

ОБОСНОВАНИЕ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНОЙ РЕГИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КЛИМАТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В.П. Евстигнеев^{1,2}, В.А. Наумова², Д.Ю. Воронин¹, М.П. Евстигнеев¹

¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,

РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

² Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

E-mail: vald_e@rambler.ru

В статье рассмотрена структура существующей системы климатического мониторинга в Севастопольском регионе. Рассмотрено качество генерируемой системой мониторинга информации на примере характеристик температуры воздуха. Дано описание современного состояния условий температурного режима в регионе, а также тенденций его изменения. Сделан вывод о том, что нестационарность глобального и регионального климата, необходимость изменения плотности и структуры наблюдательной сети приводит к необходимости трансформации системы климатического мониторинга в адаптивную систему. Такая система должна обладать способностью к параметрической самонастройке и структурной адаптации к меняющимся условиям.

Ключевые слова: климатический мониторинг, температура воздуха, адаптивная система, Севастопольский регион, изменение климата

Поступила в редакцию: 17.11.2020. После доработки: 11.12.2020.

Введение. Неотъемлемой частью системы климатического мониторинга (СКМ) является измерение основных метеорологических параметров для изучения и анализа атмосферных явлений и процессов, которые характеризуют соответствующее состояние погоды [1]. Обобщение результатов такого мониторинга может использоваться в системах поддержки принятия решений по перспективному социально-экономическому развитию как в международном и национальном масштабах, так и при формировании региональной политики.

Взгляд на динамику и сущность СКМ приводит к идее того, что она должна обладать признаками адаптивной системы. Этот тезис вытекает из того факта, что в климатической системе Земли действуют довольно мощные (по энергетике) квазипериодические и однонаправленные процессы разных временных масштабов (глобальное потепление, Северо-Атлантическое колебание, Атлантическое мультидекадное колебание, циркуляционные эпохи в атмосфере и пр.). В связи с этим обобщенные оценки по данным мониторинга должны периодически обновляться для принятия более

эффективных управляющих решений в новых климатических условиях.

С другой стороны, имплементация управленческих решений может привести к каскаду изменений, например в политике социально-экономического развития региона. Это неизбежно приводит к возникновению потребности в расширении сети мониторинговых станций и новых директивных требований к содержанию и качеству синтезируемой СКМ информации. Все это приводит к необходимости формирования адаптивной системы климатического мониторинга

На решение проблемы научного обоснования необходимости трансформации системы климатического мониторинга в адаптивную самонастраивающуюся и самоорганизующуюся систему направлено настоящее исследование. Объектом исследования послужил Севастопольский регион и существующая в нем система климатического мониторинга.

Температура воздуха является одним из основных показателей, используемых для анализа климатических изменений, как в глобальном масштабе, так и на ре-

гиональном уровне [2]. Исследование термического режима является первичным этапом обобщения данных климатического мониторинга протекающих физических и экологических преобразований в окружающей среде отдельных регионов. Поэтому в работе предметно рассматривается термический режим как основной объект мониторинга региональной СКМ.

Структура региональной СКМ и качество синтезируемой информации. По Севастопольскому региону мониторинг за гидрометеорологическими параметрами проводится на пунктах наблюдения, указанных на рис. 1. Первый пункт – МГ Херсонесский маяк – расположен на мысе Херсонес, второй – МГ Севастополь – на Павловском мысе, третий – Г Фруктовое – является гидрологическим постом и служит для мониторинга р. Бельбек, четвертый и пятый – Г Хмельницкое и Г Родниковское – гидрологические посты на р. Черная. На этих пунктах Росгидрометом осуществляются регулярные стандартные наблюдения в соответствии с метеорологической, морской гидрологической и речной гидрологической программами работ. Эти станции формируют основу региональной СКМ. В Севастопольском регионе ранее были организованы и другие пункты наблюдений, среди которых дольше всех функционировал пункт М Орлиное в период 1959–1988 гг. В 1988 г. в результате оптимизации было принято решение оставить в регионе морские береговые станции наблюдения (МГ Севастополь и МГ Херсонесский маяк), обеспечивающие функционирование флота и морского порта г. Севастополь.

При дальнейшем изложении материала сосредоточим внимание на метеорологических станциях Севастопольского региона (МГ Севастополь и МГ Херсонесский маяк), осуществляющих мониторинг температурного режима.

Метеорологические наблюдения в Севастополе были начаты в 1808 г., до 1909 г. местоположение метеорологической площадки менялось неоднократно,

и только в 1909 г. она была перенесена на Павловский мыс (у входа в Южную бухту), где и располагается в настоящее время. Наблюдения на мысе Херсонес (МГ Херсонесский маяк) были начаты в 1865 г. и по настоящее время местоположение пункта практически не изменилось.

По составу и объему массивы данных в разные периоды лет существенно различаются: до 1936 г. содержится информация за три срока (7, 13 и 19 ч местного солнечного времени), в период с 1936–1965 гг. – четыре срока наблюдения (в 1, 7, 13 и 19 ч местного солнечного времени), а начиная с января 1966 г. – 8 сроков (метеорологические наблюдения стали проводиться каждые три часа 0, 3, 6, 9, 12, 15, 21 ч ВСВ). По МГ Севастополь накоплен значительный массив данных наблюдений за температурой воздуха продолжительностью более 100 лет. Однако регулярные наблюдения на этой станции начали вестись с 1882 г. с перерывом в период Великой Отечественной войны. В массивах данных МГ Херсонесский маяк имеется значительное количество продолжительных перерывов до 1945 г.

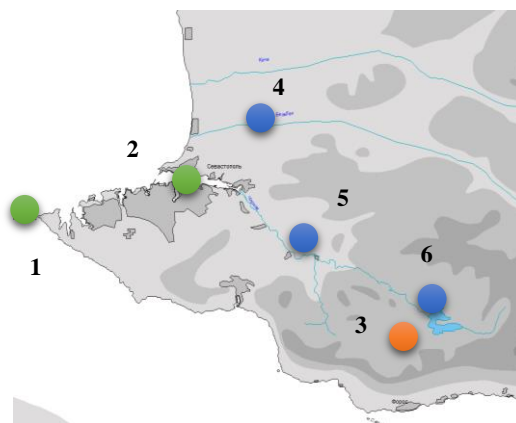


Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдения: 1 – МГ Херсонесский маяк, 2 – МГ Севастополь, 3 – М Орлиное, 4 – Г Фруктовое, 5 – Г Хмельницкое, 6 – Г Родниковское

Fig. 1. Layout of observing stations: 1 – MG Chersonesos Lighthouse, 2 – MG Sevastopol, 3 – MG Orlinoe, 4 – G Fruktovoe, 5 – G Khmelnitskoye, 6 – G Rodnikovskoye

Происходившие в течение всего периода функционирования станций изменения в методиках и дискретности измерений, изменений местоположения площадок вносят систематическую неоднородность в ряды данных, что обуславливает необходимость проверки их качества.

Проверка одним из принятых в международной климатологической практике методов, реализованного в виде рекурсивного алгоритма в библиотеке RНtestsV3 [3] показала, что в рядах наблюдений присутствует несколько сдвигов неоднородностей во временных рядах температурной характеристики. Так, для ряда значений температуры воздуха по МГ Севастополь было выявлено два скачка неоднородности – в 1897 и 1941 гг. Первый скачок, скорее всего, обусловлен переносом метеоплощадки, тогда как для второго сдвига (1941 г.) подтверждения в метаданных найдено не было. По станции МГ Херсонесский маяк в рядах значений температуры воздуха скачков неоднородности выявлено не было. Такой ряд также может считаться однородным.

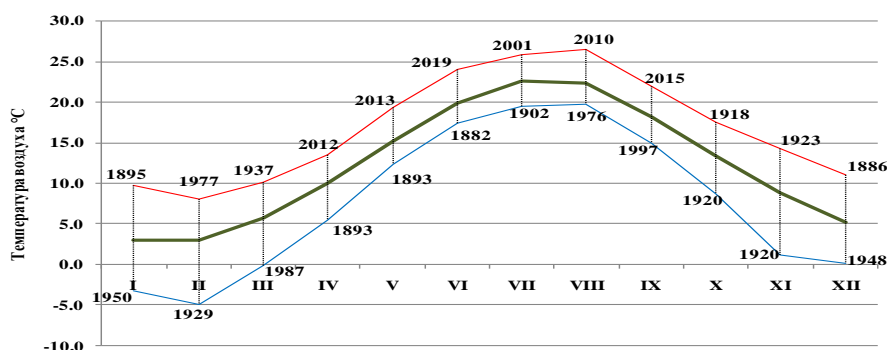
Расчет климатических характеристик (стандартных или «фоновых») проводился с использованием методик, принятых в практике Гидрометеорологической службы [4].

Современное состояние термического режима по данным СКМ. Погодные условия, в том числе температура воздуха над Азово-Черноморским бассейном, определяются условиями циркуляции атмосферы и имеют хорошо

выраженные сезонные различия. Летом на Черное море распространяется отрог Азорского антициклона, под влиянием которого формируются длительные периоды спокойной и сухой погоды. Повышенная активность атмосферных процессов и резкие изменения погоды в холодном полугодии связаны с интенсивной циклонической деятельностью над Средиземноморским бассейном и сопряжены с мощным антициклогенезом над юго-востоком Европейской части России. Кроме общециркуляционных условий на климат прибрежных районов существенное влияние оказывает прилегающая морская акватория. Действующая в регионе СКМ позволяет отследить указанные особенности формирования термического режима.

Представим результаты обобщения данных регулярного СКМ для характеристики температурных условий в регионе и некоторых комплексных показателей.

Средняя годовая температура воздуха, рассчитанная за весь период наблюдения по двум пунктам Севастопольского региона, составляет 12,3°С на МГ Севастополь и 12,6°С на МГ Херсонесский маяк (на 0,3°С выше). Такое различие обусловлено тем, что Гераклейский полуостров, на котором располагается второй пункт наблюдения, выдается далеко в море. Большую часть года (с конца августа до начала апреля) среднемесячные температуры воздуха здесь несколько выше, и лишь весной и в начале лета с усилением бризовой циркуляции распределение среднемесячных температур воздуха меняется на обратное.



a)

Как было указано выше, кроме общециркуляционных условий, на температурный режим прибрежных районов существенное влияние оказывает прилегающая морская акватория Черного моря. В зимний сезон в подавляющем большинстве случаев высокие температуры (больше 5°C) на Севастопольском побережье, обусловлены направлениями ветра со стороны открытой части моря. В этот период года температура морской воды, как правило, выше температуры воздуха. И, наоборот, понижение температуры зимой до 5°C и менее сопровождается ветрами северных и северо-восточных направлений, при которых зимой с континента вторгается сухой холодный воздух. В качестве иллюстрации такого явления приведена комплексная характеристика – термороза

ветров для зимнего сезона (рис. 4). Южное (на МГ Севастополь) и юго-восточное направления ветра (на МГ Херсонесский маяк) являются преобладающими для высоких температур воздуха на Севастопольском побережье, так как эти направления ветра характерны для фёнового ветра в регионе.

Помимо средних месячных температур воздуха важной характеристикой термического режима являются их экстремальные значения [5]. По данным МГ Севастополь абсолютный минимум (22,0°C мороза) наблюдался в феврале 1929 г., который, как было указано ранее, был и самым холодным (табл. 1). Самая высокая температура 38,3°C была зафиксирована в июле 1971 г. на МГ Севастополь, на МГ Херсонесский маяк – также в июле, но в 2012 г.

Таблица 1. Экстремальные значения температуры воздуха (°C) по данным наблюдения МГ Севастополь, МГ Херсонесский маяк за период 1925–2019 гг.

Температура, °C	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
МГ Севастополь												
Абсолютный максимум	20.4	23.9	26.6	30.8	31.6	37.0	38.3	38.1	33.8	29.7	27.4	25.2
Год	1971	1958	1962	1975	1980	2009	1971	2017	1929	1922	1917	2008
Абсолютный минимум	-21.9	-22.0	-15.3	-6.1	0.6	5.7	10.3	9.7	2.7	-7.5	-12.5	-18.0
Год	1940	1929	1898	2004	1970	1918	1884	1970	1970	1920	1953	1888
МГ Херсонесский маяк												
Абсолютный максимум	18.7	21.9	23.2	26.8	30.3	33.5	38.3	37.3	32.6	27.4	25.3	22.7
Год	1971	1958	1962	2012	1980	2009	2012	1946	1984	1991	2010	2008
Абсолютный минимум	-17.7	-19.4	-10.6	-5.7	0.0	5.2	10.4	10.1	0.0	-4.5	-10.1	-12.9
Год	1950	1929	1929	2004	1904	1958	1904	1933	1993	1920	1953	1933

Следует обратить внимание на то, что и в зимние месяцы температуры могут достигать нехарактерных для этого сезона высоких значений. Например, в феврале 1958 года была отмечена температура 23,9°C (МГ Севастополь), а в декабре 2008 года 25,2°C (МГ Севастополь). Такие высокие температуры в холодное полугодие (включая апрель) наблюдаются, как правило, в теплом секторе циклона, при которых создаются благоприятные условия для обваливания с гор на побережье очень теплого и сухого воздуха – фена [6]. Для исследуемого района это ветры юго-восточного

направления, скорость которых может достигать 40 м/с (19 марта 1981 г. – МГ Херсонесский маяк). Например, в декабре 2008 г. в г. Севастополе наблюдался юго-восточный ветер 21 м/с, который привел к повышению температуры воздуха по данным МГ Севастополь до 25,2°C и до 22,7°C на МГ Херсонесский маяк. Тогда был превышен абсолютный максимум температуры воздуха за весь период наблюдений на МГ Севастополь (1882–2019 гг.).

Одной из основных характеристик внутрисуточного хода температуры воздуха является ее суточная амплитуда как

разность между максимальной и минимальной значениями. Средняя за год величина такой амплитуды составляет 6,3–7,2°C; в среднем большая амплитуда отмечается летом, минимальная в зимний сезон (табл. 2). При этом на МГ Херсонесский маяк амплитуда принимает несколько меньшее значение, в среднем 0,9°C. Такое различие обусловлено тем, что на режим температуры воздуха в окрестности станции МГ Херсонесский маяк, расположенной на Гераклеяском полуострове, оказывается большее влияние со стороны Черного моря.

Наибольшая суточная амплитуда может достигать 18,8°C. такая разница между максимальной и минимальной температурой формируется при определенных синоптических процессах (табл. 2). Следует напомнить, что суточный ход температуры воздуха в значи-

тельной мере определяется ходом радиационного баланса, зависит от характера подстилающей поверхности, а также от условий циркуляции атмосферы. За исследуемый период были рассмотрены синоптические процессы для случаев с максимальной суточной амплитудой температурой воздуха, как у поверхности земли, так и в средней тропосфере. Было выявлено, что формирование значительной разницы между максимальной и минимальной температурой (амплитуды) на Севастопольском побережье в теплое и холодное полугодие происходит при разных синоптических процессах: зимой и весной в подавляющем большинстве случаев (80%) при выходе южных циклонов, летом и осенью – в основном (около 72% случаев) при антициклональном типе погоды.

Таблица 2. Суточная амплитуда температуры воздуха, °C по данным наблюдений МГ Севастополь, МГ Херсонесский маяк за период 1966–2019 гг.

Показатели	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
МГ Севастополь													
Средняя	5,7	6,1	6,5	7,7	8,2	8,1	8,2	8,7	8,2	7,4	6,4	5,6	7,2
Наибольшая	18,6	16,0	17,4	18,8	18,6	15,6	17,4	18,7	17,7	16,9	17,4	17,5	18,8
Год	2015	1985	2006	2008	1980, 1994	2019	1984	2017	1992	1979 1980	2019	2009	2008
МГ Херсонесский маяк													
Средняя	5,1	5,4	5,6	6,3	6,7	7,1	7,4	7,8	7,3	6,5	5,7	5,1	6,3
Наибольшая	16,7	14,8	15,3	17,6	17,1	14,3	15,5	15,3	15,7	13,9	15,2	15,0	17,6
Год	1976	1985	1993 1995	2005	1980	1989	2001	2008	1984	1983 2018	1978 2005	2009	2005

Адаптивные свойства СКМ. Глобальные климатические, демографические, технологические и экономические изменения вызвали в мировом сообществе потребность в промышленной и цифровой трансформации видов человеческой деятельности и среды его обитания. СКМ как часть этой среды также может быть подвержена трансформации своей структуры.

Применительно к Севастопольскому региону стоит отметить, что действующие станции (МГ Севастополь и МГ Херсонесский маяк) отражают во многом режим Севастопольского побережья.

При этом континентальная часть региона имеет сравнительно сложную физико-географическую характеристику рельефа, и простая интерполяция данных береговых станций в эти микрорайоны может дать ошибочные значения метеорологического элемента.

Для подтверждения данного тезиса приведем результат сравнения характеристик термического режима по данным функционирующих станций и М Орлиное, которая была закрыта в период оптимизации сети наблюдения, проводимая Гидрометеорологической службой в конце 80-х годов прошлого века. В

табл. 3 представлены среднемесячные, а также абсолютный максимум и минимум температуры воздуха по трем пунктам наблюдения за одинаковый период 1960–1988 гг. Из табл. 3 видно, что температуры воздуха между береговыми станциями и М Орлиное существенно отличаются особенно в зимний и осенний сезон года.

Таким образом, в зависимости от стратегии развития городской среды, структура существующей СКМ г. Севастополь должна быть изменена и дополнена новыми пунктами наблюдений. Причем новая сеть пунктов должна быть оптимальной с точки зрения компромисса между плотностью сети и достаточностью освещения гидрометеорологического режима города. Однако такая оптимальность определяется во мно-

гом разнообразием микроклиматологических условий местности. Микроклиматологические условия, в свою очередь, не могут считаться стационарными вследствие наблюдаемых тенденций в изменении глобального и регионального климатов.

На рис. 4, а, б представлено последовательное изменение климатических норм среднегодовой температуры воздуха, пересчитываемых каждое новое десятилетие. На протяжении большей части XX в. норма температуры воздуха на обеих станциях Севастопольского региона не претерпевала статистически значимых отклонений. Лишь в последних двух климатических периодах, прослеживаются наиболее значимые изменения в среднегодовых температурах.

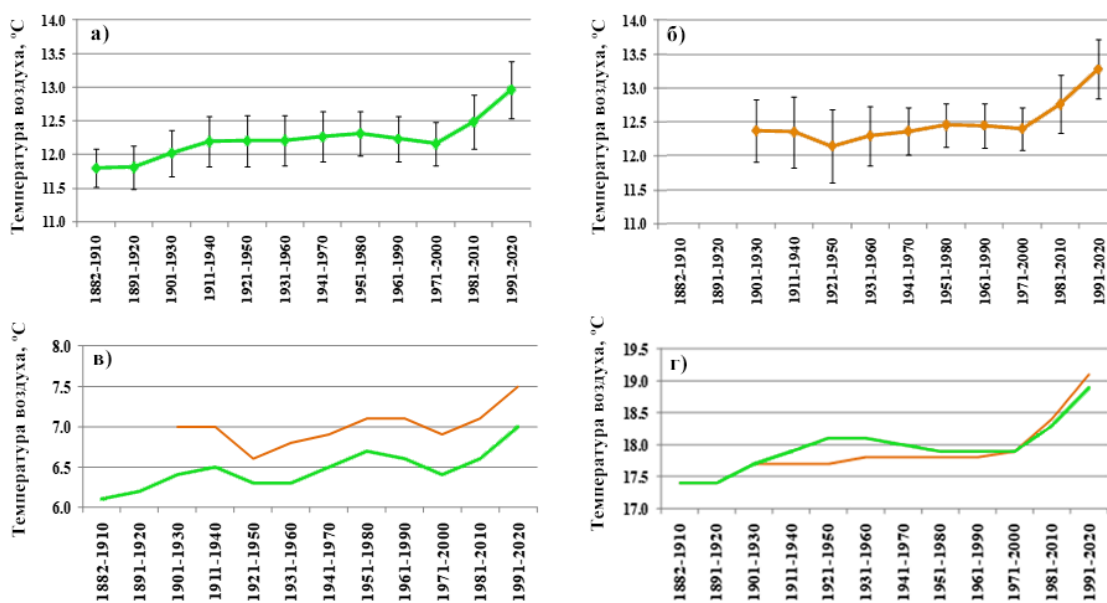


Рис. 4. Нормы температуры воздуха за год (а,б), холодное (в) и теплое (г) полугодия за различные климатические периоды по пунктам наблюдения Севастопольского региона: МГ Севастополь – зеленые линии; МГ Херсонесский маяк – коричневые линии. Средние значения температуры воздуха сопровождаются доверительными интервалами их оценки (доверительная вероятность 95%)

Fig. 4. Normals for annual (a,б), cold (в) and warm half-year (г) air temperatures for different climatic periods at the stations of Sevastopol region: MG Sevastopol – green lines; MG Chersonesos Lighthouse – brown lines. Annual air temperature normals are accompanied by confidence intervals (95% confidence probability)

Так, по отношению к пока еще действующей норме 1961–1990 гг. превышение средних за период 1981–2010 гг. составило 0,3°C для МГ Севастополь и

МГ Херсонесский маяк; климатически средние значения за период 1991–2020 гг. оказались выше уже на 0,7 и 0,9°C соответственно. Анализ динамики изме-

нений по полугодиям позволяет сделать вывод о том, что наиболее интенсивное потепление за последние 30 лет проявляется в теплое полугодии. В ходе средних температур за зимний сезон прослежива-

ется чередование периодов повышений и понижений на фоне вековой положительной тенденции к увеличению (см. рис. 4, в).

Таблица 3. Среднемесячные и экстремальные значения температуры воздуха (°С) по данным наблюдения МГ Севастополь, МГ Херсонесский маяк, М Орлиное за период 1960–1988 гг.

Температура, °С	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
МГ Севастополь													
Средняя месячная	3.2	3.4	5.5	10.4	15.2	19.8	22.0	21.7	18.0	12.9	9.1	5.7	12.2
Абсолютный максимум	20.4	20.3	26.6	30.8	31.6	35.6	38.3	34.6	33.2	28.5	24.6	20.9	38.3
Абсолютный минимум	-16.9	-17.9	-11.9	-4.1	2.0	8.4	11.3	9.7	2.7	-2.1	-7.1	-12.5	-17.9
МГ Херсонесский маяк													
Средняя месячная	3.9	3.7	5.5	9.8	14.5	19.5	22.0	22.2	18.7	13.8	9.8	6.3	12.5
Абсолютный максимум	18.7	18.7	23.2	26.3	30.3	32.6	33.6	34.1	32.6	25.7	22.7	19.5	34.1
Абсолютный минимум	-14.9	-17.2	-9.7	-2.4	1.2	8.3	10.7	10.4	3.5	-0.8	-5.5	-9.9	-17.2
М Орлиное													
Средняя месячная	1.2	1.7	4.1	9.2	14.0	17.7	19.5	18.8	14.8	9.8	6.1	2.9	9.9
Абсолютный максимум	18.7	20.7	23.6	30.6	31.5	35.6	37.8	35.7	31.7	28.6	25.6	19.5	37.8
Абсолютный минимум	-24.7	-26.9	-20.3	-8.6	-2.9	2.1	6.1	3.7	-4.1	-8.7	-11.0	-17.1	-26.9

В [2] отмечено, что показателем изменения гидрометеорологического режима является разность между смежными климатическими нормами, характеризующими климатические условия начального и конечного периодов. Причем эта разность по величине должна превосходить вероятную ошибку вычисления соответствующих норм.

Судя по рис. 4, отклонение между нормами 1961–1990 гг. и 1991–2020 гг. значимо. Из этого следует, что в г. Севастополь за последние десятилетия произошли ощутимое изменение температурного режима.

Отмеченная тенденция является проявлением более общей тенденции глобального изменения климата на Земле. Существует свидетельства того, что такие изменения могут сопровождаться интенсификацией опасных гидрометеорологических явлений [7] в том числе на региональном уровне. Необходимость заблаговременного прогноза таких явлений и углубление знаний о закономерностях их развития, актуализуют проблему увеличения дискретности измерений со-

путствующих гидрометеорологических характеристик. В этом смысле СКМ должна обладать определенной «гибкостью» и адаптироваться к меняющимся условиям.

Выводы. В работе показано, что в Севастопольском регионе проявляются глобальные климатические тенденции в виде значимого увеличения климатической нормы температуры воздуха. Существующая в регионе система климатического мониторинга отражает температурный режим только побережья, континентальная же часть остается неосвещенной, несмотря на разнообразие микроклиматических условий и особенностей рельефа на территории города. Нестационарность глобального и регионального климата, необходимость изменения плотности и структуры наблюдательной сети приводит к формированию нового требования к СКМ, такого как трансформация СКМ в адаптивную систему мониторинга. На языке кибернетики адаптивность СКМ должна проявляться как в параметрической самонастройке (например, адаптивном измене-

нии дискретности измерений гидрометеорологических величин), так и в структурной адаптации (например, оптимизация состава и плотности мониторинговой сети).

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках проекта №18-05-01073 и РФФИ и г. Севастополь № 20-47-920006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Разработка* и некоторые результаты функционирования системы мониторинга основных климатообразующих факторов в средней атмосфере / Ю.А. Израэль, Ю.А. Анохин, Г.В. Груза [и др.] // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 7. С. 5–14.

2. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я.* Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012. 194 с.

3. *Wang X.L., Wen Q.H., Wu Y.* Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series // *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2007. Vol. 46. № 6. P. 916–931.

4. *Научно-прикладной справочник по климату СССР, серия 3 «Многолетние данные».* Л.: Гидрометеиздат, 1990. Вып. 10. 604 с.

5. *Справочник по климату Черного моря.* М.: Гидрометеиздат, 1974. 405 с.

6. *Бурман Э.А.* Местные ветры. Л.: Гидрометиздат, 1969. 341 с.

7. *Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации.* СПб., 2017. 106 с.

THE RATIONALE FOR THE CONSTRUCTION OF AN ADAPTIVE REGIONAL CLIMATE MONITORING SYSTEM

V.P. Evstigneev^{1,2}, V.A. Naumova¹, D.Yu. Voronin¹, M.P. Evstigneev¹

¹ Sevastopol State University,
RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

² Institute of Natural and Technical Systems,
RF, Sevastopol, Lenin St., 28

The article considers the structure of the existing system of climate monitoring in the Sevastopol region. The quality of information generated by the monitoring system on the example of air temperature characteristics is considered. A description of the current state of temperature conditions in the region as well as its trends is presented. It is concluded that the non-stationarity of the global and regional climate and the need to change the density and structure of observation network leads to the need to transform the system of climate monitoring to the adaptive system. Such a system should be capable of parametric self-adjustment and structural adaptation to changing conditions.

Keywords: climate monitoring, air temperature, adaptive system, Sevastopol region, climate change