

Смягчение засушливости климата Приволжской степи в 2000–2007 гг., выявленное с помощью спутниковых данных

А.Н. Золотокрылин, Т.Б. Титкова

*Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия
E-mails: azolotokrylin1938@yandex.ru, ttitkova@yandex*

Природные условия Приволжской степи из-за снижения влагообеспеченности в юго-восточном направлении для жизнедеятельности населения оцениваются как переходные от благоприятных к малоблагоприятным. Изменение климата Приволжской степи анализируется как реакция на внешние воздействия, такие как солнечная радиация и осадки. Эвапотранспирация рассматривается как следствие этих внешних воздействий, а ее уменьшение может характеризовать степень нарастания засушливости климата. В работе анализируются месячные суммы эвапотранспирации (ET16) в мае–августе 2000–2014 гг. в сравнении со стационарными месячными суммами осадков, среднемесячным спутниковым радиационным балансом поверхности, температурой поверхности (MODIS). Показано, что в Приволжской степной провинции, известной своей экстремальной засушливостью, при определенном сочетании запасов влаги в почве, вызванном случайным увеличением осадков, возможно формирование двух режимов летней эвапотранспирации (повышенного и пониженного). Эти режимы использованы для классификации засушливости климата провинции на слабую (2000–2007) и сильную (2008–2014). В период 2000–2007 гг. наблюдалось смягчение сильной засушливости климата в результате увеличения затраты радиационного баланса на эвапотранспирацию и, соответственно, уменьшения турбулентного прогрева приземного слоя атмосфер.

Ключевые слова: эвапотранспирация, радиационный баланс, осадки, засушливость

*Одобрена к печати: 20.11.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-128-135*

Введение

В период освоения Приволжской степи в конце XVIII – начале XIX в. были открыты и обжиты в долинах малых рек и у подножья главного уступа восточного склона Приволжской возвышенности отдельные местности с благоприятными микроклиматическими условиями и источниками воды для жизни. Эти местности и их окрестности были освоены переселенцами для ведения сельского хозяйства, и до сих пор используются населением, хотя в целом территория страдает от сильных и продолжительных засух. Природные условия Приволжской степи для жизнедеятельности населения из-за снижения влагообеспеченности в юго-восточном направлении оцениваются как переходные от благоприятных к малоблагоприятным (Золотокрылин, Кренке, Виноградова, 2012; Исаченко, 2001).

Прогнозные изменения коэффициента увлажнения (отношение годовых осадков к годовой потенциальной эвапотранспирации) на территории степной зоны, и в частности Приволжской степи, в период 2011–2030 гг. по сравнению с периодом 1981–2000 гг. свидетельствуют об ожидаемом усилении засушливости климата (Черенкова, 2013). Прогнозные оценки получены по ансамблю 31 модели для условий «жесткого» сценария антропогенного воздействия на климатическую систему группы Representative Concentration Pathway (RCP8.5). Наибольший рост засушливости возможен в юго-восточной части Приволжской степной провинции.

В этой связи важно поставить вопрос об изучении климата Приволжской степи в сезон активной вегетации, используя спутниковый мониторинг радиационного баланса и эвапотранспирации, а также сетевые данные наблюдений за осадками. В результате климат

Приволжской степи можно анализировать как возможную реакцию на внешние воздействия, такие как солнечная радиация и осадки. Тогда эвапотранспирация рассматривается как следствие этих внешних воздействий, а ее уменьшение может характеризовать степень нарастания засушливости климата. В этом случае минимальная эвапотранспирация присуща более засушливому климату, с дефицитом влаги и неблагоприятными последствиями для населения.

Работа нацелена на изучение междугодового изменения месячных значений эвапотранспирации, а также радиационного баланса и осадков в сезон активной вегетации (май–август) для характеристики степени засушливости климата.

Территория исследования и базы данных

Территория исследования охватывает Приволжскую степную провинцию в пределах 50–52° с.ш. и 44–49° в.д. и покрывает значительную часть Саратовской области и примыкающей к ней с юго-запада части Волгоградской области (Исаченко, 2001). Волга делит провинцию на менее сухую правобережную и более сухую левобережную. Характерная особенность степного климата — летняя засушливость при продолжительности лета около 4,5 месяца и большая изменчивость месячных осадков от года к году (Левицкая, Иванова, 2014). В это время года средняя суточная температура колеблется от +21 до +24°С и, как правило, преобладает сухая малооблачная погода. Часто с конца июня и до середины августа на территории возникают дискомфортные для человека условия, когда температура воздуха не опускается ниже +30°С (Золотокрылин, Кренке, Виноградова, 2012). Засушливые годы повторяются в среднем через два года (Левицкая, Иванова, 2014).

Месячные суммы осадков для рассматриваемой территории получены по стационарным данным из архива ВНИИГМИ-МЦД за период 2000–2014 гг. (<http://www.meteo.ru>). Осреднение осадков проводилось по пяти станциям (Саратов, Ершов, Новоузенск, Фролово и Александров Гай).

База данных MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16) (<http://www.ntsg.umd.edu/project/mod16>) использована для вычисления месячных сумм эвапотранспирации за период 2000–2014 гг. Размер пикселя составляет 1 км². Описание метода расчета эвапотранспирации и оценка качества ее воспроизведения моделями на основе спутниковых и наземных данных приведены в работах (Mu et al., 2007; Mu, Zhao, Running, 2011, 2013). В перечисленных работах указывается, что коэффициент корреляции модельной эвапотранспирации с наземными наблюдениями составляет 0,76, а ошибка воспроизведения — около 10%.

Месячные суммы радиационного баланса поверхности получены из базы данных системы изучения облачности и излучения Земли CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System: https://ceres.larc.nasa.gov/order_data.php). Эта система разработана для изучения влияния облачного покрова на радиационный баланс Земли с борта спутника Terra. Она дополняет аналогичный прибор на борту спутника TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission). CERES измеряет радиационный баланс Земли в двух участках теплового диапазона. На борту спутника имеются два одинаковых прибора, которые измеряют суммарный радиационный

баланс Земли и совместно с данными MODIS по облачному покрову обеспечивают оценку характеристик облачности, что позволяет оценить влияние облачности на тепловое излучение Земли. Среднемесячные данные, охватывающие период 03.2000–08.2016, приведены в регулярную сетку с разрешением $1 \times 1^\circ$. Оценка качества воспроизведения радиационного баланса поверхности и его составляющих приведена в документации продукта (<https://ceres.larc.nasa.gov/dqs.php>, https://ceres.larc.nasa.gov/documents/DQ_summaries/CERES_EBAF-Surface_Ed2.8_DQS.pdf), в котором отмечается, что достигнута 10% точность воспроизведения составляющих радиационного баланса.

В работе применен кластерный анализ, позволяющий классифицировать многомерные наблюдения (месячные суммы осадков, среднемесячные значения радиационного баланса, месячные значения эвапотранспирации) на два уровня засухливости: слабый и сильный. За период май–август 2000–2014 гг. каждый месяц анализировались три параметра, в целом за май–август в сумме — 12 параметров.

Основные результаты

Вначале рассмотрим результаты классификации исследуемых параметров на два уровня засухливости, сильный и слабый, с помощью кластерного анализа (*табл. 1*).

Как видно из *табл. 1*, сильная засухливость имеет преимущественное значение в среднем за май–август 2008–2014 гг. При этом в течение этого периода сильная засухливость прерывалась относительно влажными месяцами. Слабая засухливость наблюдалась в период 2000–2007 гг. Она прерывалась в 2002 и 2006 гг., когда сухие условия наблюдались по три месяца, что в целом позволило эти годы отнести к сухим.

Таблица 1. Классификация условий увлажнения по месячным значениям осадков, радиационного баланса, эвапотранспирации в Приволжской степи на два уровня засухливости: слабый (2) и сильный (1)

	<i>Май–август</i>	<i>Май</i>	<i>Июнь</i>	<i>Июль</i>	<i>Август</i>
2000	2	1	2	2	1
2001	2	1	2	1	2
2002	1	2	1	1	1
2003	2	2	2	2	2
2004	2	2	1	2	1
2005	2	2	2	1	1
2006	1	1	1	1	2
2007	2	2	2	2	1
2008	1	1	2	2	1
2009	1	1	1	1	2
2010	1	2	1	1	1
2011	1	2	1	1	1
2012	1	2	1	1	2
2013	1	2	2	1	1
2014	1	2	2	1	1

Два уровня засушливости выделяются количественно только для летних месяцев. Слабая засушливость в июне возможна при выпадении осадков более 40 мм, эвапотранспирации более 50 мм (за счет накопленной весенней влаги) и радиационного баланса более 130 Вт/м². В июле слабая засушливость характерна при осадках 60 мм и более и эвапотранспирации более 45 мм. Значения радиационного баланса в этот месяц подвержены колебаниям. В августе относительной границей между уровнями засушливости является количество осадков 30 мм и эвапотранспирации 20 мм.

Режим с повышенной эвапотранспирацией в мае–августе 2000–2007 гг. статистически достоверно отличается от режима в период 2008–2014 гг. (рис. 1). На данном рисунке кривые не пересекаются даже с учетом ошибки данных эвапотранспирации, которая составляет не более 10%, т.е. 2,7 и 3,7 мм.

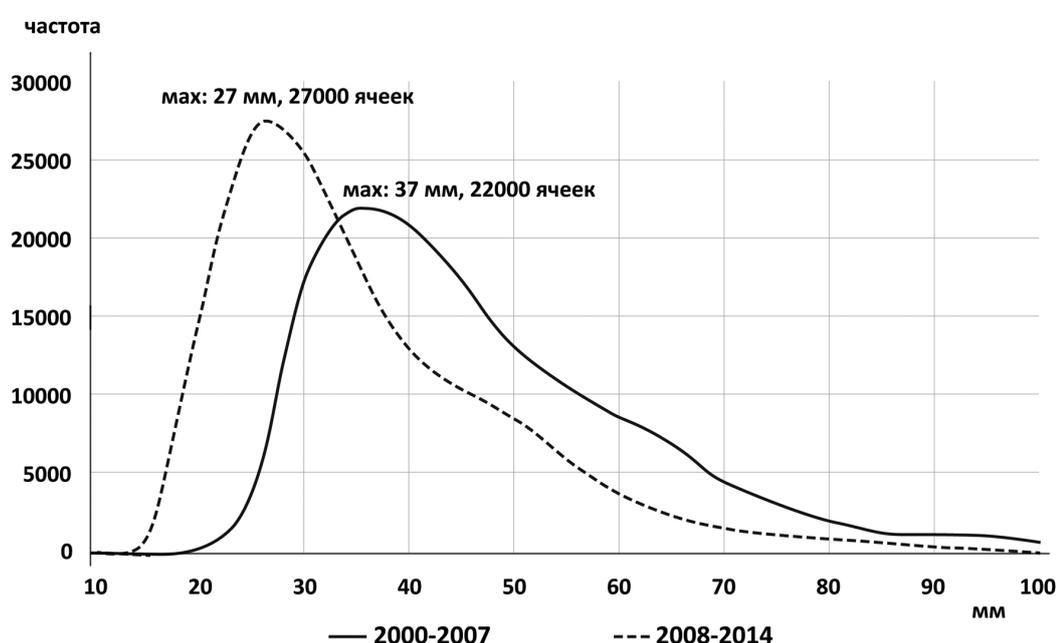


Рис. 1. Функция распределения вероятностей месячной эвапотранспирации в периоды 2000–2007 и 2008–2014 гг. в Приволжской степи

В табл. 2 представлены средние месячные суммы эвапотранспирации в периоды 2000–2007 и 2008–2014 гг. Средние месячные суммы эвапотранспирации достоверно различаются для трех месяцев из четырех (за исключением мая) и для всего сезона активной вегетации (см. табл. 2).

Таблица 2. Месячные суммы эвапотранспирации в Приволжской степи в периоды 2000–2007 и 2008–2014 гг.

	Май	std	Июнь	std	Июль	std	Август	std	Май-август	std
2000–2007	42,4	5,5	54,8	5,08	48	10,29	26	5,68	43	6,6
2008–2014	38,8	5,1	41,0	6,72	31	10,27	19	6,34	33	7,1
Разность	-3,6	-0,4	-13,7	1,6	-16	0,0	-7	0,7	-10	0,5

std — стандартное отклонение»;

Полужирным шрифтом выделены значимые изменения с вероятностью 0,95% по критерию Стьюдента.

Как видно на *рис. 2*, эвапотранспирация в период 2008–2014 гг. была меньше на всей территории степи. Наименьшие значения эвапотранспирации наблюдались в юго-восточной части степной провинции. Условия для повышенной эвапотранспирации в период 2000–2007 гг. возникли по нескольким причинам. Во-первых, из-за достаточного количества влаги в почве в мае после снеготаяния, о чем косвенно свидетельствуют высокие значения эвапотранспирации несмотря на малое количество майских осадков в оба периода. Во-вторых, статистически значимое превышение осадков июне–июле в период 2000–2007 гг. (*рис. 3*). Следует отметить, что в годы засухи (июнь–август 2010 г. и май 2012 г.) осадки практически не выпадали.

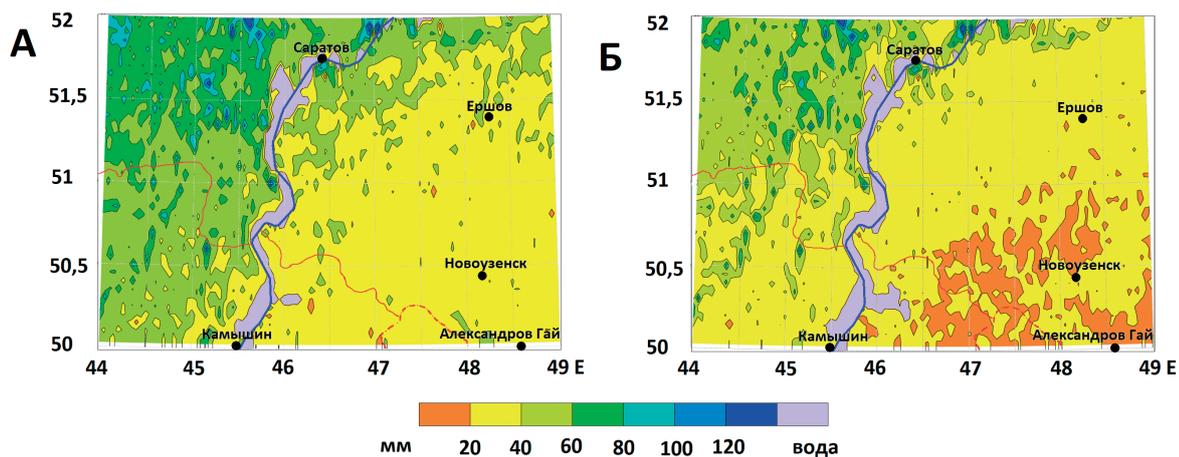


Рис. 2. Средняя месячная эвапотранспирация (мм) за период май–август в Приволжской степи: А – 2000–2007 гг.; Б – 2008–2014 гг.

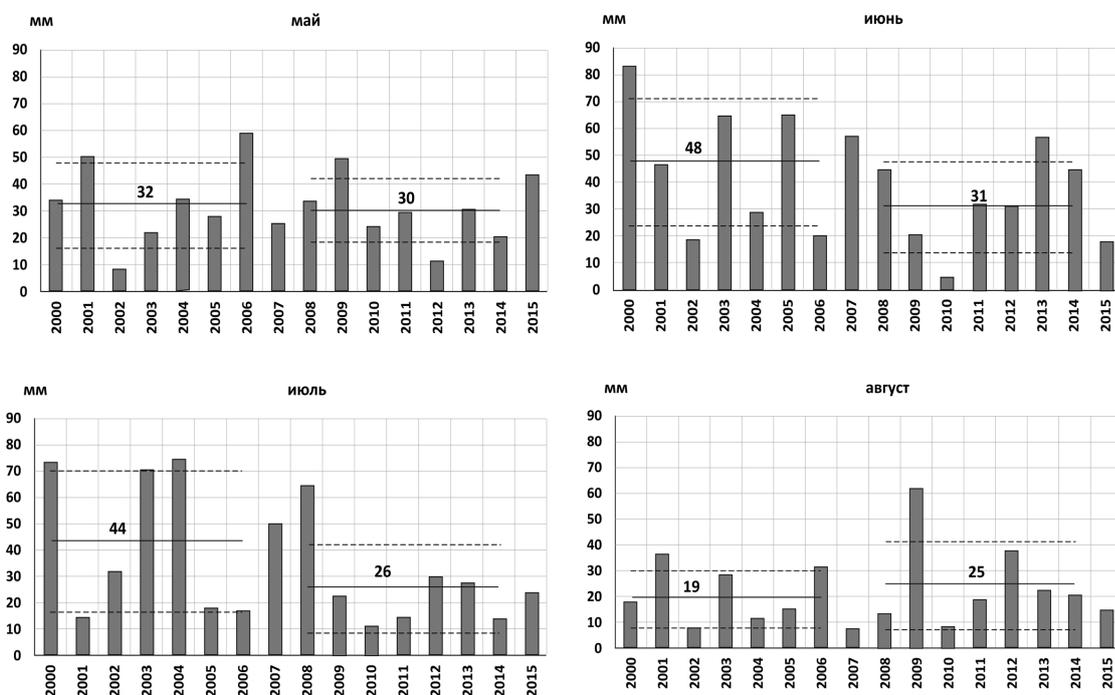


Рис. 3. Междугодовой ход месячных сумм осадков (мм) в Приволжской степи в период 2000–2014 гг. Сплошная линия — среднее, пунктир — стандартное отклонение

Временной ход месячных сумм осадков в мае указывает на их близкий к норме уровень в оба сравниваемых периода (*рис. 3*). Но в период 2000–2007 гг. в самые жаркие месяцы июня

и июля выпало осадков почти в два раза больше, чем в период 2008–2014 гг., поддерживая тем самым повышенный эвапотранспирационный расход влаги.

Полезной характеристикой степени засушливости климата является отношение энергетического эквивалента месячной эвапотранспирации к месячному радиационному балансу (табл. 3). Как видно из табл. 3, эвапотранспирация была выше в слабо засушливый период 2000–2007 гг., чем в сильно засушливом периоде 2008–2014 гг.

Таблица 3. Отношение энергетического эквивалента среднемесячных сумм эвапотранспирации к среднемесячной сумме радиационного баланса (%) в Приволжской степи в период 2000–2014 гг. Для сравнения эти величины были пересчитаны в МДж/мес·м²

Периоды	Май	Июнь	Июль	Август	Май-август
2000–2007	23	28	25	18	24
2008–2014	19	17	14	12	16

В мае почвенная влага слабо лимитирует эвапотранспирацию, и ее доля составляет 23% в слабо засушливом периоде 2000–2007 гг. и 19% в сильно засушливом периоде 2008–2014 гг. В июне и июле доля затраты радиационного баланса на эвапотранспирацию в первый период превышает соответствующую долю во второй более чем на 10%, что больше ошибки измерения параметров. Характерно, что эвапотранспирация в засуху 2010 г. была минимальной в июне–августе (5–9 мм).

Во второй (более сухой) период большая часть радиационного баланса затрачивалась на турбулентный прогрев атмосферы, что подтверждается повышенным фоном температуры воздуха и поверхности (рис. 4). В мае–июле температура воздуха значительно выше во второй более засушливый период.

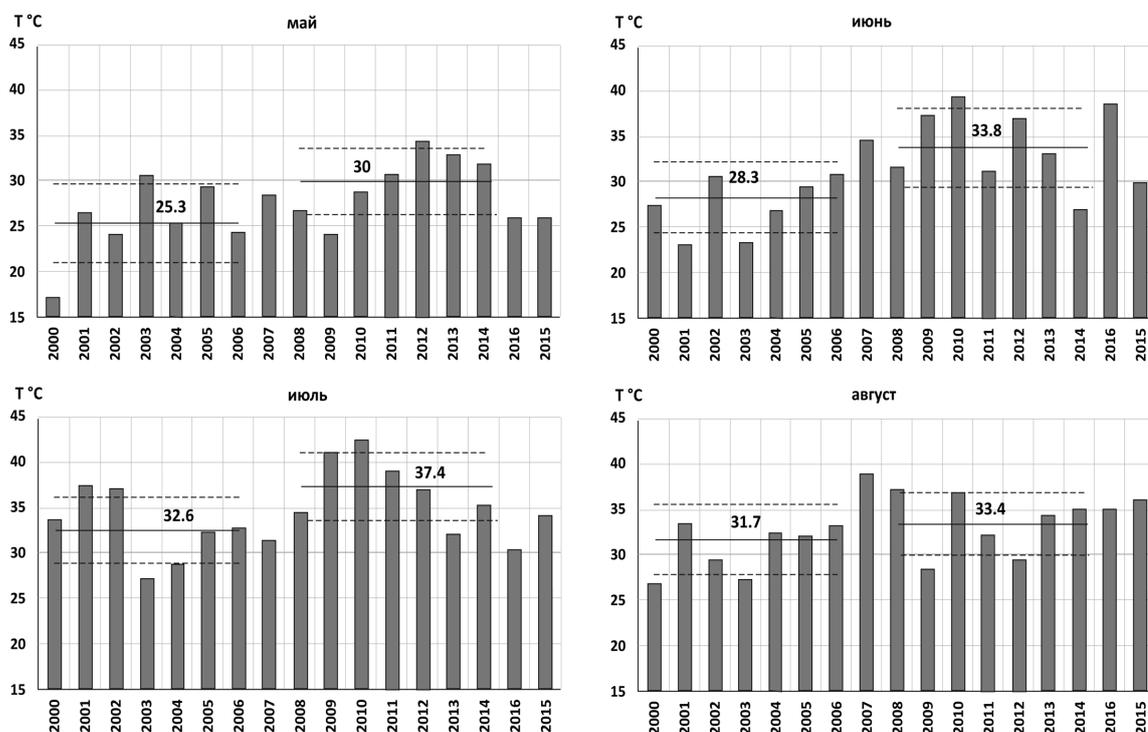


Рис. 4. Междугодовой ход температуры поверхности (°C) в Приволжской степи в период 2000–2014 гг. Сплошная линия — среднее, пунктир — стандартное отклонение

Заключение

В Приволжской степной провинции, известной своей экстремальной засушливостью, при определенном сочетании запасов влаги в почве, вызванном случайным увеличением осадков, возможно формирование двух режимов летней эвапотранспирации (повышенного и пониженного). Эти режимы определены по спутниковым месячным данным эвапотранспирации (ET16), которые использованы для классификации засушливости климата провинции на слабую (2000–2007) и сильную (2008–2014). В период 2000–2007 гг. наблюдалось смягчение сильной засушливости климата в результате увеличения затраты радиационного баланса на эвапотранспирацию и, соответственно, уменьшения турбулентного прогрева приземного слоя атмосферы.

Работа выполнена в Институте географии РАН при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-10236)

Литература

1. Золотокрылин А.Н., Кренке А.Н., Виноградова В.В. Районирование России по природным условиям жизни населения. М.: Геос, 2012. 156 с.
2. Исаченко А.Г. Экологическая география России. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2001. 328 с.
3. Левицкая Н.Г., Иванова Г.Ф. Климат и урожай Саратовской области. Изменчивость и продуктивность Саратовской области на фоне глобального потепления. Сарбрюкен: Ламбертское Академическое изд-во, 2014. 96 с.
4. Черенкова Е.А. Возможное изменение условий увлажнения равнин России к середине XXI в. // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2013. Т. 25. С. 116–131.
5. Mu Q., Heinsch F.A., Zhao M., Running S.W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data pdf icon // Remote Sensing of Environment. 2007. Vol. 111. P. 519–536.
6. Mu Q., Zhao M., Running S.W. Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm pdf icon // Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115. P. 1781–1800.
7. Mu Q., Zhao M., Running S.W. Algorithm Theoretical Basis Document: MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3) Collection 5. NASA Headquarters, 2013. No. 20.

The softening of climate aridity of Volga Steppe in 2000–2007 as derived from satellite data

A.N. Zolotokrylin, T.B. Titkova

Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia
E-mails: azolotokrylin1938@yandex.ru, ttitkova@yandex.ru

The climate of the Volga Steppe is characterized by a decrease in the moisture supply in the south-east direction for the life activity of the population and is estimated as a transition from favorable to less favorable. The climatic changes in the Volga Steppe are analyzed as a reaction to external influences, such as solar radiation and precipitation. Evapotranspiration is regarded as a result of this external influence, and its reduction may be indicative of the size of the increase in aridity of the climate. The monthly amounts of evapotranspiration (ET16) for May–August 2000–2014 are analyzed in comparison with the station monthly precipitation sums, the average monthly satellite surface radiation balance, surface temperature (MODIS). In the Volga Steppe, which is well known for its extreme aridity,

the formation of two regimes of summer evapotranspiration, increased and reduced, could be presented on condition of certain moisture storage in soil caused by occasional intense precipitation. These regimes are used to classify the arid climate of the province into a low (2000–2007) and high (2008–2014). In the period 2000–2007, there was a softening of the severe aridity of the climate as a result of an increase in the cost of radiation balance for evapotranspiration and, accordingly, a decrease in turbulent warming of the atmospheric boundary layer.

Keywords: aridity, evapotranspiration, precipitation, radiation balance

Accepted: 20.11.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-128-135

References

1. Zolotokrylin A.N., Krenke A.N., Vinogradova V.V., *Rayonirovaniye Rossii po prirodnym usloviyam zhizni naseleniya* (Zoning of Russia according to the natural conditions of life of the population), Moscow: Geos, 2012, 156 p.
2. Isachenko A.G., *Ekologicheskaya geografiya Rossii* (Environmental geography of Russia), St. Petersburg: Izd. University of St. Petersburg, 2001, 328 p.
3. Levitskaya N.G., Ivanova G.F., *Klimat i urozhay Saratovskoy oblasti. Izmenchivost i produktivnost Saratovskoy oblasti na fone globalnogo potepleniya* (Variation and productivity of the Saratov region against the background of global warming), Sarbryuken, Lambert Academic Publishing, 2014, 96 p.
4. Cherenkova E.A., *Vozmozhnoye izmeneniye uslovy uvlazhneniya ravnin Rossii k seredine XXI* (Possible modification of the terms moisture Russian plains to the middle of the XXI century), *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2013, Vol. XXV, pp. 116–131.
5. Mu Q., Heinsch F.A., Zhao M., Running S.W., Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data pdf icon, *Remote Sensing of Environment*, 2007, Vol. 111, pp. 519–536.
6. Mu Q., Zhao M., Running S.W., Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm pdf icon, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, pp. 1781–1800.
7. Mu Q., Zhao M., Running S.W., *Algorithm Theoretical Basis Document: MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3) Collection 5*, NASA Headquarters, 2013, No. 20.