

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕСЕННЕ-ЛЕТНИХ ЗАСУХ В СУХИЕ И ВЛАЖНЫЕ ПЕРИОДЫ НА ЮГЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ¹

© 2020 г. А.Н. Золотокрылин, Т.Б. Титкова, Е.А. Черенкова

Институт географии РАН

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

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

Поступила в редакцию 20.03.2020. После доработки 25.03.2020. Принята к публикации 01.06.2020

Изучаются закономерности распространения характеристик весенне-летних засух в периоды повышенного и пониженного годового увлажнения в 12 административных субъектах юга Европейской России за 1901-2018 гг. За это время четыре периода различных условий увлажнения (чередующиеся более влажный, сухой, влажный и опять сухой) разной длительности хорошо прослеживаются по данным аномалий индекса аридности в 7 регионах: Курской, Белгородской, Воронежской, Саратовской, Волгоградской, Ростовской областях и Республике Калмыкия. Период иссушения отмечен в Самарской и Астраханской областях с начала XX века вплоть до его середины. Затем период иссушения сменился более влажным. Наиболее частая смена периодов с различными условиями увлажнения наблюдалась в Ставропольском крае, где было выделено пять чередующихся периодов. Установлено, что частота весенне-летних засух согласуется с условиями долгопериодного увлажнения. Согласно данным стандартизированного индекса осадков, в сухой период она возрастает в среднем в 1.5 раза при незначительном росте интенсивности засух. Условия повышенного увлажнения, наблюдавшиеся во всех рассмотренных административных субъектах во второй половине XX века, сменились в начале XXI века более сухими условиями. Распространение более засушливых условий началось с восточных областей. Развитие сухого периода увлажнения в XXI веке подтверждено распространением на территории отрицательного тренда вегетационного индекса NDVI. При отсутствии статистически значимых трендов аридизации за более чем вековой период во всех рассмотренных областях юга Европейской России существуют длительные внутривековые периоды усиления и ослабления аридизации, которые характеризуются существенными различиями частоты и интенсивности весенне-летних засух.

Ключевые слова: периоды увлажнения, аридизация, индекс аридности, засухи, SPI, NDVI.

DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10121

Наблюдаемые изменения климата в основных зернопроизводящих районах юга Европейской России во второй половине XX века – начале 2000-х годов более соответствовали гумидному (сопровождаемому увеличением увлажнения) типу потепления, чем аридному (сопровождаемому уменьшением увлажнения; Золотокрылин, Черенкова, 2013; Золотокрылин и др., 2020). Как показывают результаты численных экспериментов на моделях климата, к середине XXI в. на юге России возможно региональное как аридное, так и гумидное потепление (Черенкова, Золотокрылин, 2012). Четкой выраженной периодичности засух или определенной однонаправленной тенденции частоты и интенсивности засух на территории в XX веке не было выявлено. Тенденция к увеличению частоты летних засух проявилась в 1930-1940-х годах лишь в некоторых регионах (Золотокрылин и др., 2014; Черенкова, 2013).

Динамика весенних (март-май) и летних (июнь-август) засух и их характеристики изучалась ранее преимущественно с использованием индекса засухи (SPI) на уровне областей территории за период 1901-2012 гг. (Золотокрылин и др., 2020). Но при этом не анализировались существенно влияющие на урожайность зерновых культур весенне-летние засухи (май-июль). Также не всегда учитывались

¹ Исследование периодов аридизации проведено в рамках научной темы ИГ РАН №0127-2019-0010 (AAAA-A19-119102890091-1). Анализ повторяемости засух выполнен при финансовой поддержке РФФ № 19-17-00242.

влияющие на характеристики засухи многолетние периоды (сухие и влажные) увлажнения.

Цель работы состоит в изучении динамики характеристик атмосферных весенне-летних засух (частоты, интенсивности) в зависимости от аридного или гумидного периода увлажнения.

В статье предполагается изучить закономерности распространения характеристик весенне-летних засух в противоположные периоды увлажнения. Для этого планируется определить: 1) периоды увлажнения применительно к индексу аридности; 2) среднюю частоту и интенсивность засух во время наиболее активной вегетации в противоположные периоды увлажнения территории: с более засушливыми и более влажными условиями.

Материалы и методы

Территория исследования включает субгумидные, сухие субгумидные, а также семиаридные земли юга Европейской России. Она представлена субъектами РФ, которые формируют ее Европейский зерновой пояс: Курская, Белгородская, Воронежская, Оренбургская, Саратовская, Самарская, Волгоградская, Астраханская, Ростовская области, Республика Калмыкия, Ставропольский и Краснодарский край.

Степень аридизации в субъектах РФ оценивалась по данным индекса аридности (Aridity Index – AI), характеризующего соотношение суммарных годовых осадков к суммарной годовой потенциальной эвапотранспирации. Потенциальная эвапотранспирация вычислялась по методу Г.Л. Пенмана (Penman, 1948, 1956). В расчете используются данные о радиационном балансе поверхности, температуре, относительной влажности воздуха и скорости ветра. Ранее авторы сравнивали различные методы расчета испаряемости на юге Русской равнины, в результате чего метод Пенмана был отнесен к наиболее надежным (Черенкова, Шумова, 2007). Индекс аридности вычислялся по данным глобальных архивов среднемесячных осадков и потенциальной эвапотранспирации с пространственным разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (Climatic Research Unit, CRU TS3.21; Hargis et al., 2014) за период 1901–2018 гг. При этом потенциальная эвапотранспирация рассчитана по формуле, которая характеризует испарение с гипотетического хорошо развитого зеленого травяного покрова высотой 0.12 м и с полностью увлажненной почвой. Данный метод расчета испаряемости рекомендован Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (Food and Agriculture Organization, FAO; Allen et al., 1998). Затем индекс усреднялся в границах субъектов РФ.

Распространение засух на территории исследовано с помощью 3-месячного стандартизованного индекса осадков (Standardized Precipitation Index, SPI) в июле (т.е. определялись засухи за май-июль). Методика расчета индекса и особенности повторяемости атмосферных засух, согласно их классификации по SPI на Европейской территории России, подробно были описаны в работе Е.А. Черенковой и А.Н. Золотокрылина (2016). Интенсивность засух на основе индекса SPI классифицируется следующим образом: $-1 < SPI \leq 0$ – слабая, $-1.5 < SPI \leq -1$ – умеренная, $-2 < SPI \leq -1.5$ – сильная, $SPI \leq -2$ – экстремальная. В работе рассматривались значения индекса ниже -1 , идентифицирующие засуху.

Сеточные данные индексов аридности и засух усреднялись в пределах обозначенных субъектов РФ. Затем формировались многолетние ряды и вычислялись их статистические характеристики (среднее, стандартное отклонение, коэффициенты линейных трендов с оценкой их статистической достоверности, коэффициент вариации) за период 1901–2018 гг. В работе А.Н. Золотокрылина с соавторами (2020) показано, что линейные вековые тренды AI незначимы и близки к нулю. Поэтому для определения более засушливых и более увлажненных условий анализировались аномалии AI как отклонения от среднего. Далее вычислялись ряды скользящих средних значений индексов: двухлетние и десятилетние соответственно.

Для определения реакции растительного покрова на изменение условий увлажнения в начале XXI века использовался нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) за период 2000–2019 гг. Анализ проводился по данным NDVI в июле, полученным с помощью модели MOD13C2 версии 6 для среднемесячных значений с разрешением $CMG 0.05^\circ \times 0.05^\circ$ (Сервис загрузки данных ..., 2019). Ежемесячный продукт основан на продуктах MOD13A2, которые перекрывают месяц, и использует средневзвешенное временное значение. Глобальные данные MOD13C1 представляют собой безоблачные пространственные композиты поверхности за этот месяц. Статистическая значимость тренда NDVI с вероятностью 0.05 определялась по критерию Стьюдента.

Результаты и обсуждение

Статистические характеристики индекса аридности, осредненного по территории административных субъектов юга Европейской России, представлены в таблице 1. По мере усиления аридизации в более южных областях индекс AI уменьшается. Как видно из таблицы 1, субгумидные территории отличаются высоким стандартным отклонением и более высокими значениями коэффициента вариации по отношению к сухим субгумидным и семиаридным областям. Устойчивость аридных зон юга Европейской России подтверждается незначимыми линейными трендами индекса аридности за весь период 1901-2018 гг. При этом индекс аридности обладает большой межгодовой изменчивостью, маскирующей его внутривековые изменения.

Таблица 1. Статистика AI за период 1901-2018 гг.

Области	Среднее	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %	Тренд	Значимость
Курская	0.88	0.17	19	0.0000	-0.0026
Белгородская	0.74	0.14	19	0.0001	0.0426
Воронежская	0.64	0.13	21	0.0003	0.0830
Самарская	0.67	0.14	21	0.0007	0.2063
Саратовская	0.52	0.12	22	0.0004	0.1112
Оренбургская	0.52	0.12	23	0.0003	0.0901
Ростовская	0.51	0.10	20	0.0002	0.0668
Ставропольский край	0.47	0.08	16	0.0000	0.0127
Краснодарский Край	0.83	0.13	15	0.0008	0.3168
Волгоградская	0.42	0.10	23	0.0002	0.0489
Республика Калмыкия	0.29	0.05	18	0.0001	0.0188
Астраханская	0.24	0.05	21	0.0001	0.0368

Примечания к таблице 1: тренды по критерию Стьюдента с уровнем значимости 0.05 незначимы.

В период 1901-2018 гг. четыре периода с различными условиями годового увлажнения (влажный, сухой, влажный и снова сухой) хорошо прослеживаются по данным аномалий индекса аридности в Курской, Белгородской, Воронежской, Саратовской, Волгоградской, Ростовской областях и Республике Калмыкия (табл. 2). В восточной части территории (в Самарской, Оренбургской, Астраханской областях) и в Краснодарском крае в течение всего XX века можно выделить только два периода: сухой и влажный. Отметим, что условия повышенного увлажнения, наблюдавшиеся во всех рассмотренных административных субъектах во второй половине XX века, сменились в начале XXI века более сухими. Наиболее частая смена периодов с различными условиями годового увлажнения наблюдалась в Ставропольском крае, где выделяется пять чередующихся периодов: сухой, влажный, сухой, влажный и сухой.

В целом, в начале XX века наблюдалось ослабление аридизации, сменившееся его усилением в 1930-х гг. Окончание более сухого периода приходится на конец 1950-х гг. С 1960-х годов практически до его окончания увеличение увлажнения территории привело к ослаблению аридизации (табл. 2).

Периоды усиления и ослабления аридизации, определяемые в масштабах года, характеризуются особенностями частоты весенне-летних засух, выделенных по индексу SPI<-1 (табл. 3). Как проиллюстрировано в таблице 3, частота засух в период наблюдения более сухих лет выше, чем в период более влажных и эта разница варьирует от 1.3 раза (Белгородская, Саратовская, Волгоградская, Ростовская, Астраханская области и Ставропольский край) до 2.5 раз (Оренбургская область).

Статистика интенсивности засух по данным индекса SPI представлена в таблице 4. Как видно, подавляющее количество засух относится к умеренным, а наименьшее число засух составляют экстремальные. Большинство весенне-летних засух максимальной интенсивности чаще наблюдались в Самарской, Оренбургской, Саратовской, Волгоградской областях и реже в Астраханской области. Тренд уменьшения интенсивности засух отмечается в Белгородской, Воронежской, а увеличения –

в Саратовской, Самарской и Оренбургской областях. Засухи максимальной интенсивности в 2010 г. отмечались только в 3 областях из 12.

Таблица 2. Периоды с условиями увлажнения более влажными (В, отмечены серым цветом) и более сухими (С), выделенными по 10-летним средним аномалий АІ для областей Юга Европейской России.

Субъекты 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	В	В	С	С	С	В	В	В	В	В	С	С
Белгородская	В	В	С	С	С	В	В	В	В	В	С	С
Воронежская	В	В	С	С	С	В	В	В	В	В	С	С
Самарская	С	С	С	С	С	С	В	В	В	В	С	С
Оренбургская	С	С	С	С	В	В	В	В	В	В	С	С
Саратовская	В	В	С	С	В	В	В	В	В	В	С	С
Волгоградская	В	В	С	С	С	С	В	В	В	В	С	С
Ростовская	В	В	С	С	С	В	В	В	В	В	С	С
Ставропольский край	С	В	В	В	С	С	В	В	В	В	С	С
Краснодарский край	С	С	С	В	В	В	В	В	В	В	С	С
Рес. Калмыкия	В	В	В	С	С	С	В	В	В	В	С	С
Астраханская	С	С	С	С	С	С	В	В	В	В	С	С

Таблица 3. Средняя частота весенне-летних засух (число засух/10 лет) – периоды наблюдения более сухих и более влажных лет в 1901-2018 гг.

Области	Периоды	Сухой	Влажный
	SPI		
Курская		3	2
Белгородская		4	3
Воронежская		3	2
Самарская		3	2
Саратовская		4	3
Оренбургская		5	2
Волгоградская		4	3
Ростовская		4	3
Краснодарский край		4	2
Ставропольский край		4	3
Республика Калмыкия		5	3
Астраханская		4	3

Средняя интенсивность засух в период наблюдения более сухих лет была на 0.1-0.2 выше, чем во влажный период. В целом, во все периоды наиболее интенсивные засухи (SPI равен -1.8, -1.9) отмечались в Оренбургской, Саратовской, Волгоградской и Воронежской областях.

Таким образом, при отсутствии значимых трендов аридизации (табл. 1) за временной интервал времени более века во всех рассмотренных областях юга Европейской России существуют длительные внутривековые периоды усиления и ослабления аридизации, которые характеризуются изменением частоты и интенсивности весенне-летних засух.

Как показывают сглаженные 10-летние средние аномалии АІ, на юге Европейской России с

начала XXI века прослеживается период с более засушливыми условиями, что подтверждается и двухлетними скользящими средними аномалии индекса аридности (рис. 1).

Согласно аномалиям, более сухой период начался в самой восточной части исследуемой территории – в Оренбургской области (2003 г.). Позднее его начало было зафиксировано в западных областях: Курской и Белгородской (2006 г.). При этом в западных областях более засушливые годы наблюдаются чаще, чем в восточных (рис. 2).

Таблица 4. Статистика весенне-летних засух по SPI различной интенсивности (от умеренной до экстремальной) за 1901-2018 гг.

Области	Число засух	Средняя интенсивность	Число умеренных засух $-1.5 < spi \leq -1$	Число сильных засух $-2 < spi \leq -1.5$	Число экстремальных засух $Spi \leq -2$	Максимальная интенсивность засухи	Год наблюдения засухи максимальной интенсивности
Курская	18	-1.63	9	6	3	-2.2	1946
Белгородская	17	-1.59	9	5	3	-2.4	1959
Воронежская	21	-1.60	13	5	3	-2.4	1959
Самарская	18	-1.60	9	4	5	-3.4	2010
Саратовская	12	-1.75	6	2	4	-2.6	2010
Оренбургская	15	-1.75	8	2	5	-3.0	2010
Волгоградская	15	-1.56	8	3	4	-2.4	1959
Респ. Калмыкия	17	-1.53	11	3	3	-2.6	1959
Астраханская	20	-1.55	14	4	2	-3.2	1972
Ростовская	19	-1.42	14	3	2	-2.8	1959
Ставропольский край	18	-1.32	14	1	3	-2.4	2007
Краснодарский край	17	-1.49	11	3	3	-2.4	1923

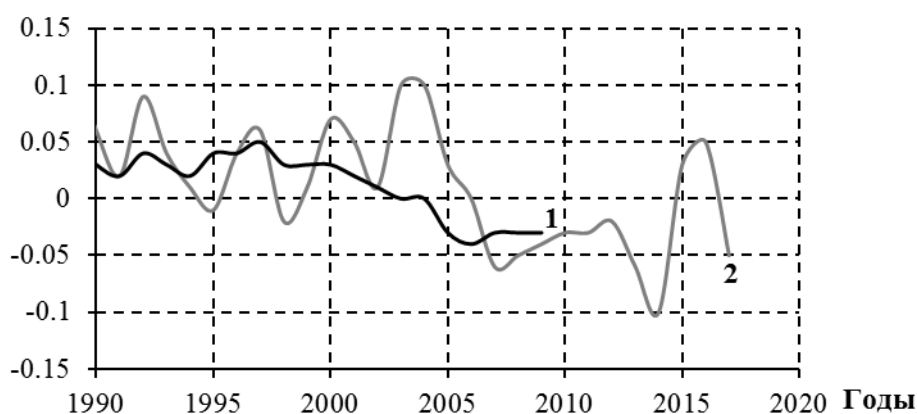


Рис. 1. Аномалии индекса аридности (AI), выделенные по скользящим средним за 10-летний (1) и 2-летний (2) период в целом для 12 областей юга Европейской России в конце XX – начале XXI века.

Сглаженные 10-летние средние индекса аридности отражают наступление нового сухого периода в XXI веке (рис. 2). Затухание влажного периода приходится на самое начало XXI века (2003-2006 гг.). Далее прослеживается период с более засушливыми условиями, что подтверждается и двухлетними скользящими средними рассматриваемых параметров. Исключение составил 2016 г., когда летом на всей территории юга Европейской России наблюдалось аномально повышенное увлажнение.

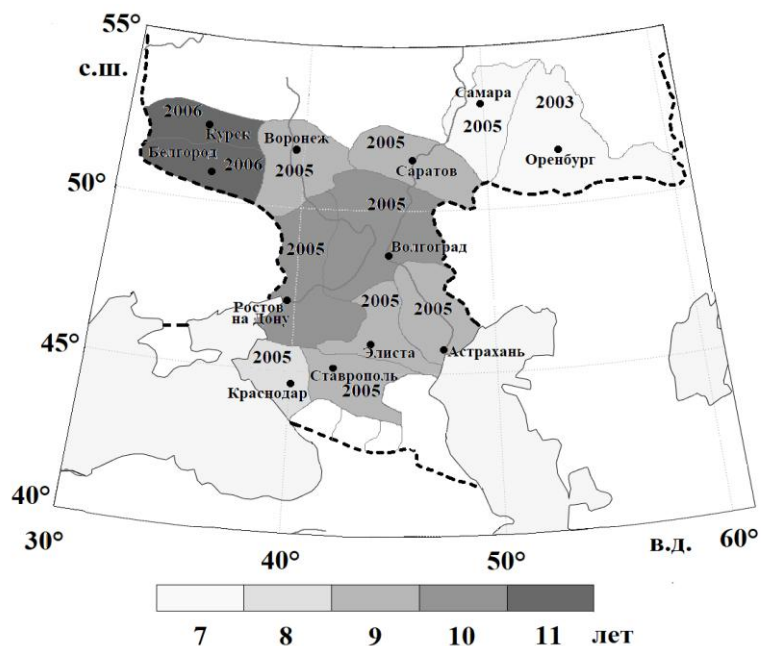


Рис. 2. Количество более сухих лет, выявленных по аномалиям индекса аридности в областях юга Европейской России за 2001-2018 гг. Цифрами обозначен год начала сухого периода по 10 летним скользящим средним в каждой административной единице.

Согласно данным индекса SPI, весенне-летние засухи в XXI веке чаще возникали в западных районах: в Курской, Белгородской и Ростовской областях по всем показателям. За 18 лет (период 2001-2018 гг.) здесь наблюдалось 10-11 лет с засухами разной интенсивности. В то время как в восточных областях отмечено только 7-9 лет с засухами (рис. 3).

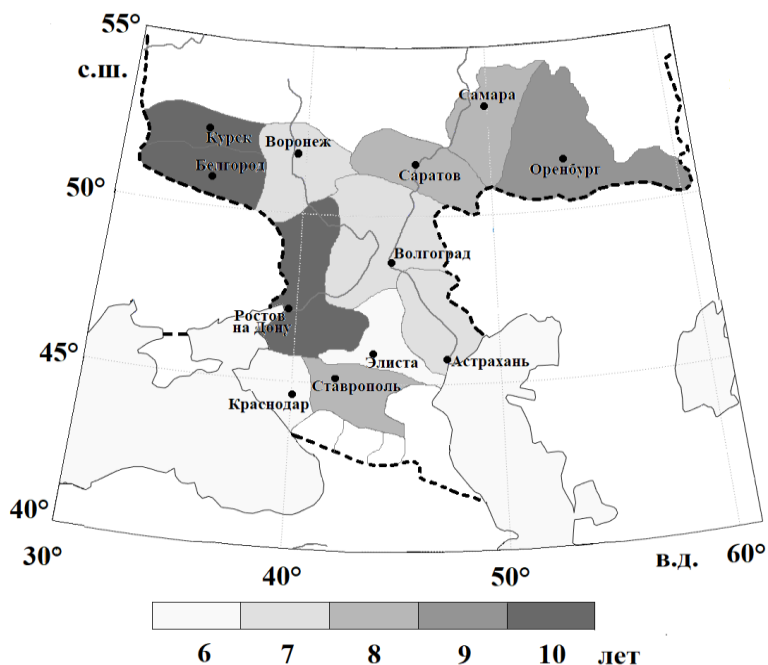


Рис. 3. Количество засух (лет) в административных субъектах на Юге Европейской России за 2001-2018 гг.

Независимым и косвенным подтверждением наступлением нового сухого периода в начале 2000-х годов являются отрицательные тренды вегетационного индекса NDVI за 2000-2019 гг. (рис. 4). Отрицательные тренды NDVI прослеживаются в каждой области. Максимальное и значимое

уменьшение вегетационного индекса произошло в Оренбургской, Самарской, Саратовской, Волгоградской и Ростовских областях.

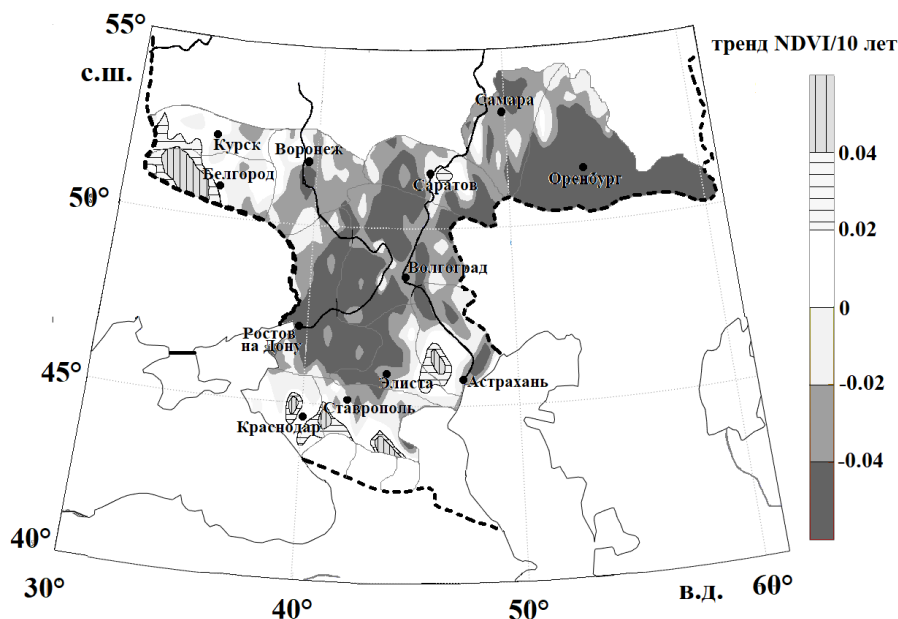


Рис. 4. Тренд NDVI за июль 2000-2019 гг. Тренд значим (уровень значимости 0.05 по критерию Стьюдента), при значениях больше (меньше) ± 0.02 .

Таким образом, в XXI веке в основных зернопроизводящих областях Юга Европейской России начался новый более сухой период увлажнения. Хотя распространение более засушливых условий началось с востока на запад, наиболее часто засухи стали наблюдаться в западных областях.

Заключение

Анализ изменений индекса аридности в 1901-2018 гг. показал наличие в основных зернопроизводящих областях Юга Европейской России долгопериодных изменений годового увлажнения, определяющих более сухие и влажные условия.

Установлено, что частота весенне-летних засух согласуется с характером годового увлажнения. В периоды наблюдения более сухих лет она возрастает в среднем в 1.5 раза. В тоже время интенсивность засух в более сухие периоды незначительно возрастает по сравнению с влажными периодами.

Наиболее интенсивные засухи чаще наблюдались в Самарской, Оренбургской, Саратовской, Волгоградской областях и реже в Астраханской области. Тренды уменьшения интенсивности засух отмечаются в Белгородской, Воронежской, а увеличения – в Саратовской, Самарской и Оренбургской областях. Засуха максимальной интенсивности в 2010 г. зафиксирована только в 3 областях из 12.

Современный, более сухой, период увлажнения сформировался в начале XXI века. Хотя распространение более засушливых условий началось с восточных областей, весенне-летние засухи стали наиболее часто наблюдаться в западных областях. Развитие нового сухого периода с начала XXI века подтверждено распространением на территории отрицательного тренда вегетационного индекса.

При отсутствии значимых трендов аридизации за более чем вековой период во всех рассмотренных областях Юга Европейской России существуют длительные внутривековые периоды усиления и ослабления аридизации, для которых частота и интенсивность весенне-летних засух существенно различаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.]

- Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А.* 2013. Тенденции увлажнения зернового пояса России в начале XXI века // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 25. С. 251-264.
- Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б.* 2020. Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // Известия Российской академии наук. Серия географическая. № 2. С. 207-217.
- Сервис загрузки данных дистанционного зондирования LP DAAC. MODIS Data, mod13c2v006. 2019 [Электронный ресурс <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13c2v006/> (дата обращения 02.02.2020)].
- Черенкова Е.А.* 2013. Количественные оценки атмосферных засух в Федеральных округах Европейской территории России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. № 6. С. 76-85.
- Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н.* 2012. Модельные оценки динамики увлажнения равнин России к середине XXI в. // Метеорология и гидрология. № 11. С. 29-37.
- Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н.* 2016. О сравнимости некоторых количественных показателей засухи // Фундаментальная и прикладная климатология. Т. 2. С. 79-94.
- Черенкова Е.А., Шумова Н.А.* 2007. Испаряемость в количественных показателях климата // Аридные экосистемы. Т. 13. № 33-34. С. 55-67.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M.* 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements // FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO. 300 p.
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H.* 2014. Updated High-Resolution Grids of Monthly Climatic Observations. The CRU TS3.10 Dataset // International Journal of Climatology. Vol. 34. P. 623-642.
- Penman H.L.* 1948. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass // Proceedings of the Royal Society. London: A193. P. 120-146.
- Penman H.L.* 1956. Estimating Evaporation // Eos, Transactions American Geophysical Union. No. 37 (1). P. 43-50.