

УДК 551.5:581.54 (477.75)

ОСОБЕННОСТИ МИКРОКЛИМАТА В ПРИМОРСКОЙ ПОЛОСЕ ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА

Светлана Павловна Корсакова¹, Павел Борисович Корсаков^{1,2}

¹Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН,
298648, Республика Крым, г. Ялта, пгт. Никита

E-mail: korsakova2002@mail.ru

²Крымское УГМС агрометеостанция Никитский сад,
298648, Республика Крым, г. Ялта, пгт. Никита

E-mail: nikita.meteo@gmail.com

В статье приводится сравнительная оценка особенностей микроклимата приморской полосы Никитского ботанического сада в районе кактусовой оранжереи по данным инструментальных метеорологических наблюдений пункта Монтедор и опорной агрометеостанции Никитский сад. В результате проведенных исследований установлена однородность и пространственно-временная связанность климатических параметров внутри исследованной территории. По результатам исследования выявлено, что в приморской полосе Никитского ботанического сада теплообеспеченность периода активной вегетации на 345°C выше, а число дней с экстремально высокими температурами в 3–4 раза больше, чем на высотах около 200 м над уровнем моря. В летний период в ночные часы характерны стоковые явления, обуславливающие падение температуры воздуха на 2–3°C ниже по сравнению с участками, расположенными на 155 м выше. Определены вертикальные градиенты температуры воздуха на Южном берегу Крыма в современных климатических условиях и выполнена их статистическая оценка. Показана возможность использования их для расчета температуры воздуха в районе Большой Ялты в диапазоне высот от 50 до 1200 м над уровнем моря.

Ключевые слова: температура воздуха; парк Монтедор; вертикальный градиент; теплообеспеченность; изменение климата

Введение

Микроклиматические условия играют большую роль в видовом составе, произрастании и развитии растительности, служат основой для практических рекомендаций в использовании территорий в рекреационных целях. Поэтому, изучение микроклиматических особенностей природных и преобразованных ландшафтов представляет теоретический интерес и имеет большое практическое значение.

Результаты многолетних исследований климата территории Южного берега Крыма (ЮБК) показали большие микроклиматические различия, обусловленные сложной топографией побережья (Пенюгалов, 1939; Шахнович, 1957; Судакевич, 1958; Важов, Антюфеев, 1984; Фурса и др., 2006; Антюфеев и др., 2014; Плугатарь и др., 2015; Корсакова, Корсаков, 2019). Форма рельефа, экспозиция склона и высота места, удаление от берега моря и условия защищенности действуют, как правило, совместно и являются ключевыми факторами, которые влияют на распределение климатических показателей по всему ЮБК (Шахнович, 1957).

Исследование особенностей микроклимата позволяет расширить представление о пространственно-временных вариациях метеопараметров и степени их локальной трансформации на пересеченной местности (Плугатарь и др., 2015; Корсакова, Корсаков, 2023). Выявленные количественные закономерности микроклиматической изменчивости дают возможность проводить пространственную интерполяцию в условиях выраженной неоднородности подстилающей поверхности, объективную

оценку состояния биоразнообразия природных и антропогенных экосистем (Фурса и др., 2006; Корсакова, Корсаков, 2019).

Наиболее значимые детальные микроклиматические исследования территории Никитского ботанического сада (НБС), были проведены в периоды 1946–1948 гг. (Судакевич, 1958) и 1981–1987 гг. (Антюфеев, 2003, 2010; Важов, Антюфеев, 1984, 1988). По итогам первого периода исследований была построена крупномасштабная карта морозоопасности территории НБС, которая показала, что за счет местных условий (в основном рельефа) средний из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха может варьировать в пределах 3–4°C (Судакевич, 1958; Шахнович, 1957). По результатам круглосуточной регистрации температуры и влажности воздуха в 1981–1985 гг. были установлены не отмечавшиеся ранее закономерности микроклиматогенеза. В частности, выявлено, что в густых слабо вентилируемых посадках летняя дневная температура воздуха может быть на 2–4°C выше, чем на открытом месте (Антюфеев 2003, 2010), построены детальные микроклиматические карты Приморского парка и парка Монтедор (Антюфеев и др., 2014).

Происходящие в последние десятилетия климатические изменения и появление современных автоматических метеостанций с надлежащей точностью измерений обусловили необходимость проведения дополнительных микроклиматических исследований для актуализации и уточнения характеристик микроклимата приморской полосы НБС. Расширение сети метеонаблюдений будет способствовать более объективной оценке общих закономерностей микроклиматической изменчивости территории ЮБК в текущих условиях потепления климата. Особый интерес представляют исследования, в которых количественно учтены комплекс термических показателей воздуха и почвы.

Цель наших исследований заключалась в выявлении особенностей микроклимата Никитского ботанического сада в районе кактусовой оранжереи и оценке пространственно-временной изменчивости метеопараметров на Южном берегу Крыма для возможности их эффективного применения в целях рационального природопользования.

Объекты и методы исследования

В исследовании были использованы данные синхронных непрерывных наблюдений за 2021–2024 гг. четырех действующих на ЮБК метеостанций ФГБУ «Крымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» и автоматической метеостанции (АМС) Никитского ботанического сада (табл. 1). Для выявления микроклиматических закономерностей считается достаточным проведение параллельных наблюдений в течение трех лет (Руководство..., 1979). Данные о среднесуточной температуре с метеорологических станций ФГБУ «Крымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» были получены с сайта «Погода в 243 странах мира» (<https://rp5.ru>).

Автоматическая метеостанция была установлена в 40 м ниже южной границы кактусовой оранжереи на открытом участке пологой террасы склона южной экспозиции (крутизна склона около 3°) в парке Монтедор Никитского ботанического сада. В состав метеостанции входил набор беспроводных датчиков фирмы Bioinstruments S.R.L. (Молдова): измерительный комплекс RTH-3z, объединяющий пиранометр (диапазон измерений 0–1250 Вт/м²), датчик температуры воздуха (разрешение 0,1°C, диапазон измерений от – 40 до 60°C) и влажности воздуха (разрешение 0,1%, диапазон измерений 3–100%), а также датчик влагосодержания (разрешение 0,1%, диапазон измерения 0–100%), температуры (разрешение 0,1°C,

диапазон измерений от -40 до 50°C) и электропроводности (разрешение $0,01$ дСм/м, диапазон измерений $0-15$ дСм/м) почвы SMTE. Установка измерительных приборов, производство измерений и обобщение материалов выполнены согласно требованиям, принятым в системе Гидрометеослужбы (Наставление..., 1985).

Таблица 1

Географическое положение метеорологических станций на Южном берегу Крыма

Table 1

Geographical location of meteorological stations at the Southern Coast of Crimea

Название метеостанции / Weather station name	Координаты / Coordinates		Высота над уровнем моря, м / Altitude above sea level, m
	Широта, °/ Latitude, °	Долгота, °/ Longitude, °	
Ай-Петри/Ai-Petri	44,469057	34,068324	1180
Ялта/Yalta	44,481208	34,155318	66
Монтедор/Montedor	44,506671	34,233156	53
Никитский сад/Nikitsky Sad	44,512727	34,240204	208
Алушта/Alushta	44,659099	34,403963	54

При сравнительной оценке микроклиматических особенностей участков НБС, расположенных в приморской и средней полосе Южного макросклона Крымских гор, опорной точкой наблюдений являлась реперная климатическая станция – агрометеостанция Никитский Сад. Её метеорологическая площадка расположена на одной из террас на склоне ЮЮВ экспозиции. Расстояние между пунктами наблюдений составляет 873 м, а перепад высот – 155 м (рис. 1).

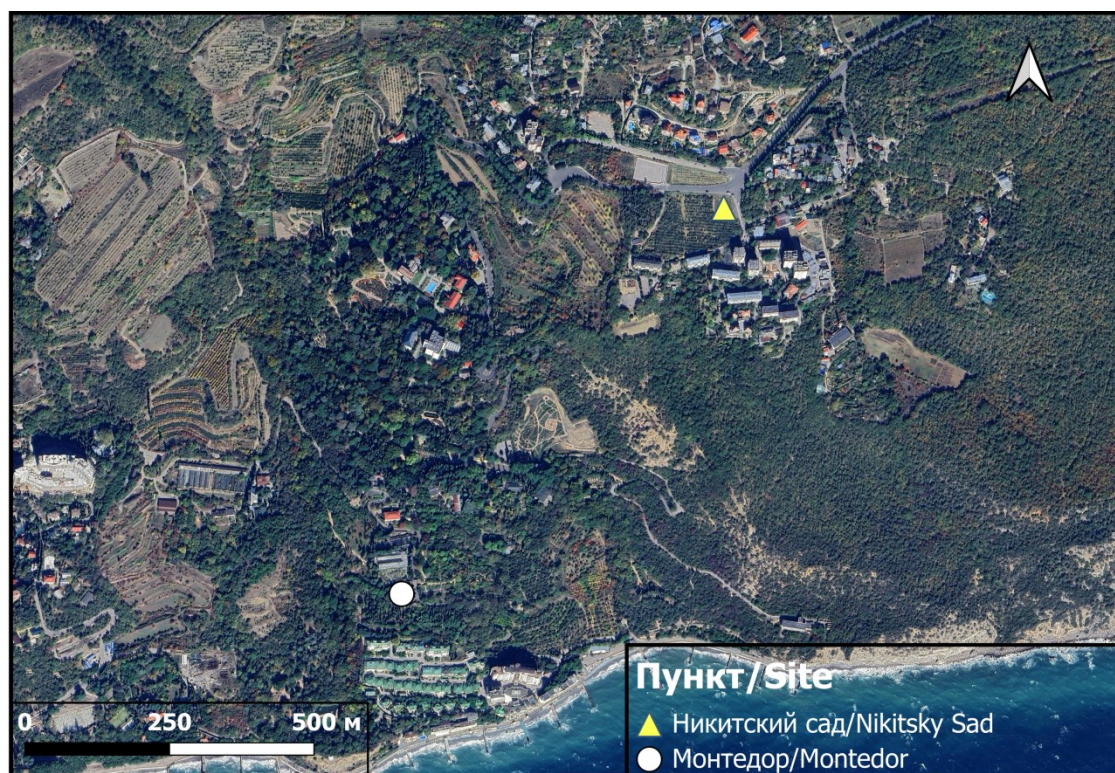


Рис. 1 Схематическая карта размещения пунктов микроклиматических наблюдений на территории Никитского ботанического сада

Fig. 1 Schematic map distribution of the microclimatic observation points on the territory of the Nikitsky Botanical Gardens

Для оценки различий величин средних двух независимых выборок метеорологических величин в пунктах наблюдений применены t-критерий Стьюдента и теста Уэлча. При сравнении вариационных рядов использованы среднесуточные значения метеорологических величин. Критическое значение уровня статистической значимости (p) принято равным 0,05.

Даты устойчивого перехода температуры воздуха через заданные пределы и суммы активных температур за периоды между этими датами определены по общепринятым в агрометеорологии методам (Грингоф, Клещенко, 2011).

Анализ и визуализация результатов моделирования проводились с использованием статистического программного обеспечения R версии 4.4.1 (R Core Team, 2024) и пакетов ggplot2 (Wickham, 2016) и ggstatsplot (Patil, 2021).

Результаты и обсуждение

Основным критерием климатической однородности района является достаточно высокая пространственная связанность колебаний полей метеорологических характеристик внутри территории, которую можно определить на основе пространственно-временной корреляционной функции (ПКФ). ПКФ метеорологических характеристик представляют собой зависимость коэффициентов парной корреляции от расстояния между пунктами наблюдений и используются при решении разноплановых задач, связанных с пространственно-временным анализом: оптимальной пространственной интерполяции метеорологических характеристик и их параметров, при выборе пунктов-аналогов для восстановления пропусков наблюдений или приведении непродолжительных рядов к многолетнему периоду, и других. Наряду с этим, представленные в однородном географическом пространстве многолетние средние величины климатических параметров образуют климатическое поле, которое отражает географию климата на анализируемой территории. Несмотря на постоянное существование этого поля, его параметры и границы ежегодно изменяются в зависимости от совокупного влияния климатических факторов и адвекции данного года (Лобанов, Шадурский, 2013).

Сравнение средних и экстремальных значений температуры воздуха, относительной влажности воздуха и температуры почвы в разные сезоны и годы подтвердило, что вариации гидротермических показателей в пределах анализируемой территории происходят вполне согласованно (рис. 2, 3).

В результате анализа данных микроклиматических наблюдений выявлена функциональная связь между изменениями температур воздуха (средних и экстремальных) и почвы. Значения коэффициента детерминации для рядов относительной влажности воздуха и дефицита насыщения водяного пара (дефицит насыщения) несколько ниже ($R^2 = 0,89$ и $R^2 = 0,95$), но превышают критически минимальное значение, равное 0,64. Дефицит насыщения является комплексной величиной, отражающей тепло- и влагосодержание воздуха, что позволяет его использовать шире, чем другие характеристики влажности, для оценки условий произрастания растений (Грингоф, Клещенко, 2011).

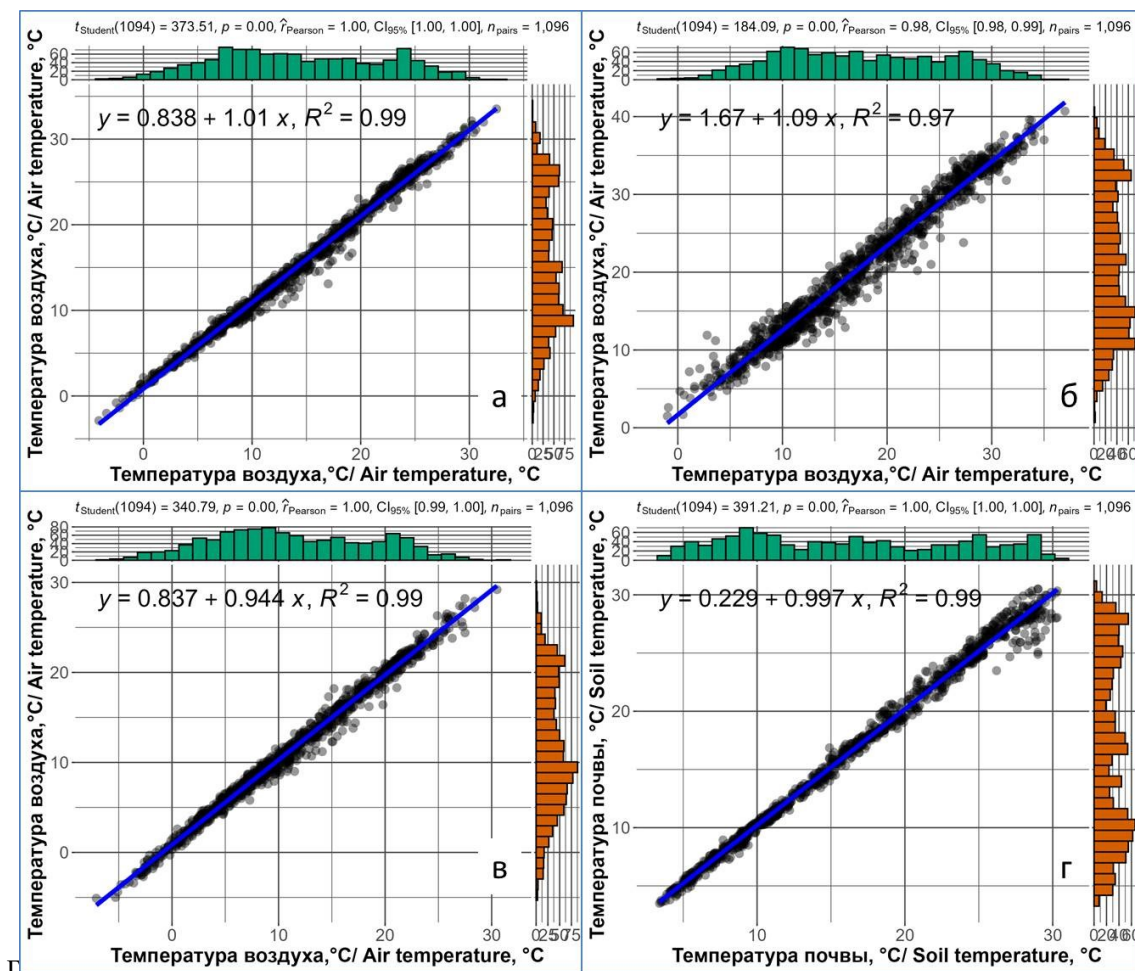


Рис. 2 Сопряженность метеорологических параметров: среднесуточной (а), максимальной (б), минимальной (в) температур воздуха и среднесуточной температурой почвы (г) между пунктами микроклиматических наблюдений Никитский сад (ось x) и Монтедор (ось y)

Fig. 2 The relationship of meteorological parameters: mean daily (a), maximum (b), minimum (c) air temperatures and mean daily soil temperature (d) between of the microclimatic observations sites Nikitsky Sad (x-axis) and Montedor (y-axis)

Построенные ПКФ отвечают условиям однородности и статистической значимости, поскольку коэффициенты детерминации температурно-влажностных характеристик высоки и превышают критическое минимальное значение при уровне статистической значимости $p \leq 0,001$.

Для согласования значений метеопараметров между пунктом наблюдений Монтедор и Никитский сад были построены уравнения линейной регрессии. Учитывая высокую пространственно-временную связанность метеопараметров и относительно небольшую площадь территории, существует потенциальная возможность выполнить приведение короткого ряда в пункте Монтедор к почти 100-летнему периоду инструментальных наблюдений на опорной станции Никитский сад, начиная с 1930 г. по настоящее время.

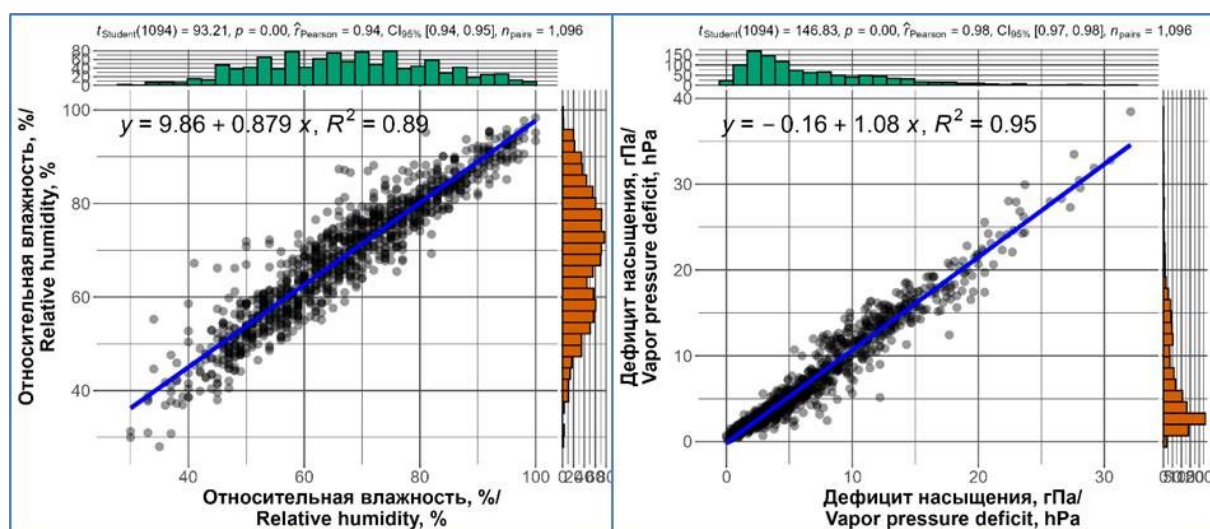


Рис. 3 Статистическая связь между среднесуточными значениями относительной влажности воздуха и дефицита насыщения водяного пара (дефицита насыщения) в пунктах микроклиматических наблюдений Никитский сад (ось x) и Монтедор (ось y)

Fig. 3 Statistical relationship between the mean daily values of relative humidity and vapor pressure deficit in the points of microclimatic observations Nikitsky Sad (x-axis) and Montedor (y-axis)

Сравнение средних и экстремальных значений метеовеличин за период трехлетних синхронных наблюдений показало, что, при разности высот между метеоплощадками 155 м, средние температуры воздуха в течение всего года в пункте Монтедор (табл. 2) на 0,6–1,2°C выше, чем на опорной метеостанции (табл. 3).

Таблица 2

Средние значения метеорологических величин в пунктах микроклиматических наблюдений на территории Никитского ботанического сада

Table 2

Mean values of meteorological variables at the at the points of microclimatic observations in the territory of the Nikitsky Botanical Gardens

Месяц/ Month	Пункт микроклиматических наблюдений / Microclimatic observation point															
	Монтедор/ Montedor								Никитский сад / Nikitsky Sad							
	t _{mean}	t _{mean.max}	t _{max}	t _{mean.min}	t _{min}	t _s	RH	VPD	t _{mean}	t _{mean.max}	t _{max}	t _{mean.min}	t _{min}	t _s	RH	VPD
I	5,9	10,0	19,1	3,2	−3,6	6,9	76	2,2	5,2	8,2	17,0	2,6	−4,8	6,9	73	2,4
II	6,7	11,2	18,1	3,9	−2,4	7,3	74	2,6	6,0	9,0	17,4	3,3	−3,3	7,0	71	2,8
III	7,7	12,9	23,6	4,5	−4,4	9,0	73	3,0	6,5	9,5	19,8	3,9	−5,1	8,9	71	3,0
IV	13,7	19,9	32,0	9,6	3,4	14,2	70	5,4	13,1	16,9	27,3	9,6	2,6	14,3	66	5,7
V	16,8	23,1	30,7	12,4	6,9	18,0	64	7,6	15,6	19,0	26,0	12,4	6,0	17,7	62	7,2
VI	22,2	28,5	37,4	17,7	12,3	23,0	68	9,6	21,2	24,7	32,4	18,0	11,5	22,3	67	9,1
VII	26,2	33,1	38,8	21,0	17,6	27,0	57	15,9	24,9	28,6	35,0	21,4	17,5	27,0	57	14,4
VIII	27,3	34,0	40,7	22,6	18,9	27,9	59	16,2	26,1	29,7	37,0	22,9	19,0	27,6	60	14,2
IX	21,1	27,6	35,7	16,9	10,2	23,7	58	11,4	19,9	23,5	30,7	16,7	10,4	23,6	58	10,2
X	15,5	21,5	31,5	11,8	5,8	18,1	66	6,4	14,7	18,3	26,3	11,6	5,0	17,9	65	6,2
XI	11,8	16,3	24,1	9,0	2,1	13,6	78	3,1	11,1	14,1	21,0	8,5	0,5	13,4	76	3,3
XII	8,5	12,0	19,7	6,2	−5,1	9,5	83	1,9	7,9	10,5	19,0	5,5	−7,1	9,3	80	2,2
Год/ Year	15,3	20,9	40,7	11,6	−5,1	16,6	69	7,2	14,4	17,7	37,0	11,4	−7,1	16,4	67	6,8

Примечание: t_{mean} – средняя температура воздуха, °C; t_{mean.max}, t_{max}, t_{mean.min}, t_{min}, t_s – соответственно, средняя максимальная, средняя минимальная и минимальная температура воздуха и почвы, °C. RH – относительная влажность воздуха, %; VPD – дефицит влажности воздуха, гПа.

Note: t_{mean} – mean air temperature, °C; t_{mean.max}, t_{max}, t_{mean.min}, t_{min}, t_s – respectively, the mean maximum, maximum, mean minimum and minimum air temperature and soil, °C; RH – relative humidity, %; VPD – vapor pressure deficit, hPa.

При этом их распределение по сезонам года не равномерно. Самые высокие градиенты температур устойчиво наблюдаются во второй половине летнего периода (июль–сентябрь), а самые низкие – в ноябре–феврале.

Анализ данных показал, что отклонения от опорной станции среднего из абсолютных и абсолютного максимумов температуры воздуха в отдельные месяцы достигают 4,5–5,2°C, что в три-четыре раза больше, чем отклонения средней температуры. При этом, если для среднего из абсолютных максимумов сохраняется общая закономерность, характерная для годового хода средней температуры, то вариации абсолютного экстремума температуры более значительны. За годы исследований абсолютный максимум температуры воздуха в августе на Монтедоре достигал 40,7°C, на агрометеостанции Никитский сад в это же время – 37°C.

Таблица 3

Отклонение средних многолетних значений метеорологических величин в пункте Монтедор по сравнению с опорной агрометеостанцией Никитский сад для приведения к многолетнему ряду

Table 3

Deviation of mean long-term values of meteorological variables at Montedor point compared with the Nikitsky Sad reference agrometeorological station for adjustment to the multiyear series

Месяц/Month	Δt_{mean}	$\Delta t_{\text{mean.max}}$	Δt_{max}	$\Delta t_{\text{mean.min}}$	Δt_{min}	Δt_s	ΔRH	ΔVPD
I	0,7	1,9	2,1	0,6	1,2	0,1	3	–0,2
II	0,8	2,2	0,7	0,6	0,9	0,2	3	–0,2
III	1,2	3,3	3,8	0,6	0,7	0,1	2	0,1
IV	0,7	3,0	4,7	0,0	0,8	0,0	4	–0,3
V	1,2	4,0	4,7	0,0	0,9	0,3	2	0,4
VI	0,9	3,8	5,0	–0,3	0,8	0,6	2	0,6
VII	1,3	4,5	3,8	–0,4	0,1	0,0	1	1,5
VIII	1,2	4,4	3,7	–0,2	–0,1	0,3	–1	2,0
IX	1,2	4,1	5,0	0,2	–0,2	0,0	0	1,2
X	0,8	3,2	5,2	0,1	0,8	0,2	1	0,2
XI	0,6	2,2	3,1	0,5	1,6	0,2	2	–0,1
XII	0,6	1,5	0,7	0,7	2,0	0,2	3	–0,3
Год/Year	0,9	3,2	3,7	0,2	2,0	0,2	2	0,4

Примечание: Δt_{mean} – отклонение средней температуры воздуха, °C; $\Delta t_{\text{mean.max}}$, Δt_{max} , $\Delta t_{\text{mean.min}}$, Δt_{min} – соответственно, отклонение средней максимальной, максимальной, средней минимальной и минимальной температуры воздуха, °C; Δt_s – отклонение средней температуры почвы, °C; ΔRH – отклонение относительной влажности воздуха, %; ΔVPD – отклонение дефицита влажности воздуха, гПа.

Note: Δt_{mean} – deviation of the mean air temperature, °C; $\Delta t_{\text{mean.max}}$, Δt_{max} , $\Delta t_{\text{mean.min}}$, Δt_{min} – respectively, deviation of the mean maximum, maximum, mean minimum and minimum air temperature, °C; Δt_s – deviation of the mean soil temperature, °C; ΔRH – deviation of the relative humidity, %; ΔVPD – deviation of the vapor pressure deficit, hPa.

Несмотря на разницу высот, средний из абсолютных минимумов температуры воздуха и средняя температура почвы выделяются наименьшими градиентами температур. В ходе проведения исследований выявлено, что в летние месяцы средний из абсолютных минимумов температуры воздуха в пункте Монтедор не выше, а на 0,2–0,4°C ниже, чем на опорной станции. Это указывает на преобладающее влияние рельефа и характера погоды. Отклонение от опорной станции значений относительной влажности в течение года не превышает 3–4%.

Как известно, на температурный режим, в зависимости от типа погоды и времени суток, значительное влияние оказывают формы рельефа (Судакевич, 1958; Шахнович, 1957; Антюфеев и др., 2014; Плугатарь и др., 2015; Корсакова, Корсаков, 2019). Поскольку в течение года вертикальные градиенты температуры не постоянны,

было проведено исследование суточного хода температуры воздуха в зимний и летний периоды. Как показали наши исследования, в это время величины вертикальных градиентов достигают самых низких и самых высоких значений. Анализ суточного хода температур при ясной (радиационный тип) и пасмурной погоде позволил выявить локальные особенности трансформации температуры воздуха в пункте Монтедор (рис. 4).

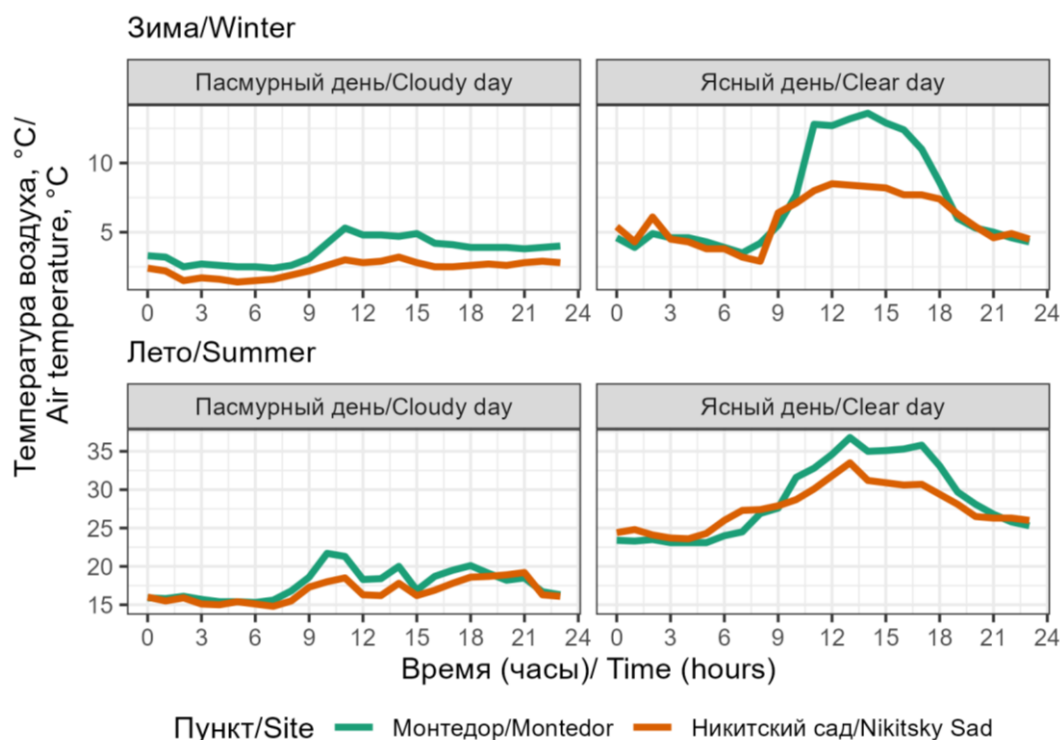


Рис. 4 Суточный ход температуры воздуха в пунктах Никитский сад и Монтедор при ясной (радиационный тип погоды) и пасмурной погоде в летний и зимний периоды
Fig. 4 The daily course of air temperature in the points of Nikitsky Sad and Montedor in clear (radiation type of weather) and cloudy weather in summer and winter

Открытый участок пологой террасы склона южной экспозиции, где расположен пункт микроклиматических исследований, относится к наиболее теплым и сухим местам парка Монтедор в течение всего года (Антюфеев и др., 2014). На таких участках в солнечные дни происходит перегрев и иссушение, как почвы, так и нижнего приземного слоя воздуха (Антюфеев и др., 2024). В послеполуденные часы и зимой и летом превышение температур, по сравнению с опорной метеостанцией, может достигать 4–5°C. Летом, под влиянием отрога Азорского антициклона, на ЮБК формируются длительные периоды жаркой и сухой погоды. В ясные тихие ночи при интенсивном радиационном выхолаживании в приморской полосе наблюдается температурная инверсия, обусловленная стеканием с горных вершин и застаиванием у моря охлажденного воздуха. В результате этого, температура воздуха в предрассветные часы может быть ниже на 2–3°C по отношению к значениям, измеренным в это же время на опорной станции, расположенной выше на 155 м (рис. 4). После восхода солнца происходит разрушение инверсии. В холодное время года решающее влияние на температуру в ясные дни также оказывает ночная инверсия температур. В пасмурную погоду при отсутствии инверсии наблюдается типичный суточный ход температур с доминированием фактора высоты.

Метеорологические условия начала вегетационного периода во многом определяют климатическую составляющую сезонной ритмики растений. Основными

характеристиками вегетационного периода являются даты устойчивого перехода температуры воздуха через градации 10 и 15°C, а также продолжительность периодов с такими температурами. Анализ дат перехода среднесуточных температур воздуха через указанные пределы показал, что в районе пункта Монтедор продолжительность периода активной вегетации растений на 10 суток больше, чем в районе агрометеостанции Никитский сад, а летнего сезона – на 18 суток. Термические ресурсы, представленные суммами активных температур воздуха выше 10°C больше, в сравнении с опорной станцией на 345°C, а выше 15°C – на 461°C (табл. 4).

Таблица 4

Сравнительная характеристика теплого периода в пунктах микроклиматических наблюдений на территории Никитского ботанического сада

Table 4

Comparative characteristics of the warm period in the points of microclimatic observations on the territory of the Nikitsky Botanical Gardens

Пороговое значение температуры воздуха, °C / Threshold value of air temperature, °C	Пункт микроклиматических наблюдений / Microclimatic observation point							
	Монтедор / Montedor				Никитский сад / Nikitsky Sad			
	Средняя дата перехода температур / Mean temperature transition date			Σta, °C	Средняя дата перехода температур / Mean temperature transition date			Σta, °C
	Весной / In spring	Осенью / In autumn	Продолжительность / Duration		Весной / In spring	Осенью / In autumn	Продолжительность / Duration	
> 10	29.III	1.XII	247	4739	2.IV	25.XI	237	4394
> 15	26.IV	18.X	175	3827	9.V	13.X	157	3366

Примечание: Σta – сумма активных температур воздуха за период.

Note: Σta – sum of active air temperatures for the period.

В летние месяцы на высоте 208 м над уровнем моря преобладают максимальные температуры воздуха, благоприятные для развития растений (интервал 21–30°C) и число таких дней в месяц составляет 19–31 (табл. 5). На высоте около 53 м над уровнем моря такие температуры преобладают только в мае, июне и в сентябре. В июле и в августе на этих высотах весь месяц господствуют температуры, угнетающие развитие растений и дискомфортные для человека ($\geq 30^\circ\text{C}$). На 155 м выше число дней с экстремально высокими температурами в 3–4 раза меньше: 8 дней – в июле и 12 дней – в августе.

Таблица 5

Сравнительная характеристика агроклиматических показателей летнего периода в пунктах микроклиматических наблюдений на территории Никитского ботанического сада

Table 5

Comparative characteristics of agroclimatic indicators of the summer period in the points of microclimatic observations on the territory of the Nikitsky Botanical Gardens

Месяц / Month	Пункт микроклиматических наблюдений / Microclimatic observation point						
	Монтедор / Montedor			Никитский сад / Nikitsky Sad			
	Число дней с / Number of days from			Число дней с / Number of days from			
	$21^\circ\text{C} \leq t_{\max} < 30^\circ\text{C}$	$t_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$	$\text{RH} \leq 30\%$	$21^\circ\text{C} \leq t_{\max} < 30^\circ\text{C}$	$t_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$	$\text{RH} \leq 30\%$	
V	30,7	0,3	2,7	31,0	0,0	1,3	
VI	18,0	12,0	1,7	28,0	2,0	1,3	
VII	2,3	28,7	3,7	23,3	7,7	1,0	

Продолжение таблицы 5

VIII	0,3	30,7	2,7	19,0	12,0	1,3
IX	22,7	7,3	2,0	29,7	0,3	0,3
За период / For the period	74,0	79,0	12,7	131,0	22,0	5,3

Примечание: t_{max} – максимальная за сутки температура воздуха, °C; RH – относительная влажность воздуха, %.

Note: t_{max} – the maximum daily air temperature, °C; RH – relative humidity, %.

Дни, когда хотя бы в один из сроков наблюдений относительная влажность понижается до 30% и менее, принято относить к сухим. В среднем, за период с мая по сентябрь, число дней с относительной влажностью воздуха $\leq 30\%$ в пункте Монтедор составляет 13, а на 155 м выше их уже в 2,5 раз меньше.

Скорость изменения приземной температуры воздуха с высотой является важнейшим параметром, который используется в моделях горного климата. В связи с этим, не утрачивает актуальности и в наши дни изучение характера распределения температуры воздуха с высотой в условиях сложного горного рельефа ЮБК. Опыт построения различных высотных зависимостей показал, что на интенсивность понижения температуры воздуха в горах оказывают влияние орография, близость моря или водоемов, особенности подстилающей поверхности и атмосферной циркуляции, сезон года, влажность воздуха и другие факторы (Шахнович, 1957; Судакевич, 1958; Фурса и др., 2006; Антюфеев и др., 2014). Так, согласно данным Ю.Е. Судакевича (Судакевич, 1958), при адвективных похолоданиях, исключающих возможность инверсий, вертикальный градиент на горном склоне ЮБК получился равным 0,9–1,0°C. При радиационной погоде на горном склоне Никитского ботанического сада на однообразных формах рельефа высота над уровнем моря не имеет существенного значения (Судакевич, 1958; Фурса и др., 2006).

Ранее нами были проведены исследования 70-летних рядов инструментальных метеорологических наблюдений четырех станций ЮБК, по результатам которых была выявлена пространственная однородность изменений температуры воздуха, свидетельствующая о наличии единых временных закономерностей формирования климата на территории региона (Корсакова, 2018).

Используя данные наблюдений пяти действующих метеостанций, расположенных на территории ЮБК за 2021–2024 гг., был произведен расчет вертикальных градиентов среднесуточной температуры воздуха в современных климатических условиях и выполнена их статистическая оценка. Изменение средней месячной и годовой температуры воздуха при поднятии на каждые 100 м в разных частях ЮБК приведено в таблице 6.

Анализ данных показал, что вертикальные градиенты температуры в течение года на ЮБК не постоянны и в отдельные месяцы на высотах от 50 до 1200 м над уровнем моря могут изменяться от 0,53 до 0,82 °C/100 м (табл. 6). Наименьшие значения вертикальных градиентов отмечаются в апреле, а наибольшие – в июле-сентябре. Такой ход градиентов температуры обусловлен влиянием моря на температурный режим прибрежных районов: весной температура воздуха на побережье понижена и, следовательно, разница ее с температурой воздуха в горах уменьшается. Во второй половине лета и осенью море «обогревает» прибрежные районы, и различие их температуры с температурой воздуха в горах возрастает. Аналогичная сезонная динамика вертикального градиента среднемесячной температуры воздуха приводится в работе Д.И. Фурса с соавторами (Фурса и др., 2006). Однако по сравнению нашими результатами, величины градиентов в марте-мае в среднем ниже на 0,1°C, а в ноябре-декабре – выше на 0,1-0,2°C. Очевидно, это связано со значительным ростом на ЮБК в

первые десятилетия XXI века температур в ранневесенний период при отсутствии их значимого роста в ноябре-декабре (Корсакова, Корсаков, 2023). Высоты ниже 50 м над уровнем моря не были включены в расчеты по причине, имеющей отношение к воздействию моря – начиная от берега, до высоты 40–50 м в районе Большой Ялты температура воздуха повышается (Шахнович, 1957; Фурса и др., 2006).

Таблица 6

Пространственно-временная изменчивость вертикальных градиентов (°C/100 м) среднемесячной температуры воздуха на высотах более 50 м над уровнем моря по данным наблюдений метеорологических станций на Южному берегу Крыма за 2021–2024 гг.

Table 6

Spatio-temporal variability of vertical gradients (°C/100 m) of the mean monthly air temperature at altitudes above 50 m sea level according to observations of meteorological stations on the Southern Coast of Crimea for 2021–2024

Месяц / Month	Вертикальный градиент (°C/100 м) средней месячной температуры воздуха (°C) при поднятии на 100 м по направлениям: / The vertical gradient (°C/100 m) of the mean monthly air temperature when rising by 100 m in the following directions:		
	Монтедор–Ай-Петри (амплитуда высот 1027 м) / Montedor–Ai-Petri (the heights amplitude is 1027 m)	Ялта–Ай-Петри (амплитуда высот 1014 м) / Yalta–Ai-Petri (the heights amplitude is 1014 m)	Алушта–Ай-Петри (амплитуда высот 1026 м) / Alushta–Ai-Petri (the heights amplitude is 1026 m)
I	0,67 ± 0,19	0,68 ± 0,17	0,66 ± 0,17
II	0,66 ± 0,22	0,67 ± 0,22	0,66 ± 0,20
III	0,68 ± 0,22	0,66 ± 0,21	0,65 ± 0,21
IV	0,58 ± 0,25	0,53 ± 0,25	0,55 ± 0,25
V	0,70 ± 0,18	0,64 ± 0,18	0,67 ± 0,19
VI	0,71 ± 0,15	0,66 ± 0,14	0,70 ± 0,14
VII	0,79 ± 0,12	0,73 ± 0,12	0,76 ± 0,11
VIII	0,79 ± 0,12	0,72 ± 0,11	0,76 ± 0,10
IX	0,82 ± 0,14	0,76 ± 0,13	0,79 ± 0,13
X	0,70 ± 0,24	0,68 ± 0,23	0,70 ± 0,23
XI	0,62 ± 0,19	0,62 ± 0,19	0,63 ± 0,18
XII	0,60 ± 0,18	0,61 ± 0,17	0,61 ± 0,17
Год / Year	0,69 ± 0,18	0,67 ± 0,18	0,68 ± 0,17

Используя полученные величины вертикальных градиентов можно рассчитать значения средней температуры воздуха на любых высотах от 50 до 1200 м над уровнем моря в районе Большой Ялты с различной временной дискретностью (суточной, месячной, сезонной, годовой). Искомые значения температуры воздуха на определенной высоте рассчитываются по уравнению регрессии:

$$t_i = t_{obs} - \gamma \times (H_i - H_{obs}), \quad (1)$$

где: t_i – температура воздуха на высоте H_i , °C; t_{obs} – температура воздуха на метеостанции, °C; H_{obs} – высота метеостанции, м; H_i – расчетная высота, м; γ – вертикальный градиент температуры воздуха в расчетный месяц по выбранному в таблице 5 направлению, °C / 100 м.

Для проверки на точность и эффективность расчетов вертикального распределения средней температуры воздуха на ЮБК при использовании полученных величин вертикальных градиентов были привлечены данные независимых наблюдений агрометеостанции Никитский сад. При помощи уравнения (1) был выполнен расчет значений средних суточных температур воздуха для агрометеостанции по следующим направлениям высотных профилей: Монтедор–Ай-Петри (модель М1), Ялта–Ай-Петри

(модель M2) и Алушта–Ай-Петри (модель M3). Входными данными моделей являлись среднесуточные значения температуры воздуха, измеренные на метеостанции Ай-Петри, высота ее метеоплощадки (1180 м над уровнем моря), высота метеоплощадки агрометеостанции Никитский сад (208 м над уровнем моря) и значения вертикальных градиентов среднемесячной температуры воздуха для каждого высотного профиля (табл. 6). Всего для проверки были использованы данные расчетов и наблюдений за три года (1096 сут), охватывающие все сезоны года и широкий диапазон температур (рис. 5).

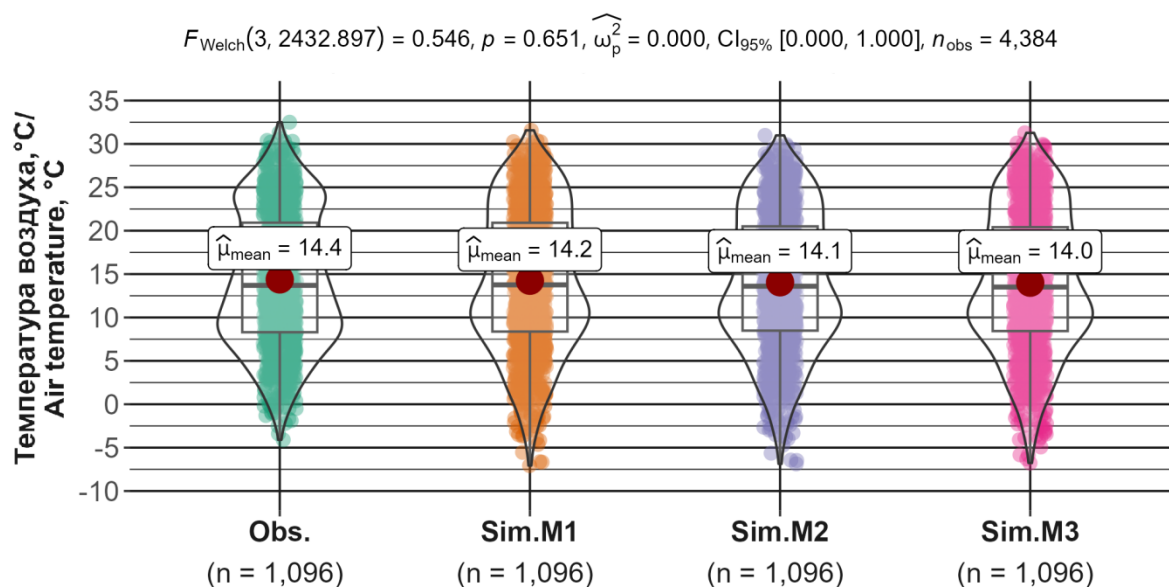


Рис. 5 Сравнение между группами значений среднесуточных температур воздуха, измеренных на агрометеостанции Никитский сад (Obs.) и смоделированных с помощью расчетных вертикальных градиентов по трем высотным профилям (Sim.M1, Sim.M2 и Sim.M3)

Fig. 5 Comparison between groups of mean daily air temperatures measured at the Nikitsky Sad agrometeorological station (Obs.) and modeled using calculated vertical gradients along three altitude profiles (Sim.M1, Sim.M2 and Sim.M3)

В верхней части графика представлены результаты теста на межгрупповые различия. Результаты демонстрируют отсутствие значимых различий между группами, поскольку значение F-статистики для теста Уэлча (0,546) значительно меньше граничного значения и нулевая гипотеза не отвергается. На это же указывает p-значение (0,651), которое значительно больше 0,05, а также 95%-ный доверительный интервал их разности и значение критерия омега квадрат равное нулю ($\omega^2 = 0,000$), что свидетельствует об отсутствии различий между средними значениями анализируемых групп.

По результатам расчетов среднесуточных температур воздуха была выполнена оценка степени линейного соответствия прогнозируемых и измеренных значений методом регрессионного анализа (табл. 7).

Анализ уравнений регрессии показал, что все модели достаточно точно описывают вариации температур в исследуемом пункте (Никитский сад). Наименьшее значение интерсепта получено при расчетах по модели M2 (Ялта–Ай-Петри). Наклон линейного тренда положительный, а тангенс угла наклона (коэффициент b) линии регрессии близок (модели M1 и M3) или равен единице (модель M2), что свидетельствует об отсутствии систематической ошибки прогнозируемых температур в сторону их завышения или занижения. Модели характеризуются высокой степенью детерминации реальных данных среднесуточных температур (объясняют 95% их вариации) и статистической достоверностью (p намного меньше 0,001). Сравнительная оценка качества моделей на основе коэффициентов AIC, BIC и RMSE показала, что в

целом различия между ними невелики (в пределах 1–2%), однако более высокая точность аппроксимации получена при расчетах с использованием вертикальных градиентов по профилю Монтедор–Ай-Петри (модель М1).

Таблица 7

Оценка степени линейного соответствия прогнозируемых и измеренных значений среднесуточной температуры воздуха на Южном берегу Крыма методом регрессионного анализа

Table 7

Estimation of the degree of linear correspondence between the predicted and measured values of the mean daily air temperature on the Southern Coast of Crimea by regression analysis

Параметр / Indicator	Модель М1: Монтедор–Ай-Петри / M1 Model: Montedor–Ai-Petri	Модель М2: Ялта–Ай-Петри / M2 Model: Yalta–Ai-Petri	Модель М3: Алушта–Ай-Петри / M3 Model: Alushta–Ai-Petri
a (Intercept)	–0,59 [–0,82, –0,36]	–0,34 [–0,57, –0,11]	–0,50 [–0,74, –0,27]
b	1,03 [1,02, 1,04]	1,00 [0,99, 1,01]	1,01 [0,99, 1,02]
Num.	1096	1096	1096
R ²	0,950	0,947	0,946
R ² Adj.	0,950	0,947	0,945
AIC	4426,3	4443,8	4483,4
BIC	4441,3	4458,8	4498,3
F	20890,933	19375,132	18996,852
RMSE	1,82	1,83	1,87
p	< 2,2e–16	< 2,2e–16	< 2,2e–16

Примечание: a – интерсепт модели; b – угловой коэффициент линейного тренда; Num. – число случаев, сут; R² – коэффициент детерминации; R² Adj. – скорректированный коэффициент детерминации; AIC – критерий Акаике; BIC – байесовский информационный критерий; F – F-статистика; RMSE – корень средней квадратичной ошибки и p – уровень значимости.

Note: a – the model intercept; b – the angular coefficient of the linear trend; Num. – the number of cases, day; R² – the coefficient of determination; R² Adj. – the adjusted coefficient of determination; AIC – the Akaike criterion; BIC – the Bayesian information criterion; F – F-statistics; RMSE – the root of the mean quadratic error and p is the level significance.

Высокие значения F-статистической величины линейной подгонки, отображающие соотношение между объяснимой и необъяснимой дисперсией, указывают на высокую значимость анализируемых моделей регрессии в целом. При этом лучше всего соответствует генеральной совокупности, из которой брались выборки, также модель М1 с максимальным значением F-статистики. По результатам комплексной оценки все протестированные модели показали высокий уровень адекватности к исходным данным среднесуточных температур воздуха по статистической выборке. Более высокая точность аппроксимации данных по внешней выборке выявлена при использовании вертикальных градиентов среднемесячной температуры воздуха по профилю Монтедор–Ай-Петри (модель М1). Очевидно, это может быть обусловлено тем, что высотный профиль Монтедор–Ай-Петри расположен ближе к агрометеостанции Никитский сад, чем профили Ялта–Ай-Петри и Алушта–Ай-Петри.

Заключение

Проведенное исследование позволило уточнить некоторые характеристики микроклимата приморской полосы НБС в условиях современного потепления климата. Функциональная связь между изменениями температуры воздуха и почвы, а также тесная корреляция рядов влажности воздуха являются признаком однородности и пространственно-временной связанности климатических параметров внутри исследованной территории Никитского ботанического сада.

По результатам исследования установлено, что на территории НБС в приморской полосе на высотах около 50 м над уровнем моря теплообеспеченность периода активной вегетации на 345°C выше, а число дней с экстремальными

температурами выше 30°C в 3–4 раза больше, чем на высотах около 200 м над уровнем моря. При интенсивном радиационном выхолаживании, летом в приморской полосе в ночной период характерны стоковые явления, вследствие которых температуры воздуха в предрассветные часы ниже на 2–3°C по сравнению с участками, расположенными на 155 м выше. Это необходимо учитывать при изучении сезонной ритмики хозяйственно-ценных видов растений и культиваров, растительных сообществ, произрастающих в природном заповеднике «Мыс Мартыан».

Пространственно-временная однородность изменений температуры региона, выявленная на основе анализа многолетних инструментальных наблюдений на метеостанциях ЮБК, позволяет использовать величины вертикальных градиентов для расчета температуры воздуха в районе Большой Ялты в диапазоне высот от 50 до 1200 м над уровнем моря. При интерполяции данных целесообразно использовать высотные зависимости температурных градиентов, рассчитанных для профиля, расположенного как можно ближе к анализируемой территории.

Повысить объективность расчетов температуры воздуха по всему диапазону высот позволяет учет воздействия на вертикальный градиент особенностей подстилающей поверхности, смены типов погоды и других факторов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы Госзадания ФГБУН «НБС-ННЦ» № FNNS-2022-0003.

Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the State Task № FNNS-2022-0003 of FSFIS “NBG-NSC”.

Литература / References

Антюфеев В.В. Микроклиматическая изменчивость термических ресурсов вегетационного периода на Южном берегу Крыма // Труды Никитского ботанического сада. 2003. Т. 121. С. 137–145.

[*Antyufeyev V.V.* Microclimatic variability of thermal resources of the growing season on the Southern Coast of Crimea // *Proceedings of the Nikitsky Botanical Gardens*. 2003. 121:137–145.]

Антюфеев В.В. Некоторые фитоклиматические эффекты под пологом древесных интродуцентов на юге Крыма // Материалы междунар. научн. конф. «Современные проблемы ландшафтной архитектуры и озеленения». Ялта, 2010. С. 10–11.

[*Antyufeyev V.V.* Some phytoclimatic effects under the canopy of tree introducers in the south of Crimea // *Materials of the International Scientific Conference. "Modern problems of landscape architecture and landscaping"*. Yalta, 2010. 10–11.]

Антюфеев В.В., Казимирова Р.Н., Евтушенко А.П. Агроклиматические, микроклиматические и почвенные условия в приморской полосе Южного берега Крыма. Теоретические основы и практические рекомендации для рационального размещения растений при реконструкции насаждений // Труды Государственного Никитского ботанического сада. 2014. Т. 137. С. 5–25.

[*Antyufeyev V.V., Kazimirova R.N., Yevtushenko A.P.* Agro-climatic, microclimatic and soil conditions in the coastal strip of the Southern Coast of Crimea. Theoretical foundations and practical recommendations for the rational placement of plants during the reconstruction of plantings // *Proceedings of the State Nikitsky Botanical Gardens*. 2014. 137:5–25.]

Важов В.И., Антюфеев В.В. Оценка микроклимата территории Никитского ботанического сада // Труды Государственного Никитского ботанического сада. 1984. Т. 93. С. 118–127.

[Vazhov V.I., Antyufeev V.V. Assessment of the microclimate of the territory of the Nikitsky Botanical Gardens // *Proceedings of the State Nikitsky Botanical Gardens*. 1984. 93:118–127.]

Важов В.И., Антюфеев В.В., Куликов Г.В., Максимов А.П. Термические особенности зимы 1984–1985 гг. на Южном берегу Крыма и древесные экзоты // Труды Никитского ботанического сада. 1988. Т. 105. С. 104–116.

[Vazhov V.I., Antyufeev V.V., Kulikov G.V., Maksimov A.P. Thermal features of the winter of 1984–1985 on the Southern Coast of Crimea and woody exotics // *Proceedings of the Nikitsky Botanical Gardens*. 1988. 105:104–116.]

Грингоф И.Г., Клещенко А.Д. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011. Т. 1: Потребность сельскохозяйственных культур в агрометеорологических условиях и опасные для сельскохозяйственного производства погодные условия 808 с.

[Gringof I.G., Kleshchenko A.D. Fundamentals of agricultural meteorology. Obninsk: Federal State Budgetary Institution "VNIIGMI-MCD", 2011. Vol. 1: The need for agricultural crops in agrometeorological conditions and dangerous weather conditions for agricultural production 808 p.]

Корсакова С.П. Оценка будущих изменений климата на Южном берегу Крыма // Экосистемы. 2018. Вып. 15 (45). С. 151–165.

[Korsakova S.P. Assessment of future climate changes on the Southern Coast of Crimea // *Ecosystems*. 2018. 15 (45):151–165.]

Корсакова С.П., Корсаков П.Б. Изменение климатических норм на Южном берегу Крыма за последние 90 лет // Биология растений и садоводство: теория, инновации. 2023. № 2 (167). С. 84–95. DOI: 10.25684/2712-7788-2023-2-167-84-95

[Korsakova S.P., Korsakov P.B. Changes in climatic norms on the Southern Coast of Crimea over the past 90 years // *Plant biology and horticulture: theory, innovations*. 2023. 2(167):84–95. DOI: 10.25684/2712-7788-2023-2-167-84-95].

Корсакова С.П., Корсаков П.Б. Сравнительная оценка микроклимата в природном заповеднике «Мыс Мартьян» по данным двух метеостанций // Научные записки природного заповедника «Мыс Мартьян». 2019. № 10. С. 34–43. DOI: 10.36305/2413-3019-2019-10-34-43

[Korsakova S.P., Korsakov P.B. Comparative assessment of the microclimate in the Cape Martian Nature Reserve according to data from two weather stations // *Scientific notes of the "Cape Martyan" Nature Reserve*. 2019. 10:34–43. DOI: 10.36305/2413-3019-2019-10-34-43].

Лобанов В.А., Шадурский А.Е. Определение зон климатического риска на территории России при современном изменении климата. Монография. СПб.: РГГМУ, 2013. 164 с.

[Lobanov V.A., Shadursky A.E. Determination of the climate risk zone in Russia under modern climate change. Monograph. St. Petersburg: RGGMU, 2013. 164 p.]

Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Часть I. Метеорологические наблюдения на станциях / Под ред. Г.И. Слабович. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 300 с.

[Guidelines to hydrometeorological stations and posts. Issue 3. Part I. Meteorological observations at stations / Edited by G.I. Slabovich. L.: Hydrometeoizdat, 1985. 300 p.]

Пенюгалов А.В. Некоторые особенности микроклимата Южного берега Крыма // Известия Крымского педагогического института им. М.В. Фрунзе. 1939. Т. 7. С.70–117.

[Penyugalov A.V. Some features of the microclimate of the Southern Coast of Crimea // *Izvestia of the Crimean Pedagogical Institute named after M.V. Frunze*. 1939. 7: 70–117]

Плугатарь Ю.В., Корсакова С.П., Ильницкий О.А. Экологический мониторинг Южного берега Крыма. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2015. 164 с.

[*Plugatar Yu.V., Korsakova S.P., Ilitsky, O.A. Ecological monitoring of the Southern Coast of the Crimea. Simferopol: PH «ARIAL», 2015. 164 p.*]

Погода в 243 странах мира [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rp5.ru>. (дата обращения: 15.10.2024).

[Weather in 243 countries of the world [Electronic resource]. Access mode: <https://rp5.ru> . (date of access: 10/15/2024).]

Руководство по изучению микроклимата для целей сельскохозяйственного производства / Под ред. З.Н. Пильниковой. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 152 с.

[Guidelines for studying the microclimate for agricultural production purposes / Edited by Z.N. Pilnikova. L.: Hydrometeoizdat, 1979. 152 p.]

Судакевич Ю.Е. Микроклиматическая характеристика морозоопасности территории Никитского ботанического сада / Труды Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института. 1958. Вып. 14. С. 99–110.

[*Sudakevich Yu.E. Microclimatic characteristics of frost hazard in the territory of the Nikitsky Botanical Gardens / Proceedings of the Ukrainian Scientific Research Hydrometeorological Institute. 1958. 14:99–110*]

Фурса Д.И., Корсакова С.П., Фурса В.П., Иванченко В.И. Агроклиматические ресурсы Южного берега Крыма в районе большой Ялты и их оценка применительно к винограду. Ялта, 2006. 60 с.

[*Fursa D.I., Korsakova S.P., Fursa V.P., Ivanchenko V.I. Agro-climatic resources of the Southern Coast of Crimea in the area of Bolshaya Yalta and their assessment in relation to grapes. Yalta, 2006. 60 p.*]

Шахнович А.В. Микроклиматические особенности Южного берега Крыма // Труды УкрНИГМИ. 1957. Вып. 8. С. 175–210.

[*Shakhnovich A.V. Microclimatic features of the Southern Coast of Crimea // Proceedings of UkrNIGMI. 1957. 8:175–210*]

Patil I. Visualizations with statistical details: The 'ggstatsplot' approach. Journal of Open Source Software. 2021. 6(61): 3167. DOI:10.21105/joss.03167

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. 2024. Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>

Wickham H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. 2016. Springer-Verlag New York. URL <https://ggplot2.tidyverse.org>

Статья поступила в редакцию: 17.10.2024

Korsakova S.P., Korsakov P.B. Microclimate features on seaside of the Southern Coast of Crimea // Plant Biology and Horticulture: theory, innovation. 2024. № 4 (173). P. 62-77

The article provides a comparative assessment of the microclimate features on seaside of the Nikitsky Botanical Gardens around of the cactus greenhouse according to instrumental meteorological observations of the Montedor point and the Nikitsky Sad reference agrometeorological station. As a result of the conducted research, the homogeneity and spatial-temporal connectivity of climatic parameters within the studied territory has been established. According to the results of the study, it was revealed that in the seaside of the Nikitsky Botanical Gardens, the sum of active temperatures in active vegetation period is 345°C higher, and the number of days with extremely high temperatures is 3-4 times more than at altitudes of about 200 m above sea level. During the summer period, stock phenomena are characteristic at night, causing the air temperature to drop 2-3°C lower compared to areas located 155 m above. Vertical gradients of air temperature on the Southern Coast of Crimea in modern climatic conditions have been determined and their statistical assessment has been performed. The possibility of using them to calculate the air temperature in the area of Big Yalta in the altitude range from 50 to 1200 m above sea level is shown.

Key words: air temperature; Montedor Park; vertical gradient; sum of active temperatures; climate change