0,01
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	0,01
сухостепная	0,54		0,01		0,52		-0,5		-1,1		0,02		-0,03		-0,03		-0,02	
полупустыня	0,75		0,01		0,51		-1		-1		0,01		-0,03		-0,02		-0,01	

В субарктической зоне незначительное увеличение тепло-влагообмена с начала XXI века в начале летнего сезона сопровождается увеличением фитомассы. На юге, в суббореальных ландшафтах положительные тренды потоков явного тепла сопровождаются падением потоков скрытого тепла и фитомассы.

# Изменение взаимосвязи вегетационного индекса и потоков турбулентного тепло- влагообмена (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  $> 0,1$  ( $< -0,1$ ). Условные обозначения: 1 – июнь,  
2 – июль, 3 – август.

## Выводы

- Связь тепло-влагообмена с NDVI находится на среднем уровне и не превышает 0.7 во всех ландшафтных зонах, и значительно меняется в течение летнего сезона.
- Сопряжение турбулентного тепло-влагообмена и фитомассы особенно заметно прослеживается при разреженной растительности в субарктических и суббореальных ландшафтах. Связь потоков явного тепла и NDVI в течение летнего периода в субарктических и бореальных ландшафтах максимальна положительна в июне, затем ослабевает.
- Турбулентные потоки скрытого тепла и NDVI 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.
- В субарктической зоне увеличение тепло-влагообмена с начала XXI века в начале летнего сезона сопровождается увеличением NDVI. В суббореальных ландшафтах положительные тренды потоков явного тепла сопровождаются падением потоков скрытого тепла и фитомассы.
- Сопряженность теплообмена с NDVI растет в июне и августе и мало меняется в июле. Для потоков скрытого тепла и NDVI корреляционные связи также растут в июне и августе в субарктике и бореальной зоне ЕТР, а в суббореальных ландшафтах, наоборот слабеют на протяжении всего летнего сезона на фоне уменьшения NDVI.

*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»*



## Литература

*Оке Т.Р.* Климаты пограничного слоя. Ленинград. Гидрометеоиздат. 1982.

*Finnikov K.A., Korzun A.M., Kolesnichenko A.V.* Mathematical modeling of heat transfer in plant community // Journal of Stress Physiology & Biochemistry, V. 7. No. 4. 2011. pp. 424-436.

IPCC, 2022: Climate Change 2022: IPCC Sixth Assessment.

*Wu M., Schurgers G., Rummukainen M., Smith B., Samuelsson P., Jansson C., Siltberg J., May W.* Vegetation–climate feedbacks modulate rainfall patterns in Africa under future climate change // Earth Syst. Dyn. № 7. P. 627-647. DOI: <https://doi.org/10.5194/esd-7-627-2016>.