

**СОВРЕМЕННЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ ИСПАРЕНИЯ
И ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ НА ЮГЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ**

© 2023 г. Т.Б. Титкова*, А.Н. Золотокрылин*, Е.А. Черенкова***

**Институт географии РАН*

Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29, стр. 4

E-mail: titkova@igras.ru, zolotokrylin@igras.ru

***Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН*

Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3. E-mail: cherenkova@igras.ru

Поступила в редакцию 10.02.2023. После доработки 03.03.2023. Принята к публикации 03.04.2023.

Исследовано влияние климатических параметров на испарение в период активной вегетации растений в лесостепной, степной и полупустынной зонах в период 1980-2021 гг. на юге Европейской территории России. Рассмотрены основные закономерности связи испарения и влажности почвы. В начале вегетационного сезона изменение испарения в лесной и степной зонах во многом определяется положительной связью с температурой и ветровыми условиями. В середине сезона вегетации возрастает роль осадков и ветровых условий. С июля связь испарения и температуры становится отрицательной из-за нарастающего дефицита влаги в зонах сухого субгумидного и семиаридного климата. Связь испарения и влажности верхнего слоя почвы отрицательна в начале вегетационного периода при минимальном испарении с еще не разогретого почвенного покрова в зонах лесостепи и степи, а в полупустыне на фоне уже прогретой почвы положительна. С середины вегетационного сезона и до конца связь испарения и влажности почвы значимо положительна от лесостепных до полупустынных ландшафтов. В начале вегетационного сезона продолжающееся потепление приводит к увеличению испарения, в середине и в конце вегетационного сезона тренды испарения значимо отрицательные, так как недостаток влаги при больших температурах приводит к иссушению почвенного покрова и преждевременному увяданию растительности. Наибольшее падение испарения отмечается в степных и сухостепных ландшафтах, на что повлияло иссушение территории при росте температуры, уменьшение сумм осадков и средней скорости ветра. Тренды влажности верхнего слоя почвы в основном отрицательны на всем юге Европейской территории России с максимумом потери влаги в широколиственно-лесной и лесостепной зонах, как более увлажненных относительно сухостепных и полупустынных природных зон. В полупустынной зоне за весь вегетационный сезон изменения влажности почвы минимальны.

Ключевые слова: испарение, температура, осадки, ветер, влажность почвы, природные зоны, вегетационный сезон.

DOI: 10.24412/1993-3916-2023-3-4-14

EDN: ZUWGEV

В концепции нейтрального баланса деградации земель по борьбе с опустыниванием Конвенцией ООН определены основных фактора, влияющих на опустынивание: изменения наземного покрова, динамика продуктивности земель и динамика запасов почвенного углерода (Cowie et al., 2018). Аридизация климата приводит к усилению деградации земель через сокращение продуктивных водных ресурсов, снижение почвенного потенциала, продуктивности растительных сообществ и биологического разнообразия (Куст, 2020; Лобковский и др., 2022). При этом климатические изменения природно-ландшафтного потенциала могут привести как положительное, так и негативное воздействие на состояние устойчивого землепользования сельскохозяйственных земель (Андреева и др., 2021). Знания о круговороте энергии и влаги в системе растительность-почва-атмосфера крайне важны для изучения природной составляющей процессов, влияющих на деградацию земель. На фоне повышения среднегодовой температуры воздуха и общей аридизации климата деградация почвенного покрова резко увеличила риск почвенной (агрономической) засухи,

что в значительной мере влияет на биологическое разнообразие и приводит в большинстве случаев к снижению урожайности сельскохозяйственных культур, а также к нарушению устойчивого землепользования (Национальный доклад, 2019, 2021; Андреева, Куст, 2020).

Последние исследования изменения регионального климата летом на юге Европейской территории России (ЕТР) показывают, что период 1976-2020 гг. характеризуется статистически значимым потеплением с наибольшей скоростью до $0.74^{\circ}\text{C}/10$ лет в Южном федеральном округе (Доклад ..., 2021). Наибольший рост температуры на юге ЕТР наблюдается в августе. Средняя за теплый период температура поверхности почвы увеличилась на $1.1-1.5^{\circ}\text{C}$. Также риски сильных атмосферных засух в течение всего вегетационного периода увеличились на всей территории, наиболее заметно – в полупустынной зоне (с 55% до 82%; Губарев и др., 2022). В целом по России наблюдается рост осадков за последние сорок с половиной лет (Доклад ..., 2021). При этом количество осадков на юге ЕТР увеличилось в весенний период на 10-25%, а в летний период сократилось на 23-30% (Губарев и др., 2022). Установлено, что рост испарения с поверхности суши в бассейне Волги с середины 1960-х до конца 1980-х годов в среднем на 2-4% в год обусловлен ростом температуры и осадков (Лавров, 2019). В качестве возможных причин обозначенных изменений указывается перестройка атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе под действием долгопериодных изменений температуры поверхностного слоя Северной Атлантики (Черенкова, 2017). Увеличение увлажнения нашло отражение в росте климатообусловленной урожайности (Павлова, Сиротенко, 2012) и восстановлении естественной степной растительности (Новикова и др., 2011; Сажин и др., 2006). Однако в южной половине ЕТР в летний период на фоне быстрого роста средних температур вследствие роста испаряемости уменьшается влажность почвы, что приводит к увеличению риска засухи и иссушения территории и нарастания аридности климата (Доклад ..., 2021).

Повышение глобальной температуры обуславливает кумулятивный отклик растительности, выраженный в изменении состава и структуры растительного компонента ландшафтов (Singh et al., 2003; Золотокрылин, Титкова, 2009). При этом подстилающий покров медленнее реагирует на изменение температуры и условий увлажнения при относительно густой растительности и быстрее при разреженной, что связано с уровнем теплообмена в толще растительного покрова (Wu et al., 2016). Потепление климата может значительно повлиять на водный баланс за счет изменения испарения с поверхности почвы с учетом транспирации растениями и увеличения дефицита почвенной влаги (Wang et al., 2018). На изменение влажности поверхностных слоев почвы наибольшее влияние оказывает рост средней температуры (Титкова, Золотокрылин, 2022). Испарение влаги с поверхности растительности и из почвы определяет водопотребление растительности, динамику накопления биомассы растений и является важнейшей характеристикой роста и развития растений (Полужтков и др., 2006; Титкова, Золотокрылин, 2022). Поэтому анализ пространственного распределения трендов испарения и влажности почвы является важным для прогнозирования устойчивого землепользования на юге ЕТР – в европейском зерновом поясе России.

Целью данной работы является исследование тенденций изменений испарения на юге Европейской территории России преимущественно в лесостепной, степной и полупустынной зонах в период активной вегетации растений. В работе предпринята попытка исследовать влияние изменений климатических параметров на испарение в различные месяцы теплого периода, а также рассмотреть основные закономерности связи испарения и влажности почвы в природных зонах юга ЕТР.

Материалы и методы

Территория исследования – сельскохозяйственные районы ЕТР южнее 54° с.ш., в зонах субгумидного, сухого субгумидного и семиаридного климата. Здесь расположено 18 зернопроизводящих субъектов РФ.

Получение достоверных количественных оценок испарения как на суше, так и с водной поверхности является сложной и трудоемкой задачей (Allen et al., 1998; Amatya et al., 2016; Wohlfahrt et al., 2010). В данном исследовании для оценки испарения с поверхности суши были использованы среднемесячные данные наиболее современного реанализа ERA5-Land с апреля по сентябрь в период 1980-2021 гг. (Copernicus, 2022) – это глобальный архив данных реанализа с горизонтальным разрешением $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$, доступный за период с 1950 года по настоящее время.

В реанализе ERA5-Land под испарением подразумевается накопленное количество воды, испарившейся с поверхности Земли, включая транспирацию от растительности. Величина испарения, его динамика во времени находятся в сложной взаимосвязи с температурой, влажностью воздуха, осадками, скоростью ветра и потоков солнечной радиации, которые определяют физические свойства почвенного и растительного покрова (Братсерт, 1985; Лавров, 2019). В данной работе были рассмотрены некоторые из перечисленных климатических параметров, связанные с испарением: температура воздуха, осадки и скорость ветра. Их среднемесячные данные в теплый период года с апреля по сентябрь получены из архива реанализа ERA5-Land. Температура на высоте 2 м н.у.м. БС (Т) рассчитывается путем интерполяции между самым низким уровнем модели и поверхностью Земли с учетом атмосферных условий. Под суммой осадков (Pr) в реанализе подразумевается сумма крупномасштабных и конвективных осадков. Также анализировалась векторная сумма зональной и меридиональной компоненты скорости ветра на высоте 10 м н.у.м. БС.

Выявленные искажения влажности почвы по данным реанализа ERA5-Land для региона Поволжья обусловили поиск других архивов данного параметра. К исследованию были привлечены среднемесячные данные об объемной влажности почвы (Soil Moisture, SM) с апреля по сентябрь в период 1980-2021 гг., полученные из глобального архива SM GLEAM версии 3.6a (Gleam, 2022; Martens et al., 2017) с пространственным разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (Gruber et al., 2019). Данные SM GLEAM воспроизводят общие сезонные закономерности поля влажности почвы, что подтверждает обнаруженная связь ведущих режимов ее изменчивости летом на ЕТР с основными режимами атмосферной циркуляции (Zveryaev, Arkhipkin, 2019). Мы ограничились рассмотрением данных влажности почвы в слое 0-10 см, поскольку поверхностный слой непосредственно взаимодействует с атмосферой и, следовательно, имеет больший отклик на изменения регионального климата.

Были рассчитаны десятилетние линейные тренды и рассмотрена межгодовая динамика климатических параметров с апреля по сентябрь в период 1980-2021 гг. Выполнен корреляционный анализ связи испарения с каждым из климатических параметров в течение вегетационного сезона. Исследованы корреляционные связи испарения и влагосодержания верхнего слоя почвы по ландшафтными зонам.

Результаты и их обсуждение

Зависимость испарения от климатических параметров. На рисунке 1 приведены коэффициенты корреляции испарения с каждым из климатических параметров. В зависимости от месяца вегетационного периода степень влияния климатического параметра на испарение меняется. Значения коэффициентов корреляции между испарением и климатическими параметрами ограничены среднемесячными значениями, которые могут ослаблять кратковременные связи, возникающие в течение времени между параметрами, что отмечается и в других исследованиях (Лавров, 2019).

В начале вегетационного сезона, в апреле и мае, изменения испарения во многом определяются положительной связью с температурой (корреляция – 0.92, 0.94). Связь с осадками и ветром минимальна, так как влажность почвы в этот вегетационный период наибольшая (рис. 2а). В середине вегетационного сезона в июне и июле возрастает роль осадков (корреляция – 0.62, 0.69) и ветровых условий. Увеличение скорости ветра приводит к увеличению испарения и высушивает почву. Начиная с июня связь испарения и температуры становится отрицательной (корреляция – -0.21), особенно к концу вегетационного сезона из-за нарастающего дефицита влаги в зонах сухого субгумидного и семиаридного климата (корреляция – -0.9). В августе влияние на испарение имеет сочетание всех рассматриваемых параметров. Усиление ветра приводит к еще более сильному иссушению почвы, что отрицательно сказывается на испарении (корреляция – -0.61). В сентябре испарение положительно зависит главным образом от осадков (корреляция – 0.88) и отрицательно от температуры (корреляция – -0.89).

Таким образом, в определенный период вегетационного сезона превалирующее влияние одного климатического параметра на испарение может усилиться или ослабиться под влиянием другого параметра.

Динамика испарения и ее связь с климатическими параметрами. Анализ 10-летних скользящих средних испарения на территории активного земледелия на юге ЕТР показал, что в разные месяцы вегетационного сезона 42-летнего периода наблюдалась как положительная, так и отрицательная

динамика испарения и влажности почвы (рис. 1). В апреле отмечается постепенное увеличение испарения, что связано с поступательным положительным трендом температуры. Значительный рост испарения в 1980-1990-х годах связан с интенсивным увеличением количества осадков в этот период, а скачок суммарного испарения после 2010 года обусловлен усилением средней скорости ветра (рис. 1а I-III). В мае на фоне общего положительного тренда испарения его наибольший положительный рост в 1980-х годах сопровождался ростом осадков.

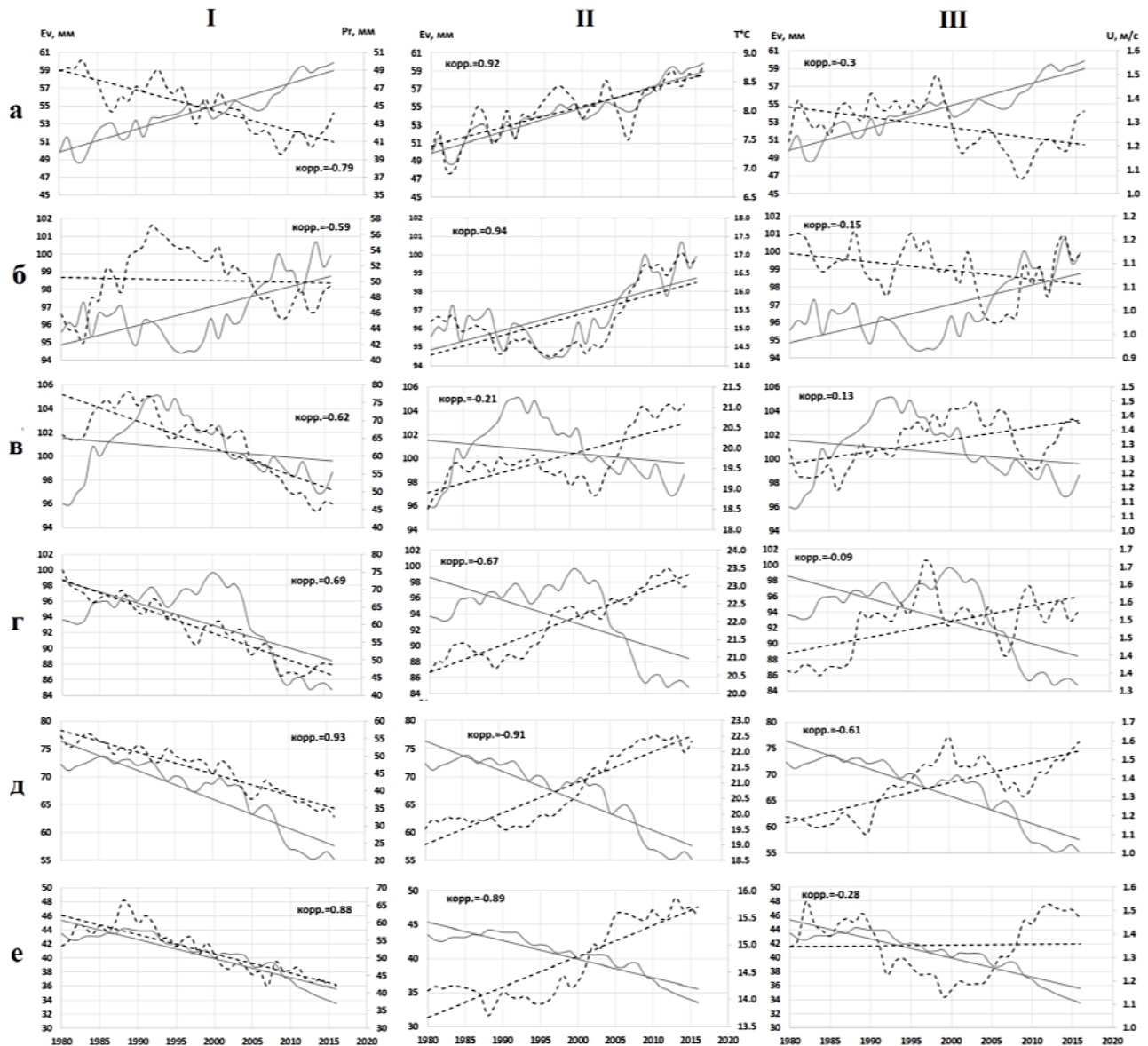


Рис. 1. Изменения 10-летних скользящих средних значений: испарения E_v (сплошные серые линии на рисунках а-е), осадков Pr (I), температуры T (II) и скорости ветра U (III) в среднем на территории исследования в период 1980-2021 гг. в (а) апреле, (б) мае, (в) июне, (г) июле, (д) августе, (е) сентябре (пунктирные линии на графиках).

С начала XXI века по настоящее время положительные тренды температуры имеют наибольшее влияние на рост испарения (рис. 1б I-III). Июнь характеризуется интенсивным ростом испарения в 1980-х годах с абсолютным максимумом в 1991 году, когда рост осадков совпал с наблюдаемой интенсификацией потепления. В XXI веке на фоне роста средней температуры общая динамика испарения отрицательна, к чему привело уменьшение количества осадков и средней скорости ветра (рис. 1в I-III). В июле положительная динамика испарения, наблюдаемая в конце XX века, во многом

связана с ростом осадков. На фоне роста темпов потепления на юге ЕТР с начала XXI века по настоящее время во все месяцы теплого периода под влиянием сокращения количества осадков отмечается уменьшение испарения (рис. 1г I-III). В конце вегетационного периода в августе и сентябре рост испарения до начала 1990-х годов сопровождался увеличением осадков. Затем на фоне роста температуры тренд суммарного испарения стал отрицателен из-за иссушения почвенного покрова и увядания растительности (рис. 1д, е I-III).

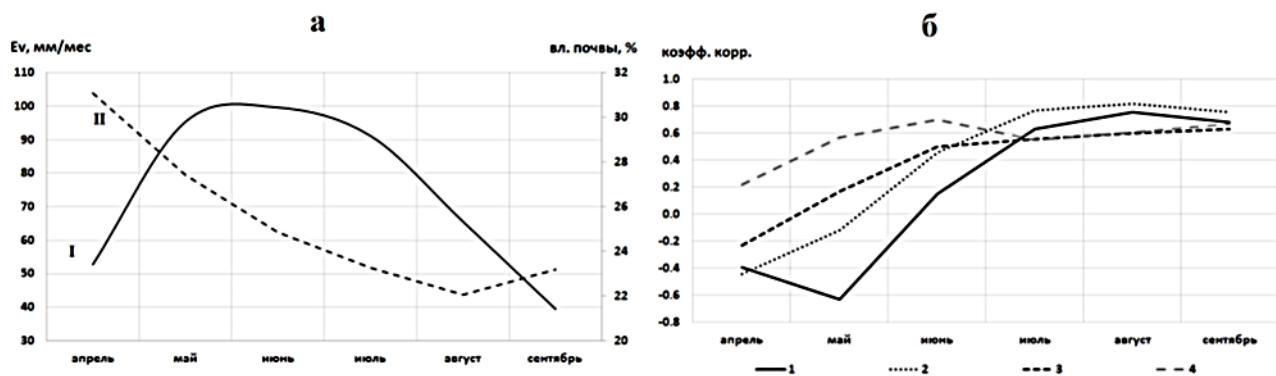


Рис. 2. Изменения параметров испарения и влажности почвы с апреля по сентябрь в период 1980-2021 гг.: а) среднемесячные значения испарения E_v (I) в мм/мес и влажности почвы в поверхностном слое (II) в % в среднем на исследуемой территории; б) коэффициенты корреляции между ними в среднем по ландшафтным зонам на юге ЕТР. Условные обозначения: 1 – лесостепь, 2 – степь, 3 – сухая степь, 4 – полупустыня.

Таким образом, направленность изменений испарения внутри периода исследования была связана с тенденциями климатических изменений. В апреле и мае в период 1980-2021 гг. продолжался рост испарения на фоне положительной связи с ростом температуры. Положительный тренд испарения в июне-сентябре замедлился в конце XX века и изменил свою направленность с начала XXI века под влиянием уменьшения сумм осадков и скоростей ветра, иссушения почвенного покрова и увядания растительности.

Испарение и влажность почвы в течение вегетационного сезона. Рассмотрим характерные черты изменения связей испарения и влажности почвы в природных зонах юга ЕТР в течение вегетационного сезона. Почвенная влага удерживается в почве благодаря противодействию силы тяжести с одной стороны и испарения и транспирации – с другой. Испарение и глубокое просачивание за пределы корневой глубины истощают запасы влаги в почве (Роде, 1965). Поэтому испарение является одним из основных климатических параметров, тесно связанных с почвенной влагой.

Согласно данным реанализа, суммарное испарение на юге ЕТР за вегетационный период (апрель-сентябрь) в период 1980-2021 гг. составляло: 460-510 мм в лесостепи, 420-500 мм в степной зоне, 380-470 мм в сухой степи и 290-360 мм в полупустыне. Эти значения во всех зонах несколько выше (на 50-80 мм) полученных при наблюдении над сушей в 1960-1980 гг. (Голубев и др., 2003).

На рисунке 2а представлен ход испарения и влагосодержание верхнего слоя почвы в течение вегетационного сезона в среднем на всей территории исследования. Значения испарения в апреле в среднем не превышают 55 мм/месяц, а влагосодержание почвы максимально за сезон вегетации и составляет чуть более 30%. Наибольшие значения испарения наблюдаются в мае-июне в среднем 95-100 мм/месяц при влажности почвы 25-27%. С середины лета до начала осени испарение достаточно быстро уменьшается (рис. 1а), в то время как влажность верхнего слоя почвы сокращается в течение всего периода активной вегетации в 2.3 раза. К концу вегетационного периода испарение уменьшается в среднем до 40-50 мм/месяц, а влагосодержание почвы – до 22-23%. Снижение влажности почвы в конце лета становится основной причиной падения испарения при повышении температуры воздуха (рис. 1д, е II). Принимая во внимание то, что атмосферные засухи способствуют прогрессирующему иссушению почвы, сделанный вывод подкрепляется выявленным значимым ростом повторяемости сильных летних атмосферных засух (Черенкова и др., 2020) на всей

исследуемой территории в последние три десятилетия по сравнению с предыдущим тридцатилетием. Ощутимое понижение испарения со скоростью более 9 мм/10 лет (рис. 2г, д) во второй половине лета отмечалось как в регионах наибольшего роста повторяемости засух в 1.7 раза в Поволжье, Заволжье и Северо-Западном Прикаспии (рис. 2в; Черенкова и др., 2020), так и в регионах менее существенного увеличения повторяемости засух на юге степной зоны.

Корреляционная связь испарения и влажности верхнего слоя почвы. Корреляционная связь суммарного испарения и влажности верхнего слоя почвы значительно меняется в течение теплого периода (рис. 2б). В начале вегетационного периода (апрель) в зонах лесостепи и степи зависимость параметров отрицательна, так как максимальное влагосодержание почвенного покрова сопровождается еще неразвившейся растительностью и минимальным испарением недостаточно разогретого почвенного покрова. С мая связь суммарного испарения и влажности почвы возрастает на фоне развития растительности и прогрева поверхности. Для сухостепных и полупустынных ландшафтов в мае она уже положительна и статистически значима для полупустынной зоны. В июне зависимость изменений испарения от влажности почвы становится значимо положительной в степной зоне. С июля и до конца вегетационного сезона корреляция перечисленных параметров значимо положительна на всем юге ЕТР.

Долгосрочные тренды испарения и влажности почвы. Установлено, что тренды испарения в течение вегетационного сезона за 42-летний период исследования были разнонаправленными (рис. 3; табл.). Тренды влажности верхнего слоя почвы в основном были отрицательными с наибольшими потерями влаги в более влажных широколиственно-лесной и лесостепной зонах по сравнению с остальными рассмотренными ландшафтными зонами. В полупустынной зоне в течение всего теплого периода изменения влажности почвы были минимальными (-0.5-0.5%) и статистически незначимыми (рис. 4).

В апреле наблюдался значимый рост испарения до 4-6 мм/10 лет (табл.) с максимумом в подтаежных, широколиственно-лесных, лесостепных и северных степных ландшафтных зонах (рис. 3а). Вместе с тем рост испарения в Брянской, Курской, Орловской, Липецкой, Воронежской, Тамбовской, Пензенской, Ульяновской, Самарской и Оренбургской областях в апреле (рис. 3а) сопровождался отрицательными трендами влажности почвы в среднем на 2.5-3%/10 лет (рис. 4а; табл.). В степных и полупустынных ландшафтах (Ростовская, Волгоградская, Астраханская областях, Калмыкия и части Краснодарского и Ставропольского края) рост испарения (до 2 мм/10 лет) и падение влажности почвы (от -0.5 до -2%/10 лет) в апреле были наименьшими (рис. 3а, 4а; табл.). В мае тренды испарения становятся отрицательными на всей территории полупустынных и сухостепных ландшафтов (до -2 мм/10 лет) при падении влажности почвы на -1%/10 лет (рис. 3б, 4б). В июне отрицательные тенденции изменения испарения отмечались уже в полупустынной, сухостепной и степной зонах при слабых отрицательных трендах влажности почвы. В широколиственно-лесной и лесостепной зонах еще сохранялась положительная тенденция испарения при значительном падении влагосодержания верхнего слоя почвы (рис. 3в, 4в). В июле отрицательные тренды испарения усилились и распространились на большую часть территории, за исключением зоны широколиственных лесов (Курская и Орловская области), где наблюдались значительные отрицательные тренды влажности почвы (рис. 3г, 4г). В августе тренды испарения были отрицательными на всей исследуемой территории с минимумом до -13 мм/10 лет в степной зоне (в Оренбургской, Саратовской, Ростовской областях, Ставропольском и Краснодарском крае; рис. 3д) и сопровождалась падением влажности почвы на 4%/10 лет (рис. 4д; табл.). В конце вегетационного сезона в сентябре отрицательные тренды испарения и влажности почвы наблюдались во всех рассматриваемых зонах (рис. 3е, 4е).

Таким образом, в период 1980-2021 гг. наблюдались положительные тенденции испарения на большей части территории в начале вегетационного периода и постепенное его уменьшение до наибольших темпов сокращения в августе. Наибольшее падение испарения отмечалось в степных и сухостепных ландшафтах. Тренды влажности верхнего слоя почвы отрицательны с максимумом потери почвенной влаги в широколиственно-лесной и лесостепной зонах. В полупустыне изменения влажности почвы были минимальными.

С точки зрения достижения нейтрального баланса деградации земель, обнаруженные тенденции снижения испарения и влажности почвы в сезон вегетации для большинства степных и

полупустынных регионов свидетельствуют об ухудшении ситуации в 2001-2021 гг. Полученные результаты подкрепляются выводами о сохранении устойчивой отрицательной тенденции увлажнения в ближайшей перспективе согласно модельным оценкам будущего климата (Золотокрылин и др., 2014). Следует также принимать во внимание, что проводимые мероприятия, направленные на снижение рисков деградации земель в регионах с аридным климатом, не везде приводят к ожидаемым результатам (Куст и др., 2022).

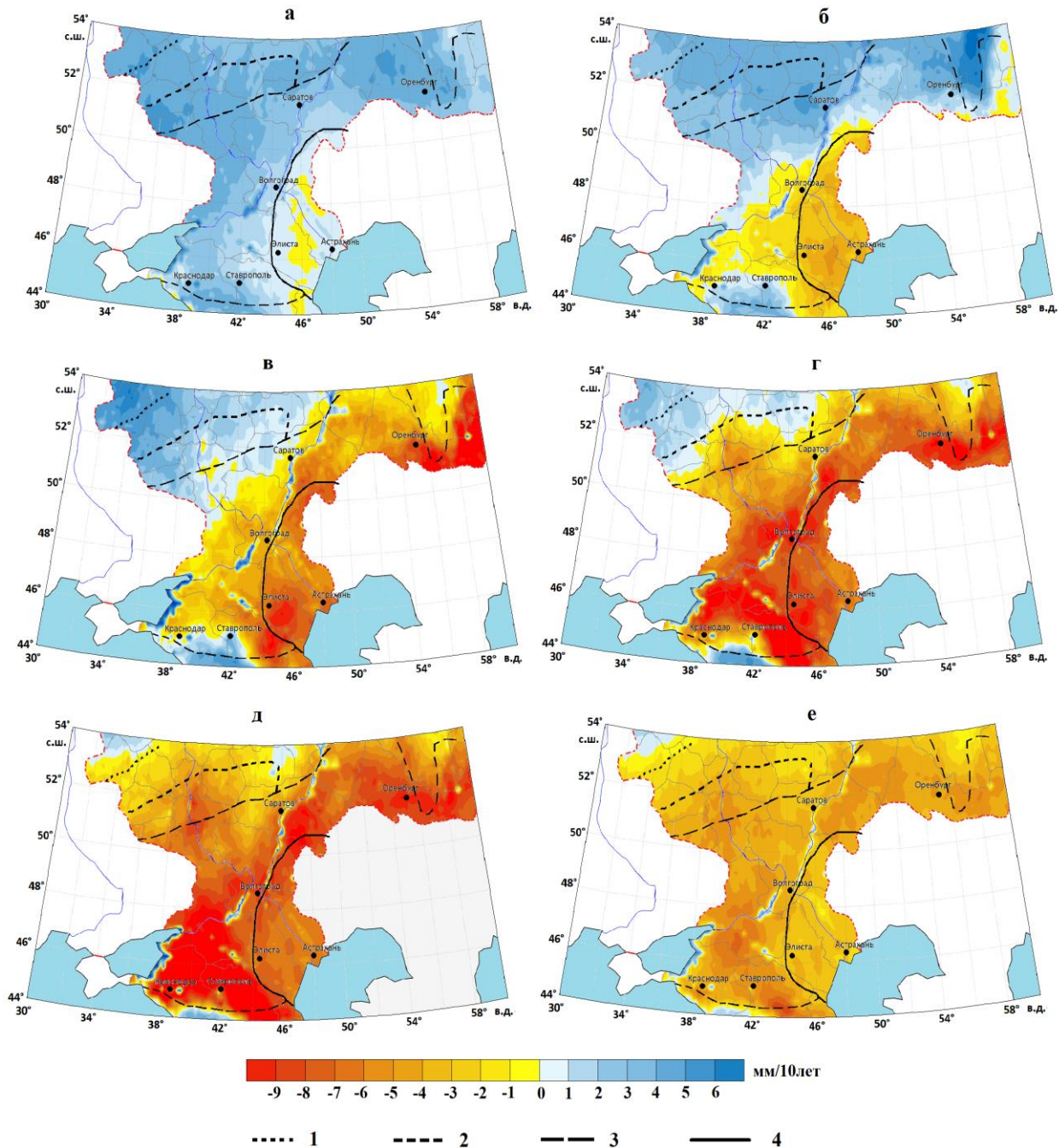


Рис. 3. Линейные тренды испарения (мм/10 лет) в период 1980-2021 гг.: а) апрель, б) май, в) июнь, г) июль, д) август, е) сентябрь. Тренды значимы при значениях $>$ ($<$) 2 мм/10 лет. Условные обозначения для рисунков 3-4: 1 – граница подтаежных и широколиственно-лесных, 2 – широколиственно-лесных и лесостепных, 3 – лесостепных и степных типичных, 4 – степных типичных, сухостепных и полупустынных, пустынных (Исаченко, 2001).

Таблица. Тренды относительных изменений испарения и влажности почвы в поверхностном слое почвы (%/10 лет) в апреле-сентябре в период 1980-2021 гг. на юге ЕТР по природным зонам.

Природная зона	Испарение						Влажность почвы					
	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь
Лесостепная	5.8	3.2	1.0	-1.6	-5.1	-7.1	-3.1	-3.7	-4.4	-5.7	-6.7	-6.6
Степная типичная	4.1	0.6	-2.1	-6.8	-5.1	-9.8	-2.4	-2.2	-2.9	-3.5	-5.4	-4.7
Сухостепная	2.2	-0.8	-4.2	-9.6	-13.7	-9.9	-3.4	-3.2	-2.5	-1.6	-4.6	-3.4
Полупустынная	0.2	-2.2	-4.2	-6.6	-11.8	-9.4	-1.8	-1.6	-1.6	-0.4	-2.3	-1.0

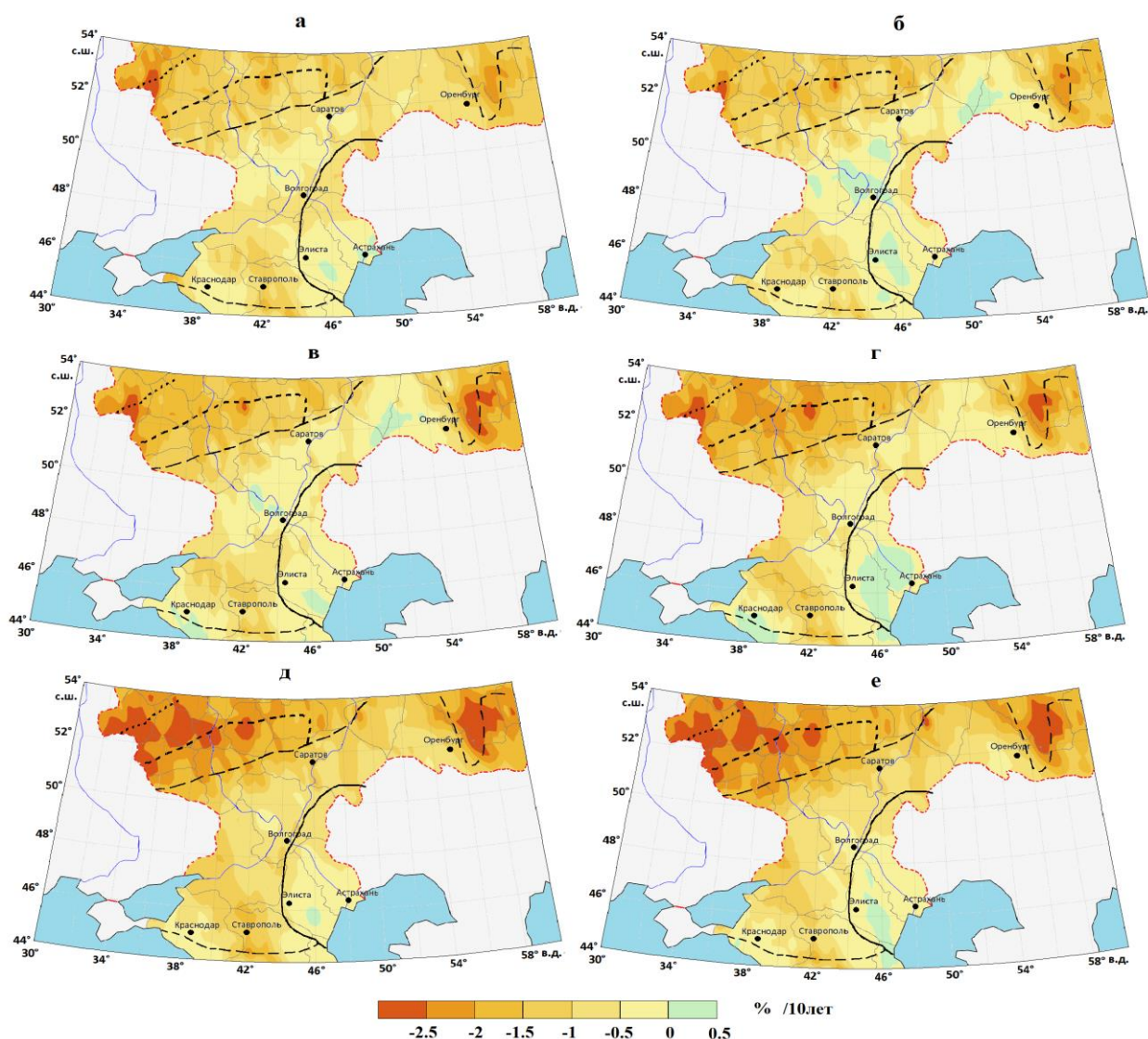


Рис. 4. Линейные тренды влажности почвы (%/10 лет) в поверхностном слое в период 1980-2021 гг.: а) апрель, б) май, в) июнь, г) июль, д) август, е) сентябрь. Тренды значимы при значениях > (<) 0.5%/10 лет.

Выводы

Оценка характера связи испарения с климатическими параметрами в период 1980-2021 гг. показала, что в начале вегетационного сезона изменение испарения в лесной и степной зонах во

многим определяется положительной связью с температурой и ветровыми условиями. В середине сезона вегетации возрастает роль осадков и ветра. Начиная с июля связь испарения и температуры становится отрицательной из-за нарастающего дефицита влаги в зонах сухого субгумидного и семиаридного климата.

Исследование динамики связи испарения и влажности верхнего слоя почвы в течение вегетационного сезона показало, что эта связь отрицательна в начале вегетационного периода при минимальном испарении с еще не разогретого почвенного покрова в зонах лесостепи и степи и положительна в полупустыне на фоне уже прогретой почвы. Со второй половины и до конца вегетационного сезона связь испарения и влажности почвы значимо положительна во всех природных зонах юга ЕТР.

Установлено, что в течение теплого периода тренды испарения разнонаправлены. В начале вегетационного периода наблюдалось увеличение испарения, что во многом объясняется продолжающимся потеплением. В середине и в конце вегетационного сезона на фоне продолжающегося потепления тренды испарения значимо отрицательные, так как недостаток влаги при больших температурах приводит к иссушению почвенного покрова и преждевременному увяданию растительности. Наибольшее падение испарения отмечается в степных и сухостепных ландшафтах, на что повлияло иссушение территории при росте температуры, уменьшение сумм осадков и скорости ветра.

Тренды влажности верхнего слоя почвы в основном отрицательны на всей исследуемой территории с максимумом потери влаги в широколиственно-лесной и лесостепной зонах, как более увлажненных относительно сухостепных и полупустынных ландшафтов. В полупустынной зоне за весь теплый период изменения влажности почвы минимальны.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что на фоне отрицательных трендов испарения и влажности почвы в летний период для большинства регионов Прикаспия свойственно ухудшение текущей ситуации в последнее двадцатилетие по показателям нейтрального баланса деградации земель.

Финансирование. Исследование влияния климатических параметров на испарение проведено в рамках научной темы № 0127-2019-0010 (АААА-А19-119102890091-1) «Разработка научных основ устойчивого управления природно-антропогенными системами на основе моделей сбалансированного землепользования»; анализ тенденций аномальных режимов почвенного увлажнения выполнен при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 19-17-00242.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева О.В., Куст Г.С.* 2020. Оценка состояния земель в России на основе концепции нейтрального баланса их деградации // Известия Российской академии наук. Серия географическая. № 5. С. 737-749.
- Андреева О.В., Лобковский В.А., Куст Г.С., Зонн И.С.* 2021. Современное состояние концепции и разработка типологии моделей устойчивого землепользования // Аридные экосистемы. Т. 27. № 1 (86). С. 3-14. [Andreeva O.V., Lobkovsky V.A., Kust G.S., Zonn I.S. 2021. The Concept of Sustainable Land Management: Modern State, Models and Typology Development // Arid Ecosystems. Vol. 11. No. 1. P. 1-10.]
- Братсерт У.Х.* 1985. Испарение в атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат. 352 с.
- Голубев В.С., Сперанская Н.А., Цыценко К.В.* 2003. Суммарное испарение в бассейне Волги и его изменчивость // Метеорология и гидрология. № 7. С. 89-99.
- Губарев Д.И., Левицкая Н.Г., Деревягин С.С.* 2022. Влияние изменений климата на деградацию почв в аридных зонах Поволжья // Аридные экосистемы. Т. 28. № 1 (90). С. 20-27. [Gubarev D.I., Levitskaya N.G., Derevyagin S.S. 2022. Influence of Climate Change on Soil Degradation in Arid Zones of the Volga Region // Arid Ecosystems. Vol. 12. No. 1. P. 15-21.]
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. 2021. М.: Росгидромет. 104 с.
- Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б.* 2009. Климатический фактор динамики растительности засушливых земель европейской территории России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 22. С. 79-91.
- Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А.* 2014. Увлажнение засушливых земель европейской территории России: настоящее и будущее // Аридные экосистемы. Т. 20. № 2 (59). С. 5-11. [Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Cherenkova E.A. 2014. Humidification of drylands in European Russia:

- The present and future // *Arid Ecosystems*. Vol. 4. No. 2. P. 49-54.]
- Исаченко А.Г. 2001. Экологическая география России. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета. 328 с.
- Куст Г.С. 2020. Современные глобальные вызовы проблемы деградации земель: международные подходы и пути адаптации на национальном уровне // *Деградация земель и опустынивание: проблемы устойчивого природопользования и адаптации*. М. С. 11-17.
- Куст Г.С., Андреева О.В., Шкляева Д.С., Лобковский В.А. 2022. О возможностях достижения нейтрального баланса деградации земель в странах Каспийского региона (на примере России, Казахстана, Туркменистана) // *Изменение климата в регионе Каспийского моря*. Материалы Международной научной конференции. Астрахань. С. 256-258.
- Лавров С.А. 2019. Закономерности формирования испарения с поверхности суши и воды под влиянием климатических изменений // *Водное хозяйство России*. № 1. С. 4-23.
- Лобковский В.А., Андреева О.В., Куст Г.С. 2022. Интеграция международной и национальной систем мониторинга и оценки деградации земель в России // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. Т. 86. № 1. С. 9-27.
- Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)» 2019 / Ред. Р.С.-Х. Эдельгериева. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Институт географии РАН, МБА. Т. 2. 476 с.
- Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)» 2021 / Ред. Р.С.-Х. Эдельгериева. М. Т. 3. 700 с.
- Новикова Н.М., Волкова Н.А., Уланова С.С., Шаповалова И.В., Вышивкин А.А. 2011. Ответные реакции экосистем на изменение водного режима территорий в степной зоне // *Аридные экосистемы*. Т. 17. № 3 (48). С. 38-48. [Novikova N.M., Volkova N.A., Ulanova S.S., Shapovalova I.B., Vyshivkin A.A. 2011. Ecosystem responses to hydrological regime changes in the steppe zone // *Arid Ecosystems*. Vol. 1. No. 3. P. 142-148.]
- Павлова В.Н., Сиротенко О.Д. 2012. Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России // *Труды ГГО*. Вып. 565. С. 132-151.
- Полужтов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. 2006. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета. 396 с.
- Роде А.А. 1965. Основы учения о почвенной влаге. Ленинград. 664 с.
- Сажин А.Н., Петров С.А., Погосян Н.В., Васильев Ю.И., Волошенкова Т.В., Козина О.В., Моников С.Н. 2006. Связь внутривековых изменений увлажнения со сменой циркуляционных эпох и ее отражение в природных процессах Атлантико-Европейского сектора Евразии // *Известия РАН. Серия географическая*. № 1. С. 26-34.
- Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н. 2022. Летние климатические изменения на юге Европейской России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. Т. 8. № 1. С. 107-121.
- Черенкова Е.А. 2017. Сезонные осадки на территории Восточно-Европейской равнины в периоды теплых и холодных аномалий температуры поверхности Северной Атлантики // *Известия РАН. Серия географическая*. № 5. С. 72-81.
- Черенкова Е.А., Бардин М.Ю., Платова Т.В., Семенов В.А. 2020. Влияние долгопериодной изменчивости температуры поверхности океана в Северной Атлантике и изменений атмосферной циркуляции на повторяемость сильных атмосферных засух летом на юге Восточно-Европейской равнины // *Метеорология и гидрология*. № 12. С. 5-19.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 1998. *Crop Evapotranspiration* (FAO 56). Rome: FAO. 300 p.
- Amatya D.M., Irmak S., Gowda P., Sun G., Nettles J.E., Douglas-Mankin K.R. 2016. Ecosystem Evapotranspiration: Challenges in Measurements, Estimates, and Modeling // *Transactions of the ASABE*. No. 59(2). P. 555-560.
- Copernicus. 2022. Climate Change Service [Электронный ресурс <https://climate.copernicus.eu> (дата обращения 07.12.2022)].
- Cowie A.L., Orr B.J., Castillo Sanchez V.M., Chasek P., Crossman N.D., Erlewein A., Louwagie G., Maron M., Metternicht G.I., Minelli S., Tengberg A.E., Walter S., Welton S. 2018. Land in Balance: The Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality // *Environmental Science & Policy*. No. 79. P. 25-35.
- Gleam. 2022 [Электронный ресурс <https://www.gleam.eu/> (дата обращения 07.12.2022)].
- Gruber A., Scanlon T., van der Schalie R., Wagner W., Dorigo W. 2019. Evolution of the ESA CCI Soil Moisture Climate Data Records and Their Underlying Merging Methodology // *Earth System Science Data*. No. 11. P. 717-739.
- Martens B., Miralles D.G., Lievens H., van der Schalie R., de Jeu R.A.M., Fernández-Prieto D., Beck H.E., Dorigo W.A., Verhoest N.E.C. 2017. GLEAM v3: Satellite-based Land Evaporation and Root-zone Soil Moisture //

Geoscientific Model Development. No. 10. P. 1903-1925.

Singh R.P., Roy S., Kogan F. 2003. Vegetation and Temperature Condition Indices from NOAA AVHRR Data for Drought Monitoring over India // *International Journal of Remote Sensing*. No. 24. P. 4393-4402.

Wang X., Wu C., Peng D., Gonsamo A., Liu Z. 2018. 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*. No. 256. P. 61-74

Wohlfahrt G., Ischick C., Thalinger B., Hörtnagl L., Hammerle A. 2010. Insights from Independent Evapotranspiration Estimates for Closing the Energy Balance – A grassland Study // *Vadose Zone Journal*. No. 9 (4). P. 1025-1033.

Wu M., Schurgers G., Rummukainen M., Smith, B., Samuelsson P., Jansson C., Siltberg J., May W. 2016. Vegetation–Climate Feedbacks Modulate Rainfall Patterns in Africa under Future Climate Change // *Earth System Dynamics*. No. 7. P. 627-647.

Zveryaev I.I., Arkhipkin A.V. 2019. Leading Modes of Interannual Soil Moisture Variability in European Russia and Their Relation to Regional Climate during the Summer Season // *Climate Dynamics*. No. 53. P. 3007-3022.