ВЛИЯНИЕ СЕВЕРОКАСПИЙСКОГО КОЛЕБАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ В КАВКАЗСКОМ РЕГИОНЕ

Е.А. Рыбак^{1,2}, Н.А. Яицкая^{1,2}, О.О. Рыбак^{1,2}

¹Сочинский научно-исследовательский центр РАН, г. Сочи, ул. Театральная, 8а

E-mail: elena.rybak@gmail.com

²Филиал Института природно-технических систем, г. Сочи, Курортный проспект, 99/18

В работе проанализированы линейные связи между одной из мод атмосферной циркуляции (Северное море – Северный Каспий, NCP) и режимами температуры воздуха и осадков на юге Европейской части России. Установлена тесная линейная связь между приземной температурой воздуха и индексом NCP в холодный период года. Связь в летние месяцы не очевидна. Режим осадков в значительной мере определяется местными условиями, а не аномалиями атмосферной циркуляции, в связи с чем использовать индекс NCP в качестве предиктора осадков нецелесообразно.

Ключевые слова: климат, региональный климат, температура воздуха, сумма осадков, прогноз климата, Кавказ.

Поступила в редакцию: 09.04.2018. После доработки: 23.04.2018.

Введение. Современные изменения климата (как, впрочем, климатические изменения во все эпохи) отличаются пространственной и временной неоднородностью. Соответственно, характер влияния климатических изменений на экономику и окружающую среду варьируется от региона к региону. Связь глобальных климатических изменений с региональными не очевидна, и для построения климатических проекций в масштабе региона важно понять механизмы, тем или иным образом формирующие режимы изменчивости тепла и увлажнения. Информация о временной и пространственной изменчивости температуры и осадков очень важна не только с академической точки зрения, но и для разработки стратегий смягчения последствий климатических изменений. Более того, для модельных исследований в области метеорологии и океанографии требуется соответствующий форсинг для последующего анализа климатических изменений и для валидации климатических моделей [1].

В настоящей работе рассматривается связь характеристик регионального климата с одной из квазиустойчивых мод атмосферной циркуляции, получившей название «Северное море – Северный

Каспий» («North Sea-Caspian Pattern») [2, 3]. Цель работы заключалась в том, чтобы исследовать принципиальную возможность использования ожидаемых фаз атмосферного колебания для сезонных ориентировочных прогнозов приземной температуры воздуха и осадков, особенно в горных регионах Юга России, в том числе и для использования последних в качестве входящих метеорологических переменных в динамических математических моделях горного оледенения.

Горные ледники являются своеобразными регуляторами водных ресурсов в горных и предгорных регионах. Накапливая воду в холодный период года, они обеспечивают стабильность и равномерность ее поступления в гидрологическую сеть прилегающих территорий. В отсутствие регулирующей роли ледников, сток в большей степени будет определяться атмосферными осадками, поступление воды будет неравномерным, а сам сток приобретет паводковый характер. Согласно последним оценкам [4], площадь ледников на северном склоне Большого Кавказа в XX в. сократилась более чем наполовину. Помимо сокращения площади, во всем исследуемом регионе наблюдалось сокращение объема оледенения [5]. В условиях из-

меняющегося климата тенденция к сокращению горного оледенения в этом регионе, вероятно, сохранится. Последнее, разумеется, не может не вызывать озабоченности, если принять во внимание ту роль, которую играет горное оледенение в формировании речного стока.

Еще один аспект актуальности прогноза состояния горного оледенения связан с обеспечением безопасности и оценки рисков, связанных с проявлениями гляциологической активности. Так, прорыв ледниковых по своему происхождению Башкаринских озер в Приэльбрусье в сентябре 2017 г. привел к значительным материальным потерям, разрушениям инфраструктуры и человеческим жертвам. Заметим, что о возможности катастрофы неоднократно и с большой заблаговременностью предупреждали специалисты [6, 7], чей прогноз, однако, был проигнорирован.

1. Регион исследования и исходные метеорологические данные. Регион исследований включает в себя южную часть Европейской территории России к югу от линии Ростов-Волгоград, включая Азово-Черноморское побережье (рис. 1). Были проанализированы ряды температуры воздуха и осадков с 31 сетевой метеостанции региона, в том числе, расположенных в горах Кавказа (Красная Поляна, Терскол, Клухорский перевал, Местия и др.). Для дальнейшего анализа (в том числе и для исключения сезонного хода) исходные данные срочных наблюдений осреднялись за зимние месяцы (декабрь-январь-февраль, далее – ДЯФ), летние месяцы (июнь-июль-август, ИИА), холодную половину года (с октября по март), теплую половину года (с апреля по октябрь) и за год в целом.

Рис. 1. Область исследований и метеорологические станции, данные которых были использованы в исследовании

Рис. 2. Преобладающие циркуляционные модели, ассоциируемые с индексом NCI: отрицательная фаза (а) и положительная фаза (б)

2. Характеристика NCI. Эта мода атмосферной циркуляции (индекс), рассчитывается как нормализованная разница геопотенциальных высот на уровне 500 гПа (Z_{500}) между центрами действия – в Северном море (узлы пространственной сетки с координатами 55°N , 0°E и 55°N , 10°E) и в северной части Каспийского моря (45°N , 50°E и 45°N , 60°E) [2, 3] (рис. 2). Условное название указанной моды – индекс колебания «Северное море – Северный Каспий» (NCI) или Северокаспийское колебание. В многочисленных работах, посвященных исследованию NCI, доказано влияние этой моды на региональный климат Альп, Балкан, Восточного Средиземноморья и Северного Ирана [8–12], то есть на районы, территориально близкие к рассматриваемому в настоящей статье. В частности, было установлено, что влияние NCI на режим температуры воздуха на Ближнем Востоке и в Каспийском регионе менее выражено в летний сезон по сравнению с зимним. [9]. К аналогичному выводу пришли авторы работ [13–17]. В этих работах методами композитного и корреляционного анализа была исследована связь различных мод, ассоциируемых с полем атмосфер-

ной циркуляции (в том числе и NCI), полученных путем разложения полей геопотенциала на эмпирические ортогональные функции, с режимом температуры воздуха и осадков в регионе, охватывающем территорию Украины и Юга России. Было показано, что в целом, для всего зимнего периода характерна значимая обратная корреляционная связь между NCI и полем температуры воздуха над Черным морем, Турцией и Грузией. С нашей точки зрения, важно, что в [17] была установлена пространственно-временная стабильность коэффициентов корреляции с сохранением областей максимума и минимума над одними и теми же регионами.

Необходимо отметить, что индекс NCI характеризует не собственно атмосферную циркуляцию, а ее аномалии, изменения по отношению к средней циркуляции. Когда фаза NCI отрицательна, Z_{500} ниже над Северным морем, и выше над Каспием. Соответственно, во время положительной фазы картина обратная. Таким образом, циркуляционная модель, которая ассоциируется с отрицательной фазой, определяет направление потоков против часовой стрелки над Северным морем и по часовой стрелке над Каспийским. Это является причиной усиления адвекции с юга и юго-запада в регионе между двумя морями. Во время положительной фазы этот регион находится под влиянием потоков северного или северо-восточного направления.

В течение положительной фазы циркуляция в регионе носит более выраженный меридиональный характер, а в течение отрицательной фазы – зональный, причем как в теплый, так и в холодный период года. Во время положительной фазы в зимний период направление потоков главным образом северного направления над большей частью Восточной Европы, Черного и Каспийского морей и Ближнего Востока приводит к ощутимому понижению температуры воздуха относительно климатических средних. Во время отрицательных фаз картина противоположная. Аномалии температуры воздуха характеризуются относительно высокой пространственной корреляцией, поскольку формируются под влиянием крупномас-

штабной циркуляции. В то же время режим осадков определяется в значительной степени местными условиями и характеризуется низкой пространственной корреляцией [8, 10].

В настоящем исследовании, в отличие от работ [13–17], были проанализированы связи индекса NCP и рядов температуры воздуха и осадков, измеренных непосредственно на сетевых метеорологических станциях, а не результаты приведенных к узлам пространственной сетки полей реанализа. Это позволило локализовать пространственные связи между NCP и метеорологическими характеристиками в более мелком масштабе, нежели при пространственном разрешении $2,5^\circ \times 2,5^\circ$.

Используемый в настоящей работе исходный ряд среднемесячных значений NCP (1948–2005 гг.) находится в свободном доступе на сайте Центра климатических исследований университета Восточной Англии¹ (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/ncp/>). Исходный ряд с временной дискретностью 1 месяц (рис. 3а) оптимально аппроксимируется моделью авторегрессии нулевого порядка (белый шум) [18], а после удаления формального годового хода (средних многолетних значений для каждого месяца года) (рис. 3б) – моделью первого порядка с небольшим коэффициентом авторегрессии (0,12). Очевидно, что сезонный ход в исходном ряду выражен очень слабо, а его удаление лишь незначительно влияет на параметры ряда. В то же время, ряды среднемесячных значений температуры воздуха и осадков содержат отчетливый сезонный ход. Осреднение по трем летним и трем зимним месяцам, за оба полугодия и за год в целом позволяет решить эту проблему. Для проведения корреляционного анализа аналогичным образом осреднялись ряды NCP.

3. Линейная связь приземной температуры и NCP. Для установления тесноты связи между рядами температуры и NCP были рассчитаны коэффициенты корреляции (R) между соответ-

ствующими рядами. Величины R в летние месяцы (июнь–август) незначительны: лишь на 12 станциях из 31 $|R| \geq 0,3$ (табл. 1).

Рис. 3. Ряд месячных значений NCP, 1948–2005 гг. до исключения годового хода (а) и сам годовой ход (б)

Это фактически означает, что фаза NCP не оказывает практически никакого влияния на формирование летнего режима температуры и осадков в исследуемом регионе. В зимние месяцы картина существенно меняется: $|R| \geq 0,3$ на 22 станциях. На отдельных станциях R может превышать по абсолютной величине значение 0,7. Станции с высокими значениями отрицательной корреляции температуры воздуха и NCP сконцентрированы в горах и предгорьях Кавказа (Терскол, Местиа, Шаджатмаз, Зеленчукская, Красная Поляна, Клухорский перевал), в районе Кавказских Минеральных вод (Кисловодск) и на участке побережья Черного моря (Сочи, Туапсе) (рис. 4).

По-видимому, отрицательная фаза NCP, ассоциируемая с усилением адвекции воздушных масс с юга и, соответственно, с увлечением числа средиземноморских циклонов, приводит к установлению более теплого температурного режима.

Поскольку нас в большей степени интересовали корреляционные связи рядов NCP и температуры воздуха в горных регионах, для этих станций были

¹ Climatic Research Unit, University of East Anglia

рассчитаны 95%-ные доверительные интервалы для R для зимних месяцев и холодного полугодия (табл. 2) в соответствии со стандартной процедурой, основанной на t -распределении Стьюдента.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между температурой воздуха в разные периоды года и года в целом и индексом НСР. Максимальным значениям ($|R| \geq 0,7$) соответствует синий цвет, промежуточным – желтый ($0,7 > |R| \geq 0,6$) и сиреневый ($0,6 > |R| \geq 0,5$), минимальным – зеленый ($0,5 > |R| \geq 0,4$), значения $|R| < 0,4$ цветом не выделены. Показаны только значения $|R| \geq 0,3$.

Станции	Год	ДЯФ	ИИА	ХП
Анапа, МГ	-0,41	-0,59		-0,62
Армавир	-0,37	-0,49		-0,58
Буйнакск	-0,38	-0,51	-0,47	-0,50
Владикавказ		-0,41	-0,40	-0,47
Волгоград			-0,30	
Гигант		-0,33		-0,38
Грозный	-0,43	-0,46	-0,35	-0,55
Дербент		-0,37	-0,32	-0,46
Зеленчукская	-0,61	-0,75	-0,43	-0,75
Кисловодск	-0,46	-0,65	-0,33	-0,63
Клухорский перевал	-0,48	-0,76	-0,35	-0,70
Кр. Поляна	-0,57	-0,74	-0,34	-0,77
Краснодар		-0,44		-0,49
Лагань	-0,32			-0,37
Махачкала	-0,34	-0,43	-0,37	-0,52
Местиа	-0,37	-0,60	-0,49	
Мин. Воды	-0,36	-0,42		-0,48
Пр.-Ахтарск		-0,39		-0,44
Ремонтное				-0,34
Ростов-н.-Д.				-0,38
Сочи	-0,55	-0,77		-0,79
Ставрополь	-0,32	-0,49		-0,51
Таганрог				-0,37
Терскол	-0,54	-0,73	-0,46	-0,67
Туапсе	-0,45	-0,71		-0,72
Тюл. остров		-0,39		-0,37
Цимлянск				-0,34
Шаджатмаз	-0,33	-0,69		-0,61

Очевидно, что даже с учетом значений нижней границы доверительного интервала корреляция между рядами позволяет сделать вывод о тесной линейной связи между ними.

Таблица 2. Нижние значения 95%-ных доверительных интервалов коэффициентов корреляции между температурой воздуха в зимние месяцы и в холодный период года НСР (только для значений $|R| \geq 0,5$)

Станции	ДЯФ	ХП
Анапа	-0,38	-0,40
Армавир		-0,35
Буйнакск	-0,28	-0,26
Грозный		-0,33
Зеленчукская	-0,58	-0,57
Кисловодск	-0,44	-0,41
Клухорский перевал	-0,59	-0,51
Красная Поляна	-0,56	-0,60
Махачкала		-0,29
Местиа	-0,38	
Сочи	-0,60	-0,62
Ставрополь		-0,28
Терскол	-0,54	-0,47
Туапсе	-0,57	-0,54
Шаджатмаз	-0,49	-0,40

Качественно сопоставимые результаты были получены в работе [9], однако на основе месячных данных реанализа, приведенных к узлам сетки $2,5^\circ \times 2,5^\circ$: в зимние месяцы (ДЯФ) обширная территория, охватывающая Восточное Средиземноморье, бассейны Черного и Каспийского морей, характеризуется отрицательной корреляцией, в то время, как область положительных корреляций ограничена несколькими узлами сетки над территорией Великобритании, югом Северного моря и Скандинавии. В обеих областях коэффициенты корреляции достаточно высоки ($|R| > 0,8$). В летние месяцы (ИИА) область высоких значений $|R| > 0,6$ значительно расширяется, охватывая большую часть Западной, Центральной и Восточной Европы, отрицательные корреляции на востоке области малы (в целом $|R| < 0,5$).

При этом сама область также значительно смещается в восточном направлении.

4. Линейная связь сумм осадков с NCP. В целом, коэффициенты корреляции между значениями NCP и суммами осадков ниже, чем с температурой воздуха (табл. 3), что, как упоминалось выше, обусловлено тем, что режим последних в значительной мере формируется под влиянием местных условий.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между суммами осадков в разные периоды года и года в целом и индексом NCP. Цветовая гамма, как в табл. 1

Станции	Год	ДЯФ	ИИА	ХП
Буйнакск		0,64	0,49	
Владикавказ		0,64		0,33
Волгоград		-0,43		-0,46
Гигант		-0,35		-0,30
Грозный		0,41		0,34
Кисловодск		0,56		0,38
Мин. Воды	0,39			
Пр.-Ахтарск		-0,33		-0,39
Ростов-н.-Д.		-0,32		
Таганрог		-0,53		-0,48
Цимлянск		-0,41		-0,33
Шаджатмаз		0,58		

В летние месяцы лишь на одной станции (Буйнакск) $|R| \geq 0,4$. Это фактически означает, что фаза NCP не оказывает никакого влияния на формирование летнего режима осадков в исследуемом регионе. В зимние месяцы картина несколько меняется, и на отдельных станциях R может превышать значение 0,5 по абсолютной величине и даже 0,6 (Буйнакск, Владикавказ).

Заметим, однако, что в силу того, что ряды осадков имеют меньшую продолжительность, чем ряды температуры воздуха, аналогичные 95%-ные интервалы будут шире. Примечательно, что однозначной географической локализации относительно высоких значений коэффициентов корреляции значений индексов NCP с количеством осадков, выделить не удалось.

Закключение. Проведенное исследование показало, что температурный режим в горных и предгорных районах Кавказа в зимний период и в холодную половину года формируется в значительной степени под влиянием аномалий атмосферной циркуляции, которую можно ассоциировать с положительной или отрицательной фазой NCP. В летний период влияние NCP на температурный режим невелико. В противоположность температурному режиму, режим осадков формируется, главным образом, под влиянием местных условий, особенно в летние месяцы: коэффициенты корреляции за исключением единственного случая не превышают 0,3. На основании проведенного исследования можно сделать вывод о том, что NCP не является пригодным предиктором для осадков, однако вполне подходит на эту роль для температуры воздуха в горных и предгорных регионах Кавказа. Тесную линейную связь между NCP и температурой воздуха в холодный период года целесообразно использовать, например, при детализации региональных сезонных прогнозов. В частности, в районе Сочи и Красной Поляны ниже значение 95%-ного интервала $|R| \geq 0,6$, что, вероятно, можно применять для построения прогностических оценок лавинной ситуации [19]. Последнее обстоятельство чрезвычайно важно при планировании работы туристической горнолыжной индустрии, и актуально не только для курортов Красной Поляны, но всего Центрального и Западного Кавказа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Molavi-Arabshahi M., Arpe K., Leroy S.A.G. Precipitation and temperature of the southwest Caspian Sea region during the last 55 years: their trends and teleconnections with large-scale atmospheric phenomena // International Journal of Climatology. 2016. V. 36. P. 215
2. Kutiel H., Benaroch Y. North Sea Caspian Pattern (NCP) - an upper level atmospheric teleconnection affecting the eastern Mediterranean: Identification and

definition // Theoretical and Applied Climatology. 2002. V. 71. P. 17–28.

3. Kutiel H., Maheras P., Türkes M., Paz S. North Sea Caspian Pattern (NCP) - an upper level atmospheric teleconnection affecting the eastern Mediterranean: Implications on the regional climate // Theoretical and Applied Climatology. 2002. V. 72. P. 173–192.

4. Лурье П.М., Панов В.Д. Изменение современного оледенения северного склона Большого Кавказа в XX в. и прогноз его деградации в XXI в. // Метеорология и гидрология. 2014. № 4. С. 68–76.

5. Khromova T., Nosenko G., Kutuzov S., et al. Glacier area changes in Northern Eurasia // Environmental Research Letters. 2014. V. 9. P. 1–11.

6. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Крыленко И.В. и др. Динамика ледниково-озерного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине р. Адыл-Су (Кавказ) // Криосфера Земли. 2007. Т. 11. №1. С. 72–84

7. Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Aleinikov A.A. et al. Monitoring of Bashkara Glacier Lakes (Central Caucasus, Russia) and modeling of their potential outburst // Natural Hazards. 2012. V. 61. No 3. P. 1293–1316.

8. Auer I., Matulla C., Boehm R. et al. Sensitivity of Frost Occurrence to Temperature Variability in the European Alps // International Journal of Climatology. 2005. V. 25. 1749–1766.

9. Brunetti M., Kutiel H. The relevance of the North-Sea Caspian Pattern (NCP) in explaining temperature variability in Europe and the Mediterranean // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2011. V. 11. 2881–2888.

10. Brunetti M., Maugeri M., Monti F., Nanni T. Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenized instrumental time series // International Journal of Climatology. 2006. V. 26. P. 345–381.

11. Efthymiadis D., Goodess C.M., Jones P.D. Trends in Mediterranean gridded temperature extremes and large-scale

circulation influences // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2011. V. 11. P. 2199–2214.

12. Kutiel H., Türkes M. New evidence for the role of the North Sea – Caspian pattern on the temperature and precipitation regimes in continental Central Turkey // Geografiska Annaler. 2005. V. 87A. P. 501–513.

13. Полонский А.Б., Кибальчич И.А. Влияние Северноморско-Каспийского колебания на аномалии приземной температуры над территорией Украины и Черного моря в холодный период // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия «Естественные науки». 2013. Вып. 25. № 24 (167). С. 150–156.

14. Полонский А.Б., Кибальчич И.А. Совместное влияние основных режимов изменчивости в системе Океан-Атмосфера в Атлантико-Европейском секторе на температурные аномалии в Украине и Азово-Черноморском регионе в зимний период // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. № 1. С. 329–333

15. Полонский А.Б., Кибальчич И.А. Межгодовая изменчивость циркуляции атмосферы и аномалии температуры Восточной Европы в зимний период // Доклады Национальной академии наук Украины. 2014. № 6. С. 100–107.

16. Полонский А.Б., Кибальчич И.А. Циркуляционные индексы и температурный режим Восточной Европы в зимний период // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 5–17.

17. Кибальчич И.А. Особенности общей циркуляции атмосферы и их влияние на формирование температурных аномалий в Украине: дис. ... канд. геогр. наук. Одесса, 2015. 181 с.

18. Привальский В.Е. Климатическая изменчивость (стохастическая изменчивость, предсказуемость, спектры). М.: Наука, 1985, 183 с.

19. Рыбак О.О., Рыбак Е.А., Поповнин В.В. и др. Формирование

снежного покрова в районе Красной Поляны (Сочи) зимой 2016-2017 гг. Часть 2. Метеорологические условия и лавинная обстановка // Политематический сетевой электронный

научный журнал КубГАУ (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2017. №131(07) Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2017/07/pdf/45.pdf>.

Рис. 4. Коэффициенты корреляции между температурой воздуха в холодное полугодие и индексом NCP. Выделен район с преобладающими значениями $R \leq -0,5$

IMPACT OF THE NORTH SEA – CASPIAN PATTERN ON THE FORMATION OF REGIMES OF AIR TEMPERATURE AND PRECIPITATION IN THE CAUCASUS REGION

E.A. Rybak^{1,2}, N.A. Yaitskaya^{1,2}, O.O. Rybak^{1,2}

¹Sochi Research Center of RAS, Sochi, Teatralnaya St., 8a

²Branch of Institute of Natural and Technical Systems, Sochi, Kurortny Ave., 99/18

Linear relations between one of the modes of atmospheric circulations (North Sea – Caspian Pattern, NCP) and temperature and precipitation in the South of European Russia are analyzed in the paper. We established strong relation between surface air temperature and NCP index during cold period of the year. Relations in summer time are not obvious. Precipitation regime is mostly determined by local conditions neither than by anomalies of atmospheric circulation. Therefore, it is inexpedient to apply NCP index as a predictor of precipitation.

Keywords: climate, regional climate, air temperature, precipitation amount, climate prediction, Caucasus