

ПРОБЛЕМЫ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ И УСТОЙЧИВОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 551.582

РОЛЬ ВЕСЕННЕ-ЛЕТНИХ ЗАСУХ В ДИНАМИКЕ АРИДИЗАЦИИ ЗАСУШЛИВЫХ ЗЕМЕЛЬ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

© 2022 г. А. Н. Золотокрылин^а *, Е. А. Черенкова^а **, Т. Б. Титкова^а ***

^аИнститут географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: zolotokrylin@igras.ru

**e-mail: cherenkova@igras.ru

***e-mail: titkova@igras.ru

Поступила в редакцию 16.06.2021 г.

После доработки 08.09.2021 г.

Принята к публикации 12.10.2021 г.

По данным стандартизированного индекса осадков и эвапотранспирации исследована связь изменений годового увлажнения и весенне-летнего, а также летнего увлажнения в 12 субъектах РФ на юге Европейской территории России в 1901–2018 гг. Применение стандартизированного индекса осадков и эвапотранспирации для оценки изменений годового увлажнения обосновано установленной его тесной связью с индексом аридности. Выявлено, что изменения увлажнения в мае–июле более существенные, чем изменения увлажнения за летний сезон, были связаны с изменениями годового увлажнения. Изменения сезонного увлажнения в регионах Поволжья, Заволжья и Северо-Западного Прикаспия объяснили от половины до 65% изменчивости годового увлажнения, а в остальных субъектах юга Европейской территории России вклад сезонного увлажнения варьировал от 30 до 60%. Сравнение выделенных в каждом субъекте фаз аридизации и их систематизация по продолжительности показали, что изменение повторяемости весенне-летних и летних засух оказывает влияние на формирование чередующихся мультидекадных периодов усиления/ослабления аридизации климата на исследуемой территории. Для большинства рассмотренных субъектов характерно два-четыре сухих периода и два-три влажных периода. Установлено, что в начале и середине XX в. на юге Европейской территории России наблюдались более сухие условия весенне-летнего и летнего периодов. Условия повышенного сезонного увлажнения во второй половине XX в. сменились в начале XXI в. более сухой фазой. Показано, что сезонные засухи в сухие периоды являются надежным индикатором засушливого года: весенне-летние засухи – для Ставропольского края и летние засухи – для Волгоградской области и Краснодарского края.

Ключевые слова: периоды усиления/ослабления аридизации, индекс аридности, стандартизированный индекс осадков и эвапотранспирации, засуха, засушливые земли, Европейская территория России

DOI: 10.31857/S2587556622010137

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение повторяемости и интенсивности засух летом в Европе и на юге Европейской территории России (ЕТР) (Второй ..., 2014; Briffa et al., 2009; Spinoni et al., 2017) является одной из причин пристального изучения динамики сезонных засух, влияющих на аридизацию климата. Глобальный анализ крупномасштабных засух на всех континентах во второй половине XX в. свидетельствует об изменениях общей площади с засухами от года к году, но многолетний тренд площадей с засухами незначим (Sheffield et al., 2009). Результаты численных экспериментов с моделями общей циркуляции атмосферы и океана в рамках международного проекта сравнения климатических моделей (Coupled Model Intercomparison

Project, CMIP) свидетельствуют о неопределенности оценок ожидаемого типа потепления (аридный или гумидный тип) на юге ЕТР в середине XXI в. (Cherenkova, Zolotokrylin, 2012).

Режим увлажнения на юге ЕТР характеризуется сильной межгодовой изменчивостью, что затрудняет разработку мер по адаптации отраслей народного хозяйства к климатическим изменениям. Весенние и летние условия увлажнения (и его экстремумы) крайне важны для полноценного развития растений. Результаты изучения динамики аридизации и деградации земель юга ЕТР в предыдущих работах (Золотокрылин и др., 2020а, б) показали отсутствие значимых трендов аридизации за более чем вековой период. Вместе с тем были выявлены внутривековые периоды усиления

Таблица 1. Коэффициент детерминации R^2 регрессии годового SPEI на: SPEI в мае–июле (I) и SPEI в июне–августе (II) по 12 субъектам на юге ЕТР в 1901–2018 гг.

Субъект РФ	Курская область	Белгородская область	Воронежская область	Самарская область	Оренбургская область	Саратовская область	Волгоградская область	Ростовская область	Ставропольский край	Краснодарский край	Республика Калмыкия	Астраханская область
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I	0.34	0.39	0.52	0.55	0.62	0.62	0.65	0.58	0.57	0.44	0.62	0.64
II	0.44	0.45	0.52	0.53	0.59	0.60	0.63	0.54	0.58	0.42	0.59	0.60

ния и ослабления аридизации, в зависимости от частоты и интенсивности весенне-летних засух.

Цель работы состоит в обосновании метода определения фаз аридизации климата с учетом количества атмосферных осадков и эвапотранспирации на засушливых землях ЕТР. Метод заключается в определении роли повторяемости весенне-летних и летних засух в формировании чередующихся мультидекадных периодов (фаз) аридизации климата (кратко фазы аридизации) на исследуемой территории.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Территория исследования представлена субгумидными, сухими субгумидными, семиаридными зонами на юге ЕТР, на которой в настоящее время расположены 12 субъектов РФ (табл. 1). Актуальность рассмотрения этой территории засушливых земель (Золотокрылин, Черенкова, 2009) обусловлена наблюдением (периодическим или постоянным в зависимости от региона) условий низкого увлажнения, характерных для полузасушливой зоны, с повышенными рисками развития процессов деградации земель и опустынивания.

В предыдущих работах (например, Золотокрылин и др., 2020а, б) авторы исследовали динамику аридности территории в субъектах РФ с использованием годового индекса аридности (AI), представляющего отношение суммарных за год осадков к суммарной годовой испаряемости, – условной величине, характеризующей максимально возможное (потенциально возможное, не ограниченное запасами воды) испарение в данной местности при существующих атмосферных условиях. В исследовании значения индекса AI за каждый год в период 1901–2018 гг. были рассчитаны с привлечением данных месячных сумм осадков и потенциальной эвапотранспирации, вычисленной по методу Пенмана (Penman, 1948, 1956) с использованием среднемесячных данных о радиационном балансе поверхности, температуре, относительной влажности воздуха и скорости ветра. Ранее авторами было выполнено сравнение различных методов расчета испаряемости

на юге Русской равнины, в результате которого метод Пенмана был отнесен к наиболее надежным методам (Черенкова, Шумова, 2007). Использованные данные об осадках и потенциальной эвапотранспирации из глобального архива CRU TS4.03 (Climatic Research Unit) с пространственным разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ были подготовлены в Университете Восточной Англии (Hargis et al., 2014). В этой организации расчет потенциальной эвапотранспирации ET_0 (мм день⁻¹) был выполнен по формуле (1), которая характеризует испарение с предположительно хорошо развитого зеленого травяного покрова (гипотетическая эталонная культура) высотой 0.12 м и с полностью увлажненной почвы.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273.16} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}, (1)$$

где R_n – радиационный баланс на подстилающей поверхности (МДж м⁻² сут⁻¹); G – поток тепла из почвы (МДж м⁻² сут⁻¹), принимаемый здесь равным 0; T – среднесуточная температура на высоте 2 м (°C); U_2 – скорость ветра, измеренная на высоте 2 м (м с⁻¹); $(e_a - e_d)$ – дефицит давления насыщенного водяного пара на высоте 2 м (кПа); Δ – наклон кривой давления водяного пара (кПа °C⁻¹); γ – психрометрическая константа (кПа °C⁻¹).

Такой метод расчета испаряемости использован Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (Food and Agriculture Organization, FAO) (Allen et al., 1998) для исследуемых ландшафтов.

Индекс аридности используется для определения границ аридных зон, как это было сделано, например, во Всемирном атласе опустынивания (World ..., 1992). Как показано в работе (Золотокрылин и др., 2020а), изолиния AI = 0.5, отделяющая сухую субгумидную зону от субгумидной зоны, проходит через несколько регионов. Однако доля лет с соответствующими этим зонам субгумидными и семиаридными условиями в увлажнении этих регионов различна. Так, в Оренбургской, Саратовской и Ростовской областях преоб-

ладали субгумидные условия (более чем в 65% лет периода), в 5% лет отмечались семиаридные условия, а в остальные годы условия увлажнения были близки к сухим субгумидным. Ставропольский край и Волгоградская область расположены на сухих субгумидных территориях, но здесь в более чем в трети лет возможно распространение субгумидных условий. Наблюдение сухих субгумидных и семиаридных условий примерно в равных долях характеризует увлажнение в Республике Калмыкии. Наиболее засушливой является Астраханская область с семиаридными условиями увлажнения, в которой доля лет с сухими субгумидными условиями составила чуть более 10%.

При анализе динамики аридности в работах (Золотокрылин и др., 2020а, б) предполагалось, что значения AI ниже/выше среднего значения сигнализируют об усилении/ослаблении аридизации территории. В данном исследовании для оценки аномалий годового и сезонного увлажнения нами использован относительно новый количественный показатель – стандартизированный индекс осадков и эвапотранспирации (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI). Использование индекса SPEI при выявлении периодов аридизации/гумидизации является более предпочтительным по сравнению с AI. Преимущество подхода, использованного при расчете SPEI, состоит в универсальности определения градаций разности осадков и испаряемости в регионах с различным климатом в соответствии со свойствами функции нормального распределения. В этом случае на хвосты распределения, ассоциирующиеся с экстремумами, приходится по 15.87% наблюдений. Значения индекса SPEI вычисляются с помощью преобразования функции вероятности лог-логистического распределения разности осадков и эвапотранспирации (наиболее близко соответствующей их распределению) в функцию нормального распределения с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением, равным единице (Vicente-Serrano et al., 2010). Подробное описание процедуры получения значений стандартизированного индекса осадков (Standardized Precipitation Index, SPI), одинаковой для SPI и SPEI, представлено в (Черенкова, Золотокрылин, 2016). Значения индекса SPEI, при расчете которого использованы те же данные осадков и эвапотранспирации, что применялись при расчете AI, были получены с помощью инструментария Пиренейского Института Экологии (Instituto Pirenaico de Ecologia) (Vicente-Serrano et al., 2010). Отрицательные/положительные значения индекса SPEI характеризуют дефицит/избыток годового (сезонного) увлажнения с учетом осадков и испаряемости для того региона, где рассчитывался индекс. Годы с отрицательными/положительными значениями годового индекса SPEI были отнесены нами к сухим/влаж-

ным годам. Засушливый год или сезонная засуха наблюдается при значениях SPEI за все месяцы года или за сезон соответственно, если эти значения ниже 1. В предыдущих работах авторов было показано, что существенный недостаток годового увлажнения в бассейнах крупных рек ЕТР, рассчитанного с использованием SPEI, приводил к низкому речному стоку Дона и Волги в текущем или следующем году, а Северной Двины и Печоры – в текущем году (Черенкова, Сидорова, 2021). Сравнение частоты засух в регионах ЕТР, выявленных с помощью SPEI и наиболее широко используемого в отечественной гидрометеорологической практике гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК), продемонстрировало недооценку индексом SPEI частоты летней засухи в Северо-Западном Прикаспии, а также в ряде областей Поволжья и Заволжья (Черенкова, Золотокрылин, 2016). Это связано с различием методологических подходов к определению градаций увлажнения (как засух, так и избыточного увлажнения) по ГТК и по SPEI. В частности, в некоторых засушливых регионах по данным ГТК выявляется перманентная сезонная засуха, а в регионах с более влажным климатом засуха по ГТК может никогда не наблюдаться. В то время как низкие отрицательные значения SPEI характеризуют “нехарактерный” режим дефицита осадков в любой местности (в том числе и для аридных, и для гумидных регионов).

Под фазами аридизации климата понимаются чередующиеся периоды усиления и ослабления аридизации длительностью от одного до нескольких десятилетий.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для достижения поставленных целей следует на уровне регионов юга ЕТР: 1) определить тесноту связи 12-месячного (годового) SPEI с годовым индексом аридности, 2) исследовать связь годового индекса SPEI (январь–декабрь) с 3-месячными индексами SPEI за весенне-летний и летний периоды в 1901–2018 гг., 3) выявить фазы аридизации климата на основе оценки весенне-летней и летней изменчивости разности осадков и эвапотранспирации (3-месячный индекс SPEI май–июль и июнь–август), 4) провести анализ вековой динамики весенне-летних и летних засух (SPEI, май–июль и июнь–август) по отношению к фазам аридизации.

Связь SPEI за январь–декабрь с годовым индексом аридности

Корреляционная связь 12-месячного SPEI (январь–декабрь) с индексом аридности на юге ЕТР в 1901–2018 гг. характеризуется высокими коэффициентами корреляции от 0.9 в семиарид-

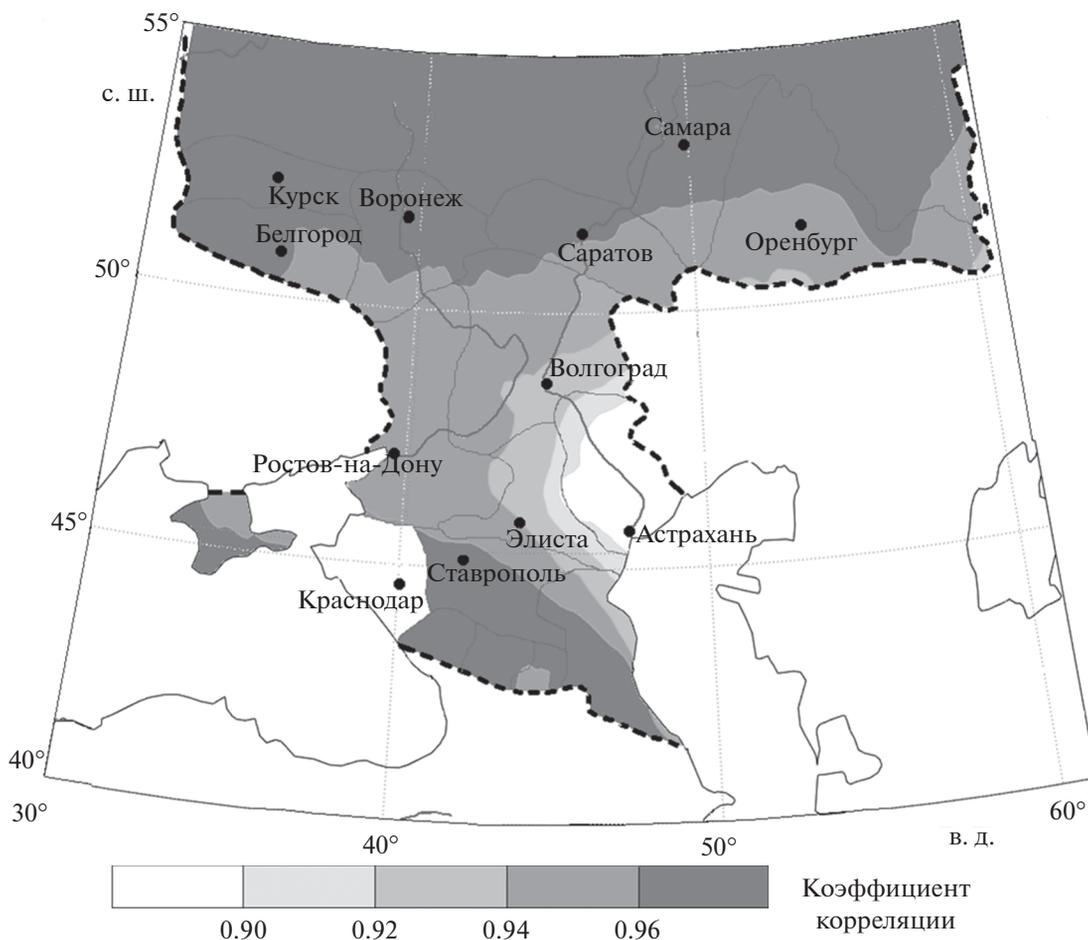


Рис. 1. Пространственное распределение коэффициентов корреляции между индексом аридности AI и годовым SPEI на юге ЕТР в 1901–2018 гг.

ной зоне (большая часть Астраханской области) до 0.98 в северной субгумидной зоне (рис. 1). Тесная связь годового AI и годового SPEI позволяет при исследовании динамики аридности сделать равноценную замену AI на SPEI.

Связь годового индекса SPEI с индексами SPEI за май–июль и июнь–август

Анализ пространственного распределения коэффициентов корреляции между годовым индексом и сезонными индексами SPEI на юге ЕТР в 1901–2018 гг. показал, что на большей части территории изменения увлажнения в мае–июле были более тесно связаны с изменчивостью годового SPEI в 1901–2018 гг., чем изменения увлажнения за летний период (июнь–август) (рис. 2а, б). Как показано на рис. 2а и б, коэффициенты корреляции между индексами возрастают с запада на восток. Увеличение коэффициента корреляции между индексами SPEI к востоку объясняется тем, что с продвижением на восток и юго-восток наблюдается уменьшение годовых сумм осадков

более чем в полтора раза: от 500 мм/год в расположенных на западе субъектах юга ЕТР до 300 мм/год в Астраханской области и в Калмыкии, а также на юго-востоке Оренбургской области. При этом для юга ЕТР характерен максимум осадков и испаряемости в летний период. Поэтому доля летних осадков, а также испаряемости в годовой сумме возрастает, что ведет к повышению коэффициента корреляции для 3-месячных значений SPEI в период, охватывающий летние месяцы.

Из табл. 1 видно, что наибольший вклад в изменчивость годового увлажнения в Курской и Белгородской областях внесли изменения летнего увлажнения (44 и 45% соответственно). Вклад изменений весенне-летнего и летнего увлажнения в изменении годового увлажнения в Краснодарском крае был приблизительно одинаковым (44 и 42% соответственно). При этом доля объясненной изменчивости годового увлажнения изменениями сезонного увлажнения в остальных рассмотренных субъектах РФ превышала 50% и

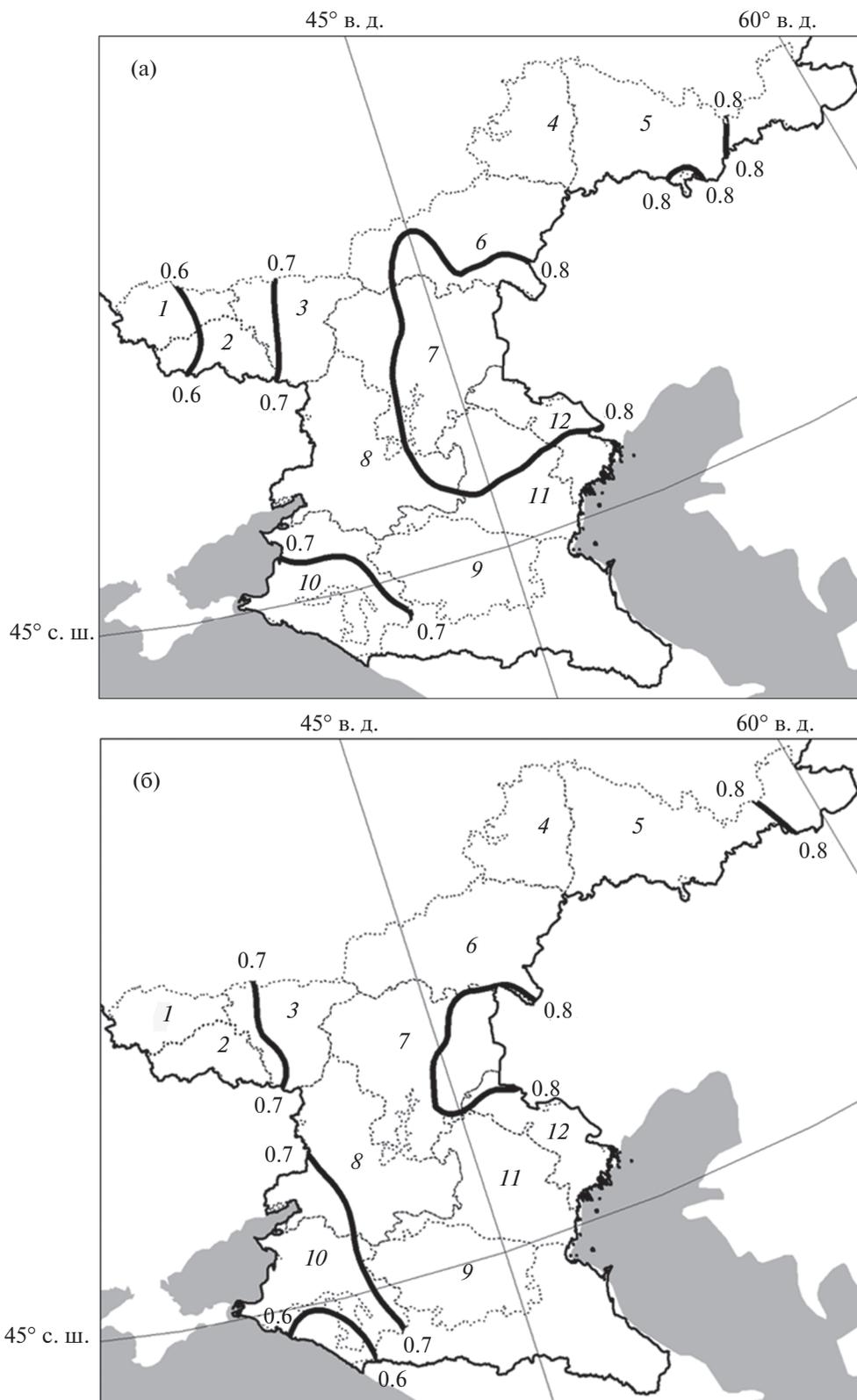


Рис. 2. Пространственное распределение коэффициентов корреляции между годовым индексом SPEI и индексом SPEI за май–июль (а) и июнь–август (б) на юге ЕТР в 1901–2018 гг.

Примечание: Административные границы субъектов РФ показаны пунктирными линиями. Номера и названия субъектов РФ см. в табл. 1.

Таблица 2. Периоды с более влажными (В) (отмечены серым цветом) и более сухими (С) условиями увлажнения (май–июль) по десятилетиям в 1901–2018 гг.

Субъект РФ	1901–1910	1911–1920	1921–1930	1931–1940	1941–1950	1951–1960	1961–1970	1971–1980	1981–1990	1991–2000	2001–2010	2011–2018
Курская область	В	В	В	С	С	С	С	В	В	В	С	С
Белгородская область	В	В	В	С	С	С	С	В	В	В	С	С
Воронежская область	С	В	В	С	С	С	С	В	В	В	В	С
Самарская область	С	В	С	С	В	С	В	В	В	В	В	С
Оренбургская область	С	В	В	С	В	С	В	С	С	В	В	С
Саратовская область	С	В	В	С	В	С	В	В	В	В	В	С
Волгоградская область	С	В	В	В	В	С	С	В	В	В	В	С
Ростовская область	В	В	В	В	С	С	С	В	В	В	С	С
Ставропольский край	В	В	С	В	С	С	С	С	В	В	С	С
Краснодарский край	В	В	С	С	С	С	С	С	В	В	С	С
Республика Калмыкия	С	В	В	В	С	С	С	С	В	В	С	С
Астраханская область	С	В	В	В	В	С	С	С	В	В	С	С

Примечание: Периоды определены по 10-летним скользящим средним 3-месячного SPEI для мая–июля для регионов юга ЕТР.

отличалась незначительно для весенне-летнего и летнего увлажнения. Изменениями сезонного увлажнения на территории Поволжья, Заволжья и Северо-Западного Прикаспия объясняется 53–65% изменений годового увлажнения (см. табл. 1).

Анализ вековой динамики периодов весенне-летнего и летнего увлажнения на юге ЕТР

Основываясь на оценке весенне-летних и летних изменений разности осадков и эвапотранспирации (3-месячный индекс SPEI для июля и августа) в среднем по десятилетиям, можно выделить периоды повышенной/пониженной аридности на юге ЕТР в XX – начале XXI вв.

Чередование периодов с различными условиями весенне-летнего увлажнения в 1901–2018 гг. (сухой, влажный) прослеживаются во всех рассмотренных субъектах (табл. 2). Количество сухих десятилетий для весенне-летних условий изменялось от одного до шести, а влажных десятилетий – от одного до пяти. Для большинства субъектов в тот же временной интервал наблюда-

лись 2–3 сухих и 2 влажных периода. Исключение составляет Оренбургская область, где чередование сухого и влажного периода для весны-лета происходило более часто.

Для летнего увлажнения на юге ЕТР в 1901–2018 гг. выделены преобладающие режимы увлажнения с тремя-четырьмя сухими периодами и двумя-тремя влажными периодами (табл. 3). При этом количество сухих десятилетий изменялось от одного до трех, а влажных десятилетий – от одного до пяти. Периоды с различным характером увлажнения наиболее часто сменяли друг друга в Самарской, Оренбургской и Саратовской областях.

В целом более сухие весенне-летние и летние условия на юге ЕТР отмечались в начале и середине XX в. (в 1901–1910, 1931–1940, 1951–1960 гг.), а также в начале XXI в. (рис. 3а, б). Условия повышенного увлажнения как весенне-летнего, так и летнего, наблюдавшиеся во всех рассмотренных регионах во второй половине XX в., сменились в начале XXI в. более сухими условиями.

Таблица 3. Периоды с более влажными (В) (отмечены серым цветом) и более сухими (С) условиями увлажнения (июнь–август) по десятилетиям в 1901–2018 гг.

Субъект РФ	1901–1910	1911–1920	1921–1930	1931–1940	1941–1950	1951–1960	1961–1970	1971–1980	1981–1990	1991–2000	2001–2010	2011–2018
Курская область	В	В	В	С	В	С	С	В	В	С	С	С
Белгородская область	В	В	В	В	С	С	С	В	В	В	С	С
Воронежская область	С	В	В	В	С	С	С	В	В	В	С	С
Самарская область	С	В	В	С	В	С	В	В	В	В	В	С
Оренбургская область	С	В	В	С	В	С	В	В	В	В	С	С
Саратовская область	С	В	В	С	В	С	В	В	В	В	С	С
Волгоградская область	С	В	В	В	В	С	С	В	В	В	С	С
Ростовская область	С	В	В	В	В	С	С	В	В	В	С	С
Ставропольский край	В	В	В	В	С	С	В	В	В	В	С	С
Краснодарский Край	С	В	В	В	В	С	В	В	В	В	С	С
Республика Калмыкия	С	В	В	В	С	С	С	В	В	В	С	С
Астраханская область	С	В	В	В	В	С	В	В	В	В	С	С

Примечание: Периоды определены по 10-летним скользящим средним 3-месячного SPEI для июня–августа для регионов юга ЕТР.

Сравнение количества случаев наблюдения года с сезонной засухой в засушливый год по данным SPEI (%)

Рассмотрим количество случаев одновременного наблюдения сезонной засухи (весенне-летней и летней) и засушливого года во влажные и сухие периоды. Результаты такого сравнения по десятилетиям в 1901–2018 гг. неоднозначны по субъектам юга ЕТР. Совпадение сезонной засухи и засушливого года наблюдалось чаще именно в сухие периоды в большинстве рассмотренных субъектов (рис. 4а, б). Отметим, что повышенная частота таких совпадений в сухие периоды по сравнению с влажными периодами отмечена в мае–июле в Ставропольском крае (в четыре раза), а также в июне–августе в Оренбургской, Ростовской, Саратовской областях и в Краснодарском крае (в два и более раза).

Наиболее надежные оценки связи сезонных засух и засух в масштабе года можно дать для нескольких регионов юга ЕТР. В сухие периоды сезонные засухи являются индикатором засушливого

года в случае наблюдения весенне-летней засухи: в Саратовской области, Республике Калмыкии и Краснодарском крае (с вероятностью 0.6), в Воронежской и Оренбургской областях (с вероятностью 0.7), в Ставропольском крае с вероятностью 0.9 (см. рис. 4а), в случае наблюдения летней засухи: в Республике Калмыкии и Ставропольском крае (с вероятностью 0.6), в Оренбургской и Ростовской областях (с вероятностью 0.7), в Саратовской области (с вероятностью 0.8), в Волгоградской области и Краснодарском крае (с вероятностью 0.9) (см. рис. 4б). Индикатором засушливого года во влажные периоды являются сезонные засухи в Воронежской и Самарской областях, а также в Ставропольском крае (с вероятностью 0.6), в Волгоградской области и Республике Калмыкии (с вероятностью 0.7).

Предложенный подход позволяет заранее по сезонным засухам идентифицировать засушливые годы в 10-летнем периоде во многих субъектах юга ЕТР, базируясь на том, что засухи вносят

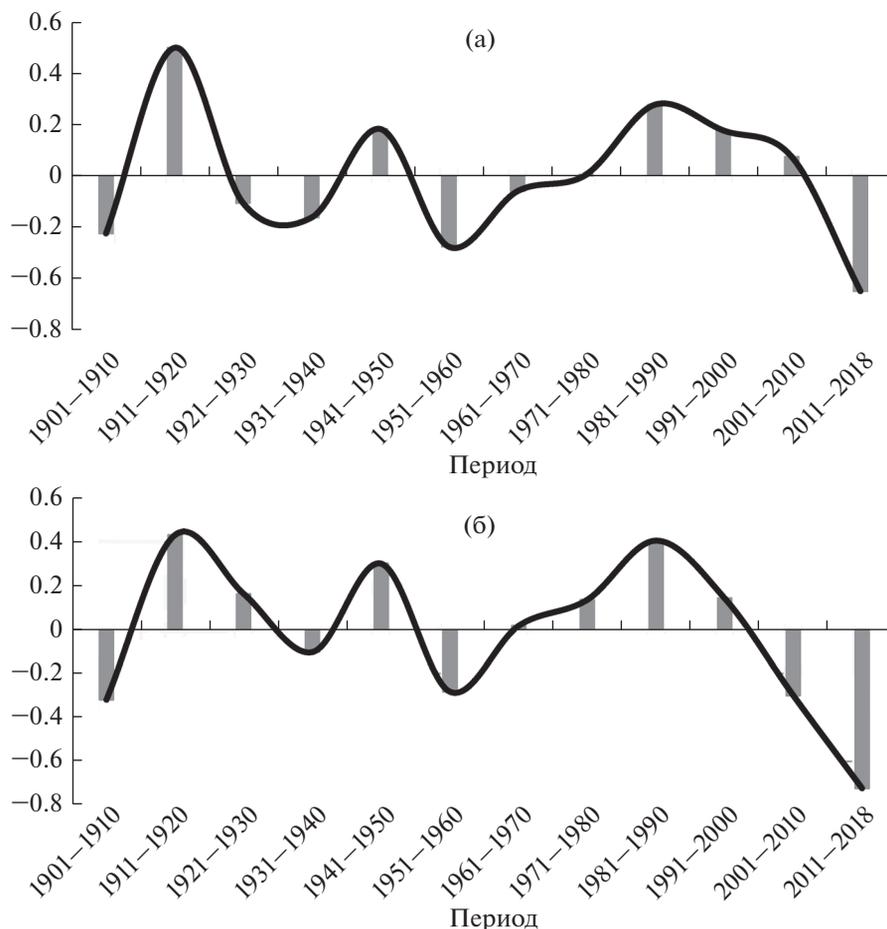


Рис. 3. Изменения 10-летних скользящих средних значений индекса SPEI (безразмерный) на юге ЕТР за май–июль (а) и июнь–август (б), усредненных по десятилетиям. Сглаженная кривая показывает переходы между сухими и влажными периодами весенне-летнего (а) и летнего (б) увлажнения.

основной вклад в формирование засушливых условий конкретного года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснован метод определения фаз усиления/ослабления аридизации климата засушливых земель на юге ЕТР с использованием индекса SPEI. Метод базируется на выявленной тесной корреляционной связи годового индекса аридности AI и годового индекса SPEI, варьирующейся от 0.9 в семиаридной зоне до 0.98 в более северной субгумидной зоне. На исследуемой территории выявлены мультideкадные колебания годового индекса SPEI, а также чередование сухих и влажных периодов сезонного увлажнения, как правило, наблюдающихся в течение несколько десятилетий. При этом для большинства из 12 рассмотренных субъектов юга ЕТР характерно 2–4 сухих периода и 2–3 влажных периода.

Установлено, что изменения увлажнения в мае–июле на юге ЕТР более тесно, чем в летний

сезон, были связаны с изменениями годового увлажнения (см. рис. 2а, б). Изменения сезонного увлажнения в регионах Поволжья, Заволжья и Северо-Западного Прикаспия объяснили 53–65% изменчивости годового увлажнения, а в остальных субъектах юга Европейской территории России – 34–58%.

Весенне-летнее и летнее увлажнение на юге ЕТР понижалось в начале и середине XX в., а также в начале XXI в. Условия повышенного сезонного увлажнения во второй половине XX в. сменились в начале XXI в. более сухими условиями. Засухи в весенне-летний и летний сезон на фоне засушливого года наблюдались чаще в сухие периоды в большинстве рассмотренных субъектов. Показано, что наиболее высока вероятность засушливого года в сухой многолетний период при наблюдении весенне-летней засухи в Ставропольском крае, а также в Волгоградской области и Краснодарском крае в случае летней засухи.

Таким образом, определение фаз усиления и ослабления аридизации климата возможно по

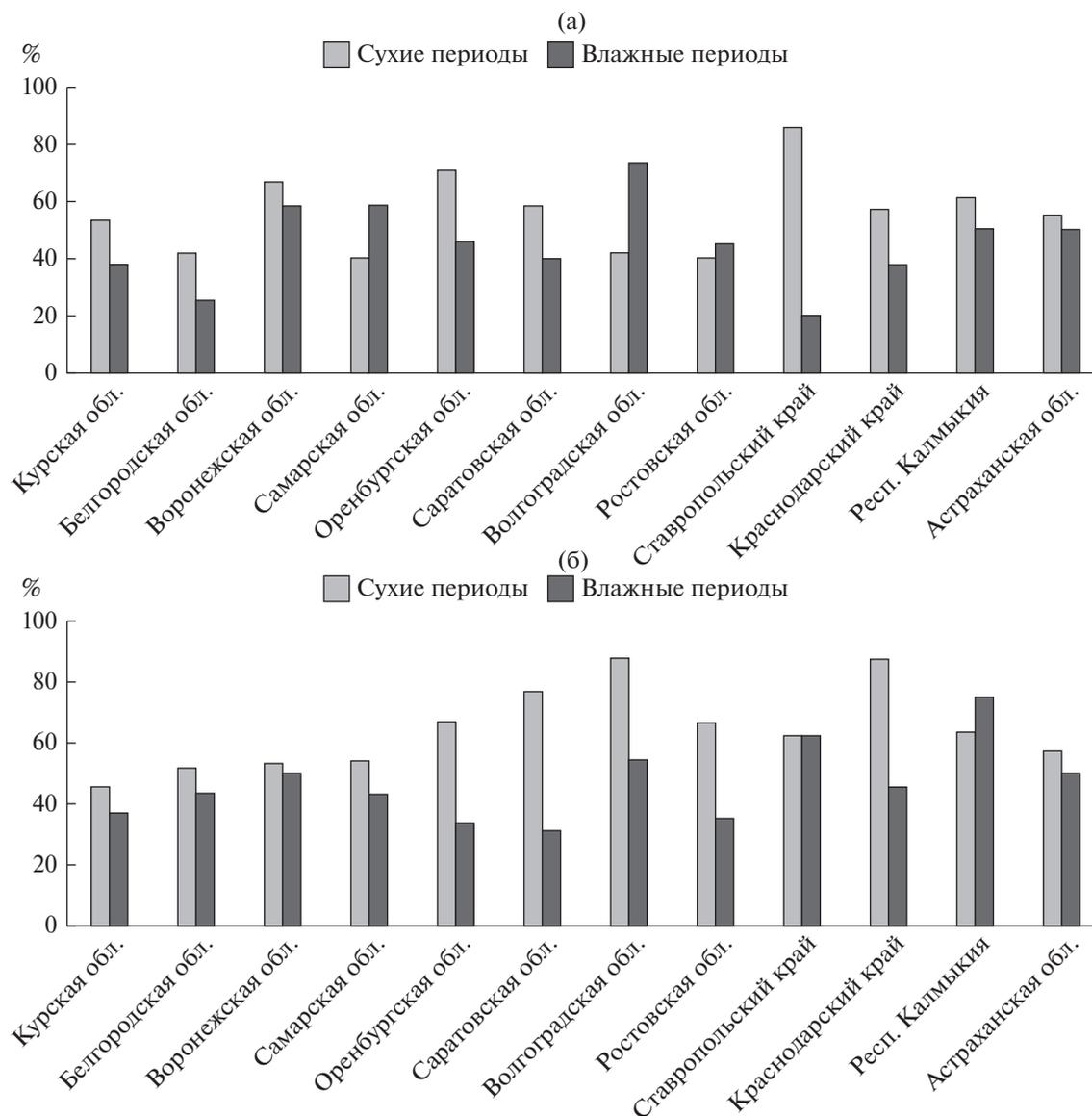


Рис. 4. Доля лет (%) с засухой в весенне-летний (а) и летний (б) сезоны в засушливый год по влажным и сухим сезонным периодам (отображенным в табл. 2 и 3) в субъектах на юге ЕТР по данным SPEI, 1901–2018 гг.

межгодовой изменчивости разности осадков и эвапотранспирации (с использованием индекса SPEI) на засушливых землях юга ЕТР. Повторяемость весенне-летних и летних засух оказывает ощутимое влияние на чередование мультideкадных периодов усиления/ослабления аридизации климата на исследуемой территории.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование проведено в рамках научной темы № 0127-2019-0010 (AAAA-A19-119102890091-1).

FUNDING

The study was conducted within the framework of the scientific theme no. 0127-2019-0010 (AAAA-A19-119102890091-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Второй оценочный доклад. Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.

- Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А.* Площадь засушливых земель равнин России // *Аридные экосистемы*. 2009. Т. 15. № 1 (37). С. 5–12.
- Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б.* Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2020а. Т. 84. № 2. С. 207–217.
<https://doi.org/10.31857/S258755662002017X>
- Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А.* Характеристики весенне-летних засух в сухие и влажные периоды на юге Европейской России // *Арид. экосистемы*. 2020б. Т. 26. № 4 (85). С. 76–83.
<https://doi.org/10.24411/1993-3916-2020-10121>
- Черенкова Е.А., Шумова Н.А.* Испаряемость в количественных показателях климата // *Арид. экосистемы*. 2007. Т. 13. № 33–34. С. 55–67.
- Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н.* Модельные оценки динамики увлажнения равнин России к середине XXI в. // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 11. С. 29–37.
<https://doi.org/10.3103/S1068373912110039>
- Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н.* О сравнимости некоторых количественных показателей засухи // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2016. Т. 2. С. 79–94.
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2016-2-79-94>
- Черенкова Е.А., Сидорова М.В.* Оценка современных условий недостаточного увлажнения, влияющих на маловодность в бассейнах крупных рек Европейской части России // *Водные ресурсы*. 2021. Т. 48. № 3. С. 260–269.
<https://doi.org/10.31857/S0321059621030068>
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M.* Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO, 1998. 300 p.
- Briffa K.R., Van Der Schrier G., Jones P.D.* Wet and dry summers in Europe since 1750: evidence of increasing drought // *Int. J. Climatol.* 2009. V. 29. P. 1894–1905.
<https://doi.org/10.1002/joc.1836>
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H.* Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // *Int. J. Climatol.* 2014. V. 34. P. 623–642.
<https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- Penman H.L.* Natural evaporation from open water, bare soil and grass // *Proc. Roy. Soc. London: A193*, 1948. P. 120–146.
- Penman H.L.* Estimating evaporation // *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*. 1956. Vol. 37 (1). P. 43–50.
- Sheffield J., Andreadis K.M., Wood E.F., Lettenmaier D.P.* Global and continental drought in the second half of the twentieth century: severity-area-duration analysis and temporal variability of large-scale events // *J. Climate*. 2009. V. 22. P. 1962–1981.
<https://doi.org/10.1175/2008JCLI2722.1>
- Spinoni J., Naumann G., Vogt J.V.* Pan-European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity // *Global and Planetary Change*. 2017. V. 148. P. 113–130.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.013>
- World Atlas of Desertification*. UNEP. London: Edward Arnold, 1992. 63 p.
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I.* A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI // *J. Climate*. 2010. V. 23. P. 1696–1718.
<https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

Role of Spring–Summer Drought in the Dynamics of Aridization of Arid Lands in European Russia

A. N. Zolotokrylin^{1, *}, E. A. Cherenkova^{1, **}, and T. B. Titkova^{1, ***}

¹*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: zolotokrylin@igras.ru

**e-mail: cherenkova@igras.ru

***e-mail: titkova@igras.ru

The relationship of changes in annual moisture with spring–summer and summer moisture in twelve federal subjects in the south of European Russia in 1901–2018 was analyzed using the Standardized-Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). The revealed close relationship between the annual SPEI and the aridity index justifies the usage of the SPEI to assess changes in annual moisture conditions. It was found that changes in moisture in May–July were associated with fluctuations in annual moisture more significantly than those in summer moisture. Changes in the seasonal moisture in the Volga, Trans-Volga and Northwestern Caspian regions explained 50–65% of the variability of annual moisture, while the contribution of the seasonal moisture varied from 30 to 60% in other federal subjects of the south of European Russia. The comparison of the aridization phases identified in each federal subject and their systematization by the duration showed that the change in the frequency of spring–summer and summer droughts affects the formation of alternating multi-decadal periods of increasing/decreasing climate aridization in the study area. Two–four dry periods and two–three wet periods are typical for most of the considered federal subjects. It was revealed that drier conditions of the spring–summer and summer periods were observed at the beginning and middle of the 20th century in the south of European Russia. The increasing seasonal moisture in the second half of the 20th century was replaced by a drier phase at the beginning of the 21st century. It was shown that droughts during

dry periods are a reliable indicator of a dry year: spring-summer droughts in Stavropol krai and summer droughts in Volgograd oblast and Krasnodar krai.

Keywords: periods of intensification/weakening of aridization, aridity index, standardized precipitation evapotranspiration index, drought, arid lands, European Russia

REFERENCES

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper, no. 56. Rome: FAO, 1998. 300 p.
- Briffa K.R., Van Der Schrier G., Jones P.D. Wet and dry summers in Europe since 1750: evidence of increasing drought. *Int. J. Climatol.*, 2009, vol. 29, pp. 1894–1905. <https://doi.org/10.1002/joc.1836>
- Cherenkova E.A., Shumova N.A. Potential evapotranspiration in quantity indicators of climate. *Arid Ekosist.*, 2007, vol. 13, nos. 33–34, pp. 55–67. (In Russ.).
- Cherenkova E.A., Sidorova M.V. On the impact of insufficient atmospheric moistening on the low annual discharge of large rivers in European Russia. *Water Resour.*, 2021, vol. 48, pp. 351–360. <https://doi.org/10.1134/S0097807821030064>
- Cherenkova E.A., Zolotokrylin A.N. Model estimates of moistening conditions on the Russian plains by the middle of the 21st century. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, nos. 11–12, pp. 704–710. <https://doi.org/10.3103/S1068373912110039>
- Cherenkova E.A., Zolotokrylin A.N. On the comparability of some quantitative drought indices. *Fundamental'naya. i Prikladnaya Klimatologiya*, 2016, vol. 2, pp. 79–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2016-2-79-94>
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol.*, 2014, vol. 34, pp. 623–642. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- Penman H.L. Estimating evaporation. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, 1956, vol. 37, no. 1, pp. 43–50.
- Penman H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. Lond., A Math. Phys. Sci.*, 1948, vol. 193, pp. 120–145.
- Sheffield J., Andreadis K.M., Wood E.F., Lettenmaier D.P. Global and continental drought in the second half of the twentieth century: severity-area-duration analysis and temporal variability of large-scale events. *J. Climate.*, 2009, vol. 22, pp. 1962–1981. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2722.1>
- Spinoni J., Naumann G., Vogt J.V. Pan-European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity. *Glob. Planet. Change*, 2017, vol. 148, pp. 113–130. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.013>
- Vicente-Serrano S M, Beguería S., López-Moreno J.I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *J. Climate*, vol. 23, pp. 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [The Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Changes and Their Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2014. 1009 p.
- World Atlas of Desertification*. London: UNEP, Edward Arnold, 1992. 63 p.
- Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A. The area of the dry plain lands of Russia. *Arid Ekosist.*, 2009, vol. 15, no. 1, pp. 5–12. (In Russ.).
- Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B. Aridization of drylands in the European part of Russia: secular trends and links to droughts. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, vol. 84, no. 2, pp. 207–217. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S258755662002017X>
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Cherenkova E.A. Characteristics of spring–summer drought in dry and wet periods in the south of European Russia. *Arid Ecosyst.*, 2020, vol. 10, pp. 322–328. <https://doi.org/10.1134/S2079096120040216>