

УДК 551.583.15

ИЗМЕНЕНИЕ УВЛАЖНЕННОСТИ ПРИКАСПИЙСКОГО РЕГИОНА РОССИИ В СВЯЗИ С ГЛОБАЛЬНЫМ ПОТЕПЛЕНИЕМ

В.О. Татарников, Е.В. Гаврилова, Д.Х. Азмухамбетова

Каспийский морской научно-исследовательский центр, Астрахань, Россия



Повышение температуры воздуха, связанное с глобальным потеплением, приводит к изменению климата Прикаспийского региона России, в который входят Астраханская область, Калмыкия и Дагестан. Анализ изменения радиационного индекса сухости Будыко показал тенденцию к уменьшению значений к концу XXI в., что свидетельствует о повышении степени увлажненности региона, а следовательно, улучшении функционирования аридных экосистем. Напротив, индекс Селянинова в большинстве климатических сценариев к концу XXI в. снижается, что говорит об ухудшении условий ведения сельского хозяйства.

Ключевые слова: Прикаспийский регион, глобальное потепление, радиационный индекс сухости, индекс Будыко, индекс Селянинова, радиационный баланс, гидротермический индекс

Введение

С конца XX в. в климатической системе планеты наблюдаются значительные изменения температуры воздуха, обусловленные антропогенными выбросами в атмосферу парниковых газов, происходят изменения режима осадков. Наблюдаемые изменения ощутимо влияют на социально-экономическое развитие, продовольственную и энергетическую безопасность, урожайность сельскохозяйственных культур, качество жизни, миграцию населения и в целом на экосистемы данного региона. Сочетание неблагоприятных факторов природного и антропогенного характера способствует деградации природных аридных экосистем [Петров и др., 2016].

Согласно современным прогнозам, приведенным в оценочных докладах Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, наблюдаемые тенденции в изменении климата с высокой степенью вероятности сохранятся и в ряде аспектов усугубятся [Первый оценочный доклад..., 2008; Второй оценочный доклад..., 2014]. Для оценки предстоящих изменений природных систем Прикаспийского региона России мы использовали режим увлаженности, построенный по прогнозируемым на период до конца XXI в. изменениям в климатической системе. Это позволит предположить состояние аридных экосистем региона в будущем. Известно [Kharin et al., 1999], что устойчивость к антропогенному воздействию аридных ландшафтов уменьшается по мере уменьшения количества атмосферных осадков, т.е. обуславливается режимом увлажненности.

Прикаспийский регион России включает в себя Астраханскую область, Калмыкию, Дагестан и российский сектор Каспийского моря. Административно район относится к Южному федеральному округу (ФО) (Астраханская область, Калмыкия) и Северо-

Кавказскому ФО (Дагестан) (рис. 1), является южным районом европейской части России. В климатическом отношении регион неоднороден. В целом он лежит в пределах умеренного климатического пояса. Вся территория Дагестана, континентальная часть Калмыкии и северная половина Астраханской области относятся к умеренно континентальной области пояса. Прибрежная часть Калмыкии и южная половина Астраханской области относятся к континентальной области умеренного пояса.

Материалы и методы исследования

Оценка изменения природных зон Прикаспийского региона осуществлялась по значениям радиационного индекса сухости Будыко (К), а изменения условий сельскохозяйственной деятельности – по гидротермическому индексу Селянинова (ГТК). Для расчета индексов использовались специализированные массивы для климатических исследований, обеспеченные Web-технологией АИСОРИ. Были взяты данные по температуре воздуха, осадкам и парциальному давлению водяного пара, начиная с 1981 г. Гидрометеорологические данные представлены как среднемесячные значения для пунктов Элиста, Яшкуль, Лагань (Калмыкия), Астрахань (Астраханская область), Махачкала, Буйнакск, Дербент и Ахты (Дагестан). Данные по облачности были получены из глобального архива CDAS (Climate Data Assimilation System), являющегося частью системы реанализа NOAA NCEP/NCAR Reanalysis [Kalnay et al., 1996], находящегося в свободном доступе.

Прогноз предстоящих изменений строился на данных моделирования по ансамблю глобальных климатических моделей (CMIP5), представленных на сайте Климатического центра Росгидромета (<https://cc.voeikovmgo.ru/ru/klimat/izmenenie-klimata-rossii-v-21-veke>).



Рис. 1. Карта расположения станций наблюдений за приземной температурой воздуха в Прикаспийском регионе России

Fig. 1. Map of the location of surface temperature observation stations in the Caspian region of Russia

Данные моделирования предстоящих изменений климата представлены как значения аномалий температуры воздуха и осадков за сезоны и год. Очевидно, что такая временная дискретность не удовлетворяет требованиям к данным для расчета индексов. Поэтому для получения нужных параметров выявлялись их корреляционные связи с температурой за сезоны или год, по уравнению регрессии вычислялись предполагаемые значения необходимых для расчета индексов параметров.

Положительные аномалии температуры воздуха, характерные для среднеглобальной температуры Земли и территории России, также фиксируются и на более локальных территориях [Второй оценочный доклад..., 2014]. Наблюдающиеся изменения температуры воздуха, связанные с глобальным потеплением, приводят к усилению испарения воды с поверхности Мирового океана, что, в конечном счете, способствует увеличению количества выпадающих осадков. Данные изменения влекут за собой отклик со стороны биологических сообществ. Для оценки этих изменений можно использовать разнообразные климатические индексы, отражающие условия произрастания растительных сообществ. К таковым относятся радиационный индекс сухости Будыко и гидротермический индекс Селянинова. На основе

первого индекса исследователи определяли границы климатических поясов, на основе второго проводили оценку условий сельскохозяйственной деятельности.

Радиационный индекс сухости Будыко представляет собой отношение годового радиационного баланса подстилающей поверхности к сумме тепла, необходимого для испарения годового количества осадков на той же площади:

$$K = \frac{R}{L \times r}, \quad (1)$$

где R – годовой радиационный баланс подстилающей поверхности, $\text{МДж}/\text{м}^2$; L – удельная теплота испарения, является постоянной величиной, для воды равна $2\,260 \text{ Дж}/\text{кг}$; r – годовая сумма осадков, мм.

Годовой радиационный баланс подстилающей поверхности является разницей между поглощенной коротковолновой радиацией и эффективным излучением этой поверхности, рассчитывается по формуле:

$$R = Q(1 - \alpha) - I, \quad (2)$$

где Q – суммарная солнечная радиация, $\text{МДж}/\text{м}^2$; α – альbedo, доли единицы; I – эффективное излучение, представляющее разность между длинноволновым излучением подстилающей поверхности и поглощенной частью встречного излучения атмосферы солнечной радиацией и эффективным излучением, $\text{МДж}/\text{м}^2$.

Для наших расчетов суммарная солнечная радиация была взята из данных научно-прикладных справочников по климату СССР для Астраханской области и Дагестана [Научно-прикладной справочник..., 1990а, 1990б]. Поступление на поверхность планеты суммарной солнечной радиации определяется расстоянием между Солнцем и Землей и в многолетнем аспекте зависит от астрономических факторов (эксцентриситета орбиты Земли, нутации оси наклона, прецессии оси). Астрономические процессы, способные вызвать значительные изменения радиационного баланса, имеют цикличность в 10^4 – 10^6 лет и больше [Hays et al., 1976; Kent et al., 2018]. В этих условиях значения радиационного баланса были приняты как неизменные на протяжении всего периода исследований. Значение альбедо было взято из трудов М.И. Будыко [2020].

Для определения эффективного излучения используется эмпирическая формула

$$I = s\sigma\Theta^4(11,4 - 0,23e) \times (1 - cn) + \Delta I, \quad (3)$$

где s – интегральная излучательная способность поверхности суши, равная 0,95; σ – постоянная Стефана–Больцмана ($\text{кал}/(\text{см}^2 \times \text{мин} \times \text{К}^4)$); Θ – среднемесячные значения температуры воздуха, градусы Кельвина; e – упругость водяного пара, мб; c – коэффициент, учитывающий влияние облачности на излучение, доли единицы; n – общая облачность в долях единицы; ΔI – поправка к эффективному излучению, пропорциональная разности температур между подстилающей поверхностью (Q_w) и воздухом (Q), определяемая по методу теплового баланса, $\text{МДж}/\text{м}^2$.

Коэффициент, учитывающий влияние облачности на излучение (c), берется из таблицы, приведенной в трудах М.И. Будыко [2020]. Для его определения требуются значение полуденной высоты солнца ($h_{\text{пд}}$) и среднее значение общей облачности. Полуденная высота солнца зависит от широты, для которой она рассчитывается, и солнечного склонения:

$$h_{\text{пд}} = 90^\circ - \varphi + \delta, \quad (4)$$

где φ – широта места; δ – солнечное склонение.

Для Астрахани, Элисты и Яшкуль значение широты было взято в 46° с.ш., для Лагани – в 45° с.ш., для Махачкалы – в 43° с.ш., для Буйнакса и Дербента – в 42° с.ш., и для Ахты – в 41° с.ш. За среднемесячные значения склонения солнца были приняты следующие значения (табл. 1).

Поправка к эффективному излучению (5) находится по следующей формуле:

$$\Delta I = 4s\sigma\Theta^3(Q_w - Q_a), \quad (5)$$

где s – интегральная излучательная способность поверхности суши, равная 0,95; σ – постоянная Стефана–Больцмана ($\text{кал}/(\text{см}^2 \times \text{мин} \times \text{К}^4)$); Θ – среднемесячные значения температуры воздуха, градусы Кельвина; Q_w – температура подстилающей поверхности, $^\circ\text{C}$; Q_a – температура воздуха, $^\circ\text{C}$.

Данные по суммарной солнечной радиации (Q) и разнице температур между подстилающей поверхностью и температурой воздуха ($Q_w - Q_a$) были взяты из научно-прикладных справочников по климату СССР для Астраханской области, Калмыкии и Дагестана [Научно-прикладной справочник..., 1990а, 1990б]. Температура почвы зависит от способности поглощать солнечную радиацию, а эта способность определяется значением альбедо почв. Альбедо же зависит от типа почвы, характера растительности, а так как эти параметры можно принять как величину постоянную, то разницу между температурой почвы и воздуха мы приняли как условно неизменную для всего периода исследований.

Имеющиеся метеорологические данные позволили определить значение индекса сухости (K) для Элисты, Яшкуля, Лагани, Астрахани, Махачкалы, Буйнакса, Дербента и Ахты. Для расчета использовались данные наблюдений за общей облачностью, температурой воздуха, упругостью водяного пара для вышеуказанных станций с 1980 по 2000 г.

Прогноз режима увлажнения

По имеющимся данным, были рассчитаны значения радиационного индекса сухости для отдельных населенных пунктов Прикаспийского региона (табл. 2). По натурным наблюдениям за 1980–2019 гг. для Астрахани и Дербента радиационный индекс сухости показал тенденцию к увеличению, для Махачкалы – к уменьшению своих значений. Интенсивность увеличения индекса для Астрахани и Дербента, рассчитанная по уравнению линейного тренда, составила 0,10 и 0,48 ед./10 лет соответственно, интенсивность уменьшения для Махачкалы – 0,13 ед./10 лет. Коэффициент аппроксимации полученных трендов во всех случаях меньше 0,10, что для строгой оценки является неудовлетворительным.

Для прогнозирования предстоящих изменений в Прикаспийском регионе были использованы данные моделирования изменений климата в период 2011–2031, 2041–2060 и 2080–2099 гг., представленные на сайте Климатического центра Росгидромета. Расчеты проводились отдельно для сценариев RCP 4,5 и RCP 8,5. По данным сайта были вычислены аномалии эффективного излучения для различных периодов (см. табл. 2). Аномалии эффективного излучения находились как разница между аномалиями восходящего потока длинноволновой радиации и нисходящего потока длинноволновой радиации.

Прогнозируемые изменения климата представлены как аномалии относительно средних значений за период 1981–2000 гг. В результате оказалось возможным получить значение радиационного баланса до 2099 г. (табл. 2).

Таблица 1
Значения солнечного склонения и полуденной высоты солнца в районе Астрахани, Махачкалы и Дербента

Table 1
Values of solar declination and midday sun height in the area of Astrakhan, Makhachkala and Derbent

Месяцы		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Солнечное склонение, δ		-20	-12	-2	9	18	23	21	13	3	-8	-18	-23
$h_{\text{нд}}$ (полуденная высота)	Астрахань, Элиста, Яшкуль	24	32	42	53	62	67	65	57	47	36	26	21
	Лагань	25	33	43	54	63	68	66	58	48	37	27	22
	Махачкала	27	35	45	56	65	70	68	60	50	39	29	24
	Буйнакск и Дербент	28	36	46	57	66	71	69	61	51	40	30	25
	Ахты	29	37	47	58	67	72	70	62	52	41	31	26

Таблица 2
Прогнозируемые изменения составляющих радиационного баланса на территории субъектов Российской Федерации Прикаспийского региона (аномалии относительно значений 1981–2000 гг.)

Table 2
Projected changes in the components of the radiation balance on the territory of the Caspian regions of the Russian Federation (anomalies in relation to the values of 1981–2000)

Район	1981–2000 гг.	2011–2031 гг.		2041–2060 гг.		2080–2099 гг.	
		RCP 4,5	RCP 8,5	RCP 4,5	RCP 8,5	RCP 4,5	RCP 8,5
Аномалии эффективного излучения, Вт/м ²							
Астраханская область	–	0,2	0,3	–0,1	0,6	0,0	–0,7
Калмыкия	–	0,0	0,0	–0,3	0,0	–0,2	1,6
Дагестан	–	0,0	–0,1	–0,1	–0,2	0,1	–1,6
Аномалии эффективного излучения, МДж/м ² ×год							
Астраханская область	–	6,3	9,5	–3,2	18,9	0,0	–22,1
Калмыкия	–	0,0	0,0	–9,5	0,0	–6,3	–50,5
Дагестан	–	0,0	–3,2	–3,2	–6,3	3,2	–50,5
Эффективное излучение, МДж/м ² ×год							
Астраханская область	939	945,3	948,5	935,8	957,9	939,0	916,9
Калмыкия	933	933,0	933,0	923,5	933,0	926,7	882,5
Дагестан	967	967,0	963,8	963,8	960,7	970,2	916,5
Радиационный баланс, МДж/м ² ×год							
Астраханская область	2 106	2099,2	2096,1	2108,7	2086,6	2105,6	2127,6
Калмыкия	2 111	2111,6	2111,6	2121,0	2111,6	2117,9	2162,0
Дагестан	1 997	1997,0	2000,2	2000,2	2003,3	1993,8	2047,5

Полученные данные по предполагаемому радиационному балансу, в зависимости от жесткости климатического сценария, показывают схожую динамику. Для большинства территориальных образований значение радиационного баланса к концу XXI в. увеличится. Наиболее интенсивное увеличение будет наблюдаться при осуществлении сценария RCP 8,5.

Из общей картины выпадает только Дагестан, здесь по сценарию RCP 4,5 к концу XXI в. будет наблюдаться снижение значения радиационного баланса. Известно, что границей тепловой энергетической базы географической зональности, отделяющей субтропические широты от средних, является значение радиационного баланса в 2 000 МДж/м²×год. Судя по значениям радиационного баланса Дагестана – эта территория является переходной между субтропиками и средними широтами. При реализации сценария RCP 4,5 область будет сохранять свой переходный статус. Если климатическая система будет развиваться по сценарию RCP 8,5, климат Дагестана подвергается аридизации. Для Астраханской области и

Калмыкии на протяжении века изменений в положении климатических поясов наблюдаться не будет.

Несмотря на отрицательную тенденцию радиационного индекса, в предстоящие периоды Астраханская область по-прежнему будет относиться к району субтропических пустынь (табл. 3). К той же географической зональности будет относиться территория Калмыкии ($K > 3$). Однако к концу XXI в., в зависимости от климатического сценария, территория Калмыкии может изменить характер своей зональности на субтропическую полупустыню (RCP 4,5).

Территория Дагестана в настоящее время относится к зоне субтропической полупустыни. При развитии климатического сценария RCP 4,5 эта территория будет тяготеть к климатическим условиям зоны субтропических степей ($K = 2-3$). Осуществление сценария RCP 8,5 будет способствовать дальнейшему определению территории Дагестана зоной субтропических полупустынь, с тяготением к переходу в зону субтропических степей, т.е. условия развития природных экосистем будут улучшаться.

Таблица 3

Прогнозируемые значения осадков и радиационного индекса сухости Будыко (К)

Table 3

Projected values of precipitation and Budyko radiation index of dryness (K)

Показатель	Субъект Российской Федерации		Период, годы			
			1981–2000	2011–2030	2041–2060	2080–2099
Осадки, мм	Астраханская область	RCP 4,5	237,6	237,6	274,1	274,1
		RCP 8,5		274,1	237,6	237,6
	Калмыкия	RCP 4,5	285,0	285,0	321,5	321,5
		RCP 8,5		321,5	285,0	285,0
	Дагестан	RCP 4,5	395,7	432,2	432,2	432,2
		RCP 8,5		432,2	432,2	395,7
Радиационный индекс сухости	Астраханская область	RCP 4,5	4,3	3,9	3,4	3,4
		RCP 8,5		3,4	3,9	4,0
	Калмыкия	RCP 4,5	3,7	3,3	2,9	2,9
		RCP 8,5		2,9	3,3	3,4
	Дагестан	RCP 4,5	2,4	2,0	2,0	2,0
		RCP 8,5		2,0	2,1	2,3

Гидротермический индекс Г.Т. Селянинова.

Прогнозируемые предстоящие изменения в увлажненности Прикаспийского региона также будут оказывать влияние на сельскохозяйственную деятельность человека. Для оценки предстоящих изменений мы использовали гидротермический индекс, оценивающий влагооборот территории, введенный Г.Т. Селяниновым. Определяется он как отношение количества осадков за вегетационный период к сумме температур выше 10 °С, уменьшенной в 10 раз:

$$ГТК = R \times 10 / \sum t, \quad (6)$$

где R – количество осадков, выпавшее за вегетационный период, мм; $\sum t$ – сумма температур, °С за период с температурами выше +10 °С.

Вычисление $\sum t$ по натурным наблюдениям охватывают период 1980–2019 гг. Анализ корреляционных зависимостей показал, что количество активных сумм температуры за год хорошо коррелировало со значением средней температуры за весну–осень и находилось в диапазоне значений корреляции от

0,70 до 0,89, в зависимости от пункта. Корреляционная зависимость суммы осадков за вегетационный период и суммы осадков за год менее выражена, находится в диапазоне от 0,62 до 0,85 ед. Полученные корреляции характеризуются достоверностью связи на уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Для оценки предстоящих изменений условий для сельского хозяйства, так же как и для предыдущего индекса, использовались данные моделирования с сайта Климатического центра Росгидромета. Количество градусодней $\sum t$ и суммы осадков за вегетационные периоды 1981–2000, 2050–2059 и 2090–2099 гг. были высчитаны с использованием уравнения линейного тренда. Расчеты производились с условием зависимости между средней температурой воздуха за весну–осень и количеством активных сумм температуры (более 10 °С), а также между количеством выпавших осадков за вегетационный период и количеством осадков за год (табл. 4).

Таблица 4

Количество градусодней с температурой более 10 °С и значение ГТК* в Прикаспийском регионе России

Table 4

Number of degree days with a temperature of more than 10 °С and the value of SCC* in the Caspian region of Russia

Период, год	Астраханская область			Калмыкия			Дагестан		
	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 8,5	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 8,5	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 8,5
	$\sum t, \text{ }^\circ\text{C}$								
1981–2000	3 488			3 648			3 413		
1997–2019	3 777			3 884			3 689		
2011–2031	3 854	4 017	4 007	3 552	3 544	3 577	3 584	3 660	3 666
2040–2061	3 815	4 132	4 334	3 796	3 761	3 916	3 714	3 832	4 021
2080–2099	3 854	4 334	5 046	3 695	3 971	4 608	3 655	4 072	4 811
	ГТК								
1981–2000	0,68			0,47			0,97		
1997–2019	0,61			0,45			0,93		
2011–2031	0,39	0,32	0,38	0,54	0,47	0,54	1,70	0,68	0,68
2040–2061	0,40	0,37	0,29	0,51	0,51	0,42	0,67	0,65	0,62
2080–2099	0,39	0,450,35	0,25	0,52	0,49	0,36	0,68	0,61	0,48

Примечание: *Зоны режима увлажненности – избыточного увлажнения, или зона дренажа (ГТК>1,3); обеспеченного увлажнения (1,0–1,3); засушливая (0,7–1,0); сухого земледелия (0,5–0,7); ирригации (ГТК<0,5).

Note: * Humidification zones-excess humidification or drainage zone (SCC>1.3); provided moisture (1.0–1.3); arid (0.7–1.0); dry farming (0.5–0.7); irrigation (SCC<0.5).

Количество градусодней с температурой более 10 °С постоянно возрастает, увеличиваясь к концу XXI в., в зависимости от климатического сценария, более чем на 1 000. Наблюдающийся в настоящее время влагооборот Прикаспийского региона характеризует его как зону ирригационного (Калмыкия), сухого (Астраханская область) и засушливого (Дагестан) земледелия.

Индекс ГКТ, рассчитанный по наблюдаемым данным от первого периода (1981–2000 гг.) к последнему (1997–2019 гг.), для всех административных территорий показывает тенденцию к снижению, т.е. условия земледелия ухудшаются. В прогнозируемый период 2011–2030 гг. условия влагооборота для Астраханской области и Дагестана по всем сценариям продолжают ухудшаться. Режим увлажненности Астраханской области постепенно будет переходить в зону ирригационного земледелия, Дагестана – в зону сухого земледелия. Калмыкия по сценариям RCP 2,6 и RCP 8,5 будет переходить в зону сухого земледелия из зоны ирригационного земледелия. К концу века условия увлажненности Астраханской области и Дагестана еще больше ухудшатся, однако останутся в зоне ирригации и сухого земледелия соответственно. Калмыкия по сценарию RCP 2,6 к концу XXI в. остается в зоне сухого земледелия, по сценариям RCP 4,5 и RCP 8,5 снова перейдет в зону ирригации.

Заключение

В результате предстоящих изменений прогнозируется снижение эффективного излучения, что приведет к увеличению радиационного баланса и суммы градусодней больше 10 °С, а также к увеличению количества выпадающих осадков.

Изменения, связанные с глобальным потеплением в Прикаспийском регионе (Астраханская область, Калмыкия, Дагестан), будут проходить по-разному. Так, в зависимости от климатического сценария, к концу XXI в. отдельные территории (Калмыкия, Дагестан) могут изменить статус природных зон вследствие увеличения количества выпадающих осадков. Однако условия влагооборота в Астраханской области и Дагестане будут ухудшаться, в Калмыкии несколько улучшаться. В целом складывающиеся к концу настоящего века условия будут благоприятствовать природным сообществам, что обусловлено переходом от зоны пустынь к зоне полупустынь и степей. В то же время изменения режима увлажненности будут способствовать переходу сельского хозяйства, требующего искусственного увлажнения, к засушливому типу земледелия, ориентированного на засухоустойчивые культуры, особенно для Астраханской области.

Литература

- Будыко М.И.** Избранные работы. СПб. : ООО «Америт»: Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, 2020. 206 с. URL: https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2020/Budyko_trudy_.pdf (дата обращения: 20.07.2020).
- Второй** оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., 2014. 58 с. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/rupublikatsii/2016-03-21-16-23-52> (дата обращения: 17.07.2020).
- Научно-прикладной** справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1–6, вып. 13: Волгоградская, Ростовская и Астраханская области, Краснодарский и Ставропольский края, Калмыцкая, Кабардино-Балкарская, Чечено-Ингушская и Северо-Осетинская АССР. Л. : Гидрометеиздат, 1990а. 724 с.
- Научно-прикладной** справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1–6, вып. 15: Дагестанская АССР, Азербайджанская ССР, Нахичеванская АССР. Л. : Гидрометеиздат, 1990б. 264 с.
- Первый** оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., 2008. 29 с. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/rupublikatsii/2016-03-22-13-06-34> (дата обращения: 17.07.2020).
- Петров К.М., Бананова В.А., Лазарева В.Г., Унагаев А.С.** Региональные особенности глобального процесса опустынивания в северо-западном Прикаспии // Биосфера. 2016. Т. 8, № 1. С. 49–62.
- Hays J.D., Imbrie J., Shackleton N.J.** Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages // Science, New Series. 1976. V. 194, No. 4270 (Dec. 10, 1976). P. 1121–1132.
- Kent D.V., Olsen P.E., Rasmussen C., Lepre Ch., Mundil R., Irmis R.B., Gehrels G.E., Giesler D., Geissman J.W., Parker W.G.** Empirical evidence for stability of the 405-kiloyear Jupiter–Venus eccentricity cycle over hundreds of millions of years // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2018 June. No. 115 (24). P. 6153–6158.
- Kharin N., Tateishi R., Harahsheh H.** Degradation of the Drylands of Asia. Chiba : Center for Environmental Remote Sensing University, 1999. P. 81.
- Kalnay E.M. et al.** The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. No. 77. P. 437–471.

Авторы:

Татарников Виталий Олегович, ведущий научный сотрудник, Каспийский морской научно-исследовательский центр, Астрахань, Россия.

E-mail: tatarnikov@caspiamonitoring.ru

Гаврилова Елена Владимировна, научный сотрудник, Каспийский морской научно-исследовательский центр, Астрахань, Россия.

Азмухамбетова Динара Хайрлаевна, научный сотрудник, Каспийский морской научно-исследовательский центр, Астрахань, Россия.

V.O. Tatarnikov, E.V. GavriloVA, D.Ch. Azmukhambetova

Caspian Marine Research Centre, Astrakhan, Russia

CHANGES IN THE MOISTURE OF THE CASPIAN REGION OF RUSSIA DUE TO GLOBAL WARMING

Since the end of the twentieth century, the climate system of the planet has been experiencing significant changes in air temperature, due to anthropogenic emissions of greenhouse gases into the atmosphere, and changes in the precipitation regime. Our research covers the Caspian region of Russia, which belongs to the southern regions of the country, where one of the highest rates of air temperature increase is observed. The Caspian region includes the Astrakhan region, Kalmykia and Dagestan. To assess the upcoming changes, the average daily air temperature and precipitation were taken, as well as the average monthly values of water vapor elasticity, total cloud cover for the points of Astrakhan, Elista, Yashkul, Lagan, Makhachkala, Buinaksk, Derbent and Akhty. To assess changes in natural areas, we used the Budyko radiation dryness index. Changes in agriculture were estimated using the Selyaninov hydro-climatic index. It was revealed that the upcoming changes in the climate system, based on the data of the ensemble of models (CMIP5), will lead to an increase in the radiation balance, in the average annual amount of precipitation, in the sum of temperatures of more than 10 °C by the end of the century. Analysis of the dynamics of the Budyko index showed that by the end of this century, the Astrakhan region will still belong to the zone of subtropical deserts. Depending on which climate scenario the global climate system will develop, the region of Kalmykia may move from the zone of subtropical deserts to the zone of subtropical semi-deserts. The territory of Dagestan currently belongs to the zone of subtropical semi-desert. With the development of the climate scenario RCP 4.5, this territory will tend to the climatic conditions of the subtropical steppe zone ($K = 2-3$). In the development of the RCP8.5 scenario, the territory of Dagestan will remain a zone of subtropical semi-deserts, with a tendency to transition to a zone of subtropical steppes. The readings of the Selyaninov hydro-climatic index, calculated for the period 2011–2030, indicate a continued deterioration of the moisture turnover conditions for the Astrakhan region and Dagestan in all scenarios. The humidity regime of the Astrakhan region will gradually deteriorate. As a result, irrigation – type agriculture will dominate in the Astrakhan region, while dry agriculture will dominate in Dagestan. According to the RCP 2.6 and RCP 8.5 scenarios, Kalmykia will move from an irrigation farming zone to a dry farming zone. By the end of the century, the humidity conditions of the Astrakhan region and Dagestan will deteriorate even more. The Astrakhan region and Dagestan will remain in the zone of irrigation and dry farming, respectively. Kalmykia, according to the RCP 2.6 scenario, remains in the dry farming zone by the end of the century, according to the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios, it again passes into the irrigation zone. It is obvious that some improvement associated with an increase in the amount of precipitation per year will contribute to the favorable development of natural systems (with a tendency to move from deserts to semi-deserts). At the same time, the conditions for the development of agriculture in most part of the Caspian region will deteriorate.

Key words: Caspian region, global warming, radiation dryness index, Budyko index, Selyaninov index, radiation balance, hydro-thermal index

References

- Budyko M. I. *Izbrannye raboty* [Selected works]. SPb: OOO «Amerit»: Glavnaya geofizicheskaya observatoriya im. A.I. Voeykova, 2020. 206 p. [Elektronnyy resurs https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2020/Budyko_trudy_.pdf (Date of accessed: 20.07.2020)]. In Russian
- Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii* [Second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation]. 2014. Moscow. 58 p. [Elektronnyy resurs <https://cc.voeikovmgo.ru/publicatsii/2016-03-21-16-23-52> (Date of accessed: 17.07.2020)]. In Russian
- Nauchno-prikladnyy spravochnik po klimatu SSSR* [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR]. Seriya 3. Mnogoletnie dannye. Parts 1–6. Issue 13: Volgogradskaya, Rostovskaya i Astrakhanskaya oblasti, Krasnodarskiy i Stavropol'skiy kraya, Kalmytskaya, Kabardino-Balkarskaya, Checheno-Ingushskaya i Severo-Osetinskaya ASSR. 1990a / Gos. kom. SSSR po gidrometeorologii i kontrolyu prirodnoy sredy, Severo-Kavkazskoe territorial'noe upravlenie po gidrometeorologii. Leningrad: Gidrometeoizdat. 724 p. In Russian
- Nauchno-prikladnyy spravochnik po klimatu SSSR* [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR]. Seriya 3. Mnogoletnie dannye. Parts 1–6. Issue 15: Dagestanskaya ASSR, Azerbaydzhanskaya SSR, Nakhichevanskaya ASSR. / Gos. kom. SSSR po gidrometeorologii, Azerbaydzhanskoe respublikanskoe upravlenie po gidrometeorologii. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990b 264 p. In Russian
- Pervyy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii* [The first assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation]. 2008. Moscow. 29 p. [Elektronnyy resurs <https://cc.voeikovmgo.ru/publicatsii/2016-03-22-13-06-34> (Date of accessed: 17.07.2020)]. In Russian
- Petrov K.M., Bananova V.A., Lazareva V.G., Unagaev A.S. 2016 *Regional'nye osobennosti global'nogo protsessa opustynivaniya v severo-zapadnom Prikaspii* [Regional features of the global desertification process in the North-Western Caspian region] // Biosfera. 2016. V. 8, No. 1. pp. 49–62. In Russian
- Hays J.D., Imbrie J., Shackleton N.J. Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages // Science, New Series. V. 194. No. 4270 (Dec. 10, 1976). pp. 1121–1132.
- Kent D. V., Olsen P. E., Rasmussen C., Lepre Ch., Mundil R., Irms R. B., Gehrels G. E., Giesler D., Geissman J. W., Parker W. G. Empirical evidence for stability of the 405-kiloyear Jupiter–Venus eccentricity cycle over hundreds of millions of years // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2018 June, 115 (24). pp. 6153–6158.
- Kharin N, Tateishi R, Harahsheh H. Degradation of the Drylands of Asia. Chiba: Center for Environmental Remote Sensing University, 1999, pp. 81.
- Kalnay E.M., et al. 1996: The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project. Bull.Amer.Meteor. Soc., 77, pp. 437–471.

Author's:

Tatarnikov Vitaliy.O., Leading Researcher, Caspian Marine Research Centre Astrakhan, Russia.

E-mail: tatarnikov@caspianmonitoring.ru

GavriloVA Elena.V., Researcher, Caspian Marine Research Centre, Astrakhan, Russia.

Azmukhambetova Dinara.Ch., Researcher, Caspian Marine Research Centre, Astrakhan, Russia.