
ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.582.2

**КЛИМАТ ЗОНАЛЬНЫХ ЛАНДШАФТОВ РАВНИН РОССИИ
ПРИ СОВРЕМЕННОМ ГЛОБАЛЬНОМ ПОТЕПЛЕНИИ
В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД**

© 2023 г. Т. Б. Титкова^а, *, А. Н. Золотокрылин^а, **

^аИнститут географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: titkova@igras.ru

**e-mail: zolotokrylin@igras.ru

Поступила в редакцию 15.03.2022 г.

После доработки 15.02.2023 г.

Принята к публикации 21.02.2023 г.

Изучены изменения климатических параметров в летний сезон между периодами 1961–1990 и 1991–2020 гг. в природных зонах равнинной части Европейской территории России и Западной Сибири. Для последнего тридцатилетия выявлены ландшафты со значимыми изменениями климатических параметров. Исследованы связи температуры воздуха и осадков с испарением и влажностью почвы. Установлено, что в суббореальных ландшафтах Европейской территории России отмечается ярко выраженное потепление, уменьшение суммарных осадков, испарения и влажности почвы. Показано, что статистически значимое потепление в июне и августе в арктических и бореальных ландшафтах Западной Сибири привело к росту испарения и иссушению почвы. На испарение и влажность верхнего слоя почвы наибольшее влияние оказывает температура: положительное в арктической и бореальной зонах и отрицательное в суббореальной. Влияние осадков на эти же параметры наиболее заметно в суббореальных ландшафтах. Оценка трендов температуры воздуха и испарения показала, что они были значимыми в последнее тридцатилетие в суббореальной зоне Европейской территории России и арктических ландшафтах Западной Сибири. В суббореальной зоне значительный рост температуры приводит к заметному падению испарения, что не наблюдается в бореальных ландшафтах.

Ключевые слова: ландшафты, природные зоны, температура, осадки, испарение, влажность почвы, ERA5-Land, европейская часть России, Западная Сибирь

DOI: 10.31857/S2587556623030111, EDN: QTNESR

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемое потепление климата и сопутствующие ему природные процессы на большей части нашей планеты отличаются разнообразием и дискретностью (IPCC, 2013; Overland et al., 2016). Влияние изменения климата на динамику растительности зависит главным образом от приземной температуры воздуха и количества осадков. В (Wang et al., 2018) отмечается, что глобальное потепление может значительно повлиять на водный баланс за счет изменения испарения и увеличения дефицита почвенной влаги. При этом их флуктуации неоднородны в пространстве в результате региональных особенностей, внутренней стохастической изменчивости атмосферной циркуляции, а также нелинейности отклика циркуляции на глобальное потепление (Демченко, Семенов, 2017; Munang et al., 2013).

Климатические процессы приводят к многообразию откликов ландшафтов: как быстрому –

реакции на засухи, так и накопленному – на повышение глобальной температуры, выраженной в изменении состава и структуры растительного компонента (Золотокрылин, Титкова, 2009; Титкова, Виноградова, 2015; Тишков и др., 2020; Singh et al., 2003). Согласно предыдущим исследованиям экстремальные явления в течение короткого промежутка времени влияют на подстилающую поверхность значительно сильнее, чем постепенные изменения количества осадков и температуры (Bouwer, 2019). Реакция растительности на температуру и условия осадков более медленная при густой растительности и более быстрая при разреженной, что связано со скоростью теплообмена в толще растительного покрова (Wu et al., 2016).

В периоды 1961–1990 и 1991–2020 гг. в северной части Атлантики наблюдались две устойчивые аномалии температуры поверхности океана (ТПО), приведшие к серьезным климатическим

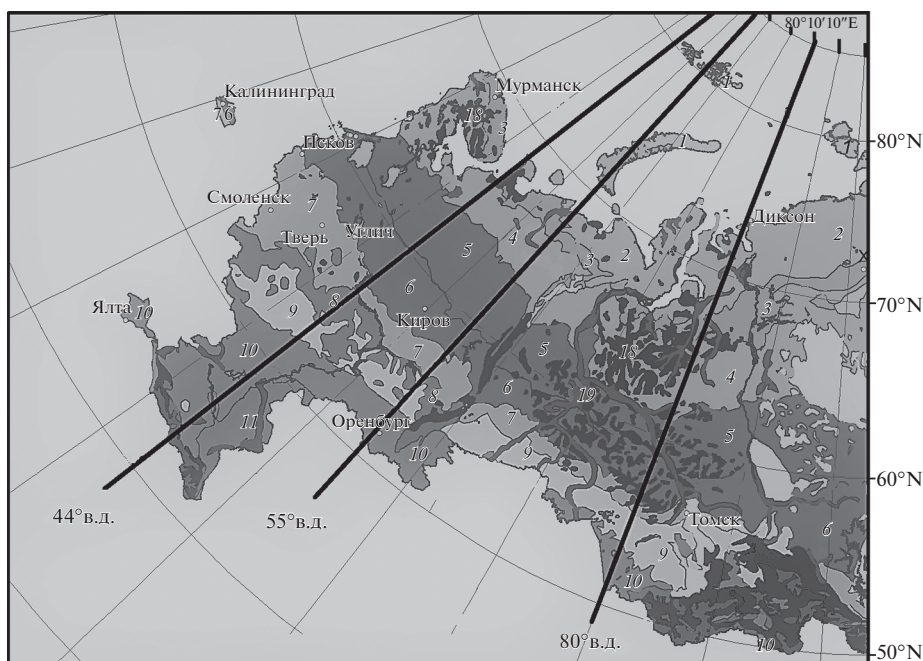


Рис. 1. Ландшафтная карта равнинной части России (Национальный ..., 2007 с дополнением) и профили исследования. Ландшафты: 1 – арктические, 2 – тундровые, 3 – лесотундровые, 4 – северо-таежные, 5 – среднетаежные, 6 – южно-таежные, 7 – подтаежные, 8 – широколиственно-лесные, 9 – лесостепные, 10 – степные типичные и сухостепные, 11 – полупустынные и пустынные, 18 – болота, 19 – речные долины и дельты.

последствиям для наземных экосистем во многих регионах мира (Semenov et al., 2010; Ting et al., 2009). В 1963–1994 гг. отмечалось преобладание отрицательной фазы аномалии ТПО Северной Атлантики (Черенкова, 2017), что сопровождалось относительно прохладной погодой и отсутствием значимых трендов температуры на Европейской территории России (ЕТР) и Западной Сибири (Бокучава, Семенов, 2018; Груза, Ранькова, 2012б). С середины 1990-х годов в Северной Атлантике преобладает положительная фаза аномалии ТПО (Второй ..., 2014; Киктев и др., 2009; Черенкова, 2017). Последний период также характеризуется существенным ослаблением крупномасштабной атмосферной циркуляции летнего сезона, что сказалось на термическом режиме ЕТР и Западной Сибири (Попова, 2018). Между периодами 1961–1990 и 1981–2010 гг. повысилась норма сезонной температуры воздуха на всей территории России, а для 20–40% площади эти изменения достигли 5%-го уровня значимости (Второй ..., 2014).

Цели работы: (1) выявить зональные ландшафты со значимыми изменениями климатических параметров в летний период; (2) оценить связи между изменениями климатических параметров и характеристиками подстилающей поверхности; (3) определить тренды климатических параметров в отдельных природных зонах ЕТР и Западной Сибири.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Рассматриваются природные зоны равнинной территории ЕТР и Западной Сибири. В описании ландшафтной структуры была использована карта из Национального Атласа России (2007) (рис. 1). Анализировались климатические параметры в целом по природным зонам и отдельно на меридиональных разрезах 44° в.д., 55° в.д. и 80° в.д.

Для анализа использовались ежемесячные данные реанализа ERA5-Land с 1961 по 2020 г. за летний период¹. ERA5-Land представляет собой набор данных пятого поколения с разрешением 0.1° × 0.1° (Muñoz-Sabater et al., 2021). Были обработаны массивы: общего количества осадков, температуры воздуха на высоте 2 м, испарения и влажности почвы в слое 0–7 см.

Наибольшая неопределенность реанализа ERA5 приходится на прибрежные ареалы (Muñoz-Sabater et al., 2021). Для ЕТР погрешность температуры составляет 0.2–0.3°С в зависимости от ландшафта, а величина осадков имеет заметную систематическую положительную ошибку в районе 20% для лесотундры и полупустыни ЕТР (Григорьев и др., 2020). В полупустыне, на фоне дефицита осадков, это отклонение может повлиять на расчеты вклада осадков в изменение испарения и влажности почвы. В центре ЕТР коэффи-

¹ <https://cds.climate.copernicus.eu/> (дата обращения 14.02.2022).

коэффициент корреляции Пирсона стационарных данных с массивами ERA5-Land в летний сезон составляет 0.66–0.83 для среднемесячных осадков и 0.99 для температуры, поэтому неопределенность данных реанализа в меньшей мере отражается на результатах трендов (Головинов, Васильева, 2022).

Для расчета испарения в ERA5-Land при существующих атмосферных условиях (давления и влажности воздуха) используется текущая температура самого нижнего слоя атмосферы, а также температура различных слоев почвы. Испарение, которое в системе прогнозирования (IFS) ECM-WF имеет отрицательный знак, было использовано с положительным знаком. Размерность влагосодержания почвы $\text{м}^3/\text{м}^3$ переведена в проценты.

Расчет значимости климатических изменений между периодами 1991–2020 и 1961–1990 гг. был произведен в целом за летний период и отдельно по месяцам с вероятностью 95% по критерию Стьюдента. Для оценок значимости трендов также применен критерий Стьюдента для всех исследуемых параметров (вне зависимости от нормальности распределения, поскольку сравниваемые величины не составляют пару коррелирующих значений; тем самым выполняется одно из условий применения критерия Стьюдента).

Для расчета статистической связи климатических параметров и характеристик поверхности использовалась простая парная корреляция в целом за летний период 1961–2020 гг. на долготных разрезах 44° в.д., 55° в.д. (центр и восток ЕТР) и 80° в.д. (центр Западной Сибири). Расчет производился по данным из узлов сетки в полосе 0.2° долготы соответствующего профиля.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Климатические изменения параметров по ландшафтным зонам

На равнинах ЕТР и Западной Сибири в 1991–2020 гг. в среднем за лето наблюдалось положительное изменение температуры воздуха относительно 1961–1990 гг. Максимальный рост температуры отмечается на юге ЕТР (западная часть широколиственно-лесной, лесостепной и степной зоны, полупустыня) и на северо-востоке Западной Сибири (зоны тундр и лесотундр, восток северной тайги) до $1.5\text{--}2^\circ\text{C}$. Такие результаты подтверждает оценка значимости изменений климатических параметров на долготных разрезах отдельно по летним месяцам на ЕТР (44° в.д., 55° в.д.) и в Западной Сибири (80° в.д.) (табл. 1).

Летнее потепление ярче всего проявилось в июле и августе в центре ЕТР, южнее таежной зоны. В степи положительный сдвиг температуры прослеживается во все летние месяцы с максимумом до 1.5°C в августе. На востоке ЕТР повыше-

ние температуры отмечено: в июне — повсеместно (максимально в тундре до 1.9°C); в июле — в Арктике и степи; в августе — в Арктике и южнее подтаежных ландшафтов. В Западной Сибири потепление прослеживается в июне от тундры до тайги (в лесотундре до 3.3°C) и в августе от южной тайги до степи. Выделяется на общем фоне июльское понижение температуры в Западной Сибири от лесотундры до степи на $-0.1\text{--}-0.3^\circ\text{C}$.

Сумма осадков в целом за лето уменьшается на ЕТР южнее подтаежной зоны и растет на севере ЕТР и в Западной Сибири (рис. 2б). В центре ЕТР значительное падение сумм осадков наблюдается в июле от южной тайги до лесостепи и в августе в степи. Колебание осадков не значимо в июне (с положительной тенденцией) и в августе (с отрицательной). На востоке ЕТР значительное увеличение осадков наблюдается в июне от тундры до северной тайги и в июле в Арктике; в июле и августе в целом количество осадков уменьшается. В Западной Сибири колебание осадков не значимо с тенденцией роста в июне и июле от южной тайги до степи и с падением в июне от тундры до средней тайги, а в августе от средней тайги до степи (см. табл. 1).

Изменившееся соотношение тепла и влаги привело к отклику подстилающей поверхности. В целом за летний период как на ЕТР, так и в Западной Сибири испарение увеличилось от Арктики до широколиственных лесов и уменьшилось от лесостепи до полупустыни (рис. 2в). В бореальных ландшафтах центральной части ЕТР при достаточном увлажнении и увеличении температуры тренды испарения положительные в июне и июле. В августе южнее таежной зоны испарение снижается, а в степи его падение происходит во все летние месяцы. Ближе к Уралу испарение растет: от Арктики до лесостепи — в июне; до южной тайги — в июле; в Арктике и тундре — в августе. В Западной Сибири на фоне значительного роста температуры и осадков в июне значимо увеличилось испарение от тундры до северной тайги. В остальные месяцы колебания испарения не значимы (см. табл. 1).

Потепление и снижение осадков в целом за летний период вызвало уменьшение влажности почвы практически на всей рассматриваемой территории с максимальным падением на юге ЕТР (рис. 2г). В центре ЕТР уменьшение влажности почвы отмечается во все месяцы лета. Значимое падение почвенной влаги наблюдается от южной тайги до лесостепи в июле и августе. На востоке ЕТР незначительный рост влажности почвы отмечен в северных ландшафтах и падение южнее северной тайги. В Западной Сибири потепление северных широт привело к значимому уменьшению почвенной влаги в июне от тундры до северной тайги и в августе от южной тайги до лесостепи.

Таблица 1. Изменения климатических параметров в летний период в ландшафтных зонах на профиле 44° в.д., 55° в.д. и 80° в.д. в 1991–2020 гг. относительно 1961–1990 гг.

Параметр	Температура, °С			Осадки, мм			Испарение, мм			Влажность почвы в слое 0–7 см, %		
Ландшафтная зона	июнь	июль	август	июнь	июль	август	июнь	июль	август	июнь	июль	август
44° в.д.												
Северотаежная	00.5	00.6	00.4	00.8	00.9	20.3	10.1	10.5	00.5	–0.4	–0.7	00.4
Среднетаежная	00.5	00.7	00.4	–1.2	–5.3	–4.9	00.0	10.4	00.1	–0.8	–1.4	–0.6
Южнотаежная	00.5	00.9	00.5	10.5	–15.8	–0.8	10.5	1.9	–0.6	–0.7	–2.0	–1.5
Подтаежная	00.5	00.9	00.6	30.6	–15.2	–2.4	20.2	30.3	–0.6	–0.1	–1.9	–2.0
Широколиственно- лесные	00.5	00.9	00.8	00.0	–17.4	–0.1	20.0	20.9	–0.1	–0.1	–2.2	–2.0
Лесостепные	00.5	10.0	00.9	00.9	–13.2	–6.5	10.1	20.7	–2.3	–0.4	–2.1	–2.6
Степные типичные и сухостепные	10.0	10.2	10.5	–3.8	–8.1	–10.9	–1.7	–4.2	–7.5	–1.1	–1.4	–2.5
55° в.д.												
Арктическая	0.7	1.2	1.3	2.3	11.6	–1.0	0.1	1.8	0.0	1.4	0.8	0.2
Тундровая	1.9	0.1	0.4	14.9	4.5	–1.6	10.2	0.6	0.2	–1.8	0.5	1.7
Лесотундровая	1.5	0.0	0.2	15.2	–2.1	–2.6	8.8	0.1	–0.3	–1.5	–0.5	0.8
Северотаежная	1.0	0.0	0.2	11.2	–3.7	–2.8	5.4	2.4	–1.0	–0.4	–0.2	–0.2
Среднетаежная	0.7	0.2	0.2	5.9	–7.6	0.8	2.5	1.0	–2.4	0.3	–1.1	–0.5
Южнотаежная	0.5	0.2	0.3	2.6	–8.0	0.3	3.2	0.0	–2.8	0.5	–0.9	–0.8
Подтаежная	0.5	0.2	0.6	2.4	–14.2	–0.2	2.5	–0.3	–0.2	–0.5	–1.4	–1.0
Лесостепные	0.5	0.2	0.6	2.4	–14.2	–0.2	2.5	–0.3	–0.2	–0.5	–1.4	–1.0
Степные типич- ные, сухостепные	0.9	0.6	1.1	–6.3	–8.2	–8.1	–5.7	–11.1	–9.8	–1.3	–1.4	–2.1
Полупустынные пустынные	0.8	0.4	1.1	–1.0	1.0	–3.9	–0.2	–1.4	–1.9	0.1	0.1	–0.5
80° в.д.												
Тундровая	2.9	0.2	0.3	4.8	–2.4	4.1	14.1	2.3	–0.2	–0.8	–1.9	0.2
Лесотундровая	3.3	–0.1	0.2	0.8	–4.6	7.0	16.7	–1.2	–0.8	–3.5	–1.4	–0.2
Северотаежная	2.4	–0.3	0.3	–1.8	–4.5	10.4	14.0	0.6	0.1	–2.8	–0.7	0.2
Среднетаежная	1.2	–0.2	0.5	5.0	–4.1	–3.0	3.7	1.9	–0.2	–0.6	0.4	–1.4

Примечание. Полужирным выделены значимые изменения с вероятностью 0.95 по критерию Стьюдента.

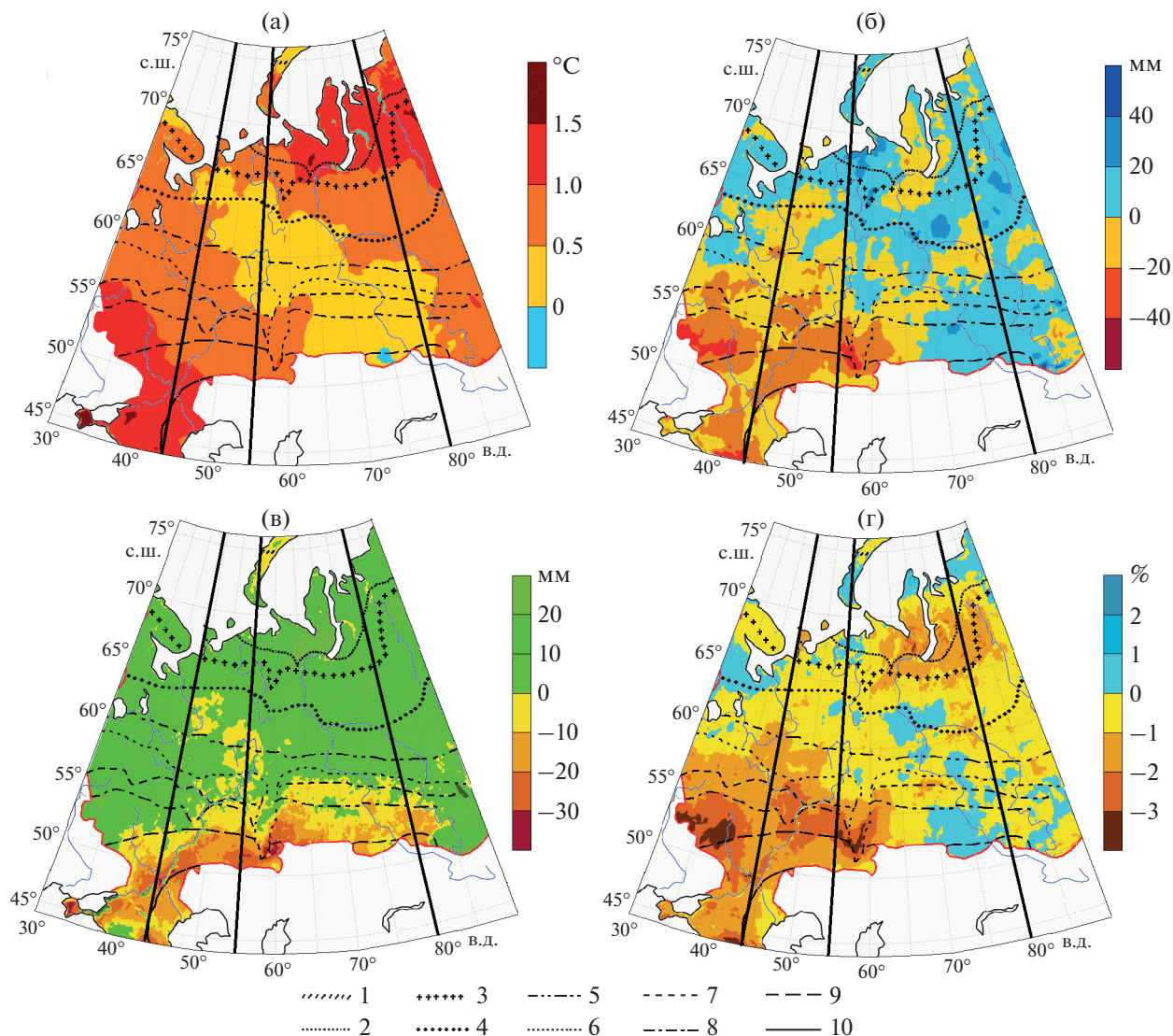


Рис. 2. Изменение климатических параметров между 1991–2020 и 1961–1990 гг. в среднем за лето: (а) температуры воздуха на 2 м (°C), (б) суммы осадков (мм), (в) испарение, E_v (мм/м³), (г) влажность верхнего слоя почвы глубиной до 7 см, Sw (%).

Примечание: Статистически значимые изменения для температуры $>(<)0.5^{\circ}\text{C}$ (-0.5°C), осадков и испарения $>(<)10$ мм (-10 мм), влажности верхнего слоя почвы $>(<)2\%$ (-2%). Показаны южные границы ландшафтных зон (номера зон см. на рис. 1).

Таким образом, из сравнения средне-летних климатических параметров в двух последовательных тридцатилетних периодах значимые изменения просматриваются главным образом на ЕТР в суббореальных ландшафтах — от лесостепных до полупустынных. Здесь ярко выражено потепление, падение сумм осадков, что отразилось на уменьшении влажности почвы и падении испарения во вторую половину летнего периода. В Западной Сибири в арктических и бореальных ландшафтах июньское и августовское потепление привели к увеличению испарения и уменьшению

почвенной влаги. Здесь же можно отметить слабое июльское похолодание на большей части Западной Сибири, кроме зоны тундры.

Связь между изменениями климатических параметров и характеристиками поверхности

Анализ связи испарения и влажности почвы с температурой и осадками показал, что в летний период от Арктики до средней тайги интенсивность испарения пропорциональна температуре. Корреляция испарения с температурой положи-

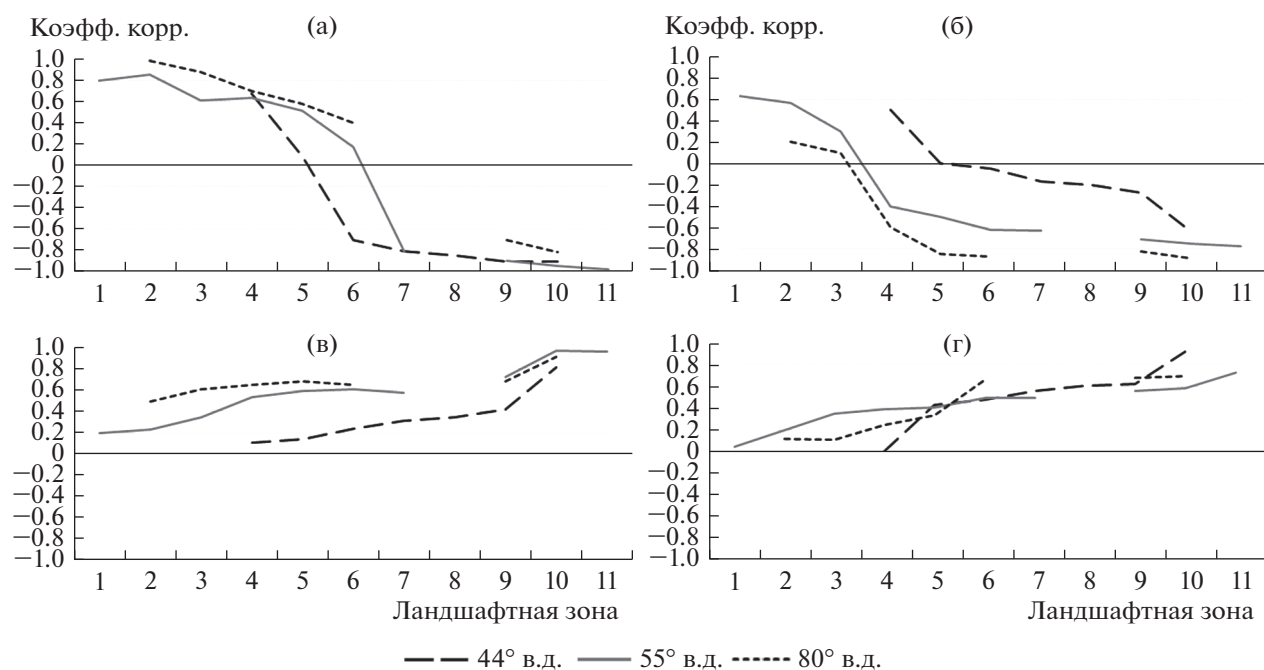


Рис. 3. Связь коэффициентов линейной корреляции испарения и температуры (а), влажности почвы и температуры (б), испарения и осадков (в), влажности почвы и осадков (г) по ландшафтными зонам на долготных разрезах 44° в.д., 55° в.д. и 80° в.д. в среднем за лето 1961–2020 гг. Цифрами обозначены ландшафты (см. рис. 1).

тельна с коэффициентом 0.6–0.8. Южнее широколиственной зоны эти зависимости нарушаются и становятся обратными (корреляция $-0.6...-0.9$), так как увядающая растительность и иссушение почвы при высоких температурах препятствуют увеличению испарения, особенно в степи и полупустыне (рис. 3а). Аналогичный характер соотношения наблюдается у влажности почвы и температуры воздуха, для которых переход от положительной к отрицательной связи происходит в таежных ландшафтах (рис. 3б). Корреляция температуры воздуха и влажности почвы положительна в зонах с избыточным увлажнением от Арктики до южной тайги. Южнее, при недостатке летнего увлажнения, связь становится отрицательной. Подобные зависимости наблюдаются на всех трех меридиональных разрезах. Корреляция осадков и испарения слабо положительная в субарктических и бореальных ландшафтах как на ЕТР, так и в Западной Сибири. В зонах с недостатком летнего увлажнения (в лесостепной–полупустынной) она возрастает и становится 0.5–0.9 (рис. 3в). Связь осадков и влажности почвы положительна и значима южнее подтаежной зоны (рис. 3г).

Таким образом, в летний период на испарение и влажность верхнего слоя почвы наибольшее влияние оказывает температура: положительное в арктических и бореальных ландшафтах и отрица-

тельное в суббореальных. Вклад осадков в изменение испарения и влажности почвы заметнее всего в суббореальной зоне.

Климатические тренды параметров в ландшафтных зонах

Рассмотрим межгодовые изменения температуры воздуха и испарения в северотаежных и степных ландшафтах, которые из-за густоты растительности обладают разной скоростью теплообмена (Klein et al., 2017; Wu et al., 2016). Как показано выше, эти ландшафты в летний период имеют противоположные зависимости испарения от температуры: прямую в северной тайге и обратную в степи. Тренд температуры в северотаежной зоне на всех разрезах слабо положителен и не достигает уровня значимости в период 1961–1990 гг. (рис. 4-1). Тренды испарения здесь также не значимы (рис. 5-1). В период 1991–2020 гг. увеличение температуры значимо на всех долготных профилях ЕТР и Западной Сибири. При этом рост испарения отмечается на всех разрезах, но не значим на востоке ЕТР (профиль 55° в.д.) (см. рис. 4б, 5б-1). То есть в бореальных ландшафтах потепление вызывает увеличение испарения, но рост температуры может быть недостаточен для значимого роста испарения (см. рис. 4б, 5б-1).

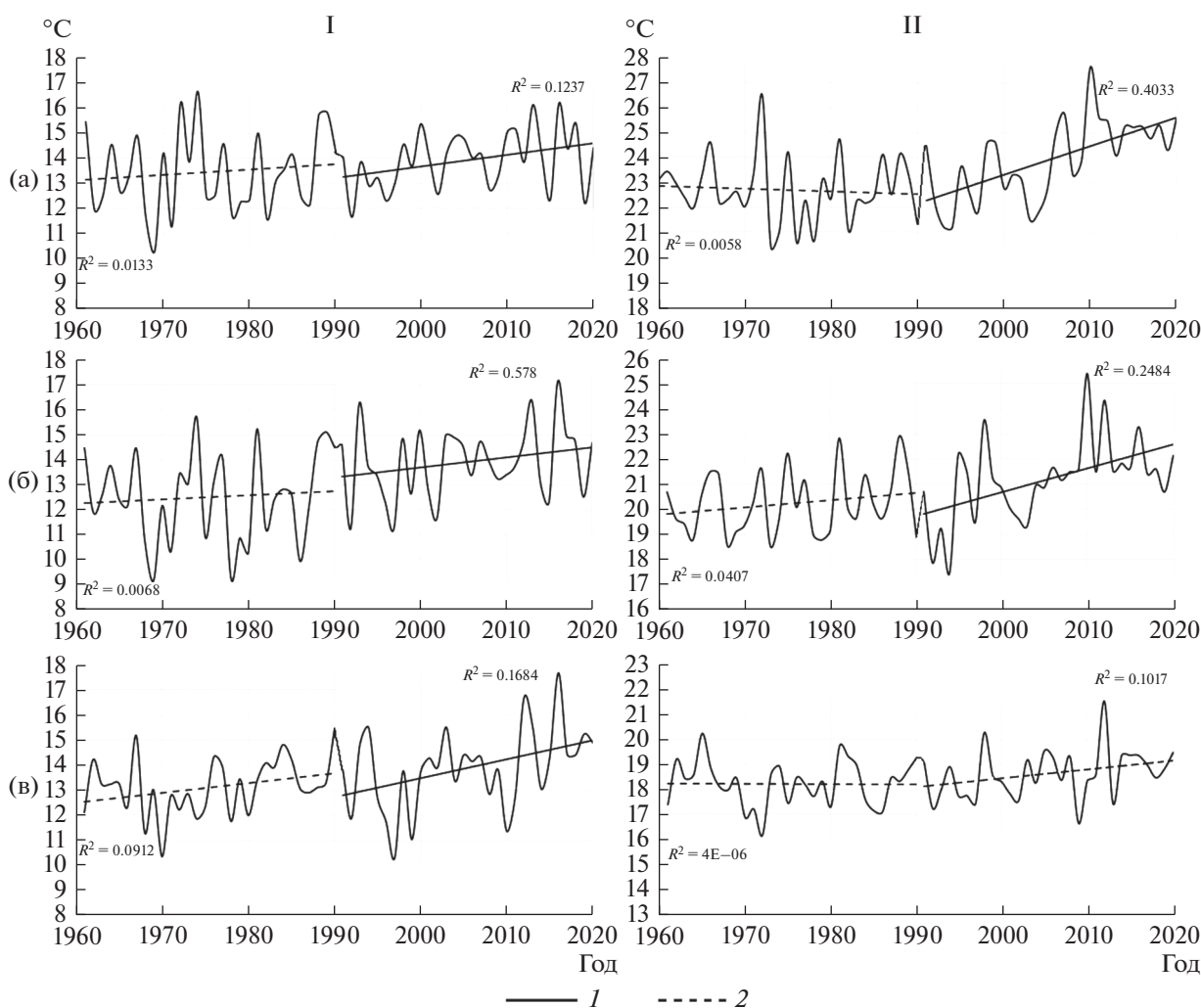


Рис. 4. Межгодовые изменения температуры летом в северотаежной (I) и степной (II) ландшафтных зонах на долготных разрезах, 1961–2020 гг.: (а) 45° в.д., (б) 55° в.д. и (в) 80° в.д. Линейные тренды: 1 – значимый, 2 – не значимый.

В степной зоне картина отличается. В период 1961–1990 гг. наблюдается отсутствие тренда температуры и испарения (см. рис. 4-II). В последующий период потепление на ЕТР привело к значимому падению испарения в степи (см. рис. 5а, б-II). В Западной Сибири слабый рост температуры сопровождается незначимым падением испарения (см. рис. 4в, 5в-II). Таким образом, в суббореальных ландшафтах значимый рост температуры приводит к значимому отрицательному отклику испарения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты нашей работы во многом подтверждают выводы предыдущих исследований относительно летнего потепления на ЕТР и в Западной Сибири.

В частности, подтвердились, следующие тенденции:

- интенсивная область июльского потепления на западе и юго-западе ЕТР в период 1976–2019 гг. (Переведенцев и др., 2021; Третий ..., 2022; и др.);
- неравномерность летнего потепления в Западной Сибири, с отсутствием июльского потепления в центре Западной Сибири (Бардин и др., 2016; Павленко, Сергеев, 2006; Переведенцев и др., 2021; Попова, 2018; Титкова, Золотокрылин, 2021; и др.);
- уменьшение испарения и влажности почвы с начала XX в. в степных ландшафтах (Глобальный ..., 2021; Золотокрылин и др., 2018; Титкова, Золотокрылин, 2022; Черенкова, 2021).

Наше исследование дополняет предыдущие анализом связей испарения и влажности почвы с температурой и осадками от тундры до полупустыни при потеплении, а дает более детальное

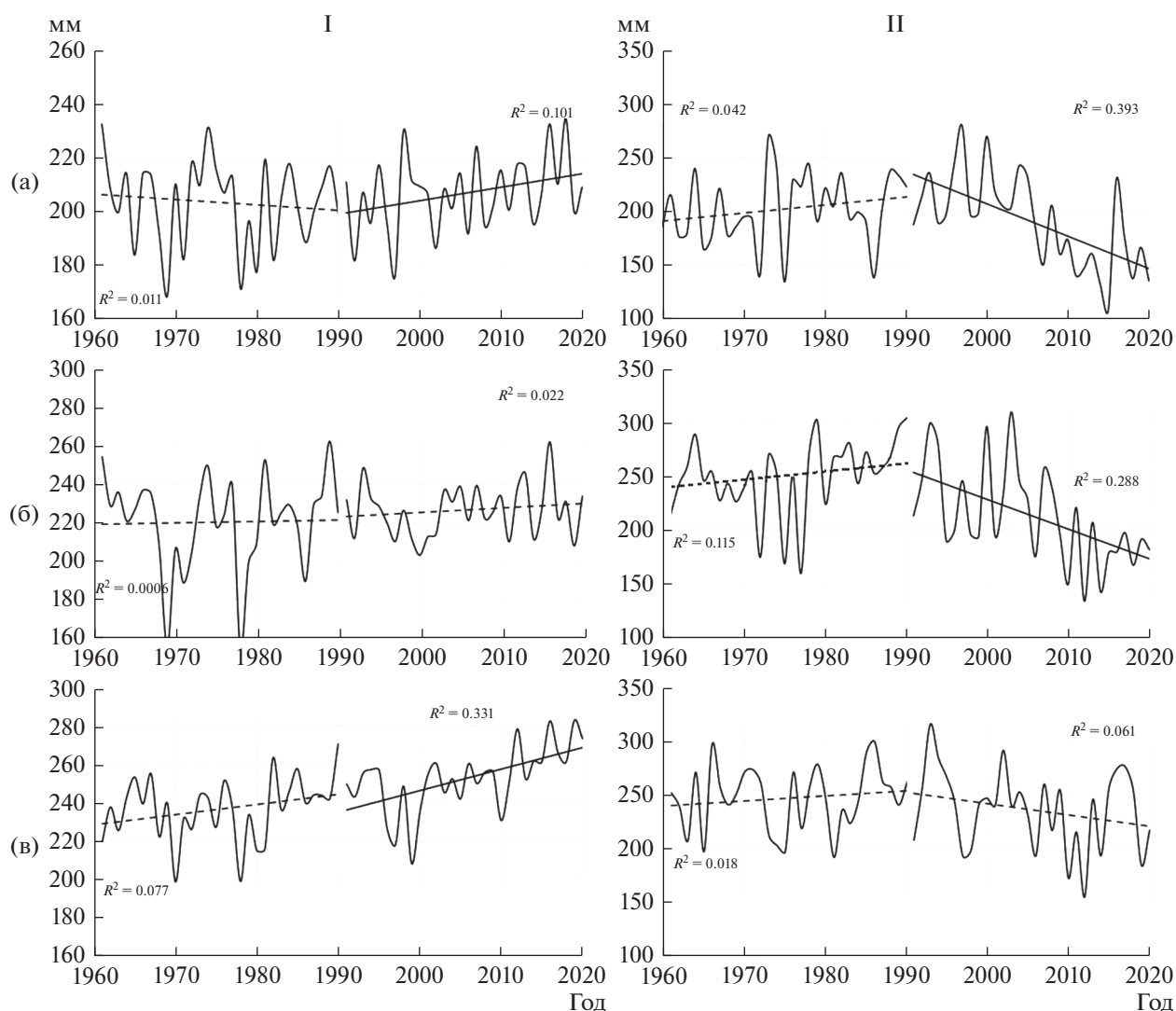


Рис. 5. Межгодовые изменения испарения летом в северотаежной (I) и степной (II) ландшафтных зонах на долготных разрезах, 1961–2020 гг.: (а) 45° в.д., (б) 55° в.д. и (в) 80° в.д. Условные обозначения см. рис. 4.

описание наблюдаемого потепления в природных зонах равнин ЕТР и Западной Сибири.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В летний период потепления 1991–2020 гг. относительно 1961–1990 гг. значимые изменения климатических параметров просматриваются на ЕТР в суббореальных ландшафтах от лесостепных до полупустынных. Здесь проявляется ярко выраженное потепление, падение сумм осадков и испарения, уменьшение влажности почвы. В бореальной зоне равнин ЕТР от северной тайги до широколиственных лесов изменение климатических характеристик между 30-летними периодами не достигло уровня значимости. В арктических и бореальных ландшафтах Западной Сибири отмечается июньское и августовское потепление

с увеличением осадков, что привело к увеличению испарения. В суббореальной зоне Западной Сибири значимых изменений климатических параметров не произошло.

На испарение и влажность верхнего слоя почвы наибольшее влияние оказывает температура: положительное в арктических и бореальных ландшафтах и отрицательное в суббореальных. Влияние осадков на эти же параметры наиболее заметно в суббореальных районах. В таежной зоне рост температуры не сопровождается значимым положительным откликом испарения, что скорее всего связано с влиянием густоты растительного покрова и, как следствие, с замедленным теплообменом. В суббореальных ландшафтах повышение температуры приводит к падению испарения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН АААА-А19-119022190173-2 (FMGE-2019-0009).

FUNDING

The study was carried out within the framework of the state task of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences АААА-А19-119022190173-2 (FMGE-2019-0009).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бардин М.Ю., Ранькова Э.Я., Самохина О.Ф. Температурные экстремумы июня и июля 2016 года // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2016. № 2. С. 143–148.
- Бокучава Д.Д., Семенов В.А. Анализ аномалий приземной температуры воздуха в северном полушарии в течение XX века по данным наблюдений и реанализов // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2018. Т. 1. С. 28–51. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2018-1-28-51>
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Гл.: 1.2.3.; 1.3.2. М.: Изд-во Росгидромета, 2014. 1009 с.
- Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство) // *Национальный докл. М., 2021. Т. 3. 700 с.* <https://doi.org/10.52479/978-5-6045103-9-1>
- Головинов Е.Э., Васильева Н.А. Сравнение многолетних метеорологических характеристик по данным реанализа и наземных наблюдений на территории Московской области // *Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика*. 2022. Т. 12. № 3. С. 92–105. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-3-92-105>
- Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Степаненко В.М. Оценка точности данных реанализа ERA-5 / В сб.: Труды IX Междунаро. науч.-практ. конф. “Морские исследования и образование (MARESE-DU-2020)”. Сборник. М., 2020. Т. 2. С. 47–50.
- Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Динамические климатические нормы температуры воздуха // *Метеорология и гидрология*. 2012а. № 12. С. 5–18.
- Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ФГБУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2012б. 194 с.
- Демченко П.Ф., Семенов В.А. Оценка неопределенности климатических трендов приповерхностной температуры, связанной с внутренней динамикой атмосферы // *ДАН*. 2017. Т. 476. № 3. С. 339–342. <https://doi.org/10.7868/S0869565217270202>
- Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б. Климатический фактор динамики растительности засушливых земель Европейской территории России // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. М.: ИГКЭ, 2009. Т. XXII. С. 79–91.
- Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А. Увлажнение засушливых земель Европейской территории России: настоящее и будущее // *Аридные экосистемы*. 2014. Т. 20. № 2 (59). С. 5–11.
- Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б. Биоклиматическая субгумидная зона на равнинах России: засухи, опустынивание/деградация // *Аридные экосистемы*. 2018. Т. 24. № 1 (74). С. 13–20.
- Киктев Д.В., Сизе Д., Александер Л. Сравнение многолетних средних и тенденций изменения ежегодных экстремумов температуры и осадков по данным моделирования и наблюдений // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2009. Т. 45. № 3. С. 305–315.
- Национальный Атлас России. Ландшафтная карта. 2007. Т. 2 / М-6: 1:30000000. С. 331. <https://national-atlas.ru/tom2/331.html>
- Павленко В.А., Сергеев А.А. Потепление климата Западной Сибири и возможные эколого-экономические последствия // *СГГА Новосибирск*. 2006. С. 1–7.
- Переведенцев Ю.П., Васильев А.А., Шерстюков Б.Г., Шанталинский К.М. Климатические изменения на территории России в конце XX – начале XXI века // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 10. С. 14–26.
- Попова В.В. Современные изменения климата на севере Евразии как проявление вариаций крупномасштабной атмосферной циркуляции // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2018. № 1. С. 84–111. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2018-1-84-111>
- Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н. Региональная неравномерность летнего потепления материковой Арктики // *Арктика: экология и экономика*. 2021. № 3. С. 374–384.
- Титкова Т.Б., Виноградова В.В. Отклик растительности на изменение климатических условий в бореальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 3. С. 75–86.
- Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н. Летние климатические изменения на юге европейской России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2022. Т. 8. № 1. С. 107–121. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-1-107-121>
- Тишков А.А., Белоновская Е.А., Вайсфельд М.А., Глазов П.М., Лаппо Е.Г., Морозова О.В., Покровская И.В., Тертицкий Г.М., Титова С.В., Царевская Н.Г. Региональные биогеографические эффекты “быстрых” изменений климата в Российской Арктике в XXI в. // *Арктика: экология и экономика*. 2020. № 2 (38). С. 31–44. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-2-31-44>
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. СПб.: Росгидромет. Научные технологии, 2022. 676 с.
- Черенкова Е.А. Влияние изменений крупномасштабной атмосферной циркуляции и температуры поверхности океана на тренды летних осадков на европейском севере России по наземным и спутниковым данным // *Современные проблемы*

- дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 229–238.
- Черенкова Е.А. Сезонные осадки на территории Восточно-Европейской равнины в периоды теплых и холодных аномалий температуры поверхности северной Атлантики // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 5. С. 72–81.
<https://doi.org/10.7868/s0373244417050061>
- Черенкова Е.А. Тренды изменений атмосферного и почвенного увлажнения в начале XXI-го века на европейской территории России по спутниковым и наземным данным / В кн.: Материалы 19-й Международной конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. М.: Институт космических исследований РАН, 2021. С. 390.
- Bouwer L.M. Observed and projected impacts from extreme weather events: Implications for loss and damage. In: Loss and Damage from Climate Change. Switzerland, Cham: Springer, 2019. P. 63–82.
- IPCC. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5). Cambridge, United Kingdom; New York, USA: Cambridge Univ. Press, 2013.
- Klein C., Bliefernicht J., Heinzeller D., Gessner U., Klein I., Kunstmann H. Feedback of observed interannual vegetation change: A regional climate model analysis for the West African monsoon // Clim. Dyn. 2017. Vol. 48. P. 2837–2858.
- Munang R., Thiaw I., Alverson K., Liu J., Han Z. The role of ecosystem services in climate change adaptation and disaster risk reduction // Current Opinion in Environ. Sustainability. 2013. № 5. P. 1–6.
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.02.002>
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D., Piles M., Rodríguez-Fernández J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J. ERA5-Land: a state-of-the-art global re-analysis dataset for land applications // Earth Syst. Sci. Data. 2021. № 13. P. 4349–4383.
<https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Overland J., Dethloff K., Francis J., Hall R., Hanna E., Kim S.J., Screen J., Shepherd T.G., Vihma T. Nonlinear response of midlatitude weather to the changing Arctic // Nature Climate Change. 2016. Vol. 6. P. 992–999.
<https://doi.org/10.1038/NCLIMATE3121>
- Semenov V.A., Latif M., Dommenget D., Keenlyside N.S., Strehz A., Martin T., Park W. The impact of North Atlantic-Arctic multidecadal variability on Northern Hemisphere surface air temperature // J. Climate. 2010. Vol. 23 (21). P. 5668–5677.
<https://doi.org/10.1175/2010JCLI3347.1>
- Singh R.P., Roy S., Kogan F. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India // Int. J. Remote Sens. 2003. № 24. P. 4393–4402.
<https://doi.org/10.1080/0143116031000084323>
- Ting M., Kushnir Y., Seager R., Li C. Forced and internal twentieth-century SST trends in the North Atlantic // J. Climate. 2009. № 22. P. 1469–1481.
<https://doi.org/10.1175/2008JCLI2561.1>
- Wang X., Wu C., Peng D., Gonsamo A., Liu Z. Snow cover phenology affects alpine vegetation growth dynamics on the Tibetan Plateau: Satellite observed evidence, impacts of different biomes, and climate drivers // Agric. For. Meteorol. 2018. № 256. P. 61–74.
- Wu M., Schurgers G., Rummukainen M., Smith B., Samuels-P., Jansson C., Siltberg J., May W. Vegetation-climate feedbacks modulate rainfall patterns in Africa under future climate change // Earth Syst. Dyn. 2016. № 7. P. 627–647.
<https://doi.org/10.5194/esd-7-627-2016>

The Climate of Zonal Plain Landscapes of Russia during the Modern Global Warming in Summer

T. B. Titkova¹, * and A. N. Zolotokrylin¹, **

¹Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

*e-mail: titkova@igras.ru

**e-mail: zolotokrylin@igras.ru

Changes in climate parameters and surface characteristics were considered between 1961–1990 and 1991–2020 climate periods on the plains of the European part of Russia and Western Siberia in different landscape zones in summer. Zonal landscapes with a significant change in climate parameters in the 1991–2020 period of warming were identified, connections between changes of climate parameters and landscape characteristics were determined, climate trends of parameters in particular landscape zones were considered. In the 1991–2020 summer period of warming, significant changes in climate parameters were identified in subboreal landscapes from forest steppe to semi-desert on the European part of Russia. A pronounced warming, a decrease of precipitation total, evaporation and soil water are noted. In Western Siberia in arctic and boreal landscapes, a warming in June and August is observed, which led to an increase of evaporation and soil draining. In boreal landscapes of the European part of Russia and subboreal landscapes of Western Siberia, significant changes in climate parameters did not occur. The analysis of connection between evaporation with soil water and temperature with precipitation in landscape zones indicates about its reliance on landscape zone. Temperature has the most impact on evaporation and topsoil water, it is positive in arctic and boreal landscapes and negative in subboreal ones. Precipitation has the most positive impact in subboreal landscapes. In boreal landscapes, a significant temperature rise may be insufficient for a significant increase of

evaporation, apparently due to the impact of dense vegetation cover with a slow heat exchange. In subboreal landscapes, a significant temperature rise leads to a significant negative response of evaporation due to a quick heat exchange.

Keywords: landscapes, natural zones, temperature, precipitation, evapotranspiration, soil water, ERA5-land, European part of Russia, Western Siberia

REFERENCES

- Bardin M.Yu., Rankova E.Ya., Samokhina O.F. Temperature extremes in June and July 2016. *Fundamental. i Prikladn. Klimatol.*, 2016, no. 2, pp. 143–148. (In Russ.).
- Bokuchava D.D., Semenov V.A. Analysis of surface air temperature anomalies in the Northern hemisphere in the 20th century using observational and reanalysis data. *Fundamental. i Prikladn. Klimatol.*, 2018, no. 1, pp. 28–51. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2018-1-28-51>
- Bouwer L.M. Observed and projected impacts from extreme weather events: Implications for loss and damage. In *Loss and Damage from Climate Change*. Springer: Cham, Switzerland, 2019, pp. 63–82.
- Cherenkova E.A. Trends in changes in atmospheric and soil moisture at the beginning of the 21st century on the European territory of Russia according to satellite and ground data. In *Proceedings of the 19th Intern. Conf. "Modern problems of remote sensing of the Earth from space"*. Moscow: Kosmicheskie Issledovaniya Ross. Akad. Nauk, 2021. 390 p.
- Cherenkova E.A. Influence of changes in large-scale atmospheric circulation and ocean surface temperature on trends in summer precipitation in the European North of Russia according to ground and satellite data. *Sovrem. Probl. Distantion. Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2018, vol. 15, no. 5, pp. 229–238. (In Russ.).
- Cherenkova E.A. Seasonal precipitation in the east European plain during the periods of warm and cool anomalies of the north Atlantic surface temperature. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2017, no. 5, pp. 72–81. (In Russ.).
<https://doi.org/10.7868/s0373244417050061>
- Demchenko P.F., Semenov V.A. Estimation of uncertainty in surface air temperature climatic trends related to the internal dynamics of the atmosphere. *Dokl. Earth Sci.*, 2017, vol. 476, no. 1, pp. 1105–1108.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X17090239>
- Global climate and soil cover in Russia: manifestations of drought, prevention measures, control, elimination of consequences and adaptation measures (agriculture and forestry). Moscow, 2021, vol. 3, 700 p.
- Golovinov E.E., Vasil'yeva N.A. Comparison of long-term meteorological characteristics according to reanalysis and ground-based observations on the territory of the Moscow region. *Melioratsiya, Upravlenie Vodnymi Resursami i Agrofizika*, 2022, vol. 12, no. 3, pp. 92–105. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-3-92-105>
- Grigor'ev V.Yu., Frolova N.L., Kireeva M.B., Stepanenko V.M. Otsenka tochnosti dannykh reanaliza ERA-5. In *Trudy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Morskie issledovaniya i obrazovanie (MA-RESEDU-2020)"*. Moscow, 2020, vol. 2, pp. 47–50. (In Russ.).
- Gruza G.V., Ran'kova E.Ya. Dynamic climatic norms of air temperature. *Meteorol. i Gidrol.*, 2012a, no. 12, pp. 5–18. (In Russ.).
- Gruza G.V., Ran'kova E.Ya. *Nablyudaemye i ozhidaemye izmeneniya klimata Rossii: temperatura vozdukha* [Observed and Expected Climate Changes in Russia: Air Temperature]. Obninsk: FGBU "VNIIGMI-MCD", 2012b. 194 p.
- IPCC. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5). Cambridge, United Kingdom; New York, USA: Cambridge University Press, 2013.
- Kiktev D.V., Size D., Alexander L. Comparison of long-term averages and trends in annual temperature and precipitation extremes based on modeling and observational data. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Fizika Atmosfery i Okeana*, 2009, vol. 45, no. 3, pp. 305–315. (In Russ.).
- Klein C., Bliefernicht J., Heinzeller D., Gessner U., Klein I., Kunstmann H. Feedback of observed interannual vegetation change: A regional climate model analysis for the West African monsoon. *Clim. Dyn.*, 2017, vol. 48, pp. 2837–2858.
- Munang R., Thiaw I., Alverson K., Liu J., Han Z. The role of ecosystem services in climate change adaptation and disaster risk reduction. *Curr Opin Environ Sustain*, 2013, no. 5, pp. 1–6.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2013.02.002>
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D., Piles M., Rodríguez-Fernández J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst. Sci. Data*, 2021, no. 13, pp. 4349–4383.
<https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- National Atlas of Russia. Landscape map. 1 : 30000000. Moscow, 2007, vol. 2, 331 p. <https://nationalatlas.ru/tom2/331.html>
- Overland J., Dethloff K., Francis J., Hall R., Hanna E., Kim S.J., Screen J., Shepherd T.G., Vihma T. Nonlinear response of midlatitude weather to the changing Arctic. *Nat. Clim. Chang.*, 2016, vol. 6, pp. 992–999.
<https://doi.org/10.1038/NCLIMATE3121>
- Pavlenko V.A., Sergeev A.A. Climate warming in Western Siberia and possible environmental and economic consequences. *SGGA Novosibirsk*, 2006, pp. 1–7. (In Russ.).
- Perevedentsev Yu.P., Vasiliev A.A., Sherstyukov B.G., Shantalinsky K.M. Climatic changes in Russia in the late 20th – early 21st century. *Meteorol. i Gidrol*, 2021, no. 10, pp. 14–26. (In Russ.).

- Popova V.V. Modern climate changes in the north of Eurasia as a manifestation of large-scale atmospheric circulation variations. *Fundamental. i Priklad. Klimatol.*, 2018, no. 1, pp. 84–111. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2018-1-84-111>
- Semenov V.A., Latif M., Dommenges D., Keenlyside N.S., Strehz A., Martin T., Park W. The impact of North Atlantic-Arctic multidecadal variability on Northern Hemisphere surface air temperature. *J. Clim.*, 2010, vol. 23 (21), pp. 5668–5677.
<https://doi.org/10.1175/2010JCLI3347.1>
- Singh R.P., Roy S., Kogan F. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *Int. J. Remote Sens.*, 2003, no. 24, pp. 4393–4402.
<https://doi.org/10.1080/0143116031000084323>
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii [The Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and its Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Chapters: 1.2.3.; 1.3.2. Moscow: Roshydromet, 2014. 1009 p.
- Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii [The Third Assessment Report on Climate Change and Their Consequences on the Territory of the Russian Federation]. St.-Petersburg: Naukoemkie Tekhnologii; Roshydromet. 2022. 676 p.
- Ting M., Kushnir Y., Seager R., Li C. Forced and internal twentieth-century SST trends in the North Atlantic. *J. Clim.*, 2009, no. 22, pp. 1469–1481.
<https://doi.org/10.1175/2008JCLI2561.1>
- Tishkov A.A., Belonovskaya E.A., Weisfeld M.A., Glazov P.M., Lappo E.G., Morozova O.V., Pokrovskaya I.V., Tertitsky G.M., Titova S. V., Tsarevskaya N.G. Regional biogeographic effects of “fast” climate changes in the Russian arctic in the 21st century. *Arktika: Ekol. i Ekon.*, 2020, no. 2 (38), pp. 31–44. (In Russ.).
<https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-2-31-44>
- Titkova T.B., Zolotokrylin A.N. Regional irregularity of summer warming in the continental Arctic. *Arktika: Ekol. i Ekon.*, 2021, no. 3, pp. 374–384. (In Russ.).
- Titkova T.B., Vinogradova V.V. The response of vegetation to climate change in boreal and subarctic landscapes at the beginning of 21 century. *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2015, vol. 12, no. 3, pp. 75–86. (In Russ.).
- Titkova T.B., Zolotokrylin A.N. Summer climatic changes in the south of European Russia. *Fundamental. i Priklad. Klimatol.*, 2022, vol. 8, no. 1, pp. 107–121. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-1-107-121>
- Wang X., Wu C., Peng D., Gonsamo A., Liu Z. Snow cover phenology affects alpine vegetation growth dynamics on the Tibetan Plateau: Satellite observed evidence, impacts of different biomes, and climate drivers. *Agric. For. Meteorol.*, 2018, no. 256, pp. 61–74.
- 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.*, 2016, no. 7, pp. 627–647.
<https://doi.org/10.5194/esd-7-627-2016>
- Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B. Bioclimatic sub-humid zone on the plains of Russia: droughts, desertification/degradation. *Arid. Ekosist.*, 2018, vol. 24, no. 1 (74), pp. 13–20. (In Russ.).
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B. Climatic factor of vegetation dynamics in arid lands of the European territory of Russia. In *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem* [Problems of Ecological Monitoring and Modeling of Ecosystems]. Moscow: IGKE, 2009, vol. 22, pp. 79–91.
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Cherenkova E.A. Humidification of drylands in European Russia: the present and future. *Arid. Ekosist.*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. 49–54. (In Russ.).